

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

FERNANDO CAMPO RAMÍREZ

**Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de
tomografia ultrassônica**

São Carlos
2015

FERNANDO CAMPO RAMÍREZ

**Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de
tomografia ultrassônica**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC – USP como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Guilherme Haach.

VERSÃO CORRIGIDA

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

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.

C198d Campo Ramirez, Fernando
Detecção de danos em estruturas de concreto por
meio de tomografia ultrassônica / Fernando Campo
Ramirez; 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. Tomografia. 2. Ultrassom. 3. Concreto. 4.
Detecção de dano. 5. Ensaio não destrutivo. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FERNANDO CAMPO RAMIREZ.**

Título da dissertação: "Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica."

Data da defesa: 07/04/2015

Comissão Julgadora:

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

Prof. Dr. **Ricardo Carrazedo**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

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

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):
Profa. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**

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

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO
participação por
Video-conferência

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade e sabedoria dada necessária para a conclusão desta etapa; porque sempre esteve me guiando em todos os momentos.

À minha mãe, Lucelly pelo amor incondicional, por seu grande apoio, por sua dedicação e paciência e porque, mesmo estando distantes, me aconselhou e sempre esteve presente.

Aos meus irmãos, Alexander e Steven que também estando distantes me apoiaram sempre para continuar nesta etapa e lograr meus objetivos.

À minha namorada, Lorena por seu amor, apoio e companhia incondicional nessa etapa de minha vida. Sempre ao meu lado, me incentivando e me dando forças para seguir em frente.

Ao professor Dr. Vladimir Guilherme Haach pelo apoio, disposição e paciência durante a realização deste trabalho.

Aos demais professores do departamento de engenharia de estruturas e aos membros da banca de avaliação deste trabalho, Ricardo Carrazedo e Roberto Caldas de Andrade Pinto pela disposição em atender ao nosso convite e pelas contribuições apresentadas para finalizar meu trabalho.

Ao meu amigo Sergio, um verdadeiro companheiro em todos os momentos desde graduação. Agradeço também ao pessoal que conheci no Brasil, que são muitos, mas dou destaque aqui aos grandes amigos que fiz: Andrezão, Arthur, Matheus, Pablito, Carlos Orozco, Rafa Niño e Everton.

Por fim, a CAPES pela bolsa de estudos concedida e a todos meus amigos que não foram mencionados aqui, mas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

RAMIREZ, F. C. **Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

A tomografia ultrassônica é um método não destrutivo que possibilita o mapeamento de uma seção interna do objeto estudado a partir de múltiplas projeções de resultados de ensaios de ultrassom a fim de identificar algumas de suas propriedades físicas, descontinuidades e/ou defeitos. Este trabalho consiste em estudar o método da tomografia ultrassônica aplicada na detecção de não homogeneidades em elementos de concreto. Para tal fim, realizaram-se diversos ensaios experimentais em prismas de concreto variando-se parâmetros como a qualidade do concreto, presença de vazios e armaduras, o arranjo dos transdutores, a frequência e a polarização das ondas ultrassônicas. Além dos ensaios, foi desenvolvida uma aplicação computacional que permitisse gerar imagens tomográficas de várias seções do elemento estudado, em diferentes planos e profundidades simultaneamente, a partir das velocidades de propagação dos pulsos de ultrassom. Como resultado conseguiu-se determinar as condições mais confiáveis nos procedimentos de medição, avaliar o grau de homogeneidade de prismas com diferentes resistências e avaliar a sensibilidade dos ensaios de ultrassom na presença de não homogeneidades como vazios, fissuras e aço de reforço. Finalmente, como conclusão desta pesquisa confirma-se o grande potencial que possui a técnica de tomografia ultrassônica aplicada em estruturas de concreto na detecção de não homogeneidades.

Palavras chaves: Tomografia, ultrassom, concreto, detecção de dano, ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

RAMIREZ, F. C. **Detection of damage in concrete structures by ultrasonic tomography.** 2015. M. Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Ultrasonic tomography is a non-destructive method that enables the mapping of an internal section of the object studied from multiple projections of results of ultrasound tests to identify some of their physical properties, discontinuities and/or defects. This work is to study the method of ultrasonic tomography applied to the detection of inhomogeneities in concrete elements. To this end, there have been several experimental tests on concrete prisms varying parameters such as the concrete quality, the presence of voids and reinforcement, the arrangement of the transducers, the frequency and polarization of the ultrasonic waves. In addition to the tests, a computer application was developed that allows to generate tomographic images of various sections of the study element and depths in different planes simultaneously from the propagation speed of the ultrasonic pulses. It was possible to determine the most reliable conditions in the measuring procedures to assess the degree of homogeneity of prisms having different resistances and to evaluate the sensitivity of ultrasound tests in the presence of inhomogeneities such as voids, cracks and reinforcing steel. Finally, as a conclusion of this research confirms the great potential that has the ultrasonic tomography technique applied in concrete structures in the detection of inhomogeneities.

Keywords: Tomography, ultrasound, concrete, detection of damage, Non-destructive testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Método ultrassônico convencional (Adaptado: PERLIN; PINTO, 2013)	24
Figura 1.2 – Equipamento de ultrassom (Disponível em: < http://www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto/testes-ultrassonicos/pundit-lab.html).....	28
Figura 1.3 – Transdutores a) 54 kHz de onda longitudinal, b) 250 kHz de onda longitudinal e c) 250 kHz de onda de cisalhamento (Disponível em: http://www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto/testes-ultrassonicos/pundit-lab.html).....	29
Figura 2.1 – Onda de compressão ou onda P (MEHTA; MONTEIRO, 2008).....	38
Figura 2.2 – Onda cisalhante ou onda S (MEHTA; MONTEIRO, 2008).....	38
Figura 2.3 – Onda de superfície ou Rayleigh (MEHTA; MONTEIRO, 2008).....	39
Figura 2.4 – Transdutor de ultrassom típico (DA SILVA; VILLANI, 2006).	40
Figura 2.5 – Arranjo de transdutores. a) Transmissão direta; b) Transmissão semidireta; c) Transmissão indireta. (Adaptado: MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).	40
Figura 2.6 – Esquema de funcionamento do ultrassom (Adaptado: ASTM C597-09)	42
Figura 2.7 – Velocidade de onda ultrassônica vs resistência à compressão para diferentes proporções de cimento/agregado (Adaptado: MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004)	44
Figura 2.8 – Esquema de medição da profundidade de uma fissura superficial (Adaptado: MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).....	48
Figura 2.9 – a) Configuração dos ensaios à flexão, b) Fissura típica no meio do vão (AGGELIS et al., 2011)	52
Figura 2.10 – a) Configuração experimental. Sinal típica de onda, b) para concreto íntegro e c) para concreto fissurado (Adaptado: AGGELIS et al., 2011)	53

Figura 2.11 – Evolução da porosidade com a velocidade de ultrassom dos concretos com relação a/c a) $\geq 0,5$ e b) $< 0,5$ (Adaptado: BENOUIS E GRINI, 2011)	54
Figura 2.12 – a) Corpo de prova de argamassa, b) procedimento para degradação química (Adaptado: OULD-NAFFA et al., 2002)	55
Figura 2.13 – Diminuição relativa da velocidade de propagação em função do tempo de degradação (Adaptado: OULD-NAFFA et al., 2002).....	56
Figura 2.14 – Esboço de prismas de concreto com barra de aço, a) dimensões e b) ensaio de ultrassom (Adaptado: WATANABE et al., 2014)	57
Figura 2.15 – Esboço da viga de concreto, a) dimensões e b) ensaio de ultrassom (Adaptado: WATANABE et al., 2014)	58
Figura 2.16 – Sinais das ondas de ultrassom submetidas a corrosão em estado inativo (Adaptado: WATANABE et al., 2014).....	58
Figura 2.17 – Relação entre a velocidade de ultrassom e o período eletrolítico para uma das vigas testadas (Adaptado: WATANABE et al., 2014).....	59
Figura 2.18 – Modelo do bloco de concreto com dois ductos (Adaptado: MARTIN et al., 2011).....	62
Figura 2.19 – Modelos de vigas testadas: a) Viga A, b) Viga B (Adaptado: MULDOON et al., 2007)	62
Figura 2.20 – Imagens Tomográficas a) Seção 1, b) Seção 2, (Adaptado: MARTIN et al., 2001).....	63
Figura 2.21 – Imagens Tomográficas: a) Viga A: Seção totalmente grauteada, b) Viga B: Seção sem graute (Adaptado: MULDOON et al., 2007).	64
Figura 2.22 – Posicionamento dos transdutores (Adaptado: AGGELIS; SHIOTANI, 2007).	64
Figura 2.23 – Tomogramas a) antes e b) após da recuperação da fissura. As setas indicam a posição real de aberturas da fissura. (AGGELIS; SHIOTANI, 2007).	65
Figura 2.24 – Pilar 1 e bloco de impacto (FERRARO et al., 2013)	66
Figura 2.25 – Imagem tomográfica dos blocos de impacto (Adaptado: FERRARO et al., 2013).....	66
Figura 2.26 – Imagem tomográfica para o pilar 1 (FERRARO et al., 2013).....	67
Figura 2.27 – Imagem tomográfica para o pilar 2 (FERRARO et al., 2013).....	67

Figura 2.28 – Ciclo acelerado de congelamento e descongelamento (Adaptado: MOLERO et al., 2012).....	68
Figura 2.29 – Imagens de ultrassons para amostras de concreto, sem agentes incorporadores de ar: (a) e (b) atenuação antes e após a aplicação dos ciclos de congelamento e descongelamento, respectivamente; (c) e (d) velocidade antes e após a aplicação dos ciclos de congelamento e descongelamento, respectivamente (Adaptado: MOLERO et al., 2012).	69
Figura 2.30 – Imagens de ultrassons para amostras de concreto, com agentes incorporadores de ar: (a) e (b) atenuação antes e após a aplicação dos ciclos de congelamento e descongelamento, respectivamente; (c) e (d) velocidade antes e após a aplicação dos ciclos de congelamento e descongelamento, respectivamente (Adaptado: MOLERO et al., 2012).	70
Figura 2.31 – Exemplo de simulação de propagação de onda para o caso com um vazio quadrado no meio (AGGELIS et al., 2011)	72
Figura 2.32 – Modelos estudados e imagens tomográficas (Adaptado: AGGELIS et al., 2011)	73
Figura 2.33 – Modelo geométrico e localização de sensores (Adaptado: CHAI et al., 2011)	75
Figura 2.34 – Fotografia de simulação de onda, a) Modelo com vazio, b) Modelo com barra de aço (Adaptado: CHAI et al., 2011).	75
Figura 2.35 – Detalhes da amostra com defeito artificial, a) Arranjo dos sensores, b) Leituras de ultrassom (Adaptado: CHAI et al., 2011)	76
Figura 2.36 – Tomogramas por: a) velocidade de ultrassom, b) amplitude de onda (CHAI et al., 2011).....	76
Figura 2.37 – Posicionamento dos transdutores. a) Localização dos pontos de leitura. b) Leituras no plano analisado (PERLIN; PINTO, 2013)	77
Figura 2.38 – Modelos estudados e imagens tomográficas (PERLIN; PINTO, 2013)	78
Figura 2.39 – Leitura no modelo discretizado	80
Figura 2.40 – Resolução pelo método ART para o caso de duas equações. (Adaptado: KALK; SLANEY, 1988)	83
Figura 2.41 – Resolução pelo método ART quando o número de equações é maior do que o número de incógnitas. (Adaptado: KALK; SLANEY, 1988) ...	84

Figura 2.42 – Resolução pelo método SIRT para o caso de duas equações.	85
Figura 3.1 – Seção analisada a) Objeto de estudo, b) Malha de discretização da seção em TUSom	87
Figura 3.2 – Formato final de TUSom versão beta: a) Pontos e trajetórias de medição, b) Imagem tomográfica da seção estudada.	88
Figura 3.3 – Fluxograma de funcionamento de TUSom	89
Figura 3.4 – Dados geométricos inseridos em TUSom: a) versão beta, b) versão nova.....	90
Figura 3.5 – Pontos de leitura inseridos em TUSom: a) versão beta, b) versão nova.	91
Figura 3.6 – Representação de leitura em TUSom: a) versão beta, b) versão nova.	92
Figura 3.7 – Representação dos pontos de interseção entre o percurso do pulso e a grade da malha adotada a) versão beta, b) versão nova.	93
Figura 3.8 – Apresentação de imagens em TuSom, a) valores discretos, b) valores contínuos	94
Figura 3.9 – Formato de TUSom para inserir dados geométricos	95
Figura 3.10 – Exemplos de geometrias criadas em TUSom.....	95
Figura 3.11 – Formato de TUSom para inserir pontos de leitura	96
Figura 3.12 – Formato de TUSom para inserir trajetórias de medições e tempos de leituras	96
Figura 3.13 – Formato principal de TUSom	97
Figura 4.1 – Modelos dos corpos de prova: a) Prisma P1, b) Prisma P2.	100
Figura 4.2 – Prismas utilizados na etapa experimental 1, a) P1 e b) P2	100
Figura 4.3 – Esquema de medições: a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3.....	101
Figura 4.4 – a) e b) Esquema de medições do Caso 4, c) Leituras por seção do Caso 5.....	102
Figura 4.5 – Seções de visualização de tomogramas com transdutores de 54 kHz: a) Prisma P1, b) Prisma P2	103
Figura 4.6 – Seções de visualização de tomogramas com transdutores de 250 kHz: a) Prisma P1, b) Prisma P2	103
Figura 4.7 – Prismas do P3 a P11 utilizados na etapa experimental 2.....	104

Figura 4.8 – Prisma P12 a) Localização dos ensaios à compressão, b) Ensaio à compressão sobre uma das regiões do prisma.....	106
Figura 4.9 – Prisma P13, a) Localização dos blocos de isopor. b) Corpo de prova e malha	107
Figura 4.10 – Prisma P14, a) confecção do corpo de prova, b) modelo do prisma com armadura.....	108
Figura 4.11 – Ensaios realizados em cada uma das três etapas experimentais.....	109
Figura 5.1 – Tomogramas com 54 kHz pelo método SIRT para o caso 1: a) prisma P1, b) prisma P2	111
Figura 5.2 – Tomogramas com 54 kHz pelo método SIRT para o caso 2: a) prisma P1, b) prisma P2	112
Figura 5.3 – Diferença entre os trajetos dos percursos mais curtos para transdutores com diâmetros diferentes e alinhados com o defeito.	113
Figura 5.4 – Exemplo de medição com transdutores e defeito não alinhados.	114
Figura 5.5 – Tomogramas com 54 kHz pelo método SIRT para o caso 3: a) Prisma P1, b) Prisma P2	115
Figura 5.6 – Representação bidimensional das medições do caso 2 de centro a centro dos transdutores.....	116
Figura 5.7 – Representação bidimensional das medições do caso 2 através da menor distância entre transdutores.....	116
Figura 5.8 – Tomogramas com 54 kHz pelo método SIRT do caso 4 para o prisma P2.....	117
Figura 5.9 – Tomogramas com 54 kHz pelo método ART do caso 4 para o prisma P2	117
Figura 5.10 – Convergência dos processos iterativos para sistemas de equações sobre-determinados inconsistentes a) ART, b) SIRT (Adaptado: PERLIN, 2011)	119
Figura 5.11 – Tomogramas com 250 kHz do caso 1 para o prisma P2.....	119
Figura 5.12 – a) Porção do prisma analisada, b) Seções das imagens tomográficas	120
Figura 5.13 – Tomogramas com 250 kHz do caso 2 para o prisma P2.....	121
Figura 5.14 – Tomogramas com 250 kHz do caso 4 para o prisma P2.....	122
Figura 5.15 – Tomogramas com 250 kHz do caso 5 para o prisma P2.....	123

Figura 5.16 – Tomogramas com 250 kHz do caso 5 para o prisma P2 sem isopor	124
Figura 5.17 – Sinal típica da onda emitida por transdutores de cisalhamento.....	125
Figura 5.18 – Tomogramas com 250 kHz de ondas de cisalhamento do caso 4 para o prisma P2	126
Figura 5.19 – Tomogramas com 250 kHz de ondas de cisalhamento do caso 5 para o prisma P2	126
Figura 5.20 – Modelo discretizado, posição dos transdutores e leituras.	128
Figura 5.21 – Relação da inclinação das medições e a distância entre pontos de emissão e recepção.....	129
Figura 5.22 – Relação da velocidade de propagação com o grau de inclinação das leituras	130
Figura 5.23 – Comparação da variação da velocidade de propagação com o ângulo de leituras	131
Figura 5.24 – Diagrama de caixa típico	135
Figura 5.25 – Diagrama de caixas das velocidades de propagação de ondas de ultrassom das medições para os prismas P3 a P11	136
Figura 5.26 – Imagens tomográficas dos prismas a) P3, b) P4, c) P5, d) P6, e) P7 e f) P8	139
Figura 5.27 – Imagens tomográficas dos prismas a) P9, b) P10 e c) P11	140
Figura 5.28 – Diagrama de caixas das velocidades de propagação de ondas de ultrassom nos elementos discretizados da malha para os prismas P3 a P11	141
Figura 5.30 – Diagrama de caixas das velocidades de propagação de ondas de ultrassom nos elementos discretizados da malha para os prismas P1 e P2	145
Figura 5.31 – Fissuras geradas no prisma P12	148
Figura 5.32 – Tomogramas do prisma P12 completo após aplicação da carga (500 kN)	149
Figura 5.33 – Tomogramas transversais da metade menos danificada do prisma P12, a) seção afastada da região de aplicação da carga, b) seção na região de aplicação da carga (500 kN).	150
Figura 5.34 – Modelo do prisma P13 e seções de visualização dos tomogramas..	151
Figura 5.35 – Tomogramas do prisma P13.....	152

Figura 5.36 – Detalhes da localização da armadura do prisma P14 e seções de visualização dos tomogramas	153
Figura 5.37 – Tomogramas do prisma P14	154
Figura 5.38 – Medições em concreto armado, a) barra de reforço perpendiculares à direção de propagação, b) barra de reforço paralela à direção de propagação (Adaptado: MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004)	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Correção da velocidade de pulsos de ultrassom devido a mudanças de temperatura (BS 1881-Part 203, 1986).....	44
Tabela 2.2 – Classificação da qualidade do concreto baseada na velocidade de pulsos de ultrassom (WHITEHURST, 1966).	50
Tabela 4.1 – Traço do concreto utilizado nos primas P1 e P2	99
Tabela 4.2 – Traço dos concretos utilizados nos primas P3 ao P11	105
Tabela 4.3 – Traço do concreto utilizado nos primas P12 a P14	105
Tabela 5.1 – Velocidades de propagação das ondas ultrassônicas das medições para os prismas P3 a P11	133
Tabela 5.2 – Velocidades de propagação das ondas ultrassônicas das medições para os prismas P3 a P11 após o tratamento estatístico dos dados experimentais	136
Tabela 5.3 – Comparação dos coeficientes de variação das velocidades de propagação das medições para os prismas P3 a P11	137
Tabela 5.4 – Velocidades de propagação das ondas ultrassônicas nos elementos discretizados da malha para os prismas P3 a P11	138
Tabela 5.5 – Velocidades de propagação das ondas ultrassônicas nos elementos discretizados da malha para os prismas P3 a P11 após ao tratamento estatístico dos dados experimentais	141
Tabela 5.6 – Comparação dos coeficientes de variação das velocidades de propagação nos elementos discretizados da malha	142
Tabela 5.7 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas das medições nos prismas P1 e P2: a) antes do tratamento estatístico e b) após o tratamento estatístico	143
Tabela 5.8 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos elementos discretizados da malha nos prismas P1 e P2: a) antes do tratamento estatístico e b) após o tratamento estatístico	144

Tabela 5.9 – Comparação dos coeficientes de variação das velocidades de propagação nos elementos discretizados da malha para os prismas P1 e P2.....	145
Tabela 5.10 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no prisma P12	147
Tabela 5.11 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no prisma P12 para as duas etapas de carregamento	149
Tabela 5.12 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no prisma P13	151
Tabela 5.13 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no prisma P14	153

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1. Considerações Iniciais	23
1.2. Objetivos	26
1.3. Justificativa.....	26
1.4. Metodologia.....	27
1.5. Estrutura da apresentação	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1. Ensaaios Não Destrutivos	31
2.2. Ensaio de ultrassom no concreto	35
2.2.1. Princípio fundamental de ultrassom.....	36
2.2.2. Equipamento	41
2.2.3. Fatores que afetam a velocidade de pulsos de ultrassom.....	43
2.2.4. Aplicações da técnica de ultrassom.....	46
2.2.5. Exemplos de aplicações da técnica de ultrassom	51
2.3. Tomografia Ultrassônica	59
2.3.1. História da Tomografia	60
2.3.2. Tomografia ultrassônica aplicada em concreto.....	61
2.4. Fundamentação matemática da Tomografia Ultrassônica	79
2.4.1. Método dos Mínimos Quadrados.....	82
2.4.2. Técnica de Reconstrução Algébrica	82
2.4.3. Técnica de Reconstrução Iterativa Simultânea.....	85
2.5. Resumo.....	86
3. PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	87
3.1. Software TUSom: versão beta	87
3.2. Software TUSom: versão nova	90
3.2.1. Dados geométricos: dimensões e malha.....	90
3.2.2. Definição dos pontos de medição.....	91
3.2.3. Definição da trajetória dos pulsos.....	92
3.2.4. Cálculo dos caminhos dos pulsos.....	92
3.2.5. Processo de reconstrução de imagens.....	94

3.2.6.	Interface gráfica do programa TUSom	94
3.3.	Resumo	98
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	99
4.1.	Arranjo entre transdutores, frequência e tipo de ondas	99
4.2.	Avaliação da homogeneidade do concreto.....	104
4.3.	Detecção de não homogeneidades	105
4.3.1.	Detecção de fissuras ou falhas	106
4.3.2.	Detecção de grandes vazios	107
4.3.3.	Influência do aço de reforço	107
4.4.	Resumo	108
5.	RESULTADOS.....	111
5.1.	Arranjo entre transdutores, frequência e tipo de ondas	111
5.1.1.	Medições com transdutores de 54 kHz de ondas longitudinais.....	111
5.1.2.	Medições com transdutores de 250 kHz de ondas longitudinais.....	119
5.1.3.	Medições com transdutores de 250 kHz de ondas de cisalhamento ..	124
5.1.4.	Estudo da influência da variação do ângulo de leituras de ultrassom, diâmetro dos transdutores e distância entre eles.....	127
5.2.	Avaliação da homogeneidade do concreto.....	132
5.2.1.	Análise das velocidades de propagação das medições de ultrassom	133
5.2.2.	Análise das velocidades de propagação nos elementos discretizados da malha	138
5.2.3.	Avaliação das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas na presença de defeitos	143
5.3.	Detecção de não homogeneidades	147
5.3.1.	Detecção de fissuras ou falhas	147
5.3.2.	Detecção de grandes vazios	150
5.3.3.	Influência do aço de reforço	152
5.4.	Resumo	157
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	159
6.1.	Conclusões.....	159
6.2.	Recomendações.....	162
	REFERÊNCIAS	163

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo busca-se apresentar a importância dos ensaios de ultrassom e da técnica da tomografia ultrassônica na área da engenharia e da construção para a avaliação do estado e da qualidade das estruturas de concreto. Além disso, expor os objetivos, a justificativa e, por último, a metodologia utilizada para a realização da presente pesquisa.

1.1. Considerações Iniciais

O concreto é parte fundamental da indústria da construção e dos mais variados projetos de engenharia em todo o mundo e, sem dúvida, é considerado o material de maior consumo através da história, com exceção da água (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As estruturas de concreto compreendem estradas, aeroportos, barragens, pontes, edifícios, etc., os quais estão continuamente sujeitos a efeitos que degradam sua integridade estrutural. Conseqüentemente, existe uma preocupação crescente sobre o estado de deterioração e segurança das mesmas. Este fato conduz à necessidade de desenvolver alternativas que permitam, de forma eficaz e confiável, avaliar a qualidade das estruturas de concreto. Neste sentido, a aplicação de Ensaios Não Destrutivos (END) se constitui em uma estratégia interessante para monitorar e avaliar o estado das estruturas.

Os ENDs possibilitam o estudo de materiais e estruturas permitindo seu constante monitoramento e o acompanhamento das suas variações ao longo do tempo, tanto em sua etapa de fabricação quanto durante seu funcionamento, sem prejudicar sua aparência nem desempenho (CARINO, 2008). Eles estão sendo altamente utilizados na indústria moderna em todo mundo para a avaliação da qualidade e detecção de variações nas estruturas, pequenas falhas superficiais, presença de trincas e outras interrupções físicas, medida de espessura de materiais e determinação de algumas das propriedades de materiais industriais.

Dentre os ensaios não destrutivos disponíveis, o ensaio de 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. Através da sua utilização consegue-se realizar um controle total da estrutura, podendo-se levar em conta, inclusive, as variações das propriedades com o tempo (LORENZI et al., 2003).

O ensaio de ultrassom está baseado na propagação de ondas sonoras de alta frequência (acima de 20 kHz) pelo material analisado. Estas ondas, as quais geralmente podem ser longitudinais, transversais ou superficiais, têm parâmetros como a amplitude e a velocidade de onda que variam em função das heterogeneidades e defeitos do material, o que possibilita a detecção de discontinuidades e zonas com algum grau de degradação. Isto é, as zonas com não homogeneidades são detectadas pela existência de baixas ou altas velocidades ou pela atenuação das amplitudes de onda. Contudo, a representação obtida por meio da propagação ultrassônica convencional é deficiente, pois se trata de uma tentativa de expressar uma seção bidimensional em um gráfico unidimensional (PERLIN; PINTO, 2013). Na Figura 1.1 mostra-se um exemplo típico da detecção de não homogeneidades internas numa seção de concreto pelo método do ultrassom. Nessa figura, a região S representa um concreto de pior qualidade, o que proporciona um maior tempo de percurso para a onda transitar por este material.

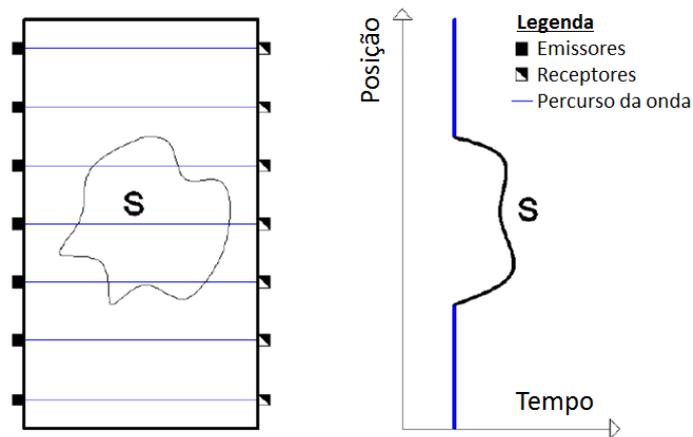


Figura 1.1 – Método ultrassônico convencional (Adaptado: PERLIN; PINTO, 2013)

Surge, portanto, um objetivo global relativo à inspeção ultrassônica: a visualização dos resultados da estrutura analisada. Em consequência, a técnica de tomografia computadorizada aparece como uma ferramenta poderosa que permite melhorar consideravelmente a representação dos resultados, e assim facilitar sua compreensão.

A tomografia computadorizada aplicada no concreto por meio de ultrassom é uma técnica não destrutiva que permite reconstruir imagens em escala de cores tanto de seções transversais, quanto tridimensionais, do objeto em estudo, partindo de medições dos tempos de propagação das ondas quando atravessam o mesmo. Com isso, é possível uma melhor identificação de defeitos, zonas danificadas, verificação da uniformidade e a determinação de propriedades físicas do material da peça analisada.

Um dos aspectos fundamentais e de grande interesse na técnica da tomografia está relacionado com os algoritmos de reconstrução de imagens. Neste sentido, na literatura encontram-se diversas técnicas desenvolvidas para a geração de imagens tomográficas como a 'Reconstrução Algébrica' (GORDON; BENDER; HERMAN, 1970), 'Reconstrução Algébrica Simultânea' (ANDERSEN; KAK, 1984) e a 'Reconstrução Iterativa Simultânea' (GILBERT, 1972) as quais têm sido aplicadas em várias pesquisas com resultados aceitáveis (KWON et al., 2005; CHAI et al., 2010; YANLI, 2010; CHAI et al., 2011). Estas técnicas estão baseadas em algoritmos que buscam resolver um sistema de equações através de processos iterativos; estes algoritmos diferem no modo como as projeções são tratadas matematicamente.

No presente projeto de pesquisa, será estudado o método da tomografia ultrassônica na detecção de danos em elementos de concreto; será avaliada a influência e a sensibilidade de parâmetros fundamentais dos ensaios convencionais de ultrassom como a frequência, a velocidade dos pulsos de ultrassom e a propagação de ondas longitudinais e transversais.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste projeto de pesquisa é estudar o método da tomografia ultrassônica aplicado na detecção de danos em elementos de concreto.

Para atingir o objetivo geral do presente estudo foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma nova versão do software TUSom que permita visualizar imagens de qualquer seção do sólido estudado simultaneamente a partir da combinação de medições de velocidades de ultrassom.
- Avaliar a influência de transdutores com frequências de 54 kHz de ondas longitudinais e de 250 kHz de ondas longitudinais e transversais nos ensaios de ultrassom em prismas de concreto.
- Determinar o arranjo entre transdutores e a combinação de medições que permita gerar imagens tomográficas mais confiáveis da estrutura interna de prismas de concreto.

1.3. Justificativa

Conforme apresentado anteriormente, as estruturas de concreto precisam de monitoramento e avaliações de seu estado continuamente mediante procedimentos que não deteriorem sua integridade. Apesar dos ensaios de ultrassom serem uma boa alternativa na verificação da uniformidade do concreto através de sua vida útil, determinação de sua qualidade e identificação de defeitos, a interpretação dos resultados a partir de valores numéricos de velocidades de propagação dos pulsos de ultrassom é uma tarefa complicada de realizar, pois a técnica não proporciona uma ferramenta de visualização que permita identificar com precisão a localização, a forma e o tamanho de defeitos internos. Neste sentido, a tomografia ultrassônica aplicada no concreto surge como uma técnica efetiva não destrutiva que possibilita o

mapeamento de toda a seção interna do objeto a partir de múltiplas projeções de ultrassom permitindo identificar algumas de suas propriedades e características internas com maior precisão. Porém, esta técnica envolve diversas variáveis das quais depende uma adequada medição e manipulação dos resultados para a posterior representação mais aproximada da realidade da estrutura mediante imagens tomográficas. Em consequência, vale ressaltar que atualmente não há procedimentos definidos que conduzam a condições ótimas para realizar esta técnica e, por isso, é importante avaliar parâmetros fundamentais que permitam conseguir melhores resultados nas medições ultrassônicas e nas representações gráficas das imagens tomográficas.

1.4. Metodologia

A metodologia deste projeto de pesquisa está dividida em quatro etapas principais: revisão bibliográfica, desenvolvimento de uma ferramenta computacional, estudos experimentais e análise e discussão dos resultados. Cada etapa é descrita resumidamente abaixo:

- *Revisão bibliográfica:* o objetivo de esta etapa é compreender a técnica da tomografia ultrassônica, o funcionamento dos métodos de geração de imagens tomográficas e identificar as variáveis principais que influenciam nas medições de ultrassom. Além disso, coletar estudos já realizados neste âmbito para enquadrar o presente trabalho dentro do contexto científico atual.

- *Desenvolvimento do software:* esta etapa consiste em desenvolver uma aplicação computacional de geração de imagens tomográficas a partir de medições de velocidades de ultrassom. É importante ressaltar que o software proposto consiste em uma modificação da versão beta do programa TUSom, desenvolvido no Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP, pelo orientador do presente projeto Vladimir Guilherme Haac.

TUSom é uma ferramenta que mapeia as velocidades dos pulsos ultrassônicos medidas num plano escolhido do elemento analisado e retorna como resultado uma imagem tomográfica da seção transversal. A versão modificada proposta permite gerar três imagens simultaneamente de três planos diferentes do sólido estudado, permitindo ao usuário variar a profundidade da seção visualizada em cada plano.

- *Estudos experimentais:* estes estudos são feitos simultaneamente com o desenvolvimento do software visando validar a eficácia do programa de geração de imagens além de alguns parâmetros que influenciam nas medições dos ensaios de ultrassom.

Os ensaios de ultrassom são realizados no laboratório do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC com um equipamento de ultrassom Pundit Lab+ (Figura 1.2) e transdutores de 54 e 250 kHz de emissão de ondas longitudinais e de 250 kHz de emissão de ondas transversais.



Figura 1.2 – Equipamento de ultrassom (Disponível em: <<http://www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto/testes-ultrassonicos/pundit-lab.html>>)

Uma primeira fase consiste em determinar o arranjo entre transdutores e a combinação de medições que permita gerar melhores imagens tomográficas da estrutura real interna de dois prismas de concreto com a mesma dosagem, um deles intacto e o outro com um bloco de isopor de geometria e localização conhecida.

Nesta etapa, as medições são realizadas com três tipos de transdutores diferentes a fim de avaliar a influência da frequência e do tipo de onda na geração de imagens tomográficas. Os transdutores utilizados são apresentados na Figura 1.3.



Figura 1.3 – Transdutores a) 54 kHz de onda longitudinal, b) 250 kHz de onda longitudinal e c) 250 kHz de onda de cisalhamento (Disponível em: <http://www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto/testes-ultrassonicos/pundit-lab.html>)

Posteriormente é avaliado o grau de homogeneidade de nove prismas de concreto com resistências à compressão entre 20 e 50 MPa realizando medições das velocidades de propagação de ondas de ultrassom a partir da frequência, tipo de ondas e arranjo de transdutores que gere melhores resultados na etapa anterior. A ideia nesta fase é avaliar a eficácia da técnica de tomografia ultrassônica no estudo da homogeneidade do concreto, além de observar a sensibilidade dos ensaios e das imagens tomográficas em concretos com diferentes resistências.

Finalmente procura-se identificar defeitos ou não homogeneidades no concreto a partir dos parâmetros avaliados nas fases anteriores. Para estes ensaios são moldados três prismas de concreto com a mesma dosagem e cada um deles com um tipo de não homogeneidade diferente; num primeiro prisma são inseridos blocos de isopor de diferentes geometrias e localizados aleatoriamente, o segundo prisma é submetido a carregamento com o fim de gerar algum tipo de dano (fissuração) e o terceiro prisma é moldado com concreto armado.

- *Análise e discussão dos resultados:* Esta etapa consiste em validar o software e os parâmetros avaliados em cada fase dos estudos experimentais, isto é, a partir dos dados experimentais dos diversos ensaios de ultrassom serão geradas imagens

tomográficas através do programa computacional TUSom. Assim se espera determinar as condições que permitam obter uma representação gráfica mais confiável da estrutura real dos elementos analisados. Com base nas análises neste item, são elaboradas as conclusões possíveis e pertinentes ao assunto em questão.

1.5. Estrutura da apresentação

A dissertação encontra-se estruturada em seis partes: introdução, revisão bibliográfica, programa computacional, programa experimental, resultados e considerações finais.

O capítulo 2 procura primeiramente abordar o âmbito dos ensaios não destrutivos e posteriormente fazer uma descrição mais ampla do funcionamento dos ensaios de ultrassom. Também é apresentada uma revisão de aplicações da tomografia ultrassônica focados na detecção de não homogeneidades e, finalmente, é feita uma descrição de alguns métodos de reconstrução tomográfica de imagens.

O capítulo 3 descreve de maneira geral o funcionamento da versão beta do programa TUSom e posteriormente apresenta em detalhes as etapas do processo de reconstrução de imagens implementadas na nova versão de TUSom.

O capítulo 4 apresenta em detalhe o programa experimental seguido para o desenvolvimento desta pesquisa.

O capítulo 5 contém os resultados dos ensaios experimentais e da reconstrução das imagens tomográficas geradas através de TUSom.

Finalmente, no capítulo 6 são realizadas as conclusões acerca do que foi estudado no decorrer da pesquisa. Além de apresentar propostas futuras de trabalhos que podem ser desenvolvidos com relação ao tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão dos ensaios não destrutivos. Posteriormente é apresentada uma descrição mais ampla dos ensaios de ultrassom aplicados no concreto abordando seus princípios básicos de funcionamento, bem como vários fatores que influenciam as medições e alguns estudos recentes de aplicações desta técnica em elementos de concreto. Além disso, é feita uma revisão bibliográfica das aplicações do uso da técnica de tomografia ultrassônica para a detecção de não homogeneidades. Finalmente é apresentada a descrição e a formulação matemática de três métodos utilizados na reconstrução de imagens tomográficas no programa TUSom.

2.1. Ensaios Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos (END ou NDT em inglês non-destructive testing) são definidos como aqueles praticados sobre qualquer material ou peça sem alterar de forma permanente suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais (CARTZ, 1995). Desta forma permitem seu constante monitoramento e acompanhamento das suas variações ao longo do tempo, tanto em sua etapa de fabricação quanto durante seu funcionamento.

Os ENDs representam um conjunto amplo de técnicas de análises utilizadas comumente na ciência e na indústria para avaliar as propriedades de um material ou estrutura, sem causar danos. Na engenharia civil, por exemplo, segundo o Instituto Americano de Concreto (ACI 228.2R, 1998) estes testes são usados mais comumente para determinar propriedades do concreto endurecido e para avaliar suas condições em fundações, pontes, edifícios, pavimentos, barragens e outras construções de concreto.

Estas técnicas são ferramentas altamente valiosas, as quais uma vez que permitem o controle das propriedades dos materiais, com economia de tempo e dinheiro, permitem que o material testado continue intacto no local de trabalho após

a inspeção. Segundo o ACI 228.2R (1998), estes métodos de ensaio não destrutivos são cada vez mais aplicados na avaliação de estruturas de concreto e relaciona este aumento do seu uso com diversos fatores, tais como:

- a) o desenvolvimento tecnológico em hardwares e programas de computadores para coleta dos dados e análises;
- b) vantagens econômicas na avaliação de grandes volumes de concreto comparados à retirada de amostras;
- c) capacidade de realizar avaliações rápidas e abrangentes de estruturas já existentes;

Tradicionalmente, a avaliação da qualidade das construções de concreto tem sido realizada em grande parte por inspeção visual do processo de construção e por amostragem do concreto para a realização de testes padrões em amostras frescas e endurecidas. Esta abordagem não fornece dados sobre as propriedades do concreto no seu local de origem. Em contraste, com os ENDS podem-se determinar informações sobre as propriedades do concreto endurecido no seu local de execução, como as constantes elásticas, densidade, resistência, teor de umidade e características de penetrabilidade (ACI 228.2R, 1998).

Em outros casos, quando é necessária a avaliação do estado do concreto para fins estruturais são realizadas geralmente perfurações para examinar as condições internas e obter amostras para testes, ou são realizados ensaios de carga, os quais podem comprometer a integridade da estrutura e podem demandar muito tempo e dinheiro. Por outro lado, com os ENDS é possível avaliar a integridade de uma estrutura, sem colocá-la em risco, detectando descontinuidades, falhas, fraturas ou defeitos superficiais ou internos que afetam a utilização e a vida útil.

O ACI 228.2R (1998) considera que os ENDS fornecem informações importantes para o desempenho estrutural do concreto e são aplicados por quatro razões principais:

- a) controle de qualidade em novas construções;
- b) solução de problemas em novas construções;

- c) avaliar a condição de estruturas de concreto mais antigas para reabilitação;
- d) confirmação de reparos em estruturas de concreto.

Uma característica importante dos ENDS é que eles raramente medem diretamente a propriedade de interesse. Eles geralmente não oferecem uma grande quantidade de informações em comparação com ensaios destrutivos. No entanto, os diferentes métodos de ensaios não destrutivos são baseados na aplicação de fenômenos físicos como a propagação de ondas ultrassônicas, emissão de ondas eletromagnéticas e acústicas, radiografias, entre outros os quais se podem relacionar com as propriedades do concreto permitindo a determinação da sua condição e caracterização.

Os métodos a seguir são alguns dos ensaios não destrutivos aplicados ao concreto encontrados na literatura:

- *Inspeção visual*: com este método se pode observar, classificar e documentar o aparecimento de danos em superfícies expostas da estrutura. Após estabelecer a possível causa de danos à estrutura analisada, é possível identificar quais dos diversos métodos não destrutivos poderiam ser mais úteis para qualquer investigação mais aprofundada do problema (IAEA, 2002).
- *Esclerometria*: por meio da aplicação de um impacto sobre a superfície da estrutura através de um aparelho conhecido como 'Esclerômetro' é possível medir a dureza do concreto e estimar a resistência à compressão do concreto por meio de correlações.
- *Resistência à penetração*: realizado por meio de uma pistola Windsor, este ensaio é utilizado para medir a dureza da superfície e, por conseguinte, a resistência da superfície e das camadas do concreto perto da superfície (IAEA, 2002).
- *Ensaio de permeabilidade*: este método mede a facilidade com que líquidos ou gases viajam através do concreto sob condições de testes prescritas. É

usado para comparar misturas de concreto e tem o potencial de ser usado para avaliar o processo de cura (ACI 228.2R, 1998).

- *Ensaio Pull-out*: mede a força necessária para extrair um elemento metálico com geometria específica incorporado no concreto. Utilizando uma relação previamente estabelecida, a carga final de arranque medida é usada para estimar a resistência à compressão no local do concreto (CARINO, 2004).
- *Ensaio de maturidade*: é uma técnica para estimar o ganho de resistência do concreto com base no histórico de temperatura medida durante o processo de cura.
- *Ensaio de ultrassom*: o ensaio está baseado na medição do tempo de viagem de ondas de ultrassom através do material. Conhecendo o tempo e a distância percorrida pelas ondas é calculada a velocidade que pode ser correlacionada com algumas das propriedades do concreto. A técnica é também utilizada para determinar a uniformidade do material ou identificar defeitos internos.
- *Eco-impacto*: esta técnica está baseada na análise da frequência dos ecos das ondas que se propagam no interior do concreto para localizar descontinuidades internas.
- *Frequência de ressonância*: nestes ensaios são excitados corpos de prova a fim de medir suas frequências naturais e, por meio de correlações matemáticas, estimar o módulo de elasticidade dinâmico e a densidade do material.
- *Métodos magnéticos e elétricos*: estes métodos são utilizados em estruturas de concreto com diversas finalidades: localizar a armadura e medir a espessura do elemento estrutural por indutância, medir o teor de humidade do concreto através das suas propriedades eléctricas, medir o potencial de

corrosão da armadura e determinar a espessura de um pavimento pela medida da resistividade elétrica (LAUER, 2004).

- *Métodos nucleares e radioativos*: os métodos baseiam-se em dirigir a radiação gerada por fontes de radioisótopos, geradores de raios - X e reatores nucleares contra amostras de concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A radiação coletada após a interação com o concreto fornece informações sobre as características físicas do material, tais como sua composição, densidade e integridade estrutural (MITCHELL, 2004).
- *Radar*: esta técnica se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas pelo concreto e é usada para localizar aço de reforço, vazios, regiões de alto teor de umidade e determinar a espessura de pavimentos.
- *Termografia infravermelha*: é utilizada para detectar danos, vazios e outras anomalias no concreto baseado na medição da condutividade térmica. A presença de defeitos é indicada por diferenças na temperatura da superfície da peça testada.

Neste trabalho, o método utilizado é a ultrassonografia e a reconstrução tomográfica. Com estes ensaios será possível avaliar a homogeneidade do material por meio da velocidade das ondas ultrassônicas no concreto. Posteriormente será possível detectar vazios, danos e não homogeneidades dos elementos.

2.2. Ensaio de ultrassom no concreto

O ensaio de ultrassom está baseado no uso de ondas acústicas de alta frequência, não perceptíveis para o ouvido humano, que se transmitem através do material testado sem causar-lhe nenhum dano. Além disso, o elemento pode ser testado inúmeras vezes no mesmo local, o que é útil para a monitorização das mudanças estruturais internas do concreto durante um longo período de tempo (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).

Com esta técnica é possível determinar a uniformidade do concreto, isto é detectar discontinuidades, fissuras e outros defeitos superficiais e internos. Além disso, podem-se determinar espessuras de peças, identificar camadas de diferentes características, calcular o módulo de elasticidade dinâmico do concreto e estimar sua resistência.

A técnica se baseia na medição do tempo de percurso de uma onda ultrassônica que atravessa o material analisado num determinado comprimento e o resultado final é expresso geralmente em termos de velocidade de propagação dos ultrassons. Esta onda mecânica que viaja através do material é influenciada pelas características e propriedades internas do concreto que determinam sua rigidez elástica e resistência mecânica. Quando uma região de baixa compactação, vazios ou material danificado está presente no concreto testado, ocorre uma variação da velocidade dos pulsos e da amplitude das ondas o que permite que sejam detectadas as imperfeições (IAEA, 2002).

2.2.1. Princípio fundamental de ultrassom

O ensaio de ultrassom inicia quando ondas de tensão são geradas e transmitidas para um transdutor eletroacústico, o qual é mantido em contato com a superfície de concreto testado. Quando os pulsos gerados são transmitidos e viajam através do concreto, eles são recebidos e convertidos em energia elétrica por um segundo transdutor eletroacústico. Vale mencionar que para a transmissão dos pulsos no concreto é necessário um material acoplante localizado entre as faces dos transdutores e a superfície ensaiada, a fim de permitir um contato contínuo entre as superfícies. Posterior à recepção dos pulsos, um circuito eletrônico permite medir o tempo de trânsito (T) e, sabendo a distância entre os pontos de emissão e recepção, é possível então determinar a velocidade média no trecho de propagação que irá depender das propriedades elásticas e da massa do meio (IAEA, 2002). A velocidade dos pulsos (V) está dada pela seguinte equação:

$$V = \frac{L}{T} \quad \text{Equação 2.1}$$

Quando o pulso é gerado através do concreto, sofre várias reflexões nos limites das diferentes faces no interior da peça e um sistema complexo de ondas de tensão se desenvolve. Este sistema contém três tipos de ondas: ondas de compressão (longitudinais ou ondas P), ondas de cisalhamento (transversais ou ondas S) e ondas de superfície (ondas Rayleigh). Cada tipo de onda se propaga com sua velocidade característica. Para um dado sólido, as ondas de compressão têm as maiores velocidades e as ondas de superfície têm as menores. No concreto, as velocidades das ondas de cisalhamento e de superfície são geralmente 60% e 55%, respectivamente, da velocidade de onda de compressão (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).

Ondas de compressão

São também conhecidas como ondas longitudinais ou ondas P. Durante sua propagação no material são produzidas regiões de compressão e de dilatação (Figura 2.1). Estas ondas são caracterizadas pelo movimento das partículas do material na mesma direção de propagação da onda, fazendo com que as ondas apresentem as maiores velocidades de propagação em um determinado meio. Para um material elástico linear, homogêneo e isotrópico, a velocidade das ondas de compressão (V_p) é relacionada com seu módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), e densidade (ρ) (KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER, 1990) como é apresentada na Equação 2.2.

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{Equação 2.2}$$

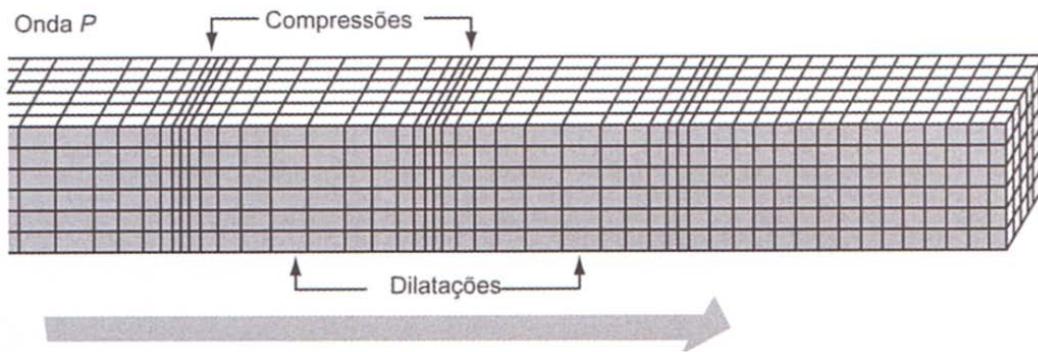


Figura 2.1 – Onda de compressão ou onda P (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ondas de cisalhamento

São conhecidas também como ondas transversais ou ondas S. Estas ondas se caracterizam pela vibração perpendicular que as partículas fazem em relação à direção de propagação (Figura 2.2). A velocidade da onda S (V_s) é mais lenta que a onda P e é dada pela Equação 2.3, que relaciona a densidade (ρ) com o módulo de elasticidade ao cisalhamento (G) (KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER, 1990).

$$V_s = \frac{G}{\rho} \quad \text{Equação 2.3}$$

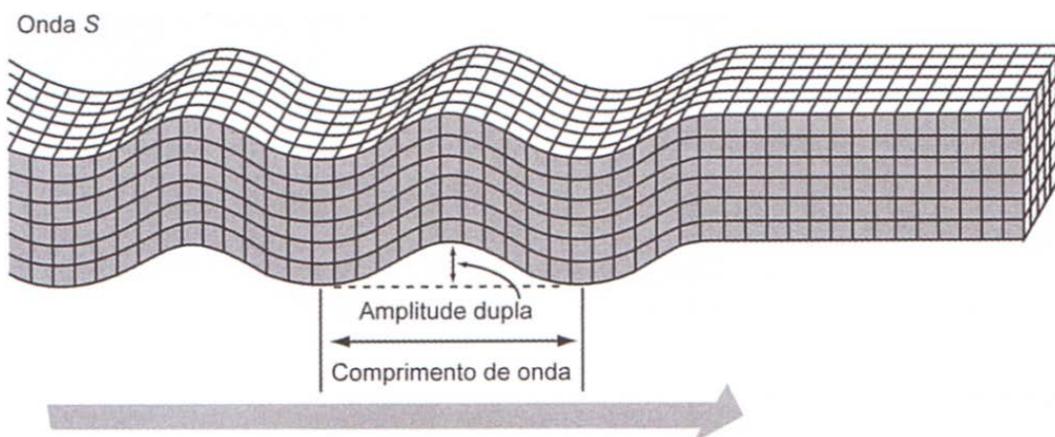


Figura 2.2 – Onda cisalhante ou onda S (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ondas de superfície

São também conhecidas como ondas Rayleigh. Suas partículas desenvolvem um movimento elíptico muito próximo à superfície com plano paralelo à direção de propagação (Figura 2.3). Podem ser utilizadas para detectar imperfeições próximas à superfície de concreto. A relação entre a velocidade das ondas de superfície (V_r) e das ondas de cisalhamento (V_s) poderia ser aproximada pela Equação 2.4 (KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER, 1990).

$$\frac{V_r}{V_s} = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad \text{Equação 2.4}$$

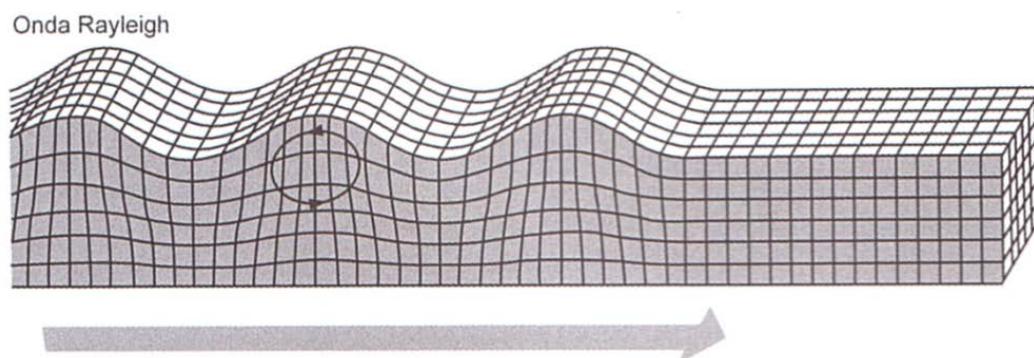


Figura 2.3 – Onda de superfície ou Rayleigh (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As ondas ultrassônicas podem ser geradas de diversas maneiras, como através de materiais piezoelétricos, magnetostrictivos ou outro material sensível à tensão (ASTM C597-09), sendo mais comum a utilização do efeito piezoelétrico.

O efeito piezoelétrico é uma característica apresentada por alguns materiais que, quando deformados mecanicamente, produzem cargas elétricas e, quando submetidos a uma diferença de potencial, se deformam mecanicamente (efeito piezoelétrico inverso). Quando uma diferença de potencial é aplicada ao elemento piezoelétrico ele altera suas dimensões, gerando vibrações mecânicas (DA SILVA; VILLANI, 2006).

No ensaio por ultrassom as ondas sonoras são introduzidas no material testado através de um dispositivo denominado transdutor ou cabeçote emissor com uma determinada dimensão e frequência. O transdutor incorpora um material (cristal) piezoelétrico que converte sinais elétricos em vibrações mecânicas (transdutor emissor) e vibrações mecânicas em sinais elétricos (transdutor receptor).

Os materiais piezoelétricos mais utilizados são o quartzo, o sulfato de lítio, o titanato de bário, o metaniobato de chumbo e o zirconato-titanato de chumbo (ANDREUCCI, 2011). Estes cristais são montados sobre uma base de suporte (bloco amortecedor) e junto com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor ou cabeçote propriamente dito como é apresentado na Figura 2.4.

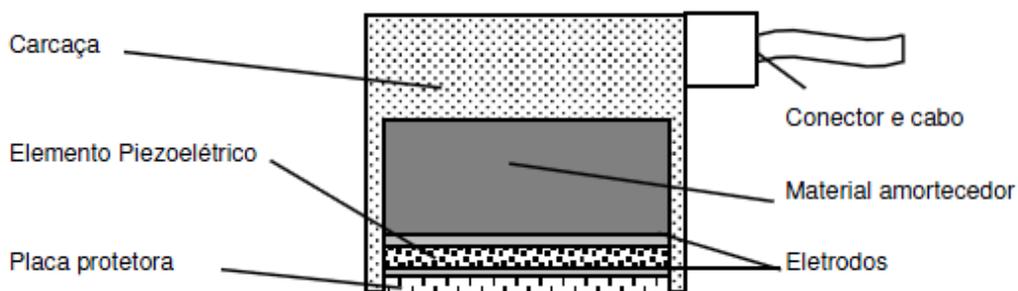


Figura 2.4 – Transdutor de ultrassom típico (DA SILVA; VILLANI, 2006).

A maioria das normas descrevem três possíveis arranjos dos transdutores para que sejam feitas as medições: transmissão direta, transmissão semidireta e transmissão indireta (Figura 2.5).

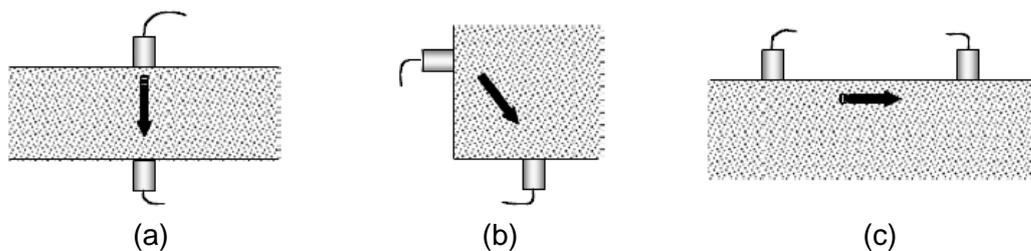


Figura 2.5 – Arranjo de transdutores. a) Transmissão direta; b) Transmissão semidireta; c) Transmissão indireta. (Adaptado: MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).

Transmissão direta

É o arranjo mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas através de um material, pois desta forma as ondas são recebidas com maior intensidade (ABNT NBR 8802: 1994).

Transmissão semidireta

Este arranjo também pode ser utilizado de forma muito satisfatória. No entanto, os transdutores não devem estar muito distantes um do outro, caso contrário, o pulso transmitido se pode atenuar e um sinal de pulso pode não ser detectado (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004). Este arranjo deve ser utilizado quando não houver a possibilidade de acesso a duas faces opostas de um corpo de prova ou elemento de concreto.

Transmissão indireta

Este arranjo é utilizado quando se tem acesso a apenas uma face do corpo de prova. Este método é mais propenso a erros e é menos satisfatório porque a amplitude do sinal recebido é significativamente menor do que o obtido pelo método de transmissão direta.

2.2.2. Equipamento

O aparelho de ultrassom consiste em um gerador de pulsos, um par de transdutores (transmissor e receptor), um amplificador, um circuito medidor de tempo, uma unidade de exibição de tempo, e cabos de conexão. A Figura 2.6 apresenta um esquema de funcionamento do ultrassom.

O equipamento basicamente produz pulsos elétricos por meio de um gerador de pulsos e eles são transformados em ondas mecânicas através de um transdutor

emissor. Este transdutor possibilita a transformação dos pulsos elétricos em ondas numa faixa de 25 kHz a 10 MHz, dependendo da aplicação; por exemplo, um transdutor de frequências altas (acima de 100 kHz) é geralmente utilizado em corpos de prova de pequenas dimensões, para caminhos relativamente curtos ou para concretos de alta resistência à compressão. Transdutores de baixa frequência (abaixo de 25 kHz) são utilizados para elementos de grandes dimensões, caminhos longos e concretos com agregados de grandes diâmetros (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).

Posteriormente um transdutor receptor recebe os pulsos mecânicos e os transforma em pulsos elétricos os quais são amplificados e um dispositivo de temporização electrónico permite medir o intervalo de tempo de viagem que a onda leva para atravessar o elemento de concreto. O equipamento deve ser ligado a um osciloscópio ou outro dispositivo de visualização para registrar a natureza do pulso recebido.

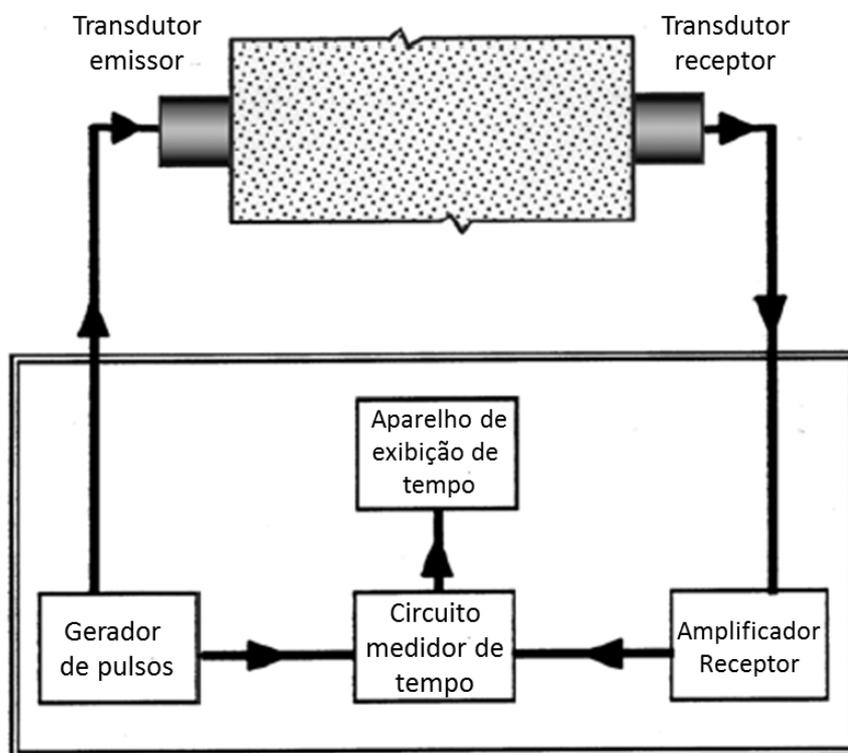


Figura 2.6 – Esquema de funcionamento do ultrassom (Adaptado: ASTM C597-09)

2.2.3. Fatores que afetam a velocidade de pulsos de ultrassom

Embora seja relativamente fácil de realizar um teste de velocidade de ultrassom, os pulsos ultrassônicos podem ser afetados por alguns fatores que dificultam a interpretação dos resultados. A seguir serão descritos alguns destes fatores.

Condições de superfície e acoplamento do transdutor com a superfície

A regularidade da superfície e o acoplamento perfeito dos transdutores com a superfície são fatores de extrema importância na qualidade dos resultados obtidos com esta técnica.

Em caso de superfícies que não estejam suficientemente lisas, devem ser tratadas através de processos mecânicos ou com aplicação de resinas, gesso, etc., a fim de regularizá-las. Além disso, o uso de acoplante é fundamental para retirar o ar da interface transdutor-concreto, melhorando a transmissão de energia. Como material acoplante podem ser utilizadas graxas siliconadas ou de origem mineral, ou vaselina (ABNT NBR 8802: 1994).

Tipo, conteúdo e tamanho de agregado

A velocidade do pulso ultrassônico é afetada significativamente pela dimensão e tipo do agregado graúdo (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004). Diferentes estudos mostram que quanto maior seja a presença de agregado graúdo dentro do concreto, maior será a velocidade do pulso no mesmo; este fato ocorre devido a que geralmente, pelas propriedades físicas, a velocidade de propagação dos pulsos nas rochas é superior à velocidade na pasta de cimento.

Na Figura 2.7 apresenta um gráfico de velocidade do pulso ultrassônico versus resistência à compressão, onde é possível notar que para uma determinada resistência, a velocidade aumenta com o aumento da relação agregado/cimento.

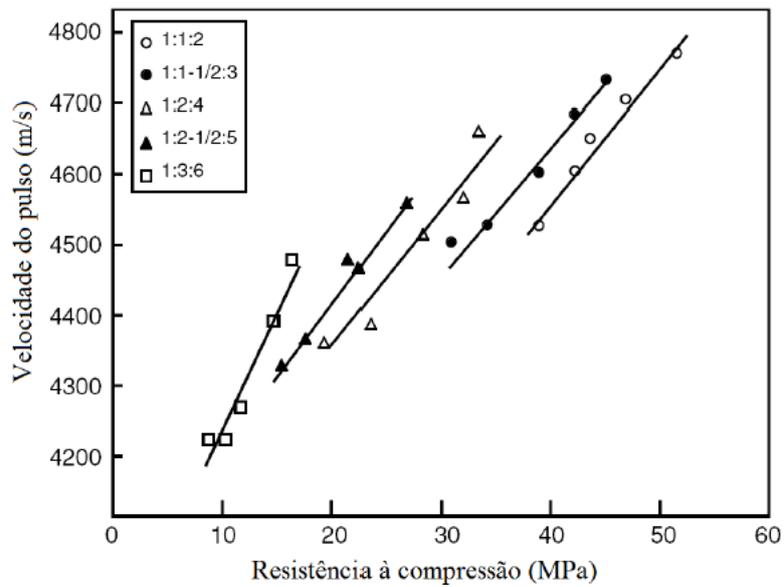


Figura 2.7 – Velocidade de onda ultrassônica vs resistência à compressão para diferentes proporções de cimento/agregado (Adaptado: MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004)

Temperatura do concreto

Segundo a norma britânica BS 1881-Part 203 (1986), temperaturas entre 10°C e 30°C não tem influência significativa na velocidade de propagação das ondas e devem-se realizar correções nas velocidades dos pulsos ultrassônicos quando estiverem fora deste intervalo. Na Tabela 2.1 são apresentadas as correções recomendadas pela norma britânica.

Tabela 2.1 – Correção da velocidade de pulsos de ultrassom devido a mudanças de temperatura (BS 1881-Part 203, 1986).

Temperatura do Concreto (°C)	Correção (%)	
	Concreto Seco	Concreto Saturado
60	+5,0	+4,0
40	+2,0	+1,7
20	0,0	0,0
0,0	-0,5	-1,0
< -4,0	-1,5	-7,5

Relação água/cimento

Estudos realizados por Kaplan (1959), apud Malhotra, Naik e Popovics (2004), demonstraram que com o aumento da relação água-cimento, diminui além da resistência final do concreto, sua velocidade de ultrassom.

Idade do concreto

Uma relação entre a velocidade de ultrassom e a idade do concreto foi apresentada por Jones (1962). Ele mostrou que a velocidade dos pulsos aumenta muito rápido nas primeiras idades do concreto, mas logo a taxa de crescimento diminui. Esta tendência é semelhante à curva de resistência versus a idade para um tipo particular de concreto, mas a velocidade de pulsos atinge um valor limite mais cedo do que a resistência.

Umidade

A velocidade de pulso para concreto saturado é maior do que para o concreto seco. A umidade geralmente tem menor influência sobre a velocidade em concreto de alta resistência do que em menor resistência devido à diferença na porosidade (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).

Presença de armadura

Um dos fatores mais importantes que influenciam a velocidade dos pulsos no concreto é a presença de reforço. A velocidade de ultrassom em aço é de 1,4 a 1,7 vezes a velocidade do pulso em concreto simples (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004). Portanto, as leituras de velocidade de pulso nas proximidades de reforço de aço são normalmente mais elevadas do que em concreto simples.

Sempre que seja possível, as leituras nas regiões próximas às barras de aço deverão ser evitadas de tal forma que o caminho de onda do emissor ao receptor não trafegue pela armadura. Caso isso não seja possível, a RILEM (ND1-1972) e a norma Britânica BS1881: Part 203 (1986) propõem a utilização de fatores de correção, que são função da geometria estudada.

Comprimento do percurso

Teoricamente o comprimento do caminho percorrido pela onda e a frequência da onda não devem afetar o tempo de propagação, portanto, eles não devem influenciar a velocidade dos pulsos. No entanto, na prática, em percursos curtos, onde os transdutores ficam muito próximos entre si, podem ocorrer influências devido à heterogeneidade do concreto.

A norma BS1881: Part 203 (1986) recomenda percursos mínimos de 100 mm para concreto com agregado graúdo de dimensão máxima de 20 mm, e 150 mm para concreto com agregado graúdo de dimensão máxima de 40 mm.

2.2.4. Aplicações da técnica de ultrassom

O método de propagação de ondas ultrassônicas tem sido aplicado com êxito no laboratório, bem como no campo. Ele pode ser usado tanto no controle de qualidade, como para a análise de deterioração do concreto.

O ultrassom desempenha uma ótima função na detecção de problemas internos do concreto, pois o pulso ultrassônico percorre o interior do elemento estrutural ensaiado e seus resultados refletem a natureza física do percurso utilizado. A seguir são apresentadas algumas das aplicações mais usuais desta técnica.

Cálculo do módulo de elasticidade dinâmico

A velocidade de uma onda de compressão que viaja através de um material elástico é definida unicamente pelas constantes elásticas e densidade do material. Portanto, é possível calcular o módulo de elasticidade de um material pelo método de ultrassom se o coeficiente de Poisson e a densidade são conhecidos ou assumidos (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004). Reescrevendo a Equação 2.2 do item 2.2.1, a relação entre essas constantes elásticas e a velocidade de ultrassom que viaja em um meio elástico isotrópico é dado pela seguinte equação:

$$E_d = \frac{\rho V^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{Equação 2.5}$$

Inúmeros pesquisadores reportaram boas estimativas do módulo de elasticidade dinâmico em concreto, no entanto, Malhotra, Naik e Popovics (2004) não recomendam o método para este propósito por duas razões: a) o erro na estimativa do coeficiente de Poisson não é insignificante; b) a Equação 2.5 é mais apropriada para materiais homogêneos, o que deixaria a validade do método em dúvida no caso do concreto.

Geralmente, o módulo de elasticidade dinâmico no concreto obtido pelo método do ultrassom é maior do que aquele obtido por medições de vibrações, mesmo quando o coeficiente de Poisson é conhecido (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).

Medição de profundidade de fissuras superficiais

Os pulsos de ultrassom transmitem uma quantidade muito pequena de energia através do ar. Portanto, se um impulso viaja através do concreto bem sobre uma fissura ou vazio, cuja área projetada perpendicularmente ao comprimento do percurso é maior do que a área do transdutor transmissor, o pulso irá contornar o

defeito. Consequentemente, o tempo de viagem do pulso será maior do que através de concreto semelhante sem nenhum defeito.

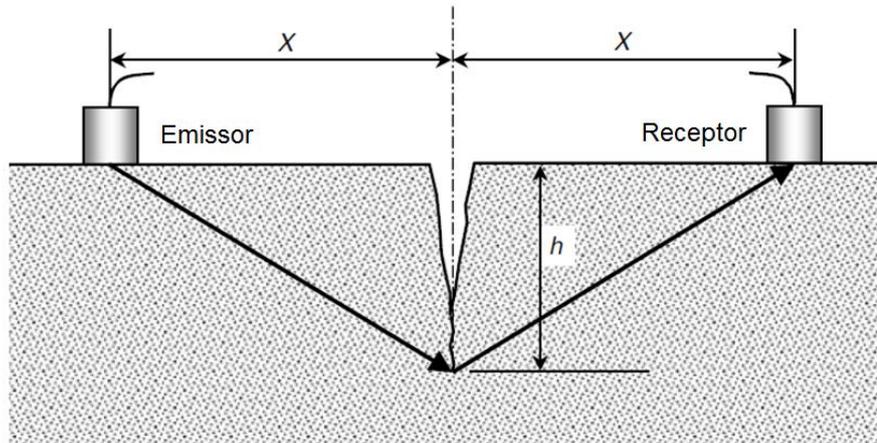


Figura 2.8 – Esquema de medição da profundidade de uma fissura superficial (Adaptado: MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004)

A profundidade de uma fissura superficial (h) pode ser estimada através da Equação 2.6, onde t_1 é o tempo de viagem da onda de ultrassom ao redor da fissura, e t_2 é o tempo de viagem ao longo da superfície do mesmo tipo de concreto, sem nenhuma fissura; a distância (x) entre os transdutores para medir os tempos t_1 e t_2 deve ser igual.

$$h = \frac{x}{t_2} \sqrt{t_1^2 - t_2^2} \quad \text{Equação 2.6}$$

Ressalta-se, porém, que a aplicação desta técnica na localização de falhas tem sérias limitações. Por exemplo, se fissuras e falhas são pequenas, ou se eles estão cheios com água ou outros detritos permitindo, assim, que a onda se propague através do defeito, a velocidade do impulso não irá diminuir significativamente (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).

Estimativa da resistência do concreto

Com o método de velocidade de impulsos de ultrassom podem ser obtidas boas estimativas da resistência do concreto *in situ* e pré-fabricado, embora não haja nenhuma relação física entre a resistência e a velocidade. A estimativa é sempre mais precisa quando realizada em laboratório, pois há um maior controle das composições do concreto estudado. A relação entre resistência e velocidade do pulso não é única, e é afetado por muitos fatores, como por exemplo, tamanho e tipo do agregado, tipo de cimento, relação água-cimento e teor de umidade (MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004).

A norma Britânica BS 1881-Part 203 (1986) e a norma americana ACI 228.1R (1998) recomendam práticas para desenvolver a relação entre velocidade do pulso ultrassônico e resistência à compressão, que pode ser usada posteriormente para estimar a resistência *in situ*.

Variação das propriedades do concreto através do tempo

O método da propagação de ondas de ultrassom é uma aplicação muito utilizada para o monitoramento de estruturas de concreto ao longo do tempo.

Medições de velocidade de pulsos ultrassônicos são muito úteis para acompanhar o processo de endurecimento do concreto. Nas primeiras idades existem mudanças rápidas na velocidade dos pulsos e estão associadas a mudanças físico-químicas na estrutura da pasta de cimento (IAEA, 2002). Mais especificamente, estas mudanças estão relacionadas com o aumento do módulo de elasticidade e da resistência do concreto o que ocasiona um aumento das velocidades de ultrassom. As medições podem ser úteis para determinar o melhor momento para a desforma da estrutura ou aplicação de cargas.

Em longo prazo, o método da propagação de ondas de ultrassom também é uma aplicação bem sucedida. É possível identificar mudanças ocorridas na estrutura causadas por fatores ambientais como congelamento, ou sulfatos, entre outros,

realizando medições em intervalos de tempo definidos, no mesmo local da estrutura (BUNGEY; MILLARD, 1996). As alterações na estrutura interna do concreto serão refletidas nas velocidades das ondas registradas. Se ocorrer uma diminuição das velocidades dos pulsos ultrassônicos em longo prazo, pode-se relacionar a uma deterioração na estrutura interna.

Homogeneidade do concreto

O método da propagação de pulsos de ultrassom é apropriado para o estudo da homogeneidade do concreto e, por conseguinte, para a avaliação relativa da sua qualidade. As heterogeneidades como fissuras, vazios, concreto deteriorado, variações nas proporções da mistura, etc. causam variações na velocidade dos pulsos de ultrassom.

Tabela 2.2 – Classificação da qualidade do concreto baseada na velocidade de pulsos de ultrassom (WHITEHURST, 1966).

Velocidade de pulso de ultrassom (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 – 4500	Bom
3000 – 3500	Regular
2000 – 3000	Pobre
< 2000	Muito pobre

Este método é muito eficaz no estabelecimento de dados comparativos e na avaliação qualitativa do concreto. O procedimento do ensaio consiste em efetuar leituras diretas de ultrassom sobre uma malha retangular, de espaçamento definido, desenhada sobre o elemento testado. O tamanho da malha dependerá do tamanho da peça e da precisão necessária. Como a velocidade de propagação das ondas de ultrassom depende das propriedades elásticas do material, é possível associar os dados obtidos das velocidades com parâmetros de qualidade do material e com regiões deterioradas ou defeitos internos no concreto. Neste sentido, Whitehurst

(1966) apresenta uma classificação geral dos concretos com base nas velocidades dos pulsos de ultrassom (Tabela 2.2). Essa classificação foi estabelecida experimentalmente para concreto normal com densidade de aproximadamente 2400 kg/m³.

Tomografia ultrassônica

A tomografia ultrassônica é uma das aplicações mais complexas do método de propagação de ondas de ultrassom. Com esta técnica é possível melhorar consideravelmente os resultados obtidos dos ensaios convencionais de ultrassom permitindo identificar com maior precisão a localização, a forma e o tamanho da não homogeneidade interna.

Esta técnica permite produzir imagens de seções transversais ou tridimensionais do objeto estudado através da combinação da informação contida numa série de projeções, obtidos em ângulos diferentes através do material. Acredita-se que quanto maior o número de medições é realizado, mais precisos são os resultados. (MARTIN et al., 2001).

Posteriormente, os dados obtidos das projeções devem ser tratados matematicamente mediante técnicas e algoritmos para gerar as imagens. Tradicionalmente a reconstrução de imagens se baseia num mapa de velocidades de ondas de ultrassom, no entanto estudos como o realizado por CHAI et al. (2011) mostram que a tomografia por atenuação de ondas de ultrassom pode ser uma melhor alternativa.

2.2.5. Exemplos de aplicações da técnica de ultrassom

Na área da engenharia civil a técnica convencional de ultrassom tem sido bem sucedida através do tempo. Diversos casos de estudo focados em peças e estruturas de concreto são desenvolvidos constantemente a fim de avaliar o estado interno ou superficial do elemento, utilizando a técnica de ultrassom como

ferramenta para a detecção de problemas como, profundidade de fissuras, falhas de concretagem, variações na qualidade do concreto, entre outras. A seguir são apresentados alguns estudos recentes sobre aplicações desta técnica.

Aggelis et al. (2011) usaram uma combinação de técnicas não destrutivas para a detecção e caracterização de danos embaixo da superfície do concreto. Inicialmente os defeitos foram localizados através da termografia observando a variação do campo de temperatura monitorada por uma câmara de infravermelho. Em seguida foi usada a propagação de ondas de ultrassom para estimar a profundidade através de correlações entre a onda transmitida e o dano característico.

Para o estudo foram moldados sete corpos de prova de concreto reforçado com fibras de aço. As dimensões dos corpos foram 100 x 100 x 400 mm, as relações de água-cimento (a/c) e brita-cimento foram de 0,5 e 3,6 respectivamente. O volume de fibras foi de 0,5% usado com o propósito de controlar os deslocamentos no meio do vão. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios à flexão em quatro pontos com diferentes níveis de deslocamentos no meio do vão, resultando fissuras verticais que se propagam a partir da superfície de tração de baixo para cima dos prismas (Figura 2.9).

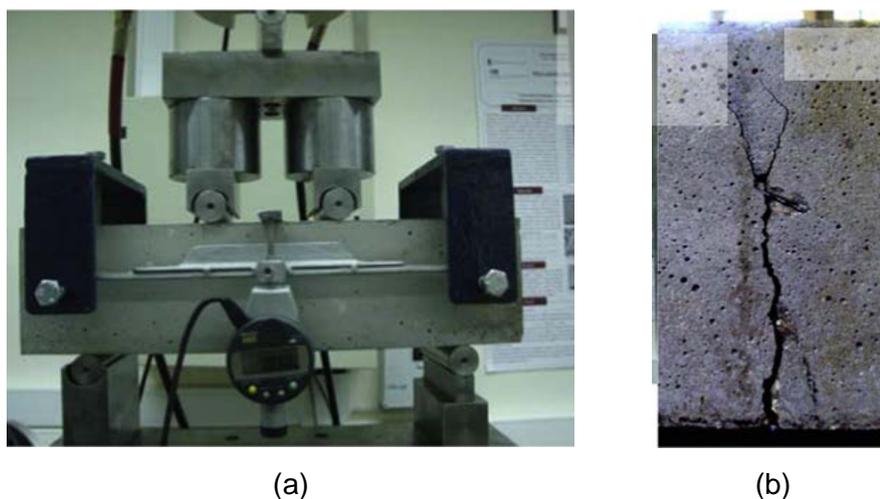


Figura 2.9 – a) Configuração dos ensaios à flexão, b) Fissura típica no meio do vão (AGGELIS et al., 2011)

No que se refere aos ensaios de ultrassom, foram usados dois sensores de cinco milímetros de diâmetro colocados na superfície íntegra dos prismas, na cara oposta à superfície de tração, a uma distância de sete centímetros um do outro. A excitação foi produzida batendo com um lápis a superfície do prisma, introduzindo uma faixa de frequências de até aproximadamente 300 kHz e foi medido o tempo de viagem das ondas longitudinais e Rayleigh nos dois sensores (Figura 2.10).

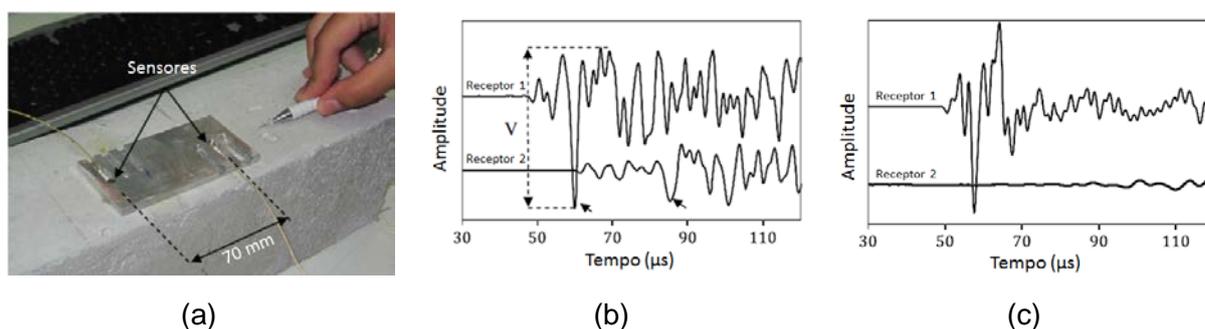


Figura 2.10 – a) Configuração experimental. Sinal típica de onda, b) para concreto íntegro e c) para concreto fissurado (Adaptado: AGGELIS et al., 2011)

Os resultados mostraram que para o concreto sem fissuras e para distâncias desde a superfície íntegra até a ponta da fissura de até 31 mm, a velocidade é semelhante. No entanto, à medida que a ponta da fissura vai se aproximando à superfície, atravessando quase todo o prisma, a velocidade diminui até 33% para a amostra com a maior fissura.

Foi observado também que, para que os danos sejam identificados pelas ondas longitudinais, com medições desde a mesma superfície (arranjo de medição indireta), a fissura deve estar pelo menos a onze milímetros da superfície para que o resultado seja notável. Em relação às ondas Rayleigh se observou que a velocidade também diminui à medida que a fissura se aproxima à superfície, mas a percentagem de diminuição é menor do que nas ondas longitudinais.

Os autores concluem que o uso em conjunto das duas técnicas, termografia e ultrassom, é uma metodologia com grande potencial para a avaliação do dano em concreto difícil de visualizar. Além disso, afirma-se que os parâmetros de

propagação de ondas elásticas são sensíveis à existência de fissuras embaixo da superfície e a característica mais forte para a caracterização de danos é a amplitude da onda.

Benouis e Grini (2011) estudaram a relação entre concretos de diferentes traços, a porosidade e a velocidade das ondas de ultrassom. Para tal, usaram transdutores de 54 kHz de frequência e foram concretados corpos de prova cilíndricos de 160 mm de diâmetro e 320 mm de altura com sete diferentes traços de concreto variando as relações a/c e areia-brita obtendo valores de porosidade entre 7% e 16%.

Os ensaios permitiram correlacionar os dados das velocidades de propagação das ondas de ultrassom com a porosidade dos corpos de prova como se apresenta na Figura 2.11. Foi concluído que a porosidade pode ser estimada com precisão aceitável a partir das velocidades de ultrassom para concretos com relação a/c maior ou igual que 0,5. Mas as correlações tornam-se menos precisas para concretos com relação a/c menor que 0,5. Os autores afirmam que para concretos com baixa relação a/c é possível estimar a porosidade a partir da velocidade ultrassônica realizando correlações para cada valor de a/c.

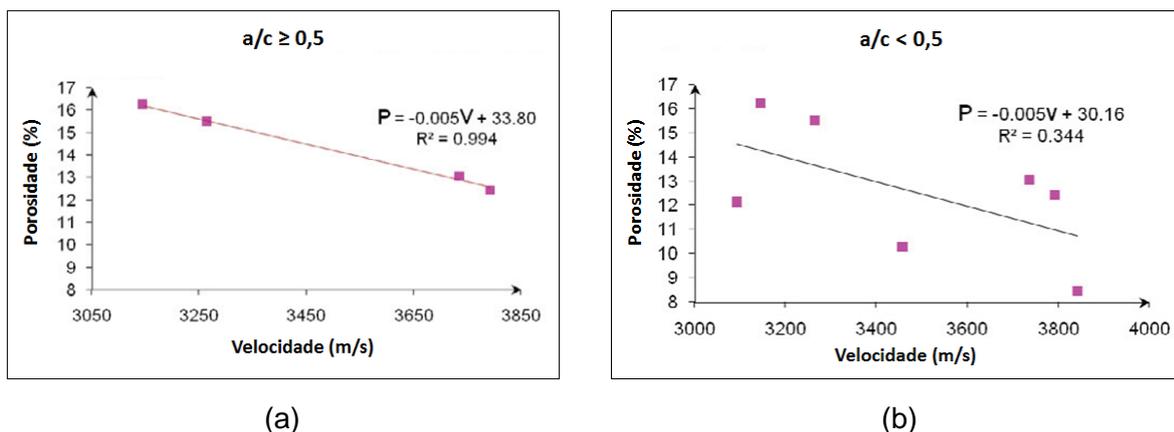


Figura 2.11 – Evolução da porosidade com a velocidade de ultrassom dos concretos com relação a/c a) $\geq 0,5$ e b) $< 0,5$ (Adaptado: BENOUIS E GRINI, 2011)

Outra aplicação interessante dos ensaios de ultrassom faz referência ao estudo e avaliação do dano no concreto produzido por agentes químicos. Neste tópico, recentemente os autores Ould-Naffa et al. (2002) e Watanabe et al. (2014) realizaram estudos com resultados importantes.

Ould-Naffa et al. (2002) utilizaram a técnica de ultrassom para avaliar a degradação química do revestimento de estruturas de concreto. O estudo foi realizado em peças de argamassa de 150 x 40 x 300 mm e para as medições de ultrassom foram usadas frequências entre 0,5 e 1,0 MHz, avaliando a velocidade e a amplitude de ondas longitudinais, transversais e Rayleigh.

Para simular a degradação química do concreto através do contato com o ambiente, a metade do corpo de prova foi imerso em uma solução de NH_4NO_3 com uma densidade de 437 g/l (Figura 2.12). A imersão foi feita por períodos de tempo de 15, 30 e 45 dias.

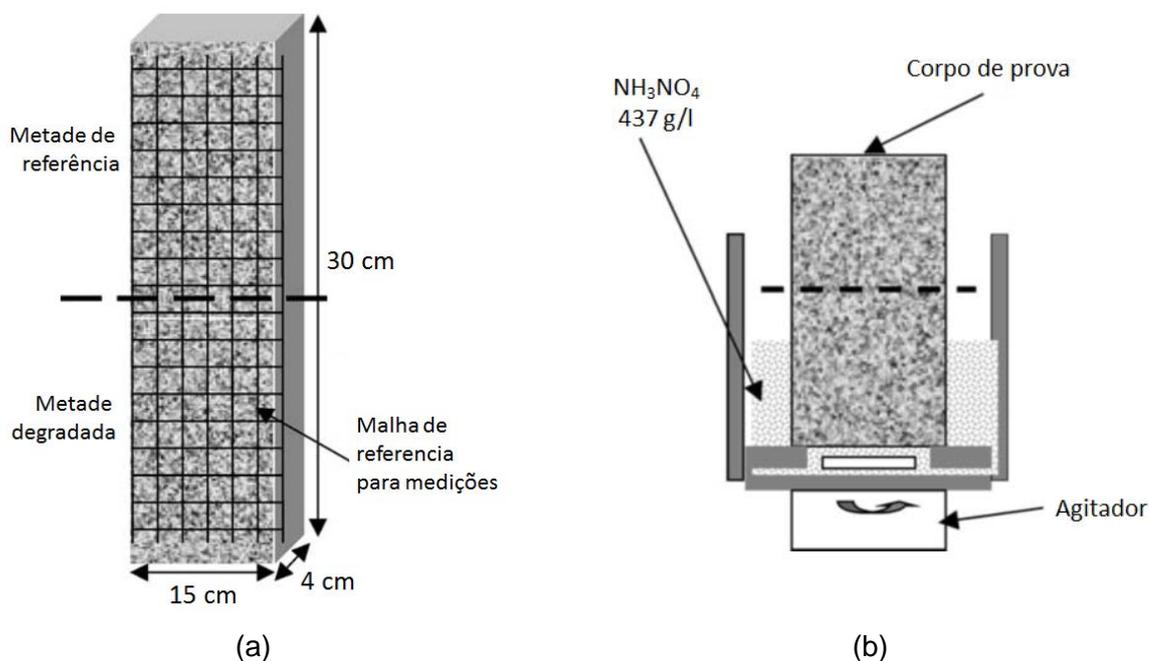


Figura 2.12 – a) Corpo de prova de argamassa, b) procedimento para degradação química
(Adaptado: OULD-NAFFA et al., 2002)

Os resultados mostraram uma diminuição significativa da média das velocidades com o tempo, especialmente nas ondas Rayleigh. A evolução das velocidades com a degradação é apresentada na Figura 2.13, onde para cada tipo de onda, é apresentada a diferença de velocidade ΔV relativa ao valor V_0 obtido no concreto sem degradação.

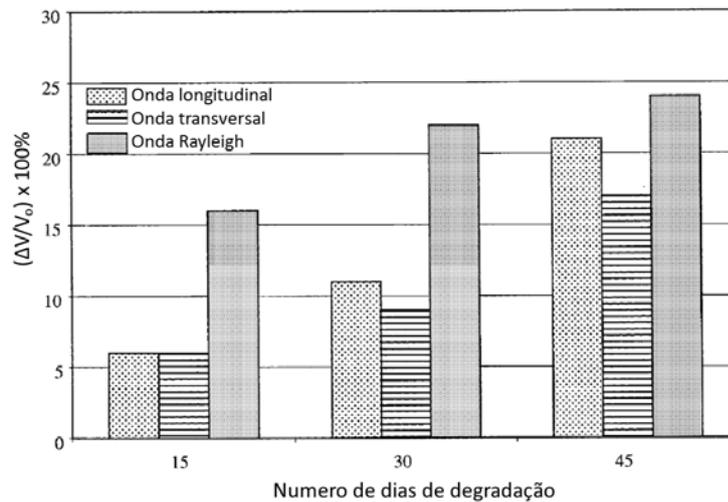


Figura 2.13 – Diminuição relativa da velocidade de propagação em função do tempo de degradação
(Adaptado: OULD-NAFFA et al., 2002)

Foi observado também um dramático incremento da atenuação da amplitude das ondas com o tempo de degradação. Este incremento foi observado especialmente nas medições das ondas transversais, onde o aumento atingiu 1000% depois de 45 dias (OULD-NAFFA, et al., 2002).

Os autores concluíram que as ondas ultrassônicas de alta frequência permitiram detectar mudanças na microestrutura do recobrimento em fases iniciais de degradação. Além disso, estudos preliminares utilizando frequências menores (50 kHz) mostraram que não foram possíveis ser medidas diferenças na atenuação entre o material degradado e o íntegro. Finalmente Ould-Naffa et al. (2002) afirmaram que a atenuação é extremadamente sensível à degradação do material e que as ondas Rayleigh podem ser mais adequadas para a avaliação do recobrimento do concreto.

Por outra parte, Watanabe et al. (2014) utilizaram ensaios de ultrassom a fim de detectar corrosão em barras de reforço em etapas iniciais que posteriormente podem causar fissurações no concreto. Para este estudo foram realizados dois tipos de ensaios, o primeiro deles sobre um prisma de concreto com corrosão em estado inativo e o outro com corrosão em estado ativo.

Para avaliar a corrosão em estado inativo foram concretados dois corpos de 150 x 150 x 300 mm e foi colocada uma barra de aço de treze milímetros de diâmetro a 40 mm de profundidade em cada prisma, conforme a Figura 2.14a. Os prismas foram embebidos em uma solução de água com 5% de cloreto de sódio e uma densidade de corrente elétrica de 50 mA/m². Após 91 dias desde o início do teste apareceu uma fissura na superfície do corpo.

Durante o período de imersão dos prismas na solução foram realizadas medições de ultrassom a cada três dias. As leituras foram feitas em modo indireto como indica a Figura 2.14b e foram usados transdutores de 200 kHz.

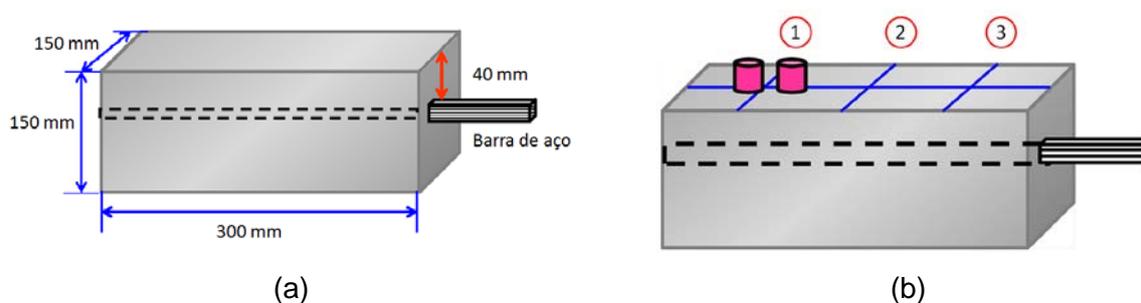


Figura 2.14 – Esboço de prismas de concreto com barra de aço, a) dimensões e b) ensaio de ultrassom (Adaptado: WATANABE et al., 2014)

Para avaliar a corrosão em estado ativo foram moldadas cinco vigas de concreto de 100 x 200 x 900 mm e uma barra de aço embetida a 30 mm da superfície (Figura 2.15a). Quatro das vigas foram imersas em uma solução de água com 5% de cloreto de sódio e uma densidade de corrente elétrica de 1 A/m² e a outra viga foi deixada intata como referência. Após dois dias do início do teste foram observadas fissuras na superfície das vigas ao longo da barra de aço.

As leituras de ultrassom das vigas foram feitas aos 10, 20, 30 e 33 dias após começar o teste de corrosão eletrolítica. As medições foram feitas em modo indireto e consistiram em fixar o transdutor emissor e variar a distancia do transdutor receptor conforme a Figura 2.15b.

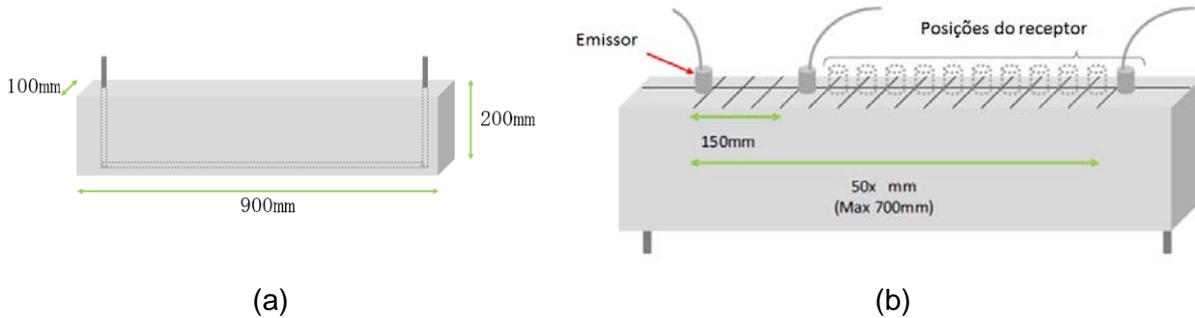


Figura 2.15 – Esboço da viga de concreto, a) dimensões e b) ensaio de ultrassom (Adaptado: WATANABE et al., 2014)

Os resultados dos ensaios de ultrassom no que se refere à corrosão em estado inativo mostraram uma diminuição da amplitude das ondas através do tempo como se apresenta na Figura 2.16. Em relação com a corrosão em estado ativo, em geral se observou uma diminuição das velocidades de propagação depois de dez dias do teste (Figura 2.17); isso implica que a amplitude das ondas ultrassônicas é atenuada e o caminho de propagação é alterado devido à corrosão das barras e às fissuras induzidas pela corrosão.

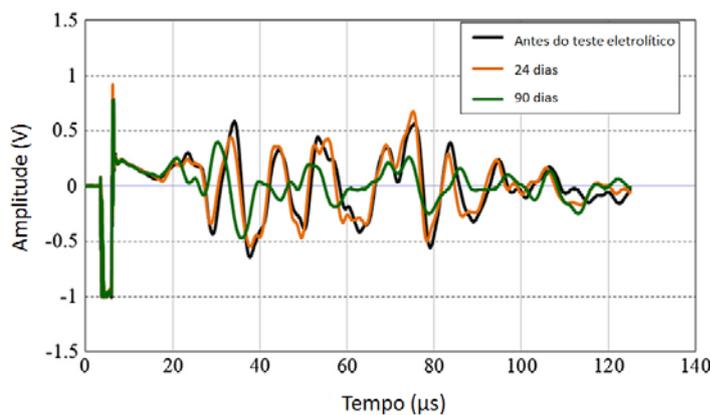


Figura 2.16 – Sinais das ondas de ultrassom submetidas a corrosão em estado inativo (Adaptado: WATANABE et al., 2014)

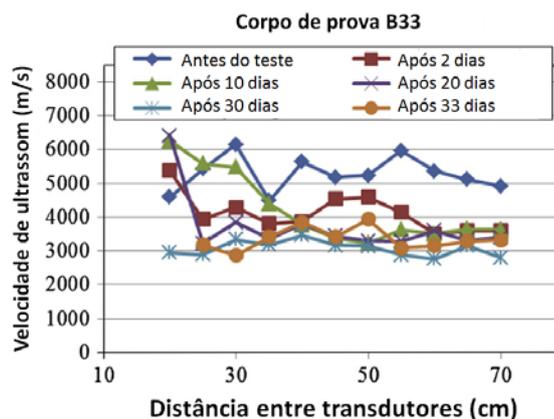


Figura 2.17 – Relação entre a velocidade de ultrassom e o período eletrolítico para uma das vigas testadas (Adaptado: WATANABE et al., 2014)

Watanabe et al. (2014) confirmaram a aplicabilidade que possui a técnica de ultrassom para detectar corrosão de barras em estruturas de concreto reforçado em fases iniciais.

Em consequência, com base nas pesquisas mencionadas e com todos os estudos que se podem encontrar na literatura, é claro o potencial que possuem os ensaios convencionais de ultrassom para avaliar danos superficiais e internos em estruturas de concreto. No entanto este tipo de ensaios possui uma limitação baseada na incapacidade de localizar a profundidade na qual se encontram as não homogeneidades ou defeitos, bem como determinar suas geometrias com mais precisão (PERLIN, 2011).

De tal modo, a técnica da tomografia ultrassônica é uma alternativa que permite melhorar consideravelmente a visualização dos resultados dos ensaios de ultrassom possibilitando caracterizar melhor as não homogeneidades internas das estruturas.

2.3. Tomografia Ultrassônica

A palavra tomografia vem das raízes gregas *tomos* e *grafia* que significam, respectivamente, “seção” ou “corte” e “imagem” ou “desenho”, ou seja, “imagem de

corde”. Na atualidade a palavra tomografia é um termo genérico usado para referir a qualquer técnica de reconstrução de imagens transversais de um objeto sólido.

2.3.1. História da Tomografia

A tomografia computadorizada é, sem dúvida, o avanço mais significativo na história da imagem médica desde o descobrimento dos raios X pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen em 1895. A importância física e médica desta descoberta foi reconhecida quando concederam-lhe a Röntgen o Prêmio Nobel de Física em 1901 (LORENZO, 2008).

Röntgen também descobriu a propriedade penetrante dos raios X sobre a matéria e a ação destes sobre as placas fotográficas e telas fluorescentes. Com estas propriedades dos raios X foi possível obter imagens bidimensionais ou radiografias do interior do corpo humano.

Posteriormente, em 1917, o matemático austríaco Johann Radon desenvolveu as fórmulas matemáticas para reconstruir uma imagem tridimensional a partir de uma série de imagens bidimensionais tomadas ao longo do eixo de um objeto. Tal técnica foi chamada transformada de Radon e considerada a base matemática para a futura tomografia computadorizada (PERLIN, 2011).

Em 1963 e 1964, Cormack desenvolveu algumas equações que mais tarde serviriam para reconstruir com a ajuda de um computador as imagens da estrutura interna de um objeto, a partir de informação obtida com o uso de raios X (LORENZO, 2008). No entanto esses estudos não mostraram interesse para a comunidade científica. Seria até 1972, quando Hounsfield publicou seus estudos e apresentou o primeiro tomógrafo computadorizado destinado inicialmente para estudos clínicos do cérebro.

O descobrimento da tomografia computadorizada (TC) foi o início de um intenso trabalho de pesquisa, tanto físico e tecnológico quanto matemático, pois uma vez apresentado o grande poder da TC nos diagnósticos médicos, rapidamente

foram construídos aparelhos mais sofisticados, utilizando diferentes fenômenos físicos tais como: raios gama, ultrassom, ressonância magnética nuclear, íons, elétrons, etc., dando lugar a distintas técnicas tomográficas (LORENZO, 2008).

2.3.2. Tomografia ultrassônica aplicada em concreto

A tomografia ultrassônica é uma ferramenta poderosa para a avaliação não destrutiva da estrutura interna dos materiais. Este método é particularmente apropriado para analisar o concreto, a fim de determinar sua espessura e detectar fissuras, vazios e intrusões que podem ser cheios com algum líquido ou material de diferentes propriedades físicas e mecânicas que o concreto ao redor (HOLA, SCHABOWICZ; 2010). É uma técnica complexa que agrupa diversos parâmetros que influenciam no ensaio e na reconstrução das imagens, mas permite a possibilidade de identificar relativamente fácil a qualidade e os defeitos internos do concreto por meio de imagens geradas em escala de cores que representam a estrutura do concreto.

Na literatura existem diversos estudos com bons resultados que incluem a aplicação da técnica de tomografia ultrassônica na avaliação de peças e estruturas de concreto para a detecção de dutos, fissuras, não homogeneidades internas, falhas de concretagem, entre outros. A seguir são apresentadas algumas destas aplicações.

No âmbito da **detecção de dutos** no interior de estruturas de concreto, Martin et al. (2001) e Muldoon et al. (2007) realizaram pesquisas procurando identificar vazios internos nos ductos dos cabos de protensão em membros de concreto através da tomografia ultrassônica.

No estudo do Martin et al. (2001), foi construído um bloco de concreto com dimensões de 120 x 75 x 40 cm contendo dois ductos semipreenchidos de 10 cm de diâmetro, conforme mostra a Figura 2.18. As leituras de ultrassom foram realizadas na parte superior e nas laterais da viga com espaçamento de dez centímetros, utilizando o aparelho Pundit.

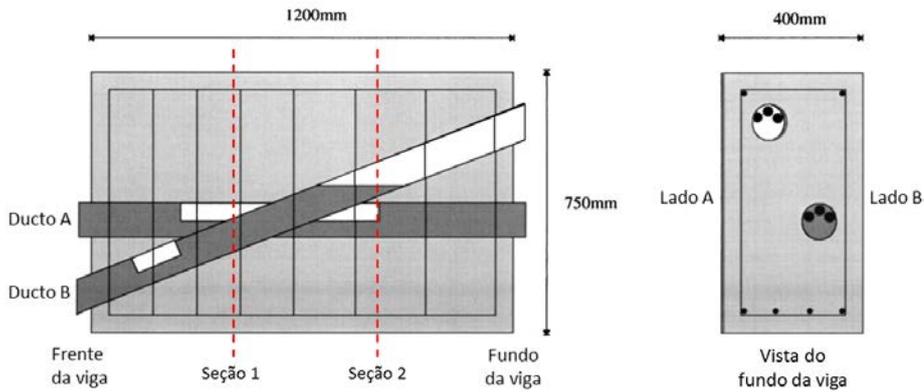


Figura 2.18 – Modelo do bloco de concreto com dois ductos (Adaptado: MARTIN et al., 2011)

Para o estudo do Muldoon et al. (2007) foram utilizadas duas vigas com dimensões de 200 x 45 x 40 cm, cujos desenhos encontram-se na Figura 2.19. As leituras incluíram as quatro faces da seção transversal da viga em todas as combinações possíveis sobre uma malha de cinco centímetros.

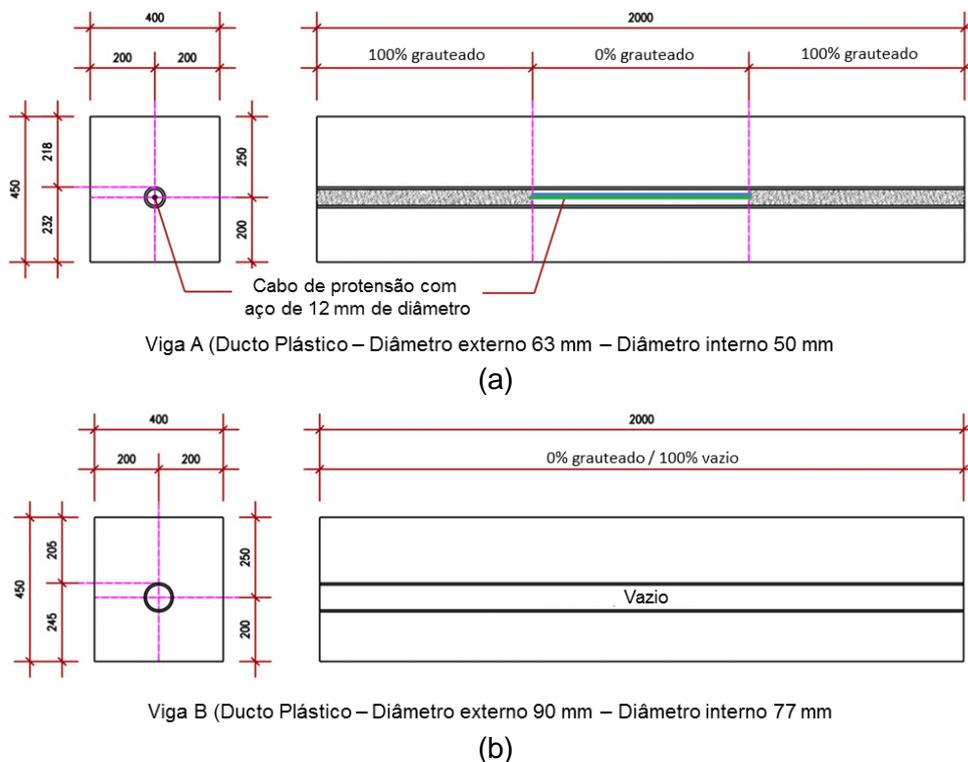


Figura 2.19 – Modelos de vigas testadas: a) Viga A, b) Viga B (Adaptado: MULDOON et al., 2007)

Os autores realizaram reconstruções de imagens tomográficas bidimensionais de diferentes seções das vigas que permitiram identificar várias heterogeneidades nas seções estudadas. A Figura 2.20 apresenta os resultados das tomografias do estudo do Martin et al. (2001) e a Figura 2.21 apresenta os do Muldoon et al. (2007).

As imagens mostraram claras variações das velocidades dos pulsos de ultrassom, por exemplo, as baixas velocidades indicaram os ductos vazios ou semipreenchidos, mas também foi possível observar concreto de baixa qualidade talvez como resultado da compactação na fase de construção. Também foram observadas áreas de altas velocidades associadas ao aço de reforço.

Nas duas pesquisas os autores finalmente concluem que a tomografia ultrassônica fornece um método altamente bem sucedido para estudar vigas de concreto protendido. No entanto, para Martin et al. (2001) é um método um pouco demorado pela necessidade de efetuar um grande número de leituras e, por isso, recomendam usar esta técnica em conjunção com um método de teste mais simples, como por exemplo a técnica de eco-impacto.

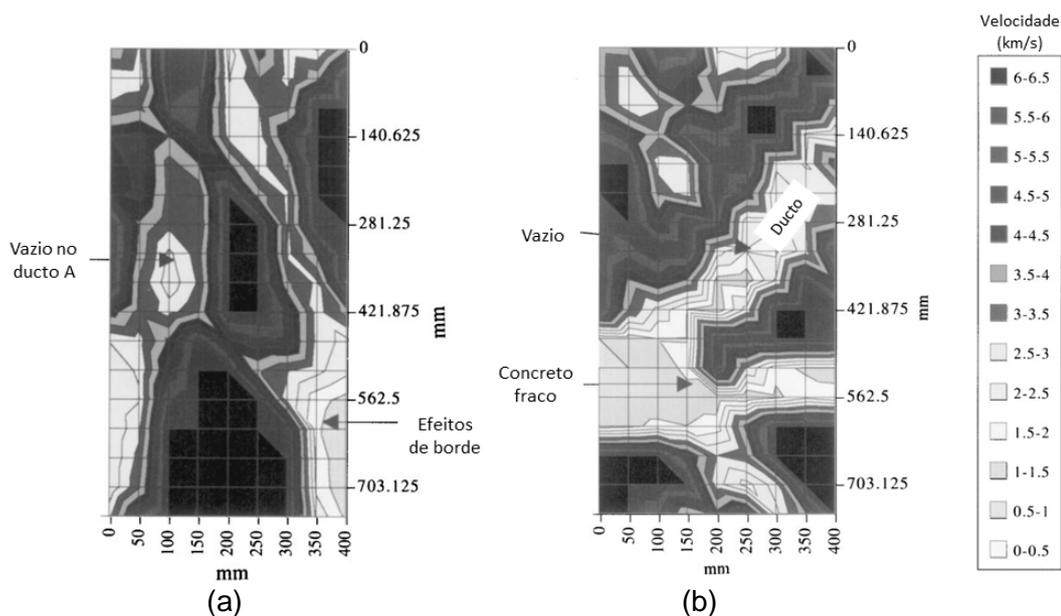


Figura 2.20 – Imagens Tomográficas a) Seção 1, b) Seção 2, (Adaptado: MARTIN et al., 2001).

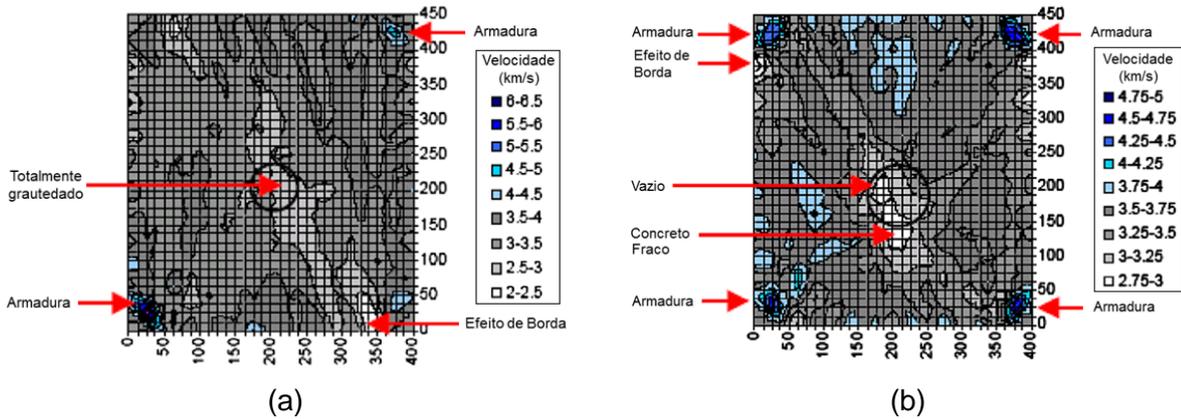


Figura 2.21 – Imagens Tomográficas: a) Viga A: Seção totalmente grauteada, b) Viga B: Seção sem graute (Adaptado: MULDOON et al., 2007).

A tomografia ultrassônica não só tem sido aplicada em amostras e modelos feitos em laboratório. Dois casos particulares de **avaliação de danos em estruturas** mais complexas foram realizados por Aggelis e Shiotani (2007) e Ferraro et al. (2013).

Aggelis e Shiotani (2007) utilizaram a técnica de tomografia ultrassônica para avaliar a reparação de uma fissura sobre uma viga de uma ponte de concreto armado. Em este estudo foram avaliados os parâmetros da fissura antes da recuperação por meio da propagação de ondas Reyleigh e posteriormente foi avaliada a eficácia da reparação realizando tomogramas utilizando ondas longitudinais.

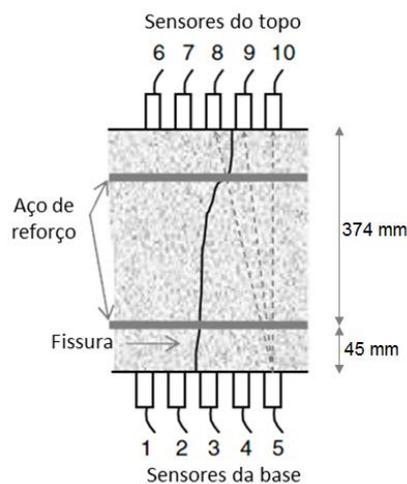


Figura 2.22 – Posicionamento dos transdutores (Adaptado: AGGELIS; SHIOTANI, 2007).

Foram utilizados dois conjuntos de transdutores, cinco posicionados no topo da viga e cinco na parte inferior como é apresentado na Figura 2.22. A distância de separação entre os sensores foi de 50 mm e foram fixados à viga usando cera derretida.

Na Figura 2.23 pode-se observar a tomografia da seção transversal antes e após da injeção de epóxi. Os tomogramas mostram claramente a detecção da fissura e o sucesso de seu preenchimento pela resina epóxi. Na seção recuperada ainda se pode ver uma zona de baixas velocidades que indicam a existência de um concreto de menor qualidade devido possivelmente à fratura da zona de processo que se expande alguns centímetros de ambos os lados da fissura.

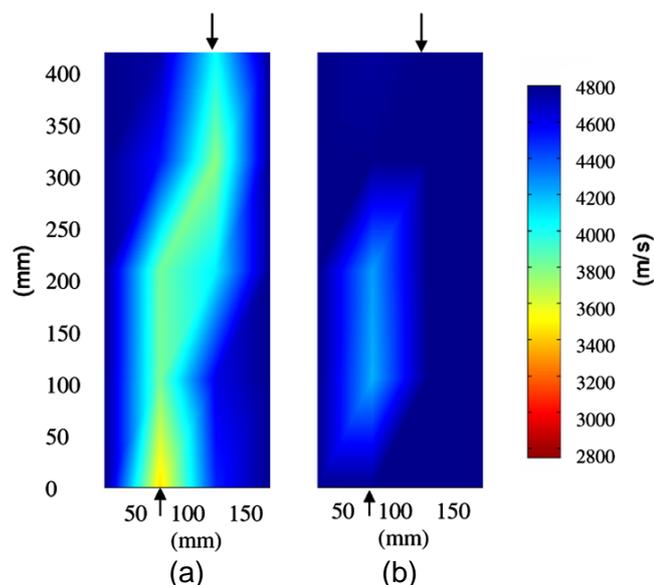


Figura 2.23 – Tomogramas a) antes e b) após da recuperação da fissura. As setas indicam a posição real de aberturas da fissura. (AGGELIS; SHIOTANI, 2007).

Aggelis e Shiotani (2007) concluem que uma abordagem tomográfica pode ser aplicada relativamente fácil e com sucesso na caracterização de fissuras e na avaliação de reparações utilizando injeções de resina epóxi.

No caso do estudo do Ferraro et al. (2013) foi utilizada a técnica da tomografia ultrassônica para avaliar a integridade de dois pilares de uma ponte antes e depois de ser aplicados uma série de impactos (Figura 2.24). Para o estudo, os

dois pilares foram equipados cada um com um bloco de impacto de concreto armado e quatro conjuntos de células de carga.



Figura 2.24 – Pilar 1 e bloco de impacto (FERRARO et al., 2013)

Antes e após dos impactos foram realizadas medições em seções transversais horizontais para diferentes elevações dos pilares e dos blocos de impacto. As medições foram feitas sobre uma malha de 30,5 cm x 30,5 cm com transdutores de 54 kHz. Os autores realizaram reconstruções de imagens tomográficas tridimensionais a partir do conjunto das reconstruções bidimensionais para cada altura dos pilares e blocos (Figura 2.25 – Figura 2.27).

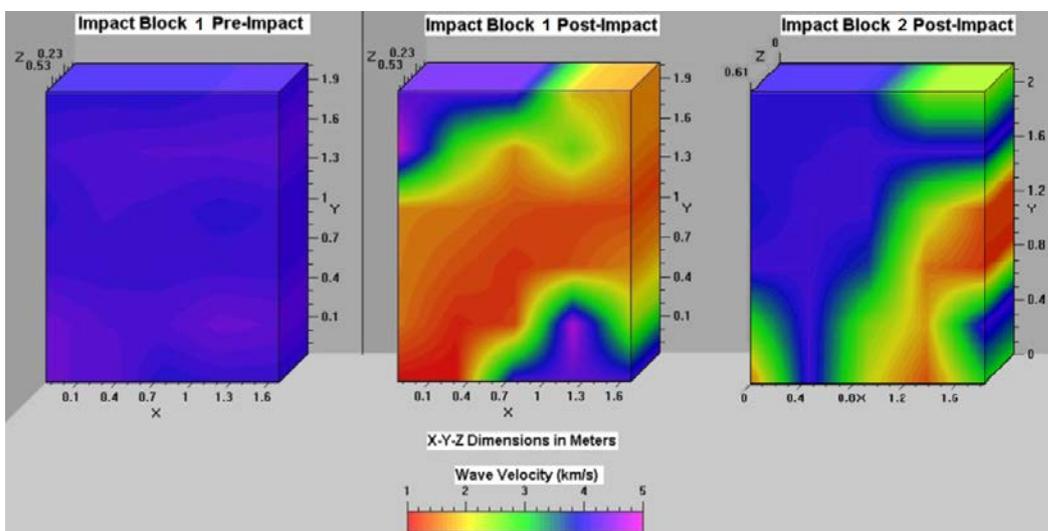


Figura 2.25 – Imagem tomográfica dos blocos de impacto (Adaptado: FERRARO et al., 2013)

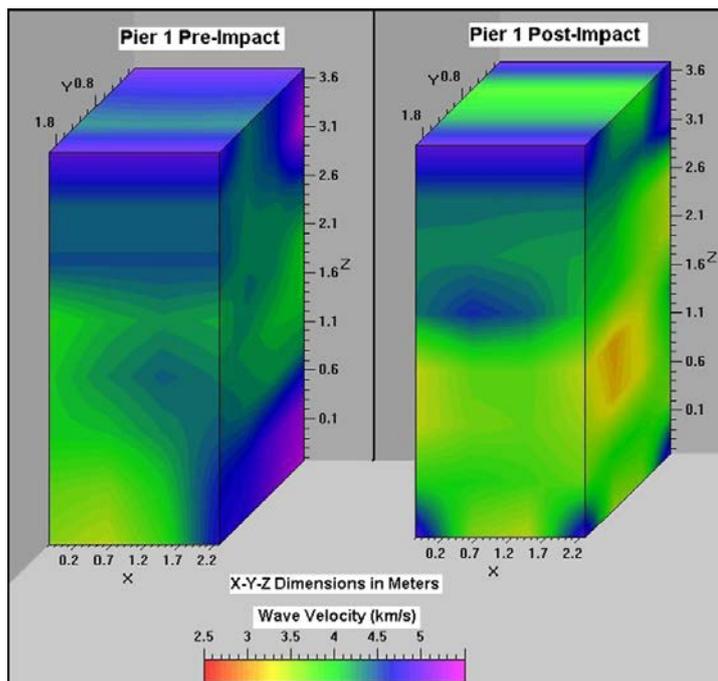


Figura 2.26 – Imagem tomográfica para o pilar 1 (FERRARO et al., 2013)

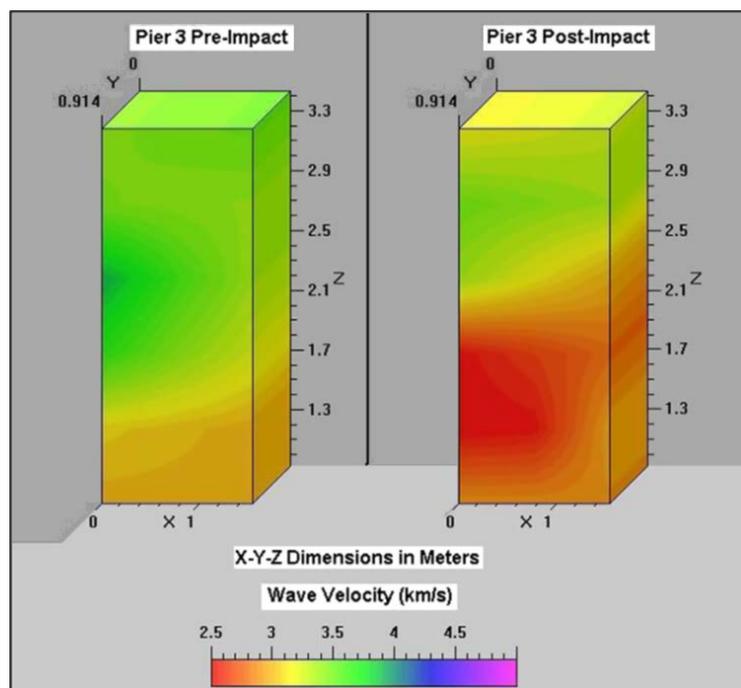


Figura 2.27 – Imagem tomográfica para o pilar 2 (FERRARO et al., 2013)

Os resultados das tomografias antes dos impactos mostraram velocidades que indicam concretos de boa qualidade, além disso, as baixas variações de velocidades indicam uma boa homogeneidade do concreto das estruturas. Em

contraste, as imagens tomográficas resultantes após das oito colisões com diferentes velocidades de impacto sobre os blocos indicaram claramente uma grande redução nas velocidades. Os dados tomográficos estão em bom acordo com os danos visuais exibidos pelo bloco de impacto.

Do estudo os autores finalmente concluem que o uso da tomografia ultrassônica sobre elementos estruturais que sofrem danos transmitidos por cargas de impacto tem provado ser um método viável para avaliação da sua integridade. A técnica da tomografia foi capaz de detectar danos no interior da estrutura que não são aparentes visualmente.

Outra aplicação da tomografia ultrassônica um pouco menos estudada que as aplicações anteriores, se refere à **avaliação do efeito de congelamento e descongelamento** no concreto. Neste âmbito, Molero et al. (2012) estudaram o uso de imagens de ultrassom como ferramenta de avaliação do concreto submetido a ciclos de congelamento e descongelamento.

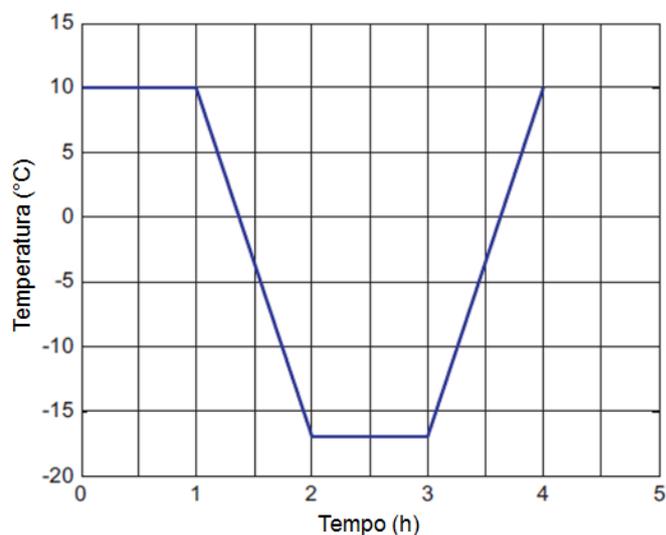


Figura 2.28 – Ciclo acelerado de congelamento e descongelamento (Adaptado: MOLERO et al., 2012)

Para avaliar o dano foram geradas imagens tomográficas de velocidades de ultrassom e de atenuação de ondas a partir de dois grupos de sete amostras cilíndricas de concreto (300 x 150 mm²); um dos grupos possui agentes

incorporadores de ar. As amostras foram sujeitas a 300 ciclos de congelamento e descongelamento acelerado de 4h cada, entre 10°C e -17°C (Figura 2.28).

As imagens de ultrassons, antes e após os ciclos de congelamento e descongelamento das amostras de concreto, sem e com agentes incorporadores de ar são apresentadas nas Figura 2.29 e Figura 2.30, respectivamente. As Figuras 2.29a e b, e Figuras 2.30a e b mostram as imagens de atenuação de ondas e as linhas 2.29c e d, e Figuras 2.30c e d mostram as imagens de velocidade de onda. Deve notar-se que as linhas (a) e (c), nas duas Figuras correspondem às medições de ultrassons realizados antes de iniciar os ciclos de congelamento e descongelamento, e as linhas (b) e (d) correspondem às medições após serem aplicados os 300 ciclos.

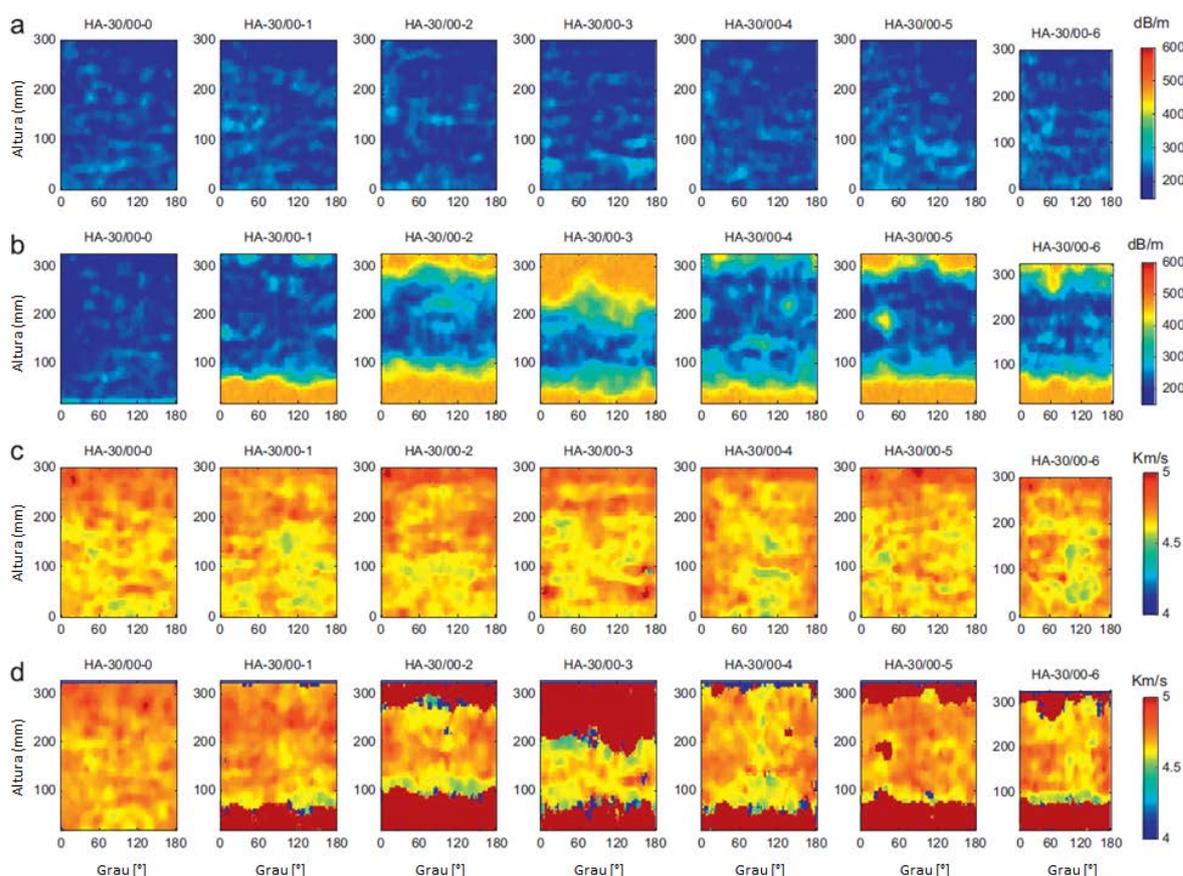


Figura 2.29 – Imagens de ultrassons para amostras de concreto, sem agentes incorporadores de ar: (a) e (b) atenuação antes e após a aplicação dos ciclos de congelamento e descongelamento, respectivamente; (c) e (d) velocidade antes e após a aplicação dos ciclos de congelamento e descongelamento, respectivamente (Adaptado: MOLERO et al., 2012).

Nas imagens correspondentes às medições de ultrassom nas amostras sem incorporadores de ar, após os ciclos, podem ser observadas zonas danificadas que progrediram desde as faces superior e inferior para o centro das amostras (Figura 2.29). Além disso, após os ciclos de congelamento e descongelamento, os autores observaram que na maioria das amostras deste grupo, as velocidades de ultrassom diminuíram e nas imagens pode-se observar que a atenuação teve um incremento significativo.

No caso das imagens das amostras com incorporadores de ar, observa-se que nenhuma das amostras se deteriorou durante os ciclos, de modo que se verificou a eficácia da adição de agentes incorporadores de ar para prolongar a durabilidade do concreto sujeito a ciclos de congelamento e descongelamento. Em contraste com o grupo de amostras sem incorporadores de ar, a atenuação diminuiu e a velocidade aumentou.

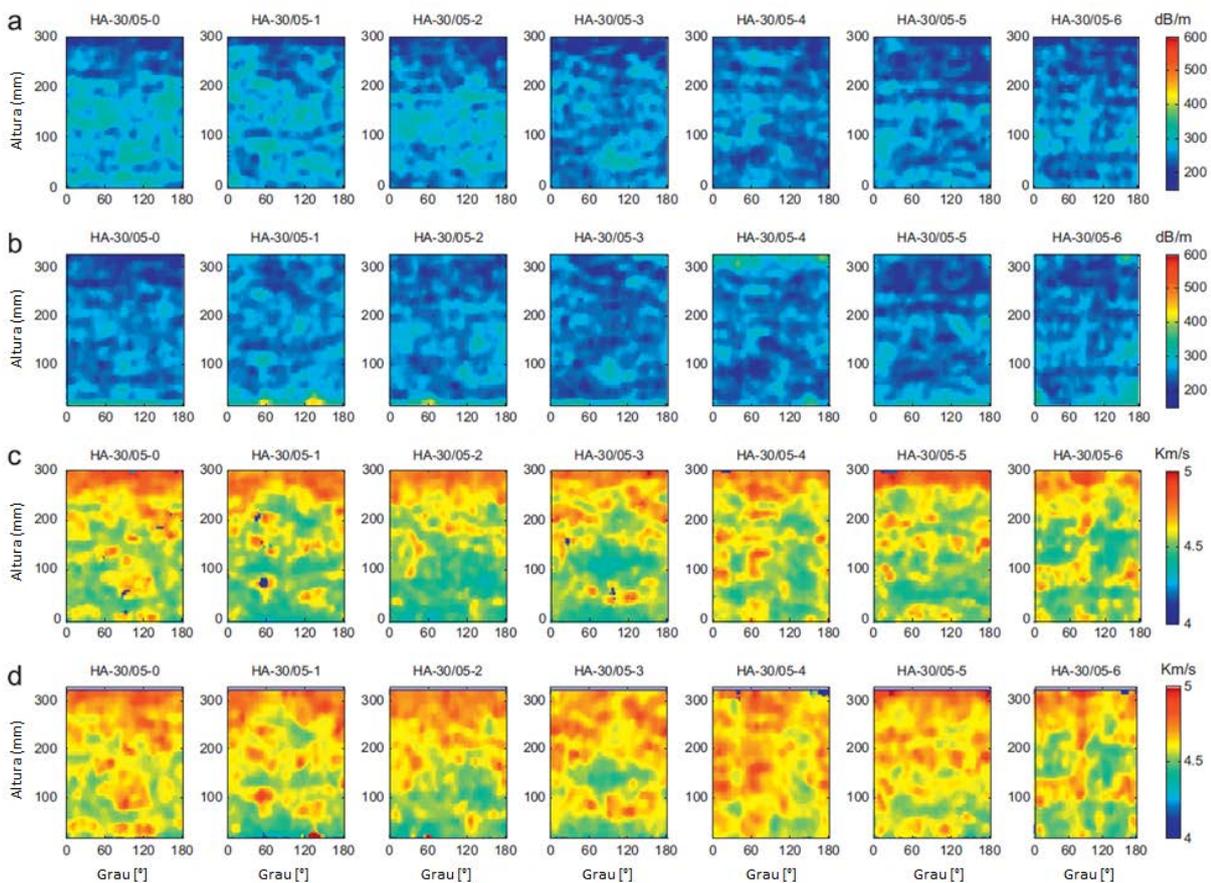


Figura 2.30 – Imagens de ultrassons para amostras de concreto, com agentes incorporadores de ar: (a) e (b) atenuação antes e após a aplicação dos ciclos de congelamento e descongelamento, respectivamente; (c) e (d) velocidade antes e após a aplicação dos ciclos de congelamento e descongelamento, respectivamente (Adaptado: MOLERO et al., 2012).

Do estudo pode-se concluir que a técnica da tomografia ultrassônica e o uso das imagens tomográficas são uma boa alternativa para a detecção de danos e a avaliação do concreto submetido a ciclos de congelamento e descongelamento.

Até agora foram apresentadas algumas das pesquisas mais recentes onde é utilizada a técnica da tomografia ultrassônica, com resultados satisfatórios, em aplicações bem específicas isto é, na detecção de ductos, fissuras, avaliação do dano por cargas de impacto e avaliação do concreto submetido a ciclos de congelamento e descongelamento.

É importante agora, citar alguns dos estudos mais recentes onde é utilizada a tomográfica ultrassônica na **detecção de não homogeneidades internas no concreto** a fim de identificar e determinar diversos fatores e parâmetros que influenciam na realização dos ensaios de ultrassom. Para isso, geralmente são inseridos dentre as amostras de concreto estudadas, durante a concretagem, diversos elementos como blocos de isopor, madeira e barras de aço de diferentes tamanhos, geometrias e localizações, simulando assim danos ou defeitos internos. Este tipo de estudos tem sido feitos tanto experimentalmente quanto por meio de simulações numéricas, neste sentido, Aggelis et al. (2011), Chai et al. (2011) e Perlin e Pinto (2013) realizaram pesquisas visando avaliar a eficácia da técnica da tomografia ultrassônica, avaliando fatores como diferentes valores de frequências e arranjos de transdutores, entres outros.

Aggelis et al. (2011) realizaram uma série de simulações numéricas de propagação de ondas através de um quadrado de concreto de 50 x 50 cm. Nas simulações foram aplicados diferentes tipos de heterogeneidades, tais como espaços vazios, zonas degradadas e barras de aço de reforço. Os impulsos foram gerados com duas frequências diferentes, 20 e 200 kHz, a fim de estimar o efeito das diferentes comprimentos de onda. A informação dos tempos dos pulsos de ultrassom calculada permitiu um estudo teórico bidimensional sobre a tomografia ultrassônica e os fatores que a afetam.

Na Figura 2.32 são apresentados os modelos simulados numericamente, o arranjo dos transdutores e os resultados das imagens tomográficas a partir das velocidades de onda com frequências de 20 e 200 kHz.

O primeiro caso foi simulado o modelo com um vazio quadrado de 500 mm de aresta no centro do elemento, os transdutores foram posicionados nas faces laterais opostas do quadrado do concreto com espaçamento de dez centímetros e se simularam um total de 72 leituras. A Figura 2.31 apresenta uma simulação de onda de ultrassom para o primeiro caso analisado. O segundo caso só varia do primeiro em que o vazio é de forma circular.

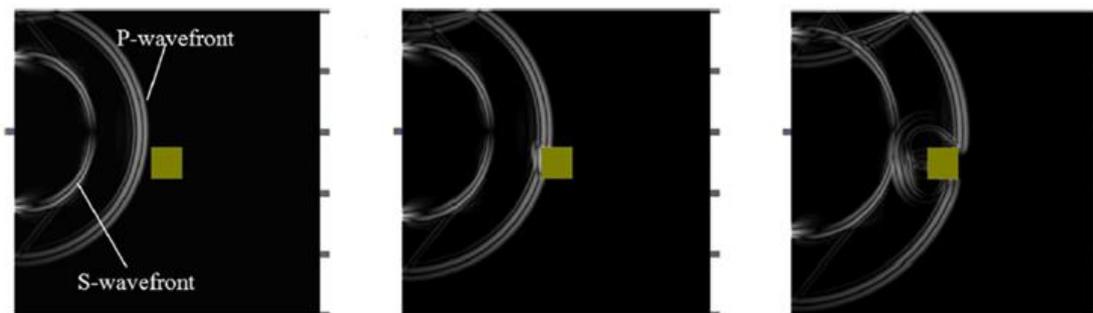


Figura 2.31 – Exemplo de simulação de propagação de onda para o caso com um vazio quadrado no meio (AGGELIS et al., 2011)

O caso três consiste de um quadrado de 500 mm de aresta, dividido em três faixas verticais; nas duas laterais, de 100 mm cada, foi simulado concreto deteriorado e a faixa do meio, de 300 mm, foi concreto íntegro. Os transdutores foram posicionados nas faces laterais opostas do quadrado do concreto. Os casos quatro e cinco são variações do caso anterior, por exemplo, no caso quatro foi inserido um vazio circular no meio do modelo e no caso cinco foram feitas leituras desde todas as faces do modelo.

Finalmente, com o propósito de examinar o efeito do aço de reforço, foi simulado o caso seis com as mesmas faixas de concreto deteriorado e com cinco barras de aço horizontais paralelas e separadas entre si cada 100 mm. As barras de aço foram simuladas por retângulos de 16 mm de espessura.

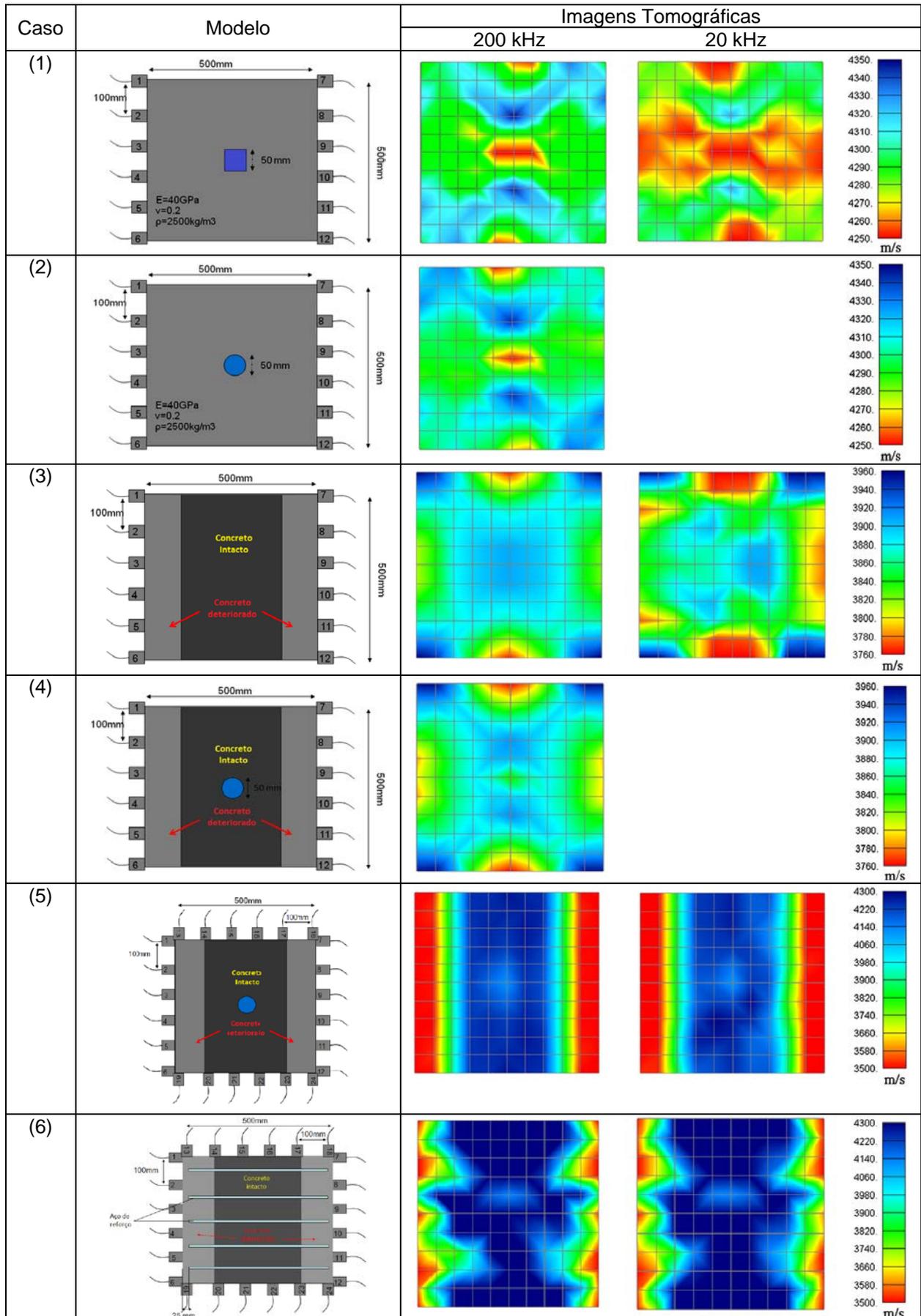


Figura 2.32 – Modelos estudados e imagens tomográficas (Adaptado: AGGELIS et al., 2011)

Com o resultado das imagens tomográficas é possível observar que a maior frequência produz tomografias de maior qualidade, provavelmente devido ao comprimento de onda reduzida, o que é mais sensível na presença de heterogeneidades. Esta melhoria dos tomogramas está também muito ligada ao aumento do número de sensores utilizados, e a colocação em todos os lados da secção transversal.

Para os autores, as camadas de diferentes qualidades de concreto e a presença de barras de reforço podem complicar a avaliação dos resultados da tomografia, dificultando a resolução dos algoritmos para reconstruir imagens, no entanto, o teste com transdutores colocados em todos os lados da estrutura melhora significativamente a precisão.

A outra pesquisa relacionada com o mesmo tópico foi realizada por Chai et al. (2011) que estudaram a sensibilidade da atenuação das ondas de ultrassom através de defeitos no concreto realizando simulações numéricas de ondas com ajuda de um software comercial para a resolução de problemas de propagação de ondas elásticas bidimensionais.

O modelo estudado é um quadrado de concreto de dimensões 300 x 200 mm. Foi incluído um vazio de 100 x 5,0 mm que se estende desde o centro da parte superior do modelo até o centro do elemento. Um segundo modelo com as mesmas dimensões do anterior foi simulado, mas foi substituído o vazio por uma barra de aço. Para os dois modelos foram utilizadas frequências de 110 kHz. As ondas foram emitidas desde três posições diferentes (A, B e C) num lado do elemento e do outro lado foram colocados 10 receptores separados cada 20 mm entre si. Na Figura 2.33 é apresentada a configuração da geometria dos modelos e o arranjo dos sensores.

A Figura 2.34 apresenta a simulação das ondas sobre os corpos de concreto. O estudo do modelo com o vazio retornou como resultado que a amplitude de ultrassom diminuiu consideravelmente em comparação com a velocidade calculada para os caminhos das ondas através do vazio. Para o modelo com a barra de aço, foi também observado uma diminuição da amplitude, em contraste com o aumento das velocidades ao atravessar o reforço de aço.

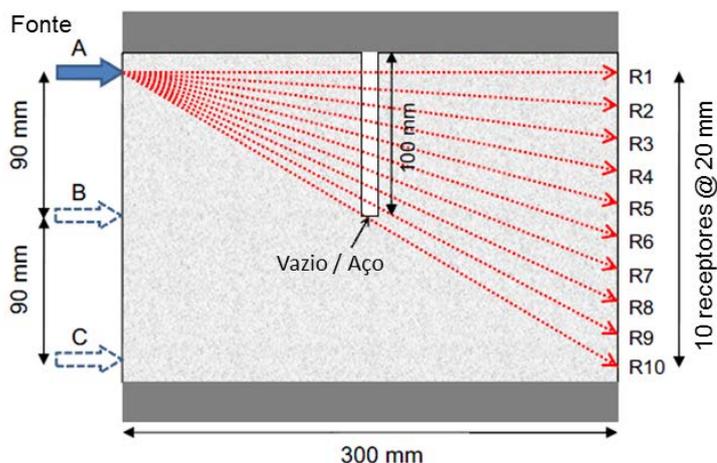


Figura 2.33 – Modelo geométrico e localização de sensores (Adaptado: CHAI et al., 2011)

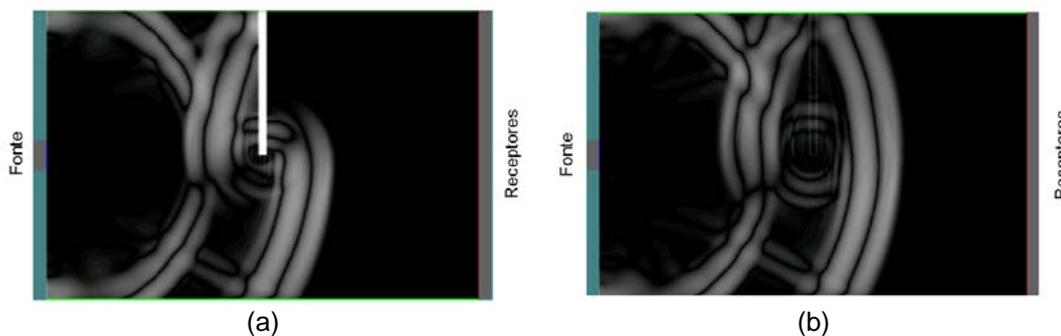


Figura 2.34 – Fotografia de simulação de onda, a) Modelo com vazio, b) Modelo com barra de aço (Adaptado: CHAI et al., 2011).

Posterior ao estudo anterior foi realizada uma tomografia por atenuação em três dimensões de um bloco de concreto com um defeito no seu interior. As dimensões do bloco concretado são 200 x 200 x 300 mm e para o defeito foi utilizado um quarto de chapa circular de isopor de diâmetro 300 mm. Foram feitas um total de 162 medições com uma frequência 110 kHz. A Figura 2.35 apresenta os detalhes da amostra utilizada, o arranjo dos sensores e os trajetos das leituras feitas.

A Figura 2.36 apresenta os resultados da tomografia por velocidade e por atenuação de onda. As duas imagens tomográficas permitem identificar o defeito, no entanto os resultados experimentais confirmaram uma maior sensibilidade da atenuação das ondas em comparação com a velocidade quando viajam através de um defeito.

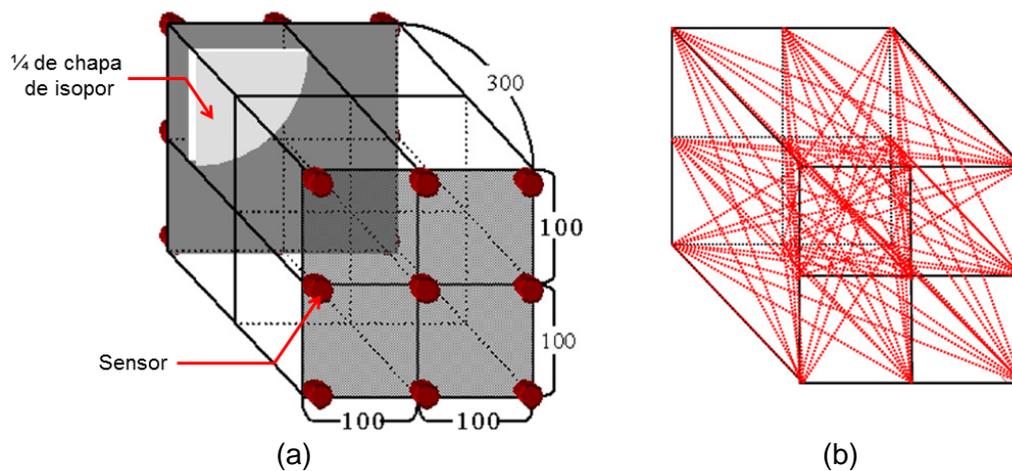


Figura 2.35 – Detalhes da amostra com defeito artificial, a) Arranjo dos sensores, b) Leituras de ultrassom (Adaptado: CHAI et al., 2011)

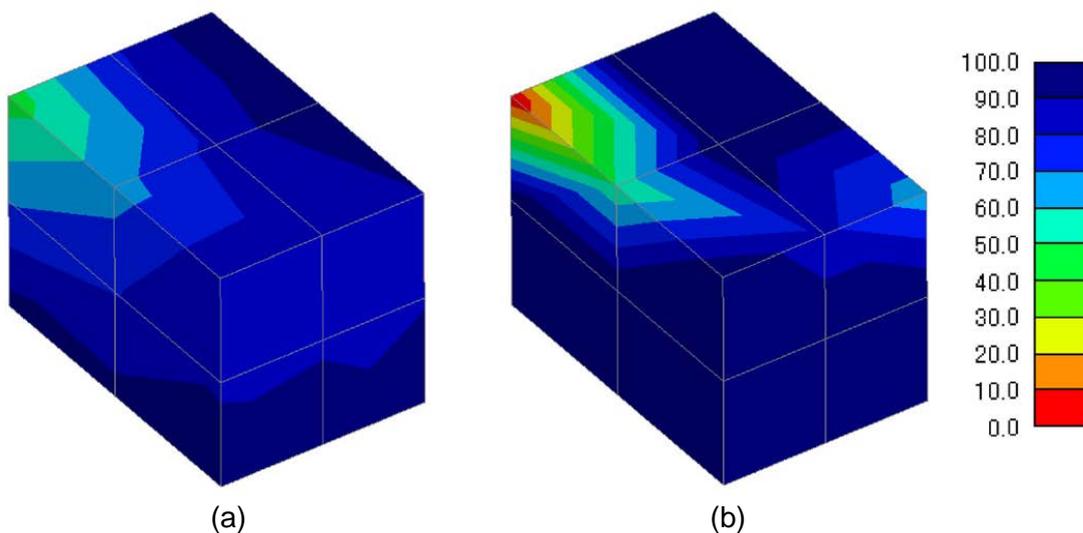


Figura 2.36 – Tomogramas por: a) velocidade de ultrassom, b) amplitude de onda (CHAI et al., 2011)

Chai et al. (2011) concluíram finalmente que a elevada sensibilidade da atenuação é capaz de proporcionar uma melhor visualização das não homogeneidades como fissuras e aço de reforço. Além disso, os aspectos microestruturais do concreto como agregados, areia, poros, etc., também influenciam a atenuação geral; no entanto, qualquer medição de dispersão é insuficiente para mascarar a clara diminuição da amplitude de, pelo menos, uma ordem de grandeza devido à presença de defeitos que possuem impedância acústica muito mais baixa.

Por ultimo, Perlin e Pinto (2013) realizaram uma pesquisa visando avaliar a eficácia da técnica da tomografia por ultrassom na detecção de não homogeneidades internas e desenvolveram um software que possibilita a identificação de não homogeneidades dentro do concreto por meio de imagens de seções transversais.

A parte experimental da pesquisa foi realizada sobre quatro corpos de prova cúbicos de concreto de 20 cm de aresta, dentro dos quais diferentes geometrias de isopor foram inseridas no meio dos blocos antes da concretagem. As leituras foram feitas com transdutores de 200 kHz, colocados nas quatro faces dos blocos, sobre uma malha de 2,5 cm, analisando apenas o plano horizontal médio dos corpos de prova, exatamente no meio das não homogeneidades de isopor como é apresentado na Figura 2.37.

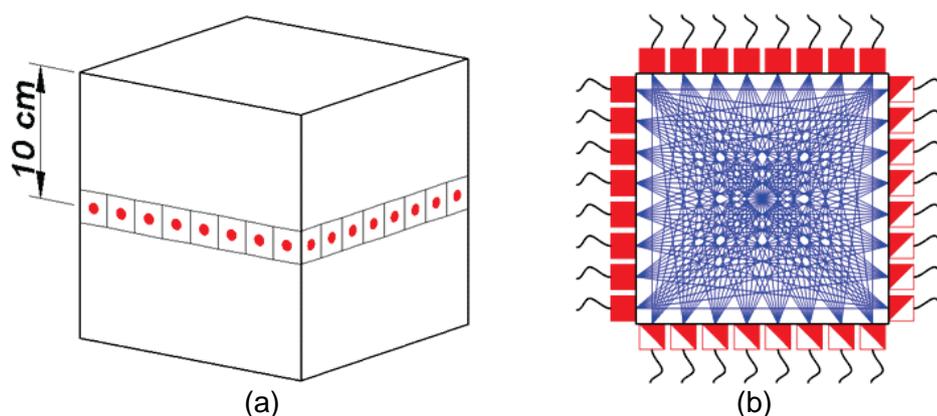


Figura 2.37 – Posicionamento dos transdutores. a) Localização dos pontos de leitura. b) Leituras no plano analisado (PERLIN; PINTO, 2013)

A Figura 2.38 apresenta os quatro casos de estudo e os resultados do tomogramas. As imagens dos dois primeiros casos representaram com sucesso a seção analisada identificando-se claramente o bloco de isopor no meio do elemento.

A imagem tomográfica do caso três apresenta uma região de baixa velocidade em forma de ovalo, com maior dimensão perpendicular ao plano do bloco de isopor. As leituras de ultrassom que se propagam pelo centro do isopor são as

mais afetadas pela sua retangularidade, devido à necessidade de contorná-lo. Desse modo, tais leituras tornam-se mais lentas e o processamento tomográfico confere essa lentidão aos elementos discretizados no centro do isopor e regiões perpendiculares ao mesmo; tal efeito foi denominado de efeito parede (PERLIN; PINTO, 2013).

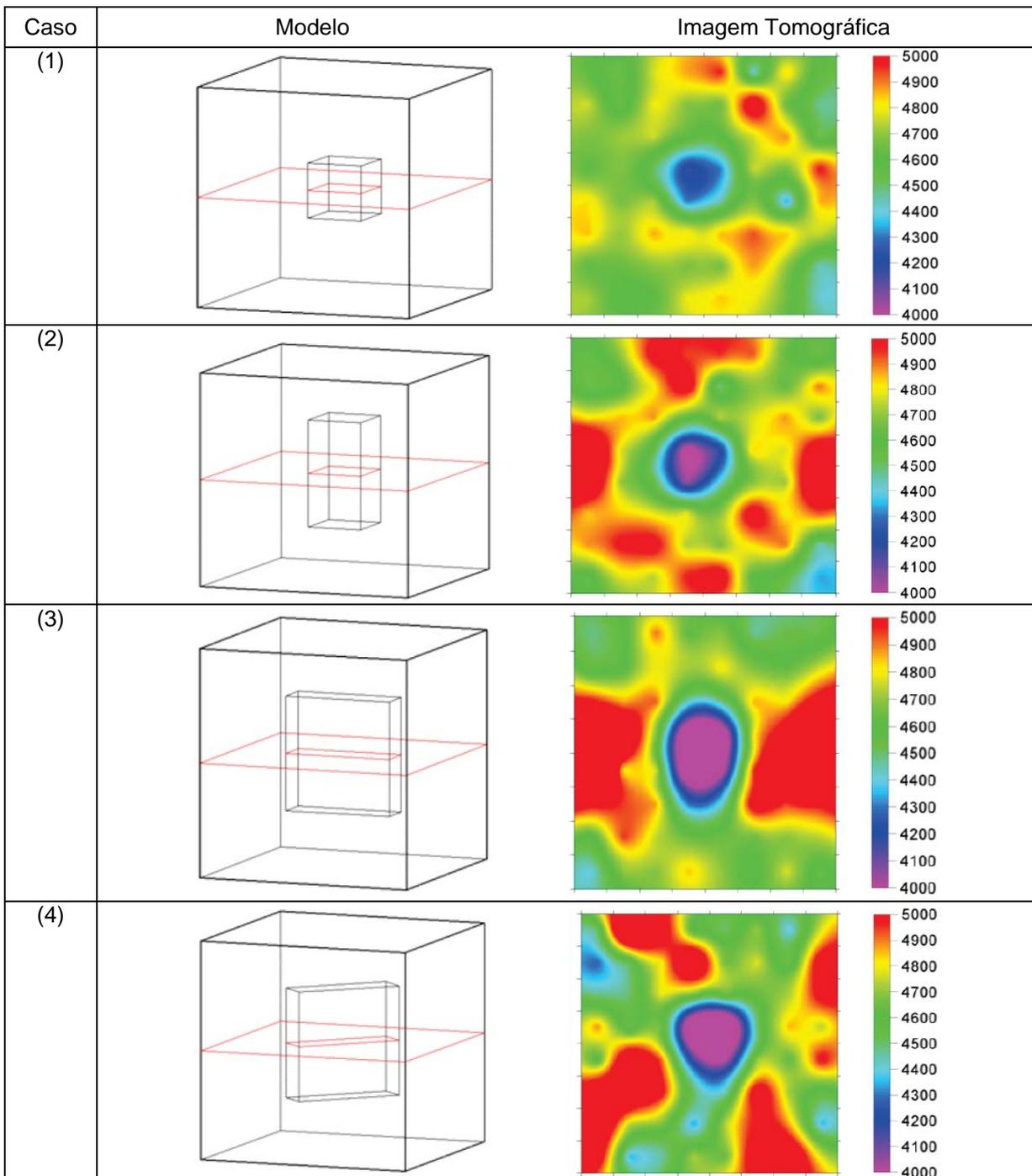


Figura 2.38 – Modelos estudados e imagens tomográficas (PERLIN; PINTO, 2013)

A imagem tomográfica do caso quatro apresentou um comportamento semelhante ao tomograma do caso três, com o mesmo efeito parede causando uma forma circular ao defeito inserido no bloco de concreto.

Dos resultados das imagens é possível observar que os tomogramas bidimensionais produzidos pelos transdutores de 200 kHz apresentaram uma boa representação das seções dos modelos analisados.

Perlin e Pinto (2013) concluem que o uso da tomografia ultrassônica tem um grande potencial na avaliação não destrutiva de estruturas com problemas patológicos diversos.

Como se observa através das diversas pesquisas apresentadas, a técnica da tomografia ultrassônica é uma ferramenta poderosa para a avaliação do estado interno e externo do concreto, porém é uma linha de pesquisa muito ampla e ainda existem algumas incertezas na hora de realizar os ensaios de ultrassom e de construir as imagens tomográficas. Neste sentido, esta pesquisa busca contribuir no estudo da técnica da tomografia ultrassônica aplicada no concreto, avaliando parâmetros fundamentais que podem ajudar a aperfeiçoar a realização dos ensaios e a reconstrução das imagens.

2.4. Fundamentação matemática da Tomografia Ultrassônica

O princípio da reconstrução de imagem é baseado em que um objeto pode ser reproduzido exatamente a partir de um conjunto de projeções tiradas de diferentes ângulos. Na prática, pode-se obter uma estimativa da imagem real do objeto em estudo, no entanto a fidelidade da reconstrução depende dos processos de aquisição e pré-processamento dos dados e da implementação numérica dos métodos de reconstrução.

Como já foi apresentado anteriormente, a tomografia ultrassônica é utilizada com sucesso em diversos casos da engenharia. Devido às correlações entre a

velocidade dos pulsos e a qualidade do concreto, informações valiosas podem ser exploradas por um tomograma, onde as áreas que exibem velocidades menores de 3500 m/s são consideradas de integridade regular, enquanto que as áreas com velocidades acima de 3500 m/s são consideradas de qualidade aceitável (Aggelis et al. 2011). Do anterior então é válido afirmar que a velocidade de onda é um dos parâmetros mais importantes nos ensaios de ultrassom e por isso é a grandeza física na qual vai ser focado o desenvolvimento matemático e o estudo da tomografia por ultrassom desta pesquisa.

Quando um impulso é introduzido no material, com geometria e distância entre transdutores conhecida, é possível determinar a velocidade de onda do material como a relação entre o comprimento total percorrido pela onda e o tempo de propagação medido pelo aparelho de ultrassom, conforme a Equação 2.1 do item 2.2.1.

Um dos conceitos básicos da tomografia é a discretização da secção transversal analisada com uma malha retangular de N elementos. Considerando o percurso de onda ultrassônica apresentado na Figura 2.39, percebe-se que o pulso ultrassônico percorre diferentes elementos com distâncias variáveis em cada elemento. A distância total L percorrida é dada pela soma das distâncias percorridas em cada elemento (ΔL). Analogamente, a soma dos tempos de percurso em cada elemento resulta no tempo total T (PERLIN; PINTO, 2013). Portanto, o tempo de viagem T entre dois pontos (emissor e receptor) é dado pela Equação 2.7.

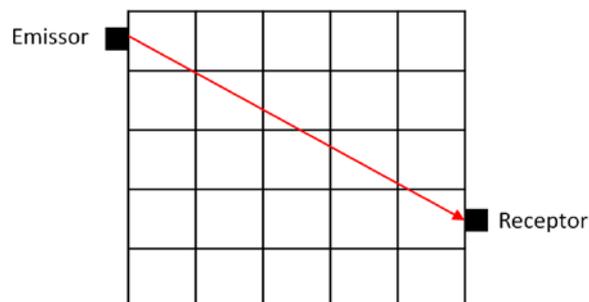


Figura 2.39 – Leitura no modelo discretizado

$$T = \sum_i \frac{\Delta L_i}{V_i} \quad \text{Equação 2.7}$$

No caso de realizar diversas medições variando os pontos de emissão e recepção, pode ser analisado um padrão denso de percursos de onda o que é mais representativo de todo o volume. Desta forma, cada nova leitura efetuada cria uma nova equação igual à Equação 2.7 resultando na Equação 2.8 onde j é o número da medição e i é o número do elemento. Quando forem efetuadas todas as leituras (m), tem-se um sistema de equações onde as incógnitas são as velocidades de propagação da onda ultrassônica em cada elemento da malha.

$$T^j = \sum_i \frac{\Delta L_i^j}{V_i} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad \text{Equação 2.8}$$

A Equação 2.8 representa um sistema de equações lineares, que poderia ser resolvido por técnicas convencionais como o método dos Mínimos Quadrados, regra de Cramer e o método de Gauss, entre outros. Além dos métodos anteriores, têm sido desenvolvidas diversas técnicas iterativas dentre os quais se destacam a Técnica de Reconstrução Algébrica (ART), a Técnica de Reconstrução Algébrica Simultânea (SART) e a Técnica de Reconstrução Iterativa Simultânea (SIRT).

A implementação do programa computacional proposto nesta pesquisa será uma modificação do software “TUSom – versão beta”, desenvolvido na Escola de Engenharia de Estruturas da Universidade de São Paulo. TUSom é um programa que mapeia as velocidades dos pulsos ultrassônicos medidas num plano escolhido do sólido de geometria conhecida e por meio de algoritmos de geração de imagem retorna como resultado uma imagem tomográfica da seção transversal do sólido analisado. A modificação do programa será descrita mais para frente, mas vale ressaltar que os métodos de reconstrução de imagens implementados serão os mesmos, isto é para a resolução do sistema de equações será possível de se realizar através dos métodos de Mínimos Quadrados, ART ou SIRT.

2.4.1. Método dos Mínimos Quadrados

Utilizando o método dos mínimos quadrados pode-se calcular o quadrado dos resíduos entre medições experimentais e medições teóricas, conforme a Equação 2.9.

$$r^2 = \sum_j (T_{\text{exp}}^j - T^j)^2 = \sum_j \left(T_{\text{exp}}^j - \sum_i c_i \cdot \Delta L_i^j \right)^2 \quad \text{onde, } c_i = \frac{1}{V_i} \quad \text{Equação 2.9}$$

Uma condição necessária sobre o valor dos coeficientes c_i para que r^2 seja mínimo é $\partial r^2 / \partial c_i = 0$. Minimizando este resíduo tem-se uma estimativa teórica do valor das velocidades em cada elemento em função das medições realizadas.

Este método pode apresentar restrições na hora de resolver o problema, pois pode acontecer que o número de equações seja diferente do número de incógnitas. Além disso, há equações linearmente dependentes, o que podem tornar o problema singular (PERLIN; PINTO, 2013). Neste sentido, dependendo da quantidade e de quais leituras foram realizadas, pode-se ter um problema sem solução adequada a todas as leituras (problema inconsistente), com solução única (problema determinado) ou com mais de uma solução (problema indeterminado).

2.4.2. Técnica de Reconstrução Algébrica

No caso dos processos iterativos, o método ART foi proposto simultaneamente por Gordon, Bender e Herman (1970) e por Hounsfield (1972), e foi derivado de um procedimento simples de projeções ortogonais proposto por Kaczmarz para resolver sistemas de equações lineares. O método busca a solução do problema a partir de uma estimativa inicial, no conjunto de soluções das equações lineares, onde cada um desses conjuntos é um hiperplano. O procedimento de resolução começa com uma estimativa inicial arbitrária do vetor de velocidades ($\vec{f}^{(0)}$) e projeta-se sobre a linha correspondente à primeira equação (p_1)

obtendo-se uma nova estimativa para o vetor de velocidades ($\vec{f}^{(1)}$). O ponto resultante agora é projetado sobre a linha que representa a segunda equação (p_2) obtendo-se uma nova estimativa para o vetor de velocidades ($\vec{f}^{(2)}$) e assim por diante (KALK; SLANEY, 1988). Se existirem apenas duas equações o processo iterativo continua, tal como é ilustrado na Figura 2.40, até atingir a convergência num valor único de vetor de velocidades.

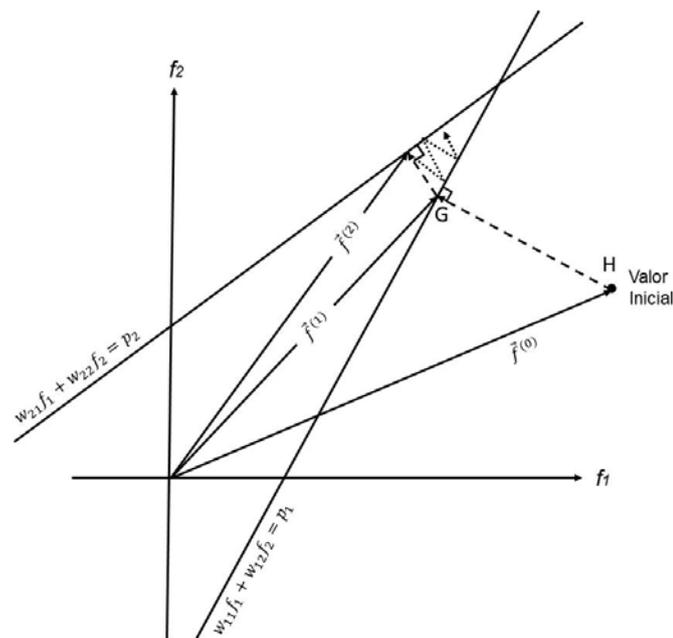


Figura 2.40 – Resolução pelo método ART para o caso de duas equações. (Adaptado: KALK; SLANEY, 1988)

Se o sistema for composto por várias equações, o problema pode ou não convergir para uma única solução onde a presença de ruído influencia consideravelmente. Isto é, se o número de equações (medições) for maior que o número de elementos (incógnitas) pode haver convergência para uma única solução, no entanto o ruído pode fazer que o método não encontrasse a convergência, oscilando ao redor das interseções das equações (Figura 2.41). Se o número de equações for menor que o número de elementos, não existe uma única solução, de fato, é possível obter um número infinito de soluções, neste caso a solução obtida dependerá da estimativa inicial (KALK; SLANEY, 1988).

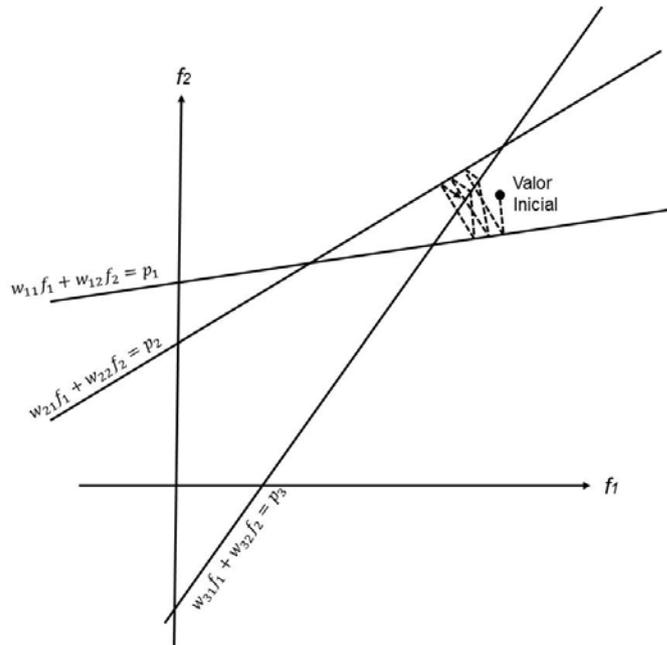


Figura 2.41 – Resolução pelo método ART quando o número de equações é maior do que o número de incógnitas. (Adaptado: KALK; SLANEY, 1988)

Quando $\vec{f}^{(i-1)}$ é projetado no hiperplano representado pela i -ésima equação resultando em $\vec{f}^{(i)}$, o processo pode ser matematicamente descrito pela Equação 2.10.

$$\vec{f}^{(i)} = \vec{f}^{(i-1)} - \frac{(\vec{f}^{(i-1)} \cdot \vec{w}_j - p_j)}{\vec{w}_j \cdot \vec{w}_j} \vec{w}_j \quad \text{Equação 2.10}$$

Onde,

p_j representa o tempo total T da medição j ,

w_j é a distância percorrida em cada elemento (ΔL),

\vec{f} equivale ao inverso da velocidade em cada elemento ($1/V_i$).

É importante considerar que a reconstrução de imagens pelo método ART pode sofrer problemas de ruído causado por inconsistências introduzidas no conjunto de equações devido ao processo iterativo (KALK; SLANEY, 1988). O

algoritmo SIRT também sofre destas inconsistências, no entanto existe uma redução significativa do ruído. Nesta abordagem a convergência é mais lenta, mas normalmente leva a melhores imagens do que as produzidas pelo ART.

2.4.3. Técnica de Reconstrução Iterativa Simultânea

O algoritmo SIRT é uma implementação paralela do algoritmo ART. Neste caso a projeção é feita em todos os conjuntos de hiperplanos ao mesmo tempo (Figura 2.42). No processo iterativo, a atualização do vetor de velocidades para $\vec{f}^{(i)}$ é feita com a média de todos os pontos mais próximos (de todas as projeções) ao ponto atual, sendo que essa média resultará no ponto a ser utilizado no próximo passo iterativo (PERLIN; PINTO, 2013). Matematicamente o processo do método SIRT pode ser escrito como a Equação 2.11, onde $\lambda = 1/m$ e m é número total de equações do sistema.

$$\vec{f}^{(i)} = \vec{f}^{(i-1)} - \sum_j \lambda \frac{(\vec{f}^{(i-1)} \cdot \vec{w}_j - p_j)}{\vec{w}_j \cdot \vec{w}_j} \vec{w}_j \quad \text{Equação 2.11}$$

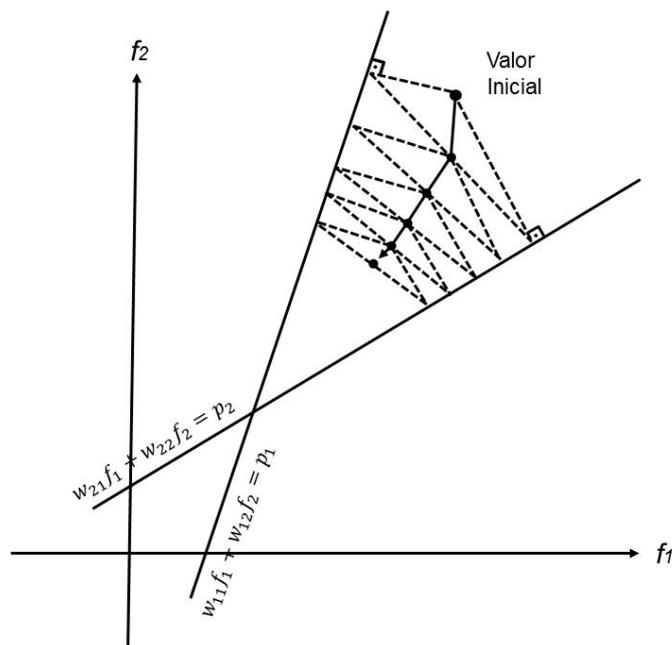


Figura 2.42 – Resolução pelo método SIRT para o caso de duas equações.

2.5. Resumo

Este capítulo procurou apresentar primeiramente uma breve descrição da importância e da utilização dos ensaios não destrutivos aplicados no concreto. Seguidamente foi abordada mais amplamente a técnica de ultrassom, apresentando seu princípio de funcionamento e equipamento, alguns dos fatores mais relevantes que influenciam nas medições, diferentes aplicações focadas no controle de qualidade e na análise de deterioração do concreto, e, por último, foram apresentadas algumas pesquisas recentes aplicadas no concreto.

Posteriormente, como uma das aplicações mais complexas dentro dos ensaios de ultrassom e sendo o foco desta pesquisa, foi apresentada a técnica de tomografia ultrassônica aplicada no concreto apresentando diversos estudos encontrados na literatura baseados na detecção de não homogeneidades ou defeitos internos em estruturas de concreto.

Por fim, foram descritas brevemente três técnicas de reconstrução de imagens tomográficas, sendo o método de Mínimos Quadrados, a Técnica de Reconstrução Algébrica e a Técnica de Reconstrução Iterativa Simultânea. Estas técnicas são utilizadas na versão beta de TUSom para a geração de imagens e continuam sendo as técnicas utilizadas na nova versão de TUSom proposta nesta pesquisa.

3. PROGRAMA COMPUTACIONAL

Neste capítulo pretende-se, primeiramente, apresentar brevemente o funcionamento da versão beta de TUSom; em seguida, é descrito de forma mais ampla cada processo implementado na nova versão de TUSom. Além disso, é apresentado o fluxograma do código computacional e figuras que exibem a interface do programa proposto neste trabalho.

3.1. Software TUSom: versão beta

A versão beta de TUSom é um programa que mapeia as velocidades dos pulsos ultrassônicos medidas num plano escolhido do sólido de geometria conhecida e, por meio de algoritmos de geração de imagens, retorna como resultado uma imagem tomográfica da seção transversal do sólido analisado. O código encontra-se desenvolvido em linguagem Pascal utilizando o ambiente de programação Delphi7.

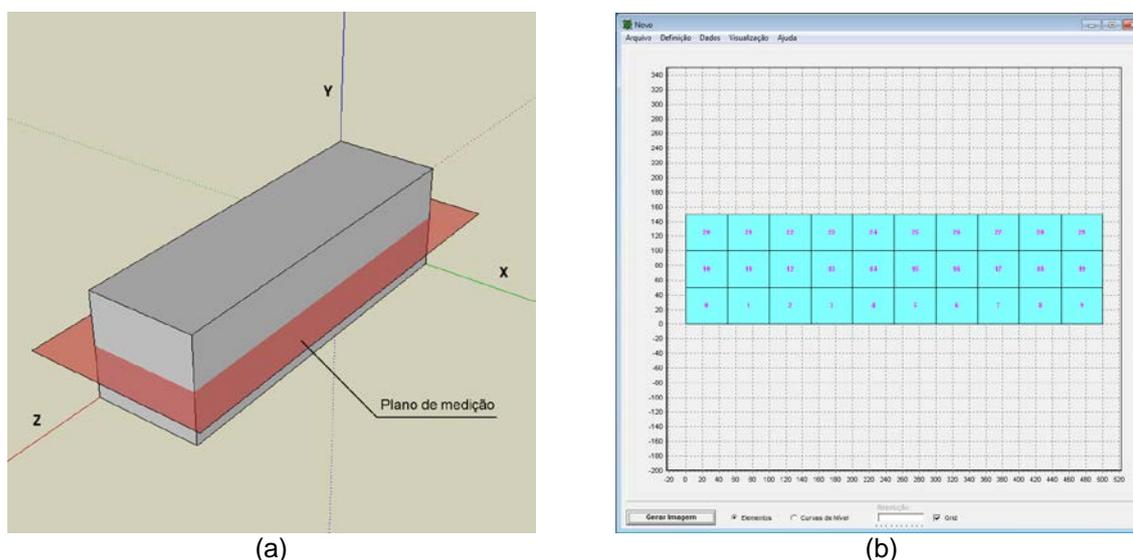


Figura 3.1 – Seção analisada a) Objeto de estudo, b) Malha de discretização da seção em TUSom

O processo básico de TUSom começa pela inserção dos dados geométricos do objeto estudado tais como as dimensões e a malha adotada. O programa

funciona em modo bidimensional, neste sentido é necessário definir a seção do objeto desejada para a análise (Figura 3.1a). A malha é uma referência para o posicionamento dos transdutores e seu tamanho é geralmente função do diâmetro dos transdutores utilizados para as medições (Figura 3.1b).

Posteriormente à definição da geometria, devem-se definir as coordenadas dos pontos de medição e a trajetória das medições, isto é, indicar quais dos pontos são emissores e quais são receptores (Figura 3.2a). Uma vez feitas às leituras de ultrassom experimentalmente, é necessário inserir os resultados dos tempos de propagação das respectivas leituras; este processo pode ser realizado manualmente ou importando os dados desde um arquivo de texto.

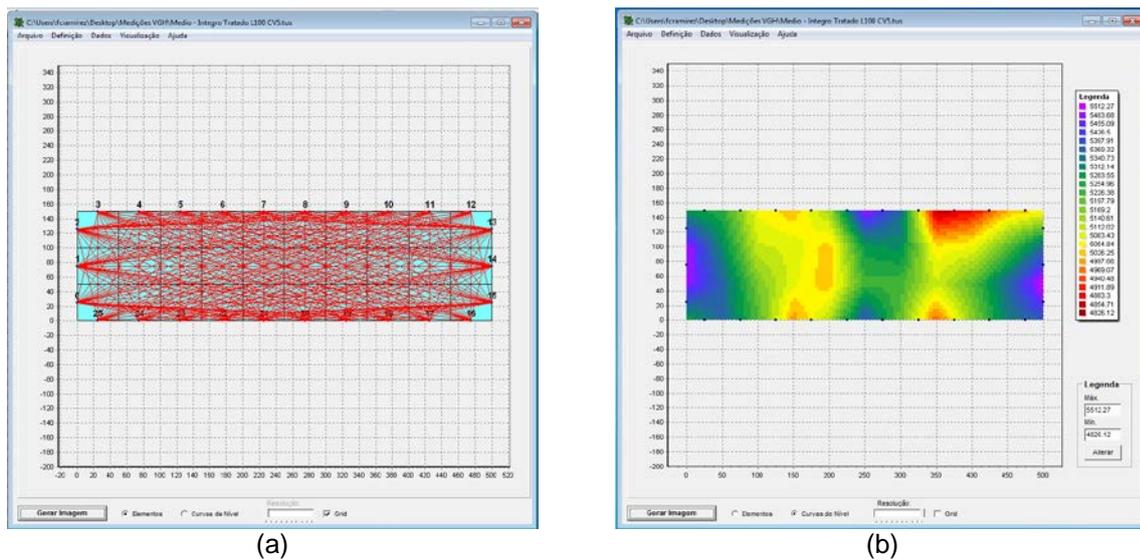


Figura 3.2 – Formato final de TUSom versão beta: a) Pontos e trajetórias de medição, b) Imagem tomográfica da seção estudada.

O programa aceita dados de leituras tanto direitas ortogonais ou oblíquas quanto leituras semidiretas. Além disso, os trajetos dos pulsos são considerados retilíneos, conectando o ponto médio de emissão com o ponto médio de recepção.

O passo seguinte é escolher o método de geração de imagem desejado entre o método de Mínimos Quadrados, ART ou SIRT. Em seguida, o algoritmo calcula as

distâncias percorridas em cada elemento discretizado da malha para cada pulso emitido desde o emissor até o transdutor.

Com os caminhos dos pulsos determinados em cada elemento para todas as leituras e com os dados dos tempos de propagação de cada leitura, começa o processo de resolução do método de reconstrução escolhido. O resultado é exibido em uma escala de cores na tela do programa (Figura 3.2b).

O fluxograma da Figura 3.3 apresenta, basicamente o procedimento implementado no TUSom para a geração de imagens tomográficas.

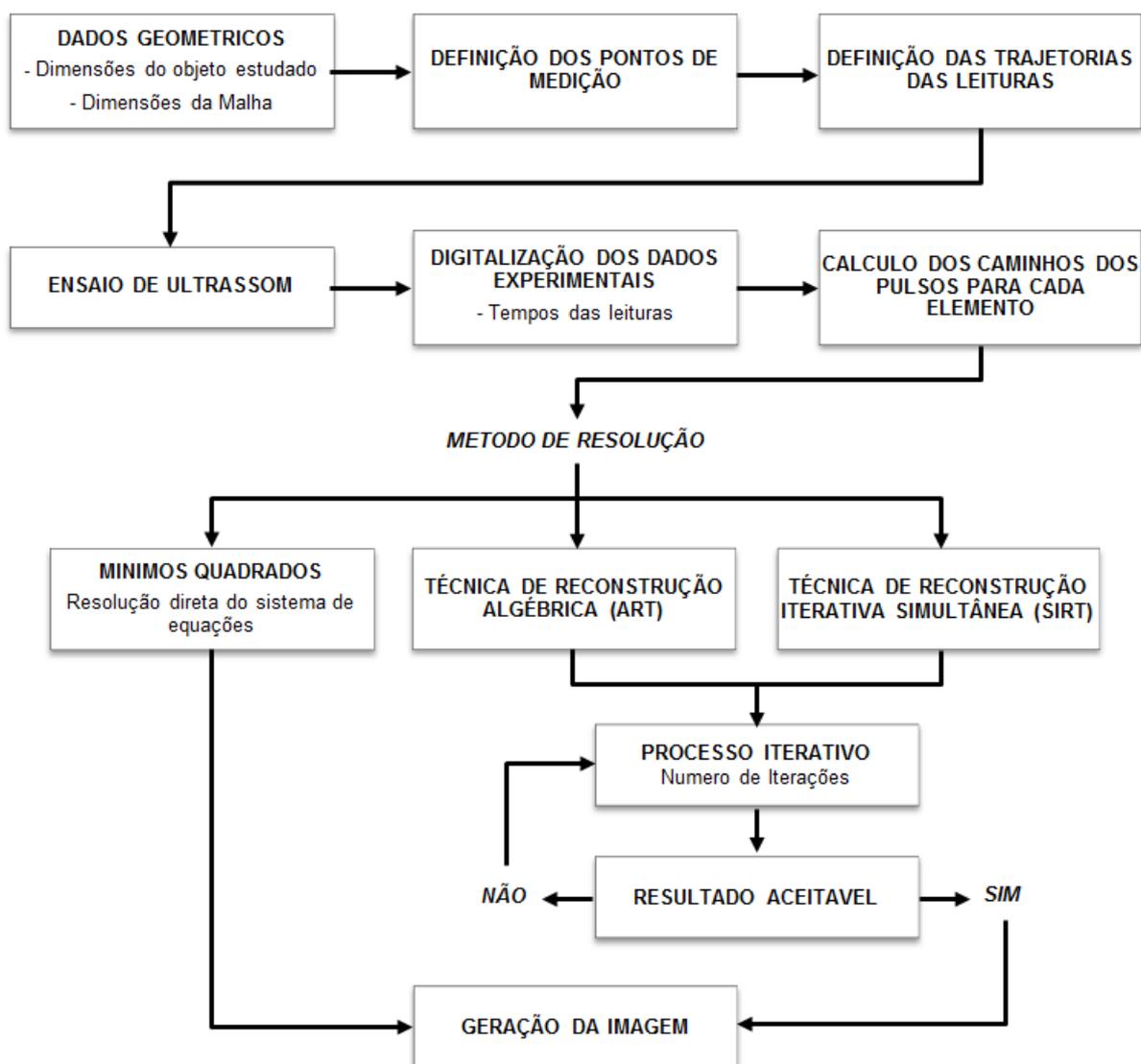


Figura 3.3 – Fluxograma de funcionamento de TUSom

3.2. Software TUSom: versão nova

A nova versão proposta de TUSom adota os mesmos processos de funcionamento e fundamentos matemáticos que a versão beta. A modificação do programa permite gerar três imagens simultaneamente de três planos diferentes do objeto estudado a partir de medições feitas em qualquer das superfícies; o usuário tem a opção de escolher a profundidade em cada plano para visualizar a seção desejada. A continuação é apresentada a descrição de cada etapa do código computacional.

3.2.1. Dados geométricos: dimensões e malha

A diferença com a versão beta de TUSom consiste em mudar o funcionamento em modo bidimensional para modo tridimensional. Neste caso somente são aceitos paralelepípedos retos e devem ser inseridos no programa os dados de base, altura e profundidade. A Figura 3.4 apresenta um exemplo da diferença entre a geometria inserida na versão beta do programa TUSom e na versão proposta nesta pesquisa.

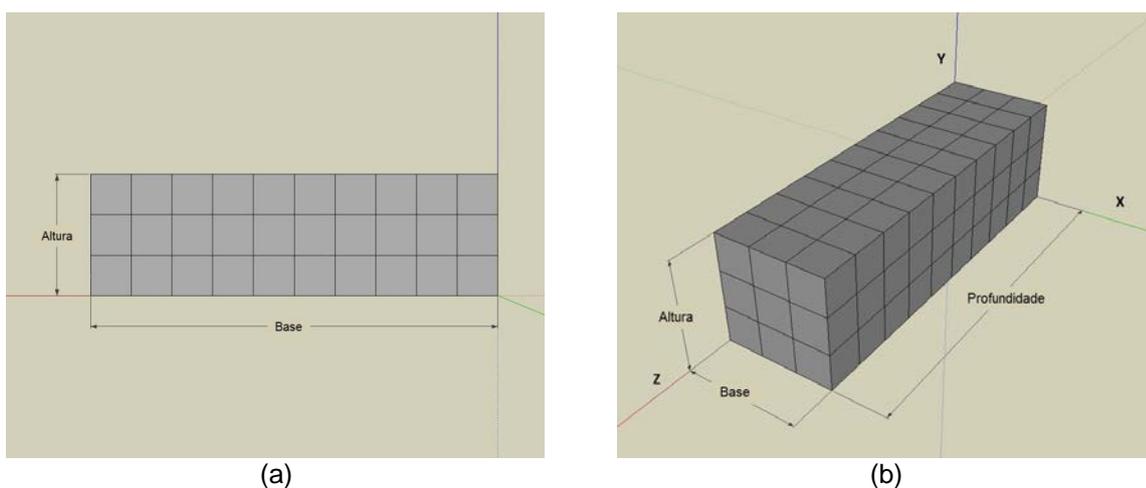


Figura 3.4 – Dados geométricos inseridos em TUSom: a) versão beta, b) versão nova.

Além das dimensões do objeto, é necessário definir o tamanho da malha em que vai ser discretizado o objeto estudado para poder levar a cabo o processo de reconstrução de imagens. Uma vez inseridas as dimensões da malha, são criados pequenos elementos quadrados definidos pelas coordenadas de seus quatro vértices. A ordem e a posição de cada elemento são armazenadas em uma sequência lógica dos elementos dentro de variáveis utilizadas para o processo tomográfico.

3.2.2. Definição dos pontos de medição

Os pontos de medição são definidos por coordenadas em três dimensões e devem ser inseridos um por um no programa. TUSom permite inserir pontos em qualquer das superfícies do objeto estudado. Uma aproximação habitual é adotar a localização de cada ponto como o centro dos transdutores (emissor e receptor) e o meio das faces dos elementos discretizados externos.

Cada ponto é identificado pela ordem em que é inserido, começando desde zero até n . A localização de cada ponto de emissão e recepção será utilizada para o cálculo do comprimento dos pulsos em cada elemento discretizado. Da mesma forma que no item anterior, a Figura 3.5 apresenta um exemplo da localização dos pontos de leitura no programa TUSom.

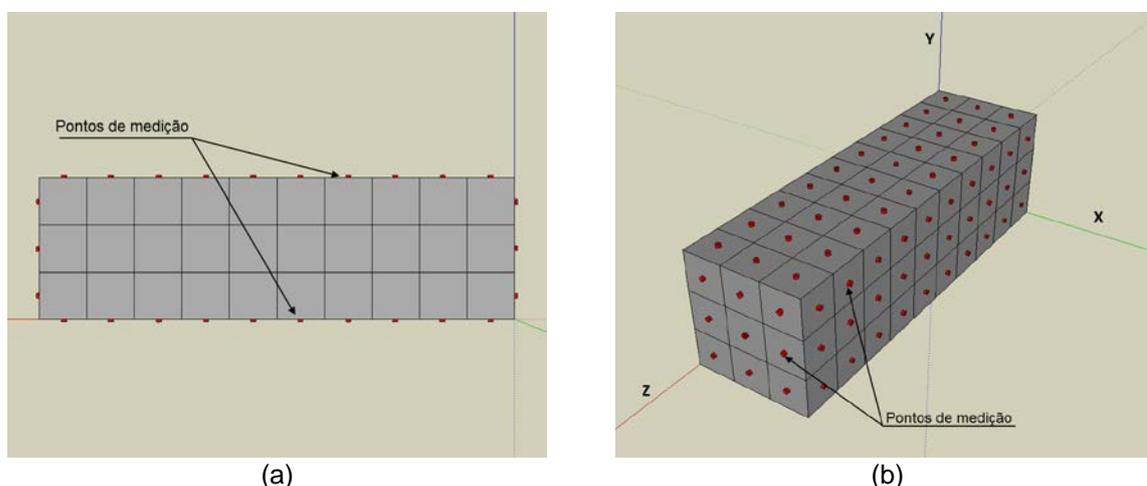


Figura 3.5 – Pontos de leitura inseridos em TUSom: a) versão beta, b) versão nova.

3.2.3. Definição da trajetória dos pulsos

A trajetória da cada leitura é considerada retilínea e está definida pela união de dois pontos de medição (emissor e receptor). Como já foi mencionado anteriormente, o programa aceita dados de leituras tanto direitas ortogonais ou oblíquas quanto leituras semidiretas.

O percurso de cada leitura é utilizado para calcular posteriormente a distância percorrida em cada elemento discretizado pelo pulso. Na Figura 3.6 pode-se observar a diferença entre o modo bidimensional e tridimensional na hora de inserir uma possível leitura no programa TUSom.

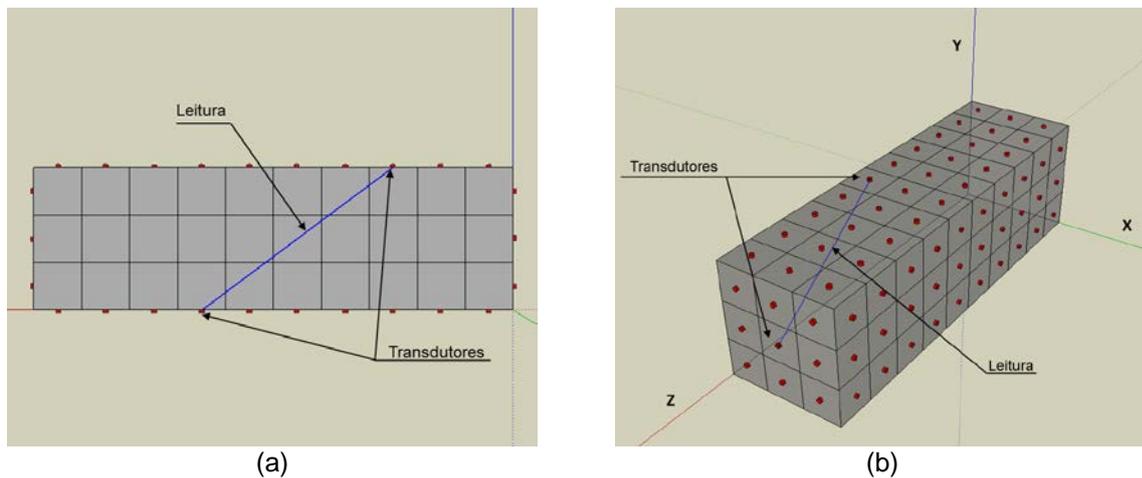


Figura 3.6 – Representação de leitura em TUSom: a) versão beta, b) versão nova.

Uma vez definidas as trajetórias, devem-se identificar as faces e os pontos de medição sobre o objeto estudado para realizar o ensaio de ultrassom. Posteriormente os dados dos tempos de cada leitura tomados no ensaio devem ser digitalizados no programa.

3.2.4. Cálculo dos caminhos dos pulsos

Nesta etapa do processo são calculadas as distâncias dos caminhos em cada elemento discretizado que percorre cada pulso entre os pontos de emissão e

recepção. Para este processo o software encontra os pontos de interseção de cada percurso e a grade da malha adotada para a discretização. Uma vez encontrados esse pontos de interseção, é calculado o comprimento do percurso do pulso em cada elemento.

Na versão beta de TUSom cada elemento discretizado está definido por quatro linhas retas que unem seus quatro vértices. O algoritmo implementado consiste que calcular o ponto de interseção entre a reta que representa cada leitura e as linhas que conformam cada elemento. Neste sentido, o algoritmo verifica se a linha de cada leitura cruza ao menos duas linhas de um elemento e armazena uma listagem das distâncias trafegadas em cada elemento para cada leitura.

No caso da versão nova, o procedimento é similar ao implementado na versão beta, sendo que agora as grades da malha não são linhas senão planos. Cada elemento discretizado no programa está definido por seis planos formando um cubo e o algoritmo verifica se o percurso de cada leitura cruza ao menos dois planos de cada elemento. Uma vez calculados os percursos em cada elemento para cada leitura, os dados são armazenados num vetor e este é utilizado posteriormente para realizar o processo tomográfico.

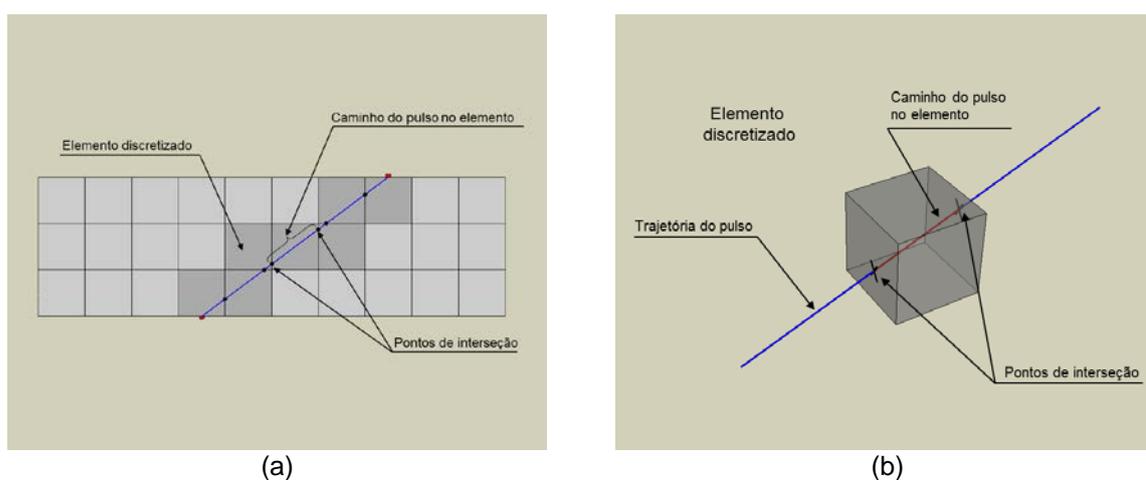


Figura 3.7 – Representação dos pontos de interseção entre o percurso do pulso e a grade da malha adotada a) versão beta, b) versão nova.

3.2.5. Processo de reconstrução de imagens

Com os dados dos tempos das leituras inseridos no programa e uma vez determinados os caminhos dos pulsos para cada leitura em cada elemento discretizado, o programa está pronto para começar o processo de reconstrução das imagens.

O programa pode resolver o sistema de equações por meio de três métodos diferentes explicados anteriormente no item 2.4; dois deles são os métodos iterativos ART e SIRT que dependem do número de iterações que seja introduzido pelo usuário e o outro é o método direto dos Mínimos Quadrados.

A resolução do método escolhido pelo usuário gera um vetor de velocidades, onde cada elemento discretizado tem um valor específico de velocidade. O resultado é exibido através de um mapa de cores que pode ser apresentado por meio de valores discretos ou valores contínuos. Na primeira opção, uma cor é aplicada à malha de elementos de acordo com sua velocidade em uma escala de cores (Figura 3.8a). Na segunda opção, as velocidades dos elementos são transpostas para os nós da malha; a média das velocidades é calculada em cada nó e uma interpolação linear é aplicada entre os nós, a fim de criar um mapa de velocidades contínuo (Figura 3.8b).

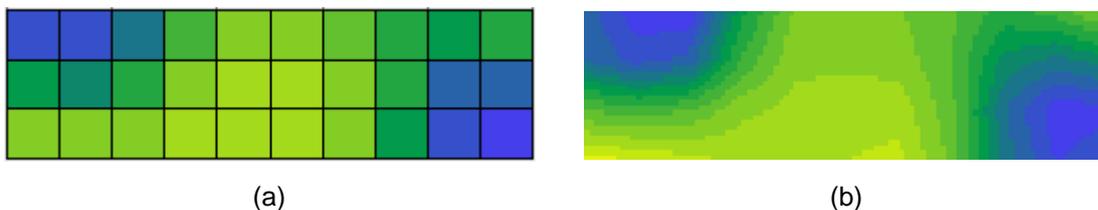


Figura 3.8 – Apresentação de imagens em TuSom, a) valores discretos, b) valores contínuos

3.2.6. Interface gráfica do programa TUSom

Com os processos abordados nos itens anteriores implementados no programa, foi criada a nova versão de TUSom que funciona em modo tridimensional. Em seguida é apresentado o formato final do programa proposto.

O programa consta de uma janela inicial que contém o *menu principal* e que conduz a diferentes janelas secundárias onde são inseridos todos os diferentes parâmetros necessários para o funcionamento de TUSom.

A Figura 3.9 apresenta a imagem da janela onde são inseridos os dados geométricos das dimensões do objeto estudado e o tamanho da malha desejada. Cabe ressaltar que o programa permite inserir mais de um objeto; isto, a fim de permitir a criação de elementos de diferentes geometrias a partir de vários paralelepípedos e possibilitar a análise de diversas estruturas como, por exemplo, vigas com seção transversal em T (Figura 3.10).

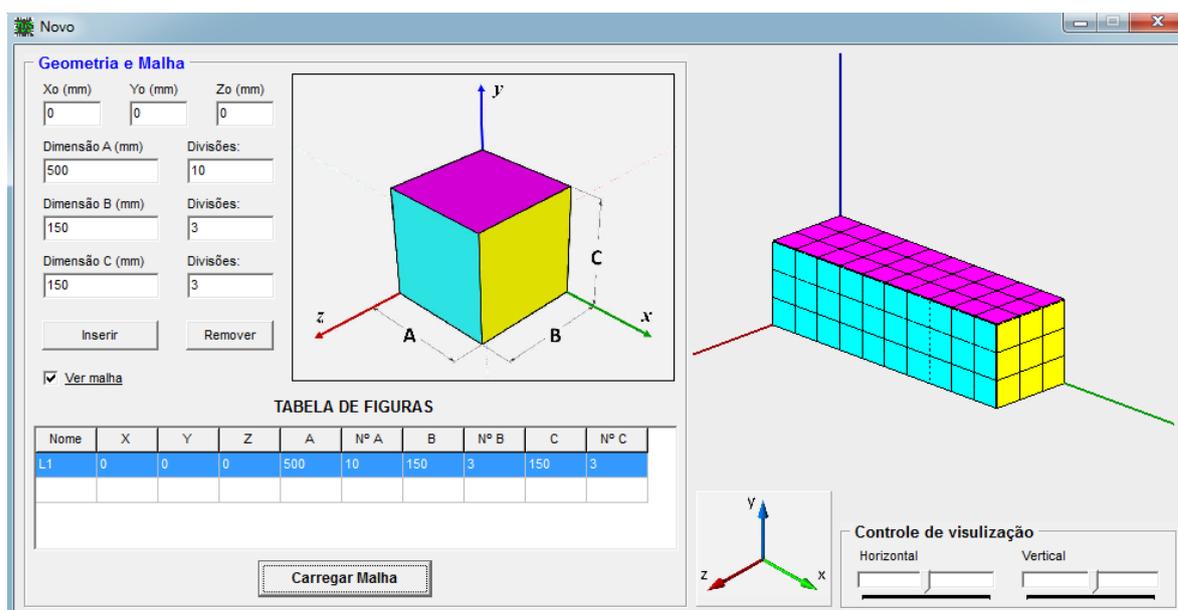


Figura 3.9 – Formato de TUSom para inserir dados geométricos

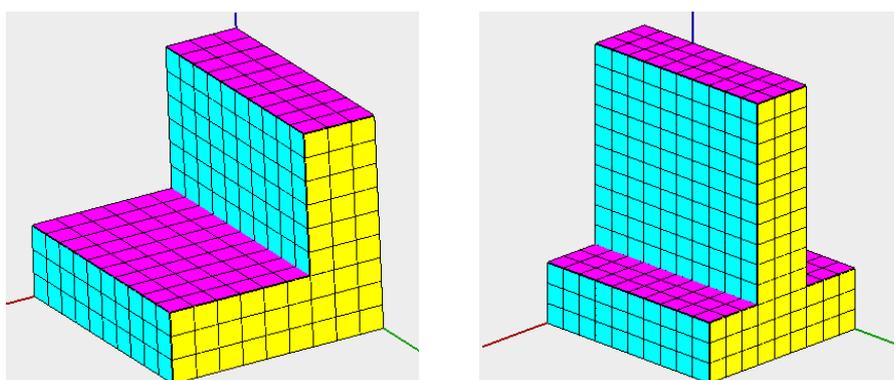


Figura 3.10 – Exemplos de geometrias criadas em TUSom

Com os dados geométricos introduzidos, os pontos de leituras podem ser criados em uma nova janela, inserindo as coordenadas em R3 para cada ponto, conforme a Figura 3.11. Da mesma forma, outra janela é aberta para introduzir a trajetória e os dados experimentais dos tempos das leituras; neste caso basta com definir o ponto de emissão e o ponto de recepção, em seguida podem ser digitados os valores dos tempos de cada leitura obtidos do ensaio experimental de ultrassom (Figura 3.12). Estes dados podem ser digitados um por um ou podem ser importados desde um arquivo de texto, caso a quantidade de leituras seja muito grande.

The screenshot shows a window titled 'Novo' with the subtitle 'Pontos de Medição'. On the left, there are input fields for X (mm) with value 225, Y (mm) with value 150, and Z (mm) with value 75. Below these are 'Inserir' and 'Remover' buttons. On the right, a table is displayed with the following data:

Ponto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
0	25	25	150
1	225	150	75

Figura 3.11 – Formato de TUSom para inserir pontos de leitura

The screenshot shows a window titled 'Linhas de Medição'. It has sections for 'TRANSMISSOR' and 'RECEPTOR' with input fields for 'Ponto Inicial' and 'Ponto Final'. There are also fields for 'Leituras p/ medição' (value 5) and 'Arquivo de Medições'. Buttons include 'Remover', 'Exportar', 'Tratar Dados', 'Inserir Percursos', and 'Inserir Medições'. Below is a table titled 'MEDIÇÕES' with the following data:

Medição	Transmissor	Receptor	L (mm)	L1	L2	L3	L4	L5	Média	Desvio	C.V. (%)	Veloc. (m/s)
0	0	1	247.49						0	0		

Figura 3.12 – Formato de TUSom para inserir trajetórias de medições e tempos de leituras

Para começar o processo tomográfico agora é necessário escolher o método de resolução desejado e definir o número de iterações se o método escolhido for

iterativo. Finalmente as imagens tomográficas em escala de cores são exibidas na janela inicial; o resultado consta de três imagens de seções em planos diferentes do objeto estudado com a possibilidade de variar a profundidade em cada plano para visualizar cada seção (Figura 3.13).

Além disso, o programa gera uma tabela com os dados de velocidades de propagação assim como os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos associados a cada elemento discretizado da malha, calculados a partir da Equação 2.5 do item 2.2.4.

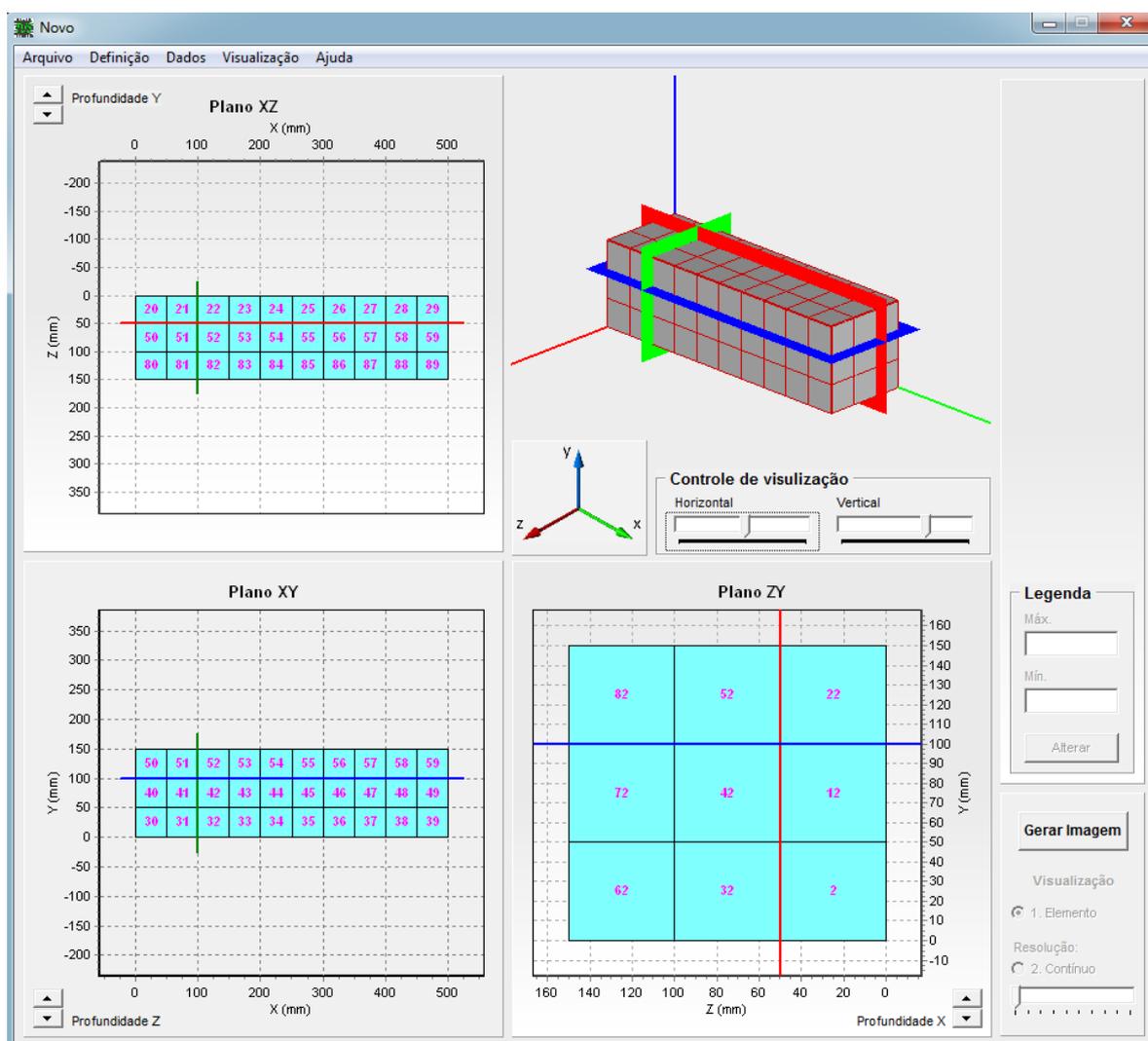


Figura 3.13 – Formato principal de TUSom

3.3. Resumo

O presente capítulo tratou inicialmente da apresentação da versão beta de TUSom desenvolvido pelo professor Doutor Vladimir Guilherme Haach. Isto com o propósito de descrever a funcionalidade do programa e mostrar os processos básicos que segue o código computacional.

Posteriormente foi feita uma descrição mais abrangente da versão de TUSom desenvolvida neste trabalho. Assim, foi possível observar as diferença dos processos de TUSom em modo bidimensional (versão beta) e em modo tridimensional (versão nova).

De maneira geral, para o usuário utilizar o código deve seguir as seguintes etapas:

- inserção das dimensões geométricas do elemento analisado e da malha de discretização adotada;
- entrada das coordenadas dos pontos de medição;
- definição dos trajetos de medições e digitalização dos tempos de propagação dos pulsos obtidos no ensaio de ultrassom;
- definição do método de reconstrução de imagens;

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo contém a descrição em detalhe dos ensaios experimentais realizados nesta pesquisa. O programa experimental foi dividido em três etapas principais e para cada uma delas são expostos as características dos prismas estudados, a metodologia dos ensaios de ultrassom e os parâmetros avaliados.

4.1. Arranjo entre transdutores, frequência e tipo de ondas

A fim de ajustar e validar os processos implementados no programa TUSom, foi levado a cabo uma primeira fase experimental para determinar o arranjo entre transdutores e a combinação de medições que permitisse gerar melhores imagens tomográficas. Além disso, foi avaliada a influência e a sensibilidade de alguns parâmetros como frequência e polarização das ondas.

Para este estudo foram utilizados dois prismas de 50 x 15 x 15 cm concretados com o traço especificado na Tabela 4.1; dentro de um dos prismas (P2) foi inserido um bloco de isopor cilíndrico de seis centímetros de diâmetro e cinquenta centímetros de comprimento localizado aleatoriamente ao longo do seu comprimento (Figura 4.1b); o outro prisma (P1) foi concretado sem nenhuma heterogeneidade no seu interior (Figura 4.1a).

Tabela 4.1 – Traço do concreto utilizado nos primas P1 e P2

Traço unitário	Fator água/cimento
1,00 : 1,48 : 2,02	0,43

O processo de cura dos prismas foi realizado em uma câmara úmida e, após 28 dias de idade, foram realizados os testes de ultrassom utilizando transdutores de ondas longitudinais de 54 kHz e 250 kHz e transdutores de ondas transversais de 250 kHz.

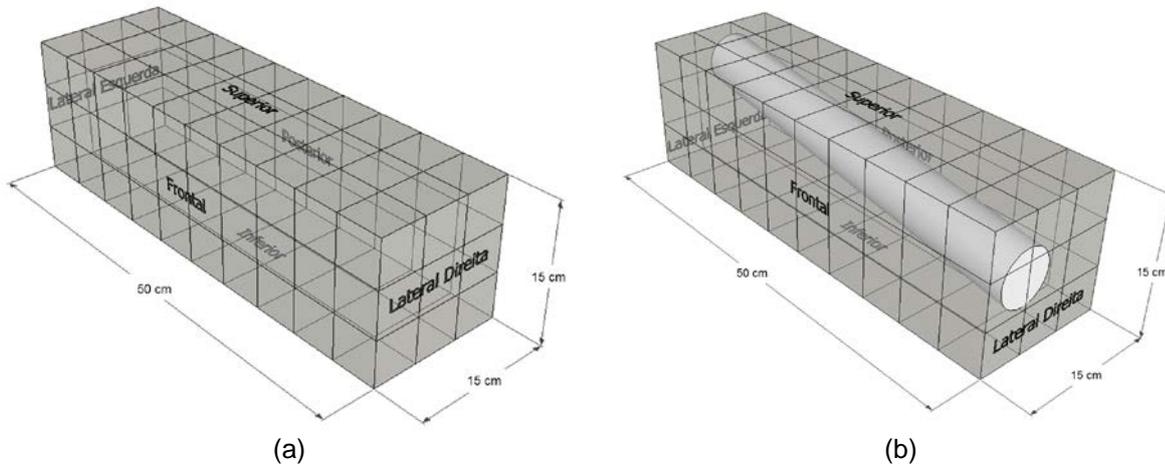


Figura 4.1 – Modelos dos corpos de prova: a) Prisma P1, b) Prisma P2.

Para posicionar os transdutores durante os ensaios, foram desenhadas como referência duas malhas de elementos quadrados sobre as seis superfícies de cada prisma. Uma malha de cinco centímetros de aresta foi utilizada como guia para os transdutores de 54 kHz e outra de três centímetros de aresta para posicionar os transdutores de 250 kHz. A Figura 4.2 mostra os dois prismas concretados e a malha de cinco centímetros.

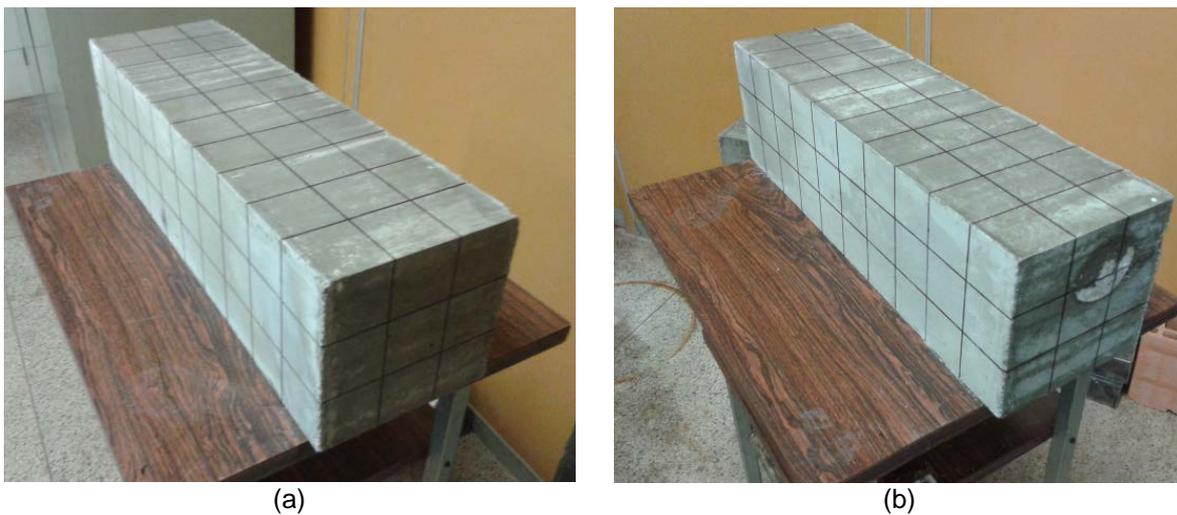


Figura 4.2 – Prismas utilizados na etapa experimental 1, a) P1 e b) P2

Nesta etapa foram avaliados cinco tipos de arranjos entre transdutores, conforme a Figura 4.3 e a Figura 4.4; nota-se que estas figuras não representam o tamanho real dos prismas nem a quantidade total das medições, mas sim o esquema da trajetória das leituras. Os arranjos variam entre si pela quantidade de medições e pelas superfícies dos prismas desde onde são feitas as leituras. Cada caso de medições é descrito a seguir.

O primeiro caso (Figura 4.3a) consiste em realizar todas as medições diretas ortogonais possíveis entre as seis faces de cada prisma, ou seja, leituras desde a face frontal à posterior, da face superior à inferior e da face lateral direita à lateral esquerda.

O segundo caso compreende medições diretas tanto ortogonais como oblíquas entre a face frontal e posterior de cada prisma. A Figura 4.3b representa o esquema de medições desde um transdutor emissor e as possíveis leituras até a fase posterior; as medições são repetidas variando o ponto de emissão na face frontal até completar todas as medições possíveis até a fase oposta.

O caso três, com a maior quantidade de leituras, inclui medições semidiretas entre as faces de maior comprimento, isto é, da face frontal à superior e da face inferior à posterior. A Figura 4.3c representa o esquema de medições para um ponto de emissão na fase frontal e outro na fase posterior até as fases superior e inferior respectivamente.

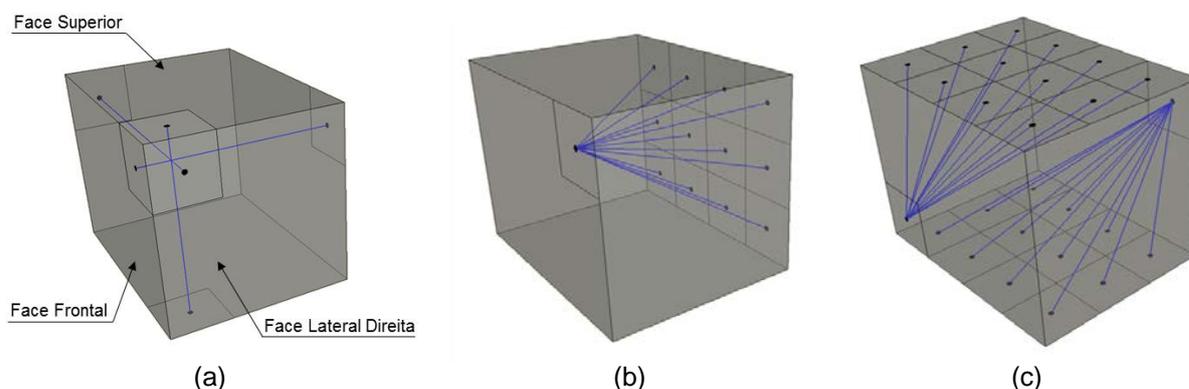


Figura 4.3 – Esquema de medições: a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3

O caso quatro (Figura 4.4a e b) compreende todas as medições possíveis, tanto diretas ortogonais e oblíquas como semidiretas, por cada seção transversal de cada prisma. Cada grupo de medições transversais é repetido ao longo de todas as seções transversais até completar cada prisma.

Por ultimo, o caso cinco (Figura 4.4c) é uma variação do caso anterior, ou seja, são feitas medições através de todas as seções transversais de cada prisma, mas neste caso só são tidas em conta as leituras diretas tanto ortogonais como oblíquas.

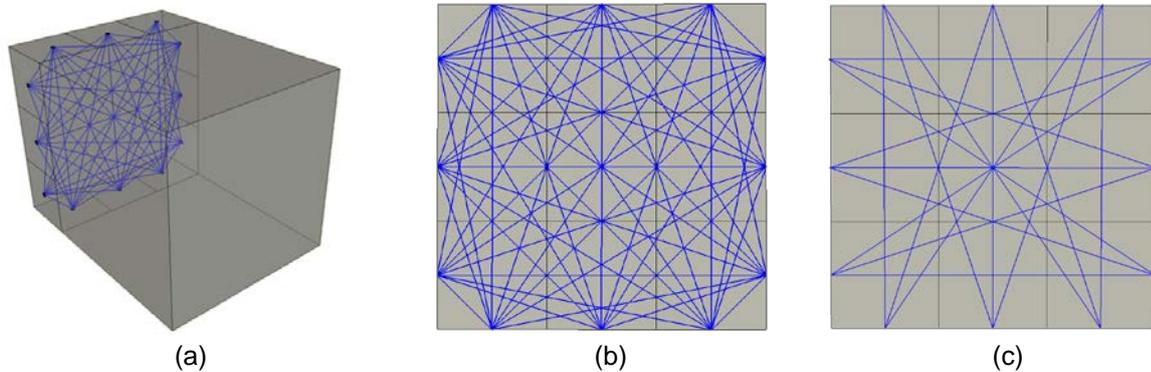


Figura 4.4 – a) e b) Esquema de medições do Caso 4, c) Leituras por seção do Caso 5

O acoplamento entre a face dos transdutores de ondas longitudinais e a superfície dos prismas foi realizado usando um gel de transmissão de ultrassons médico. Para realizar o acoplamento dos transdutores de ondas de cisalhamento e a superfície dos prismas foi utilizado um gel específico para ondas transversais, de maior viscosidade uma vez que estas ondas não se propagam em meios líquidos e gasosos.

Para cada posição dos transdutores foram realizadas cinco medidas. Assim, a média das medições foi calculada ignorando os valores com um desvio superior a 3%. Este procedimento foi realizado para todos os ensaios em todas as etapas experimentais.

Finalmente com o propósito de poder comparar os resultados entre os casos de medições, foram escolhidas duas seções intermediárias por cada prisma para visualizar os resultados das imagens tomográficas neste trabalho. Assim, para os ensaios com transdutores de 54 kHz as imagens apresentadas correspondem às seções apresentadas na Figura 4.5 e para os ensaios com transdutores de 250 kHz as imagens apresentadas fazem referência às seções mostradas na Figura 4.6.

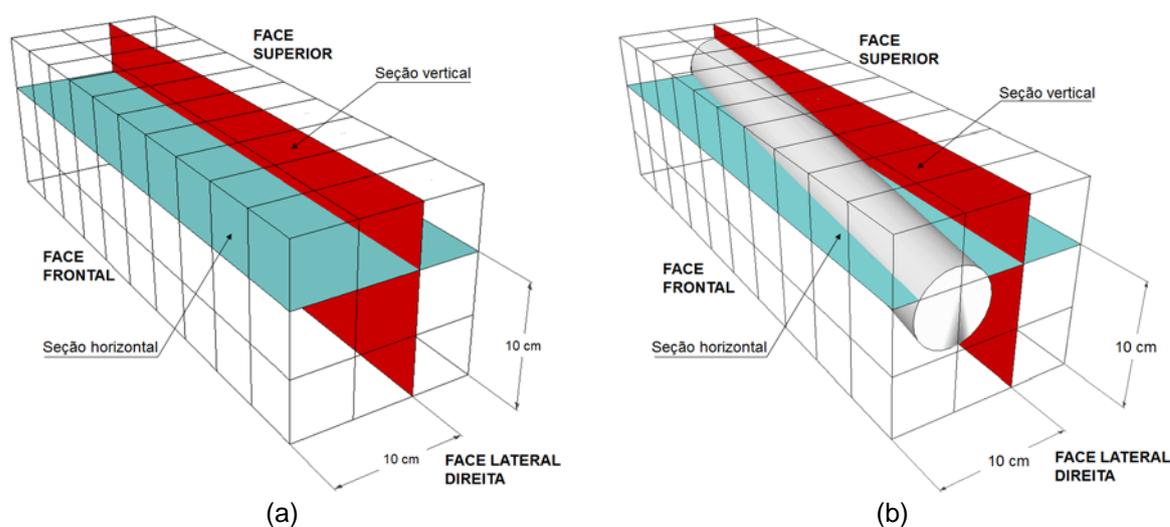


Figura 4.5 – Seções de visualização de tomogramas com transdutores de 54 kHz: a) Prisma P1, b) Prisma P2

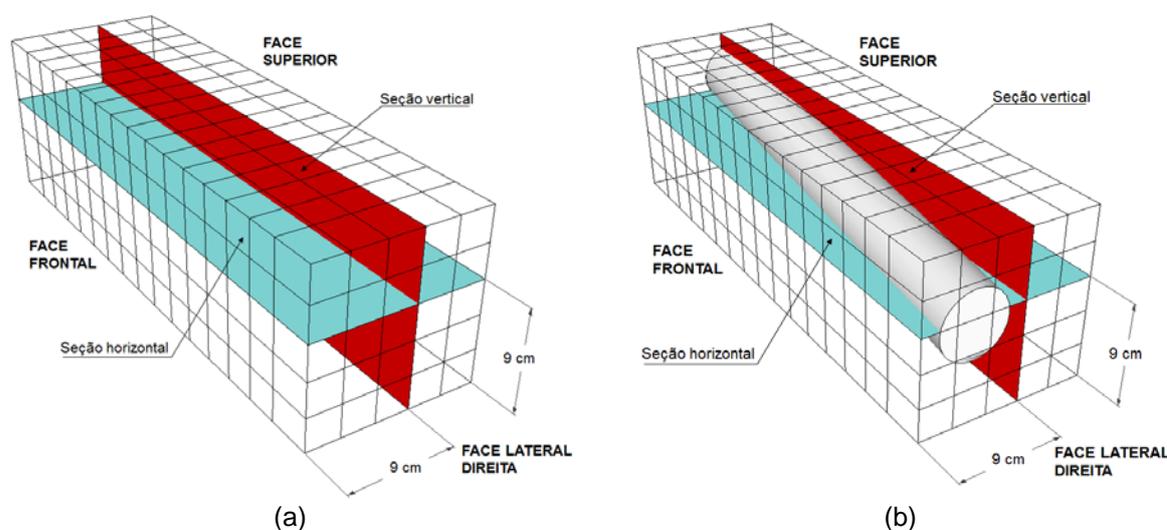


Figura 4.6 – Seções de visualização de tomogramas com transdutores de 250 kHz: a) Prisma P1, b) Prisma P2

4.2. Avaliação da homogeneidade do concreto

De acordo com a etapa experimental anterior, foi determinado que os transdutores com frequências de 250 kHz de ondas longitudinais e o arranjo entre transdutores correspondente ao caso cinco de medições proporcionam melhores resultados para os prismas analisados. Em consequência, estes parâmetros foram utilizados para realizar os ensaios de ultrassom desta segunda etapa.

Nesta fase foram concretados nove prismas de 50 x 15 x 15 cm (Figura 4.7) com diferentes resistências à compressão a fim de avaliar seu grau de homogeneidade. A ideia deste estudo consistiu em determinar a sensibilidade dos ensaios de ultrassom em concretos com diferentes resistências e tentar identificar limites de velocidades que caracterizem o concreto íntegro e permitam diferenciar facilmente a presença de algum defeito ou dano no interior do elemento de concreto ensaiado.



Figura 4.7 – Prismas do P3 a P11 utilizados na etapa experimental 2.

Os prismas foram moldados variando o abatimento do concreto em 100 mm, 150 mm e 200 mm. O estudo dos traços foi realizado de acordo com o procedimento

descrito por Helene e Terzian (1992) produzindo três concretos para cada slump: traço rico, médio e pobre (Tabela 4.2) obtendo resistências à compressão aos 28 dias entre 25 e 50 MPa.

Tabela 4.2 – Traço dos concretos utilizados nos primas P3 ao P11

Traço	Cimento	Areia	Brita
Rico	1,00	1,30	2,20
Médio	1,00	2,06	2,94
Pobre	1,00	2,83	3,87

4.3. Detecção de não homogeneidades

Nesta etapa foram moldados três prismas de concreto de 50 x 15 x 15 cm com igual resistência à compressão. Para simular as não homogeneidades internas de cada prisma foi utilizado isopor, aço de reforço e fissuras geradas mediante ensaios à compressão.

Para os ensaios de ultrassom foram utilizados os parâmetros definidos na primeira etapa experimental, isto é transdutores de 250 kHz de ondas longitudinais e medições correspondentes ao caso cinco, descrito no item 4.1. Para cada prisma se realizaram 700 medições em total. A resistência média à compressão do concreto utilizado após 28 dias foi de 53,88 MPa e o traço do concreto está apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Traço do concreto utilizado nos primas P12 a P14

Traço unitário	Fator água/cimento
1,00 : 2,05 : 2,37	0,52

Primeiramente foi moldado um prisma sem nenhum defeito (prisma P12) e após 28 dias de idade foi realizado o ensaio de ultrassom. Isto com o propósito de ter uma ideia das velocidades sobre o concreto íntegro utilizado, assim seria possível comparar os resultados das velocidades e das imagens com os ensaios no resto dos prismas.

4.3.1. Detecção de fissuras ou falhas

Para a realização desta etapa o prisma P12 foi submetido a ensaios de compressão a fim de ocasionar-lhe algum tipo de dano interno e/ou superficial. Estes ensaios foram realizados em duas regiões diferentes do prisma como indica a Figura 4.8. Os ensaios à compressão foram feitos em duas etapas; na primeira delas, o prisma foi submetido a uma força de 200 kN e, na segunda etapa foi aplicada uma força de 500 kN. No término de cada ensaio à compressão foram realizados ensaios de ultrassom para tentar identificar os danos por meio de variações nas velocidades dos pulsos de ultrassom e de imagens tomográficas.

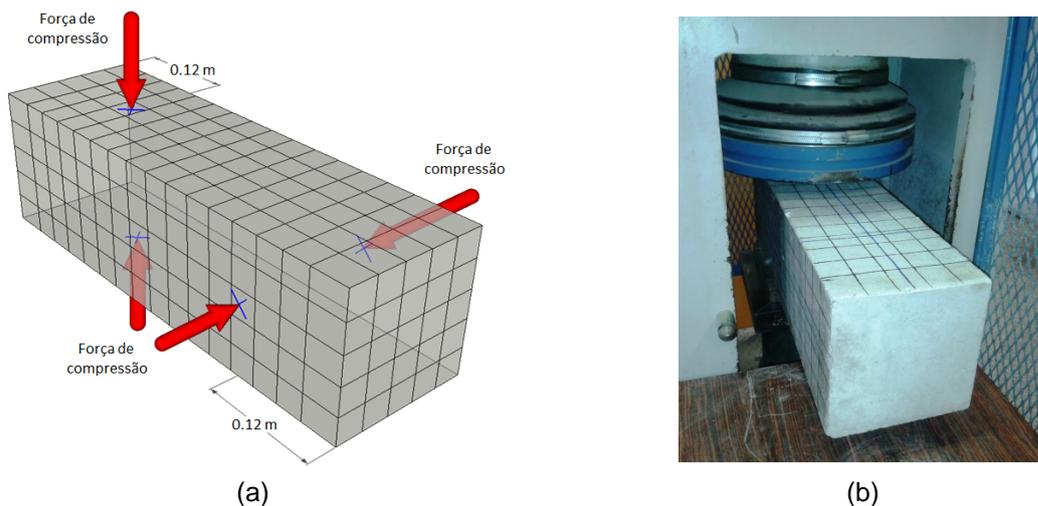


Figura 4.8 – Prisma P12 a) Localização dos ensaios à compressão, b) Ensaio à compressão sobre uma das regiões do prisma.

4.3.2. Detecção de grandes vazios

Para esta etapa o prisma utilizado foi nomeado P13. Para a simulação dos vazios, durante a concretagem do prisma, foram inseridos dois pedaços cilíndricos de isopor de seis centímetros de diâmetro posicionados transversalmente no prisma, conforme a Figura 4.9. Após 28 dias de idade do prisma, foi levado a cabo o ensaio de ultrassom visando identificar com precisão a forma e a localização dos blocos de isopor.

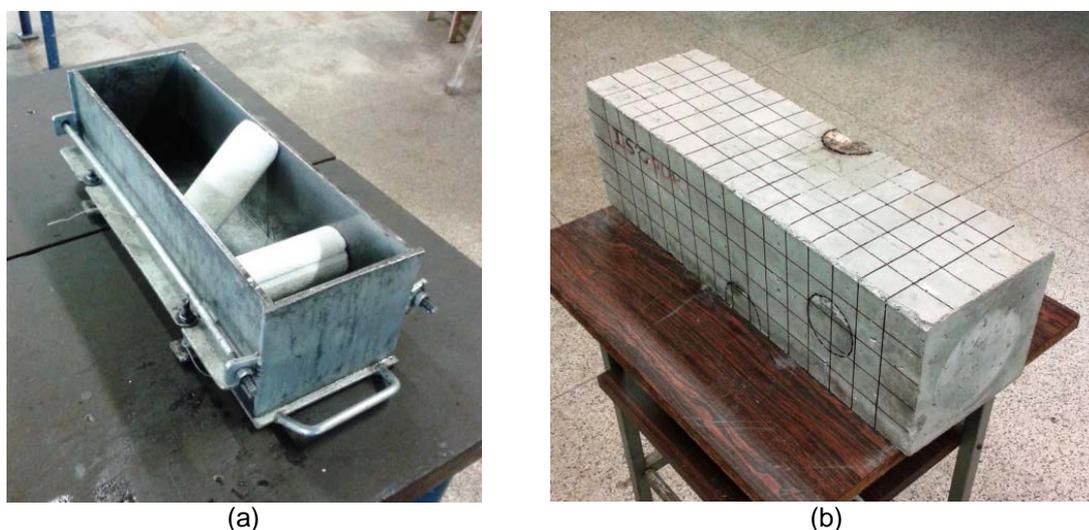


Figura 4.9 – Prisma P13, a) Localização dos blocos de isopor. b) Corpo de prova e malha

4.3.3. Influência do aço de reforço

Por ultimo, o prisma P14 foi moldado com concreto armado, conforme a Figura 4.10. Para a armadura foram utilizadas quatro barras de aço de dez milímetros de diâmetro como reforço longitudinal e aço de seis milímetros de diâmetro para os estribos. Estes últimos foram distribuídos assimetricamente ao longo do prisma com o propósito de avaliar a sensibilidade dos ensaios de ultrassom na presença da armadura com e sem estribos.

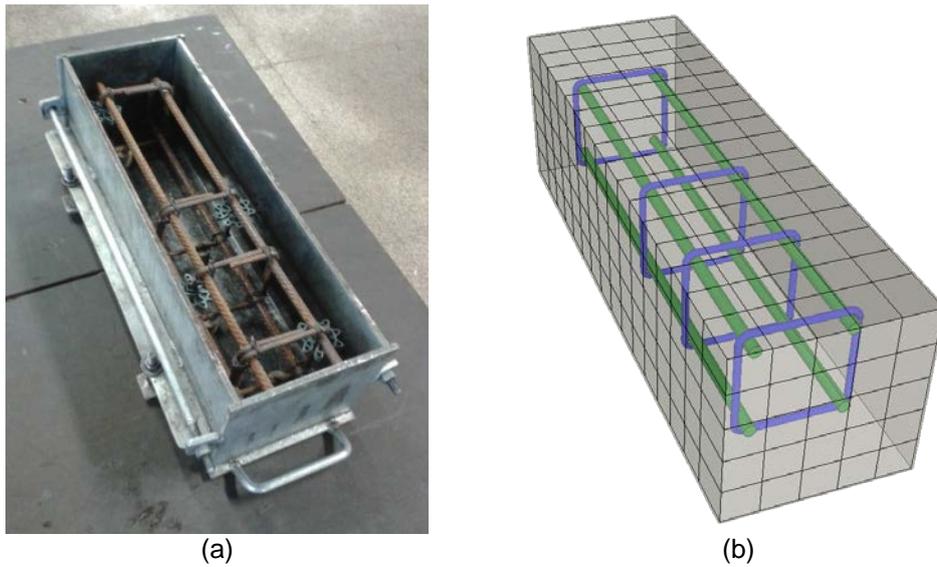


Figura 4.10 – Prisma P14, a) confecção do corpo de prova, b) modelo do prisma com armadura

4.4. Resumo

No capítulo foi apresentada a descrição das três etapas de ensaios nas quais foi dividido o programa experimental deste projeto. Para o desenvolvimento de cada etapa foram apresentadas as características dos prismas utilizados, assim como os parâmetros a serem avaliados e a configuração dos ensaios de ultrassom.

O programa experimental inicialmente visa determinar o arranjo entre transdutores, a frequência e o tipo de onda que proporcione melhores resultados nas imagens tomográficas. Posteriormente procura avaliar a homogeneidade de vários prismas de concreto com diferentes resistências à compressão. Finalmente, pretende avaliar a técnica da tomografia na detecção de fissuras, vazios e sua sensibilidade frente a aço de reforço no concreto.

De maneira global, a Figura 4.11 apresenta uma recopilación de todos os ensaios realizados nas três etapas experimentais, detalhando para cada prisma os casos de medição, a frequência utilizada e o tipo de onda utilizado.

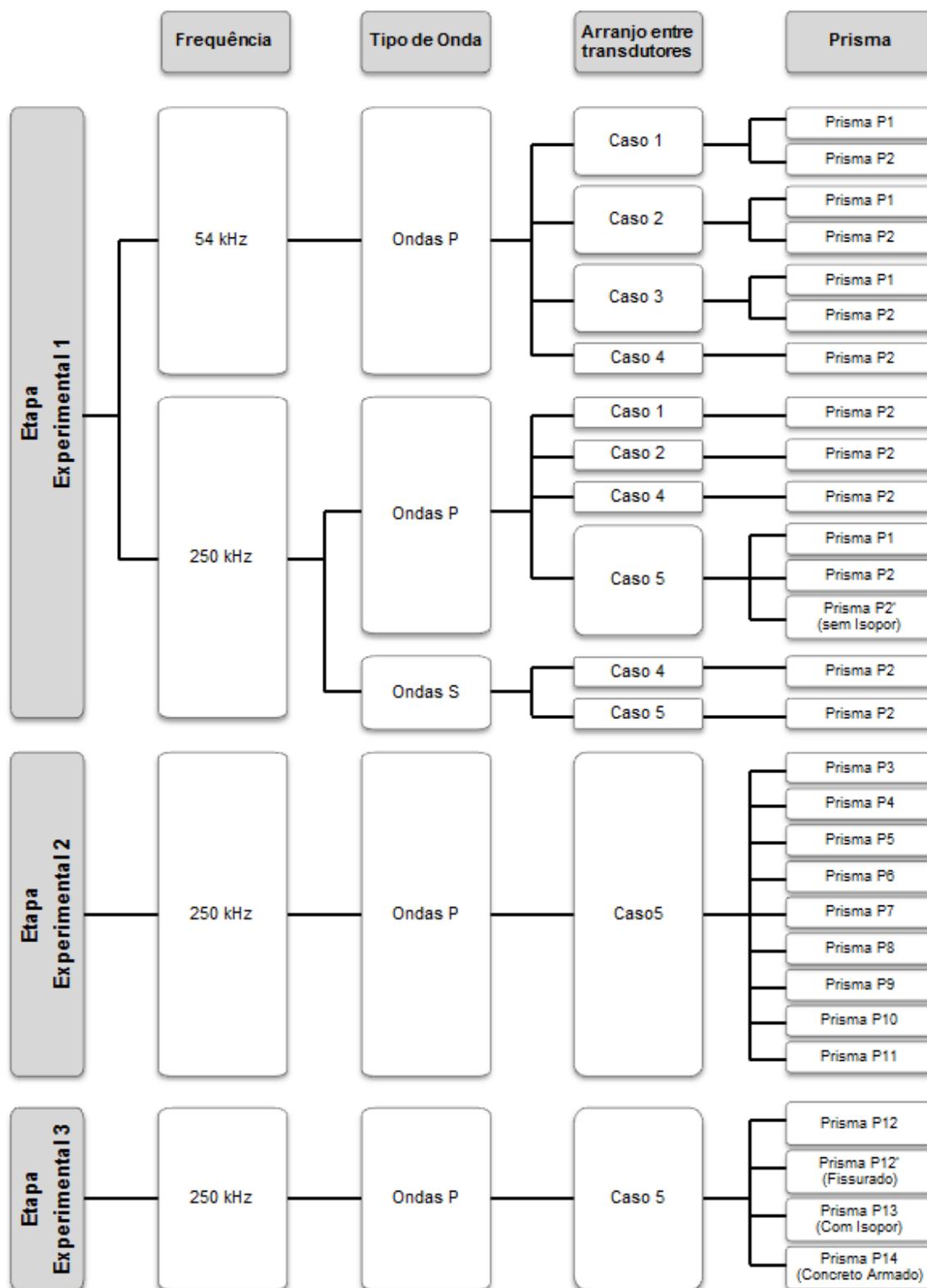


Figura 4.11 – Ensaios realizados em cada uma das três etapas experimentais

5. RESULTADOS

No presente capítulo discute-se para cada etapa experimental os resultados obtidos dos ensaios de ultrassom. Além disso, é apresentado para cada caso de estudo as imagens tomográficas geradas através do programa TUSom.

5.1. Arranjo entre transdutores, frequência e tipo de ondas

5.1.1. Medições com transdutores de 54 kHz de ondas longitudinais

- **CASO 1 – Medições diretas ortogonais**

A quantidade de medições para este caso foi de 69 para cada prisma. A Figura 5.1 apresenta os tomogramas gerados pelo método SIRT dos prismas P1 e P2, correspondentes às seções escolhidas para visualizar as imagens conforme a Figura 4.5.

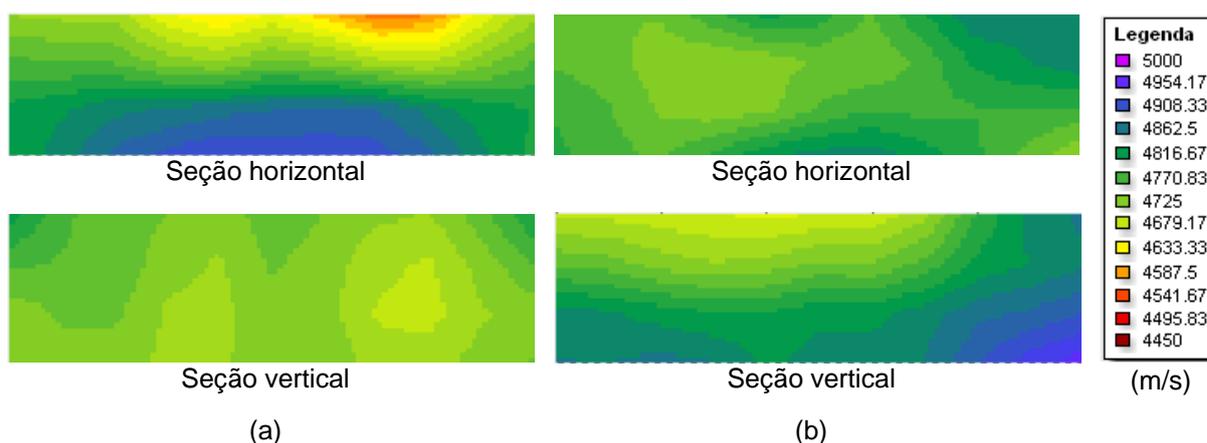


Figura 5.1 – Tomogramas com 54 kHz pelo método SIRT para o caso 1: a) prisma P1, b) prisma P2

Para ambos os prismas, os métodos de reconstrução de imagens ART e SIRT mostraram valores muito similares com um intervalo de velocidades de propagação de ultrassom entre 4500 e 4900 m/s. Em contraste, o sistema tomográfico de

equações ficou indeterminado para ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados. A diferença de aproximadamente 7% apresentada entre as velocidades pelos métodos iterativos é atribuída à heterogeneidade do concreto.

Pode-se observar que nos tomogramas do prisma P2 não se percebe o elemento de isopor inserido no interior dele. Este fato se deve possivelmente ao baixo número de leituras realizadas.

- **CASO 2 – Medições diretas ortogonais e oblíquas**

Neste segundo caso de medições foi necessário realizar 900 medições por cada prisma para realizar um mapeamento completo de cada um deles. As imagens tomográficas dos prismas P1 e P2 são apresentadas na Figura 5.2 e fazem referência às seções visualizadas na Figura 4.5. Neste caso, os métodos ART e Mínimos Quadrados apresentaram dispersões muito grandes de velocidades de propagação gerando imagens pouco coerentes, enquanto o método SIRT gerou melhores resultados.

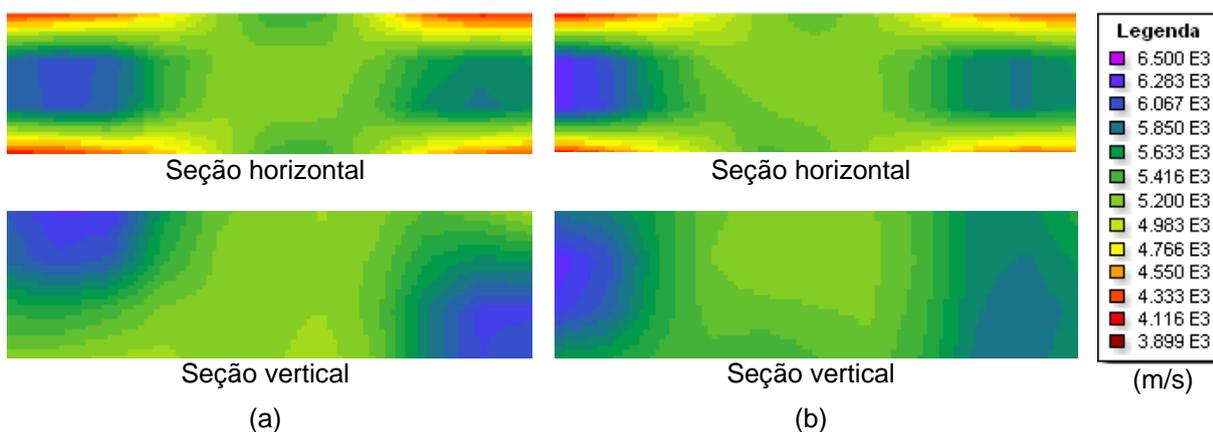


Figura 5.2 – Tomogramas com 54 kHz pelo método SIRT para o caso 2: a) prisma P1, b) prisma P2

As imagens geradas para os dois prismas pelo método SIRT apresentaram uma variação das velocidades de ultrassom aproximadamente entre 3900 e 6500 m/s. Esta diferença tão significativa é compreensível na hora de observar que as

áreas de baixas e altas velocidades estão presentes nas laterais dos prismas e podem ser atribuídas a um baixo número de leituras naquelas zonas ou ao fenómeno conhecido como efeito de borda. Este efeito é ocasionado por leituras executadas nas bordas dos prismas e pode ser evitado posicionando os transdutores a uma distância mínima das bordas maior que o comprimento de onda do pulso (MALHOTRA, NAIK E POPOVICS; 2004), no entanto, para os presentes casos de estudo, não foi possível respeitar esta recomendação devido à configuração dos ensaios e à geometria dos prismas.

Apesar do número de leituras ser elevado, em relação às imagens do prisma P2 ainda não é possível observar a presença do isopor. Neste sentido, acredita-se que existem outros parâmetros que podem influenciar nos ensaios e na reconstrução das imagens como, por exemplo, se o trajeto percorrido pelos pulsos é de centro a centro dos transdutores ou se é feito através da menor distância entre eles; outras variáveis a considerar é a influência do ângulo de inclinação das leituras e o diâmetro dos transdutores.

É interessante ver que na hipótese do trajeto percorrido pelas ondas de ultrassom seja feito através da menor distância entre os transdutores e ao redor dos vazios ou defeitos, o tamanho mínimo detectável do defeito será definido pelo diâmetro do transdutor utilizado, caso o defeito e os transdutores estejam alinhados; assim, se a área do defeito projetada perpendicularmente ao percurso da onda é menor que o diâmetro dos transdutores, dificilmente o tempo de viagem da onda será afetado e o defeito não será detectado (Figura 5.3).

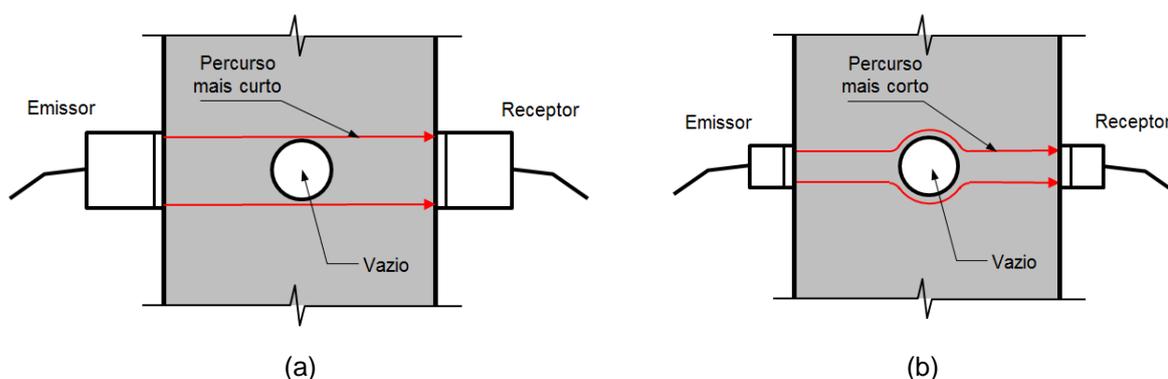


Figura 5.3 – Diferença entre os trajetos dos percursos mais curtos para transdutores com diâmetros diferentes e alinhados com o defeito.

Se os transdutores e o defeito não estiverem alinhados, o tamanho do defeito e dos transdutores se torna menos importante (Figura 5.4), sendo necessária maior quantidade de medições desde diferentes ângulos para tentar detectar o defeito, sem que este fato garanta a detecção do dano.

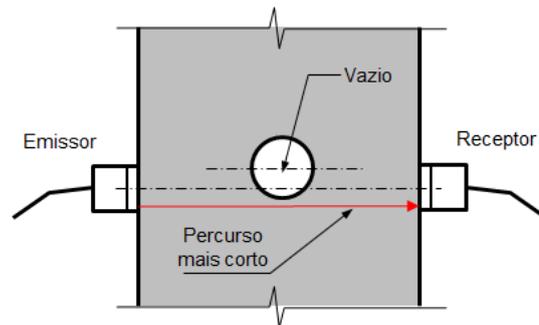


Figura 5.4 – Exemplo de medição com transdutores e defeito não alinhados.

Como o diâmetro dos transdutores de 54 kHz é de cinco centímetros e o diâmetro do cilindro de isopor é de seis centímetros, ou seja, dimensões muito próximas, os percursos das ondas de ultrassom podem ser afetados em pequenas proporções se os transdutores e o isopor estão alinhados; no entanto, os percursos também podem não ser afetados se o eixo da seção transversal do isopor não coincidir com o eixo dos transdutores. Além disso, estes fatos combinados com fatores como a heterogeneidade do material e possíveis erros de leituras durante os ensaios conduz a que os tempos das ondas possivelmente não representem perfeitamente o estado interno do prisma.

- **CASO 3 – Medições semidiretas**

Neste caso de medições foram realizadas 1800 leituras para cada prisma; apesar de ser o ensaio com maior quantidade de leituras, foi o caso que gerou as imagens com a maior variação de velocidades das faces laterais dos prismas em relação à zona intermediária deles. A Figura 5.5 apresenta os tomogramas dos prismas P1 e P2 correspondentes às seções representadas na Figura 4.5.

O método dos Mínimos Quadrados e o método SIRT apresentaram resultados similares, sendo os extremos laterais as áreas com as maiores velocidades. As velocidades dos pulsos de ultrassom na zona intermediária dos prismas variaram aproximadamente entre 4500 e 5500 m/s, enquanto nos extremos se observaram velocidades até 7300 m/s. Como no caso anterior, a variação da velocidade no meio dos prismas obedece à heterogeneidade do concreto e as áreas das maiores velocidades nos extremos dos prismas podem ser atribuídas a um baixo número de leituras em comparação com a zona intermediária deles.

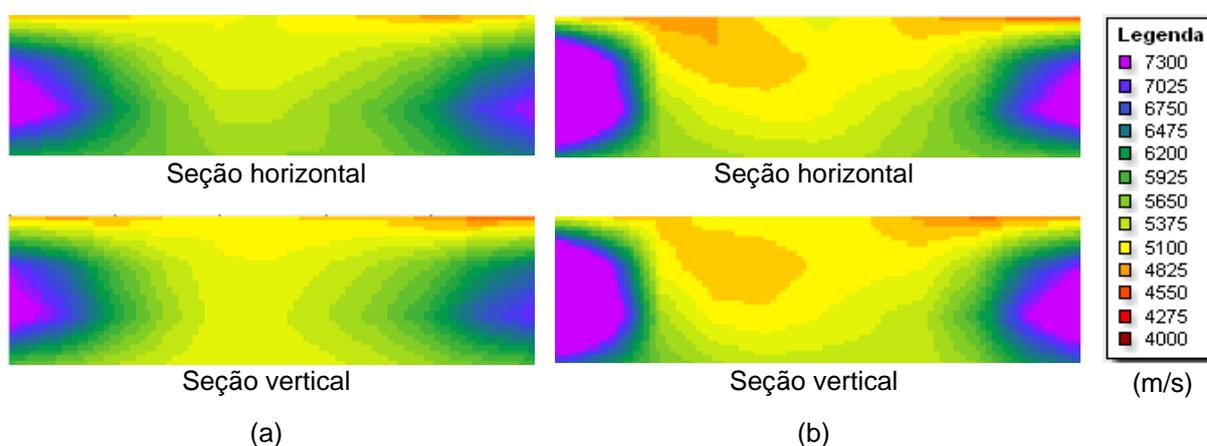


Figura 5.5 – Tomogramas com 54 kHz pelo método SIRT para o caso 3: a) Prisma P1, b) Prisma P2

Devido ao grande número de leituras, esperava-se a aparição do isopor nas imagens tomográficas do prisma P2, no entanto este fato possivelmente é ocasionado à distribuição das medições não ser uniformes em todo o volume do prisma, isto é, observando o prisma lateralmente junto com as trajetórias dos percursos é possível notar um espaço sem medições ao longo do prisma, como se mostra na Figura 5.6. Isto, somado à hipótese dos percursos serem através da menor distância entre os transdutores ocasiona que uma quantidade muito baixa de leituras seja afetada pela presença do isopor (Figura 5.7).

Além disso, o fato da distribuição das leituras não ser uniforme sobre os prismas, tanto no caso anterior de medições como no presente caso, gera espaços ou áreas com concentrações baixas de leituras e outras com concentrações muito

altas. Isto é um dos principais fatores que levam à grande variação das velocidades entre as zonas dos extremos dos prismas e a parte intermediária deles.

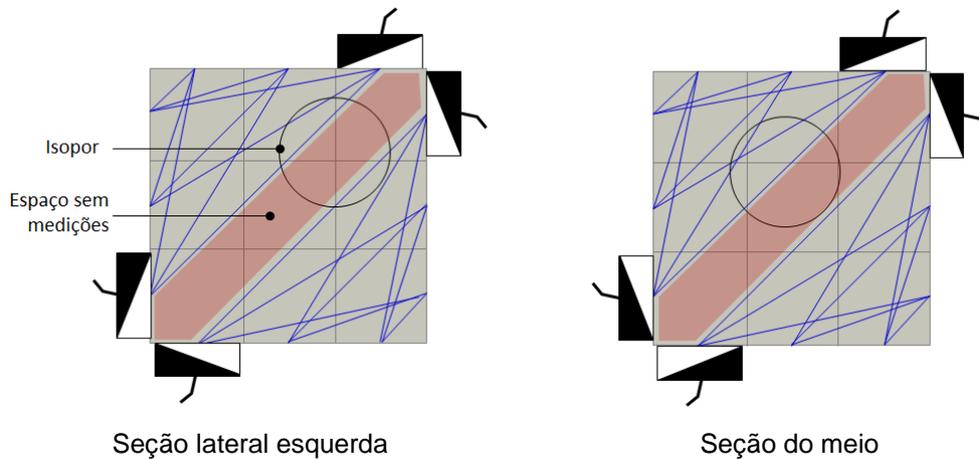


Figura 5.6 – Representação bidimensional das medições do caso 2 de centro a centro dos transdutores

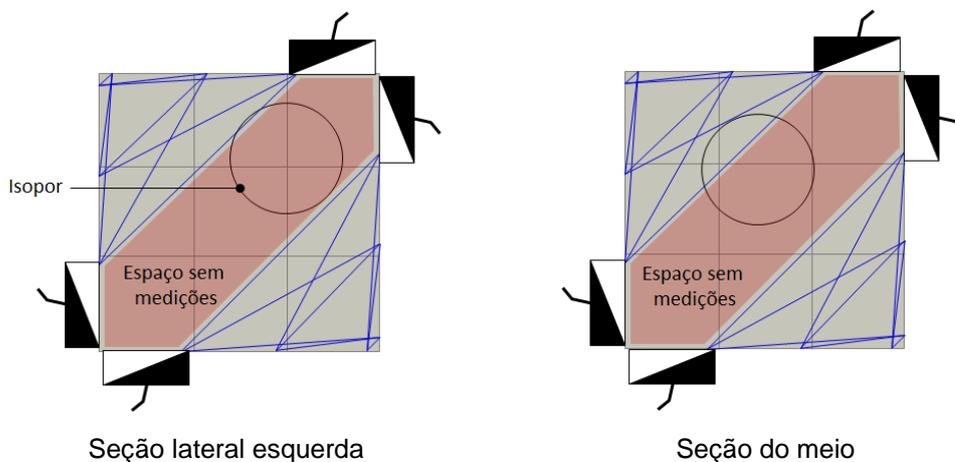


Figura 5.7 – Representação bidimensional das medições do caso 2 através da menor distância entre transdutores

- **CASO 4 – Medições por seções transversais (leituras completas)**

Mais um caso de medições foi levado a cabo no prisma P2 esperando observar a presença do isopor nas imagens tomográficas. A quantidade de leituras neste caso de medições foi de 540 por cada prisma. A Figura 5.8 e Figura 5.9

apresentam os resultados das imagens pelos métodos SIRT e ART respectivamente, das seções mostradas na Figura 4.5, adicionalmente seções transversais localizadas a cinco centímetros de cada face lateral e uma seção transversal no meio do prisma. Sem dúvida a combinação de medições feita neste caso foi a que retornou melhores resultados, no entanto as imagens ainda não são totalmente satisfatórias. O método dos Mínimos Quadrados e o método SIRT mostraram resultados muito similares, em contraste as imagens pelo método ART não foram aceitáveis.

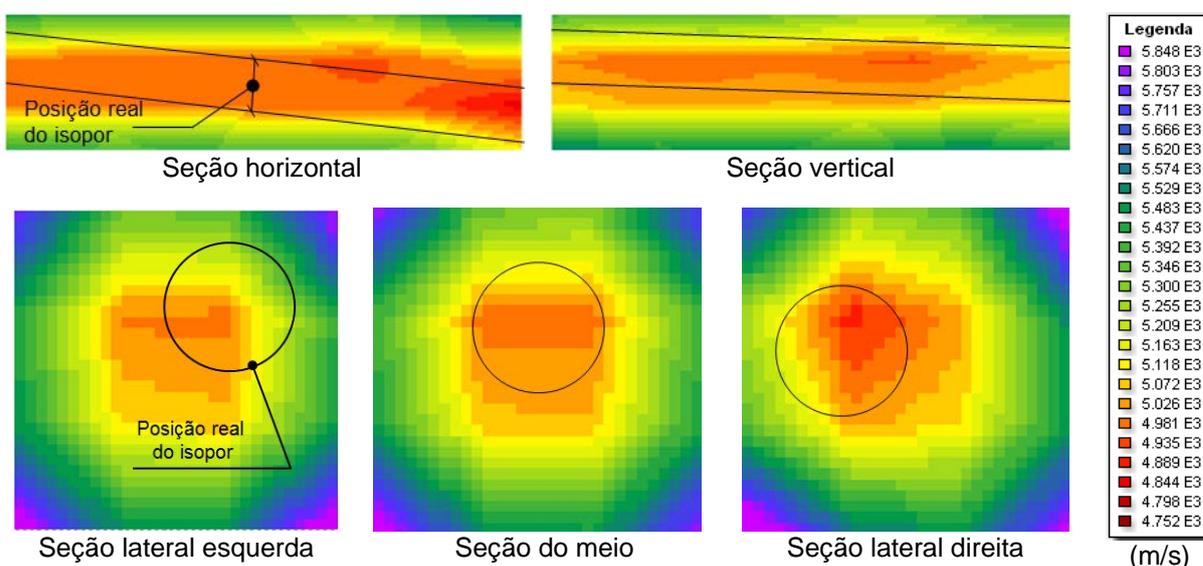


Figura 5.8 – Tomogramas com 54 kHz pelo método SIRT do caso 4 para o prisma P2

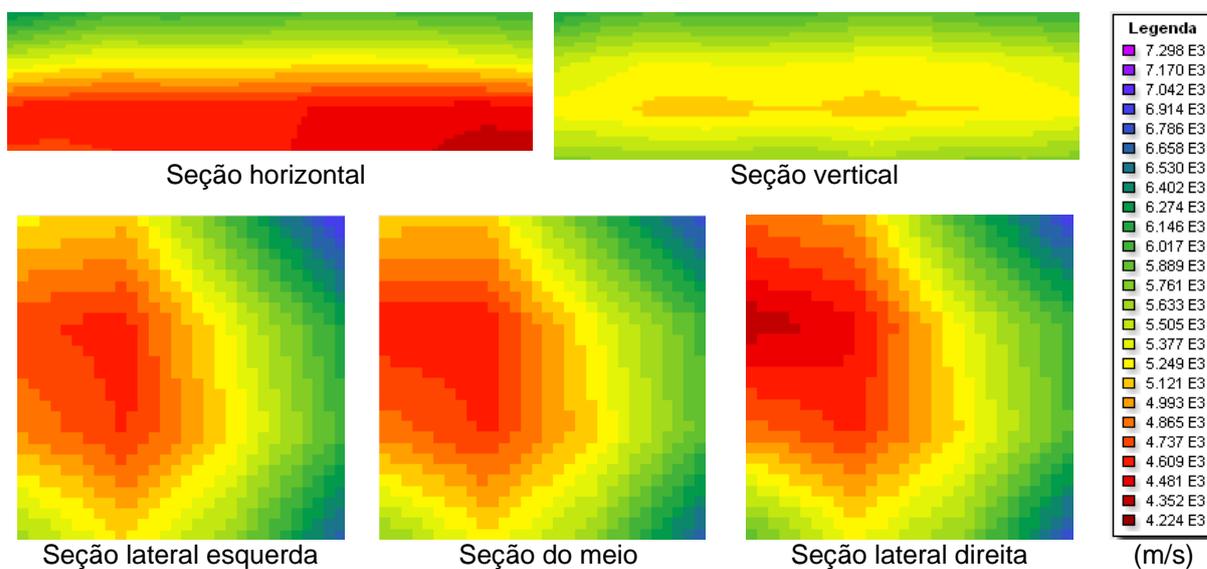


Figura 5.9 – Tomogramas com 54 kHz pelo método ART do caso 4 para o prisma P2

Nota-se claramente nas imagens geradas através do método SIRT a presença do isopor representado por áreas vermelhas e velocidades menores, abaixo de 4900 m/s. Contudo, a localização e o diâmetro ainda aparecem com dimensões um pouco diferentes das reais. Além disso, podem-se observar zonas de altas velocidades nas esquinas das imagens transversais correspondente ao baixo número de leituras nessa zona, no entanto, em relação aos outros casos de medição, as áreas de altas velocidades diminuíram consideravelmente.

Em consequência, os resultados até agora indicam que, para este caso de pesquisa em particular, não necessariamente uma maior quantidade de medições gera melhores imagens. Além disso, uma distribuição de leituras de forma uniforme sobre a estrutura deve ser considerada sempre na hora de realizar os ensaios de ultrassom, pois é de notar que, nesta pesquisa, este fator tem uma influência muito significativa no processo de geração de imagens tomográficas.

Até este momento, através dos ensaios realizados com transdutores de 54 kHz foi possível notar que os métodos de reconstrução de imagens SIRT e dos Mínimos Quadrados apresentaram resultados similares em vários dos casos de medições realizados e de melhor qualidade em comparação com o método ART.

A desvantagem do método dos Mínimos Quadrados frente ao método SIRT está na necessidade de inversão de matrizes, processo que não pode ser resolvido caso o sistema de equações seja indeterminado, isto é o número de leituras seja menor que o número de elementos discretizados da malha. Em relação ao método ART, este possui uma desvantagem frente ao método SIRT na resolução de sistemas sobre determinados inconsistentes, isto é neste tipo de sistemas o método ART não consegue obter um resultado único e entra em laço infinito em volta da melhor resposta, sem nunca alcançá-la (Figura 5.10a), enquanto o método SIRT permanece no mesmo ponto ao longo das novas iterações, como se apresenta na Figura 5.10b (PERLIN, 2011).

Neste sentido, nos seguintes tópicos se optou por apresentar os resultados das imagens geradas a partir do método SIRT para todos os casos de estudo.

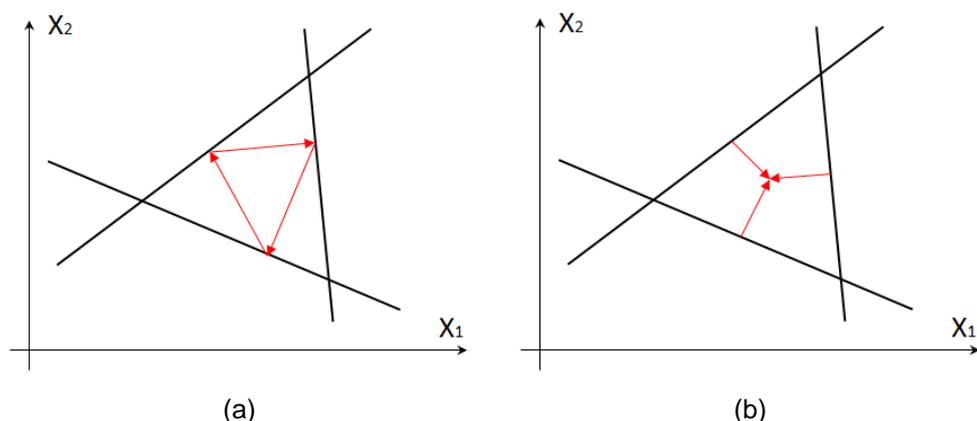


Figura 5.10 – Convergência dos processos iterativos para sistemas de equações sobre-determinados inconsistentes a) ART, b) SIRT (Adaptado: PERLIN, 2011)

5.1.2. Medições com transdutores de 250 kHz de ondas longitudinais

• CASO 1 – Medições diretas ortogonais

Para este caso de medições com transdutores de 250 kHz, foi realizado um total de 160 leituras por cada prisma. A Figura 5.11 apresenta os tomogramas do prisma P2 pelo método SIRT referentes às seções mostradas na Figura 4.6, a seções transversais localizadas a quatro centímetros de cada face lateral e uma seção transversal no meio do prisma.

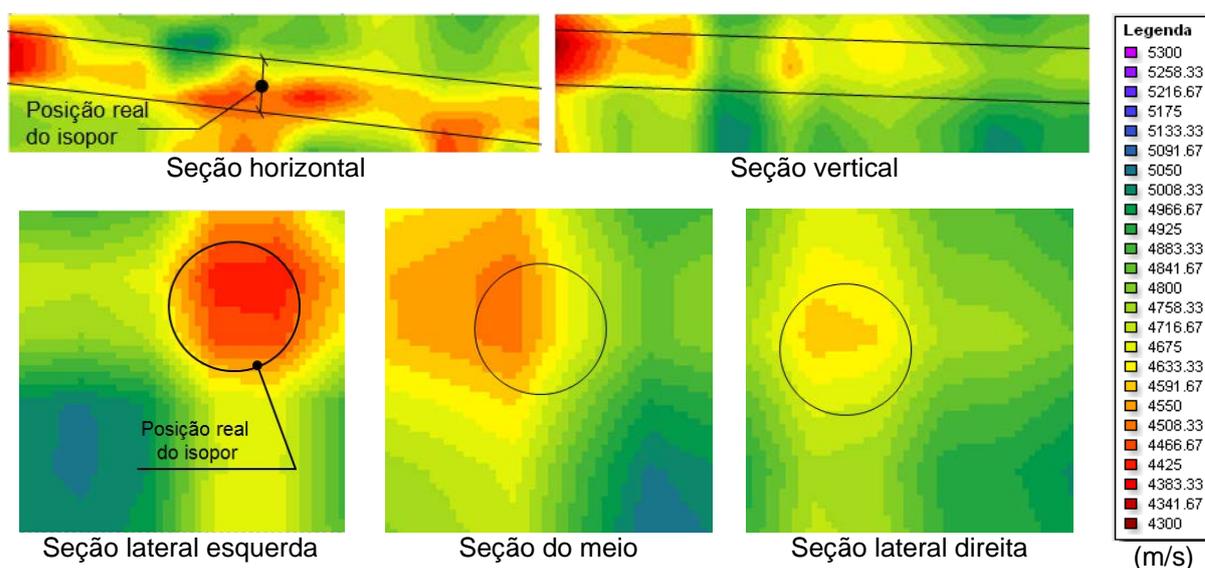


Figura 5.11 – Tomogramas com 250 kHz do caso 1 para o prisma P2

Nas imagens podem-se observar áreas vermelhas com velocidades menores que indicam a presença do isopor ao longo do prisma, no entanto parâmetros como a geometria, a localização e o tamanho não são muito claros possivelmente pela baixa quantidade de leituras.

Apesar das imagens serem pouco satisfatórias, o ensaio realizado com transdutores de 250 kHz e uma malha de discretização mais fina retornou melhores resultados em comparação com o ensaio feito com transdutores de 54 kHz.

- **CASO 2 – Medições diretas ortogonais e oblíquas**

Neste segundo caso, para fazer um mapeamento total do prisma seria necessário realizar 4900 medições, contudo, pela grande quantidade de leituras decidiu-se pegar um comprimento de 150 cm do prisma como é apresentado na Figura 5.12a. O total de leituras para o ensaio foi de 625.

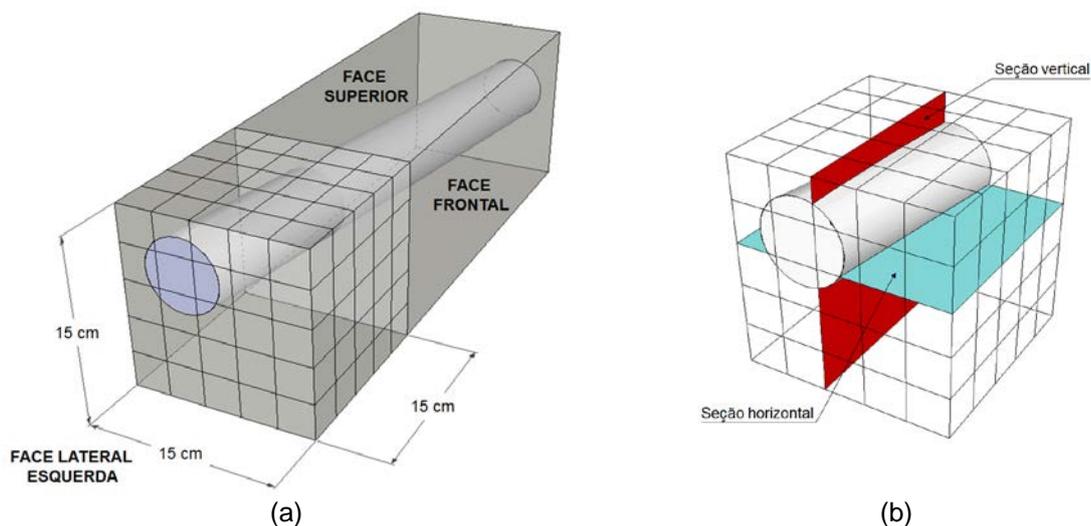


Figura 5.12 – a) Porção do prisma analisada, b) Seções das imagens tomográficas

A Figura 5.13 apresenta os tomogramas do prisma P2 pelo método SIRT para o segundo caso de medições, correspondentes às seções da Figura 5.12b e às faces laterais. As imagens mostram áreas em cor laranja que poderiam indicar a

presença do isopor, no entanto as imagens não são claras. Observam-se também efeitos de borda em alguns cantos das seções transversais. Neste caso, também é possível observar uma leve melhoria dos resultados comparados com o mesmo caso de medições realizados com transdutores de 54 kHz.

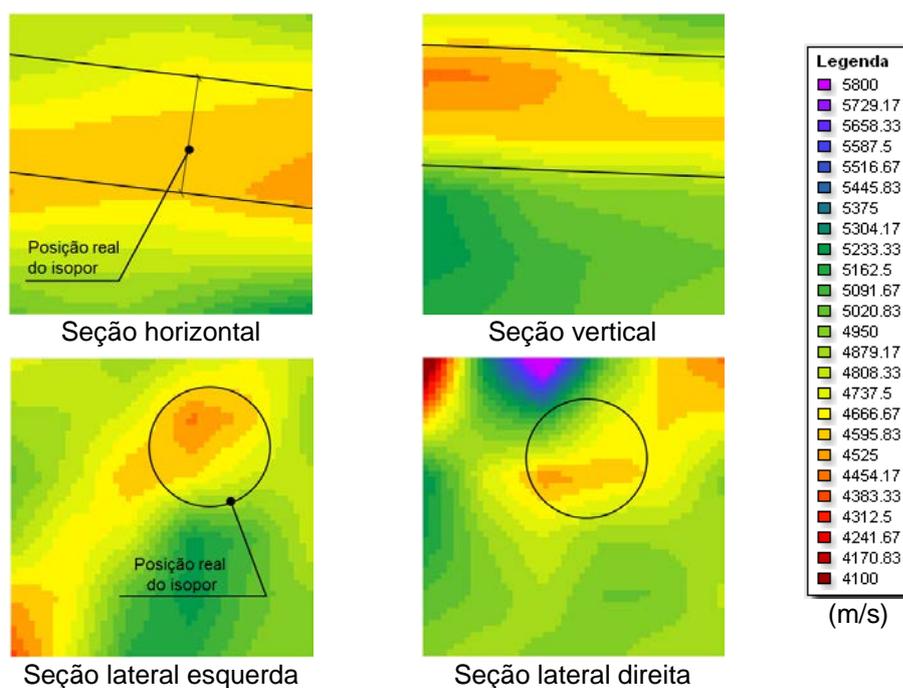


Figura 5.13 – Tomogramas com 250 kHz do caso 2 para o prisma P2

- **CASO 4 – Medições por seções transversais (leituras completas)**

Para este caso de medições com transdutores de 250 kHz, foram realizadas 2100 leituras para analisar o prisma completo. A Figura 5.14 apresenta os tomogramas do prisma P2 pelo método SIRT das seções longitudinais mostradas na Figura 4.6, adicionalmente seções transversais localizadas a quatro centímetros de cada face lateral e uma seção transversal no meio do prisma. Nas imagens pode-se observar a presença do isopor representado por áreas vermelhas e velocidades abaixo de 4400 m/s. Neste caso as imagens mostraram uma melhoria bem significativa dos tomogramas onde a geometria e a localização do elemento de isopor são mais aproximadas à realidade do corpo de prova. As áreas ao redor do

isopor têm uma distribuição uniforme de velocidades entre 4500 m/s e 5400 m/s, ou seja, uma diferença de 16% associadas com a heterogeneidade do concreto.

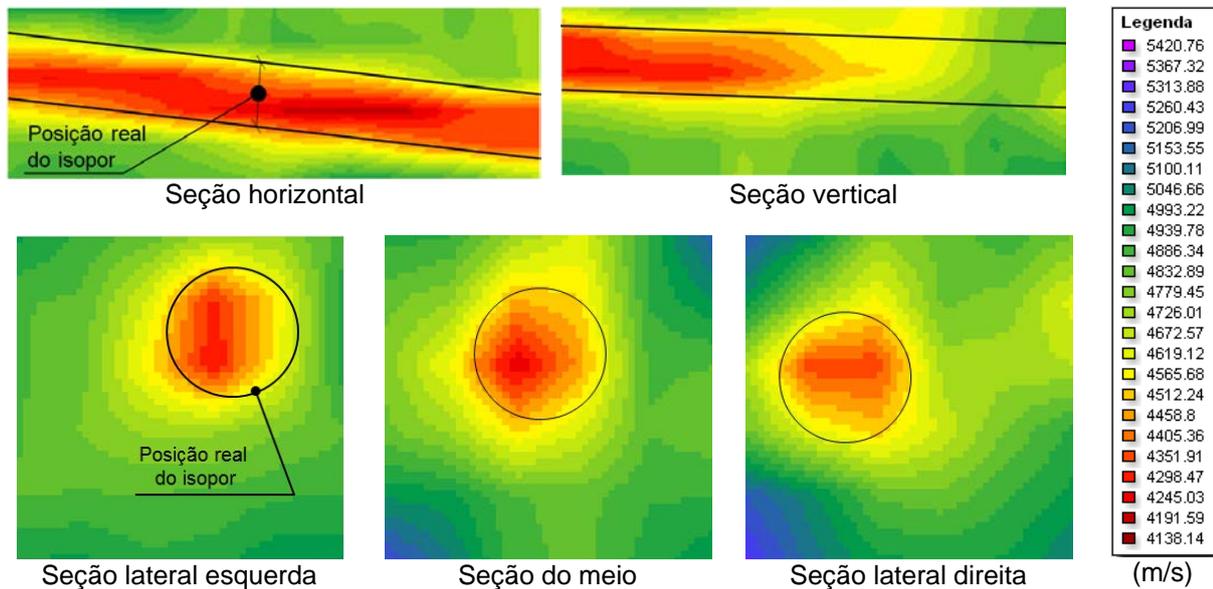


Figura 5.14 – Tomogramas com 250 kHz do caso 4 para o prisma P2

- **CASO 5 – Medições por seções transversais (leituras entre faces opostas)**

Apesar das imagens geradas para o caso anterior serem bem satisfatórias, a quantidade de medições foi muito grande o que ocasiona tempos de ensaios excessivos para elementos relativamente pequenos de concreto, consequentemente o ensaio torna-se pouco viável. Assim, optou-se por considerar só as medições diretas ortogonais e oblíquas por cada seção transversal do prisma.

A Figura 5.15 apresenta as imagens tomográficas do caso cinco para o prisma P2. Como no caso anterior, observa-se claramente a presença do isopor representado por áreas vermelhas e velocidades menores a 4500 m/s, aliás, o resto do prisma mantém uma distribuição de velocidades entre 4500 m/s e 5200 m/s, própria da heterogeneidade do concreto.

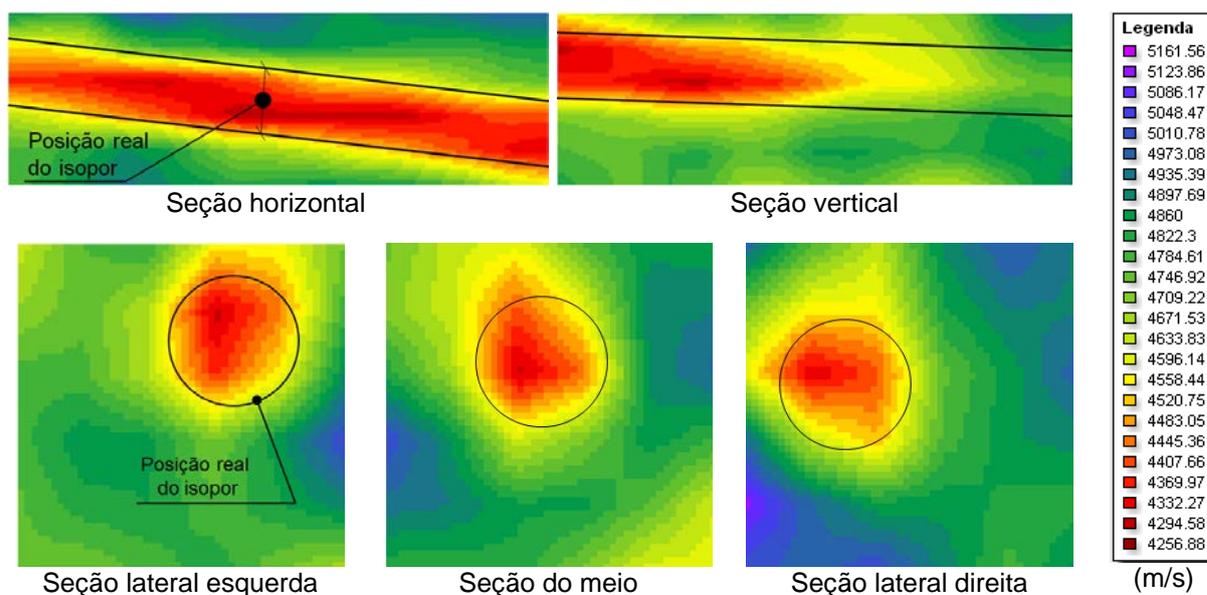


Figura 5.15 – Tomogramas com 250 kHz do caso 5 para o prisma P2

Pode-se concluir que, tanto o caso quatro como o cinco são igualmente satisfatórios, no entanto, a quantidade de medições diminuiu consideravelmente. Assim, enquanto para o caso quatro foram feitas 2100 medições, para o caso cinco foram feitas 700, diminuindo 67% das medições, tornando-se a melhor opção para realizar os ensaios.

Até o momento o defeito no interior do prisma P2 foi modelado por meio de um elemento cilíndrico de isopor representando um vazio por sua alta porosidade. No entanto, apesar da porosidade do material, acredita-se que as ondas de ultrassom podem viajar através dele tendo influência nos resultados. Por isso, é de interesse identificar se existem variações quando o defeito é um vazio real. Em consequência, foi extraído o isopor do prisma P2 e realizou-se de novo este ensaio.

A Figura 5.16 apresenta as imagens tomográficas do prisma sem isopor. Observa-se que existe uma variação muito pequena nas imagens em comparação com o prisma com isopor. Esta mínima diferença de velocidades pode ser desprezível e conclui-se que, para este caso de pesquisa, a posição e o tamanho do isopor fazem que o ultrassom tenha uma propagação imperceptível ou nula através

dele, simulando um vazio total. Por conseguinte, conclui-se que é possível identificar vazios com grande exatidão por meio da técnica tomográfica ultrassônica.

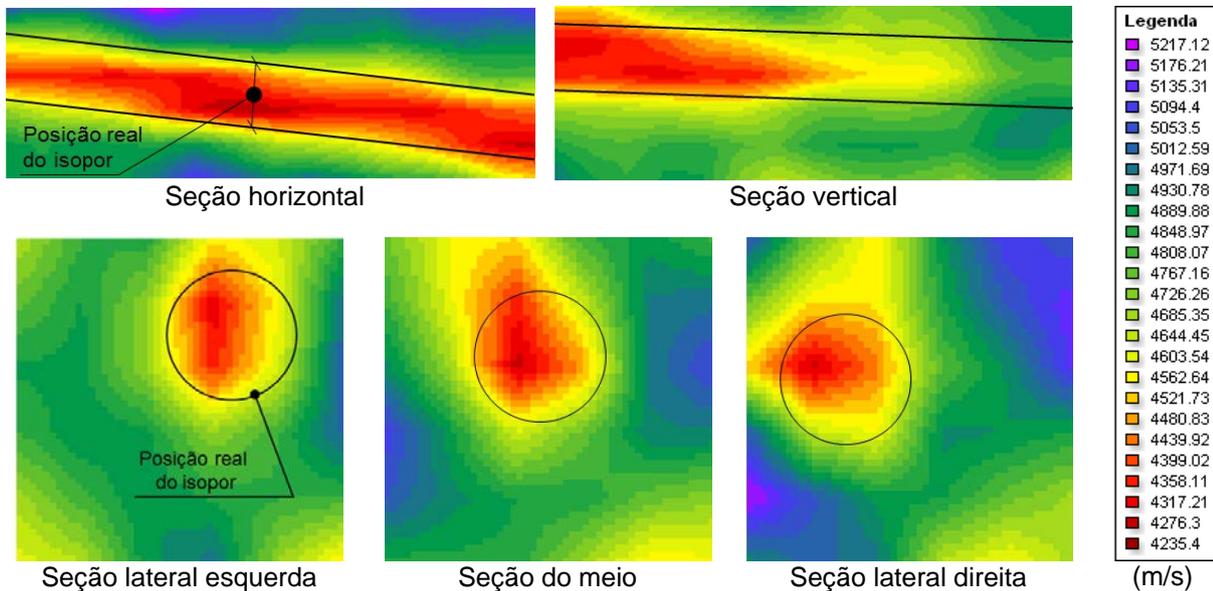


Figura 5.16 – Tomogramas com 250 kHz do caso 5 para o prisma P2 sem isopor

5.1.3. Medições com transdutores de 250 kHz de ondas de cisalhamento

Com os parâmetros definidos de frequência e arranjo dos transdutores, agora é de interesse determinar a influência das ondas transversais nos ensaios de ultrassom. Para este estudo foram avaliados os casos quatro e cinco no prisma P2 e os resultados são apresentados a seguir.

É importante mencionar que o gel utilizado nos ensaios com transdutores de cisalhamento tem uma alta viscosidade, portanto sua manipulação implicou maiores tempos na realização das medições. Além disso, os transdutores de ondas de cisalhamento utilizados também emitem simultaneamente ondas longitudinais (Figura 5.17), mas o software de aquisição de dados só fornece o tempo das ondas longitudinais. Isto implicou um tratamento adicional dos sinais medidos pelo equipamento de ultrassom a fim de identificar o tempo de chegada das ondas de cisalhamento.

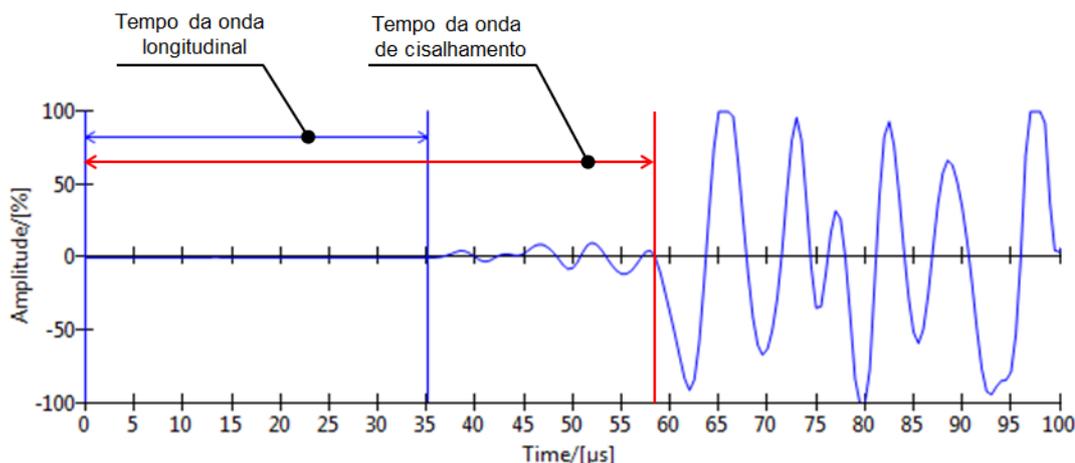


Figura 5.17 – Sinal típica da onda emitida por transdutores de cisalhamento

- **CASO 4 – Medições por seções transversais (leituras completas)**

A Figura 5.18 apresenta os resultados das imagens tomográficas para duas seções transversais do prisma P2. Nas imagens é possível observar, com muita clareza, a presença do isopor representado por áreas vermelhas e as velocidades menores, além disso, a geometria e a localização aparecem nas imagens de forma aceitável. Assim, é possível afirmar que o ensaio de ultrassom com transdutores de cisalhamento, para o arranjo do caso quatro de medições, pode ser igualmente satisfatório.

Nota-se que o intervalo de velocidades das imagens é bem menor em comparação com o mesmo ensaio feito com transdutores de ondas longitudinais. Como no concreto a velocidade das ondas de cisalhamento é geralmente 60% da velocidade das ondas longitudinais (MALHOTRA, NAIK E POPOVICS; 2004), foram comparadas as velocidades das ondas de cisalhamento com as velocidades das ondas longitudinais para o mesmo ensaio, a fim de confirmar a relação entre os dois tipos de ondas. No total, para as duas seções foram realizadas 300 leituras e, após da análise, obteve-se que para o 95% das leituras, as velocidades das ondas de cisalhamento estão aproximadamente entre 55% e 65% das velocidades das ondas longitudinais, confirmando a relação que existe entre os dois tipos de onda.

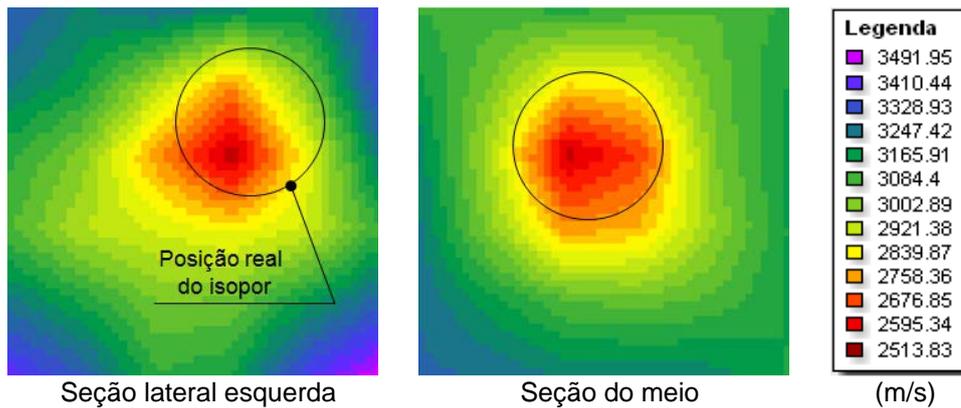


Figura 5.18 – Tomogramas com 250 kHz de ondas de cisalhamento do caso 4 para o prisma P2

- **CASO 5 – Medições por seções transversais (leituras entre faces opostas)**

A fim de comparar e avaliar se é possível reduzir o número de leituras em relação ao caso anterior, realizando o ensaio com transdutores de cisalhamento, foram analisadas as mesmas seções considerando apenas as leituras diretas ortogonais e oblíquas. A Figura 5.19 apresenta os resultados das imagens tomográficas do ensaio.

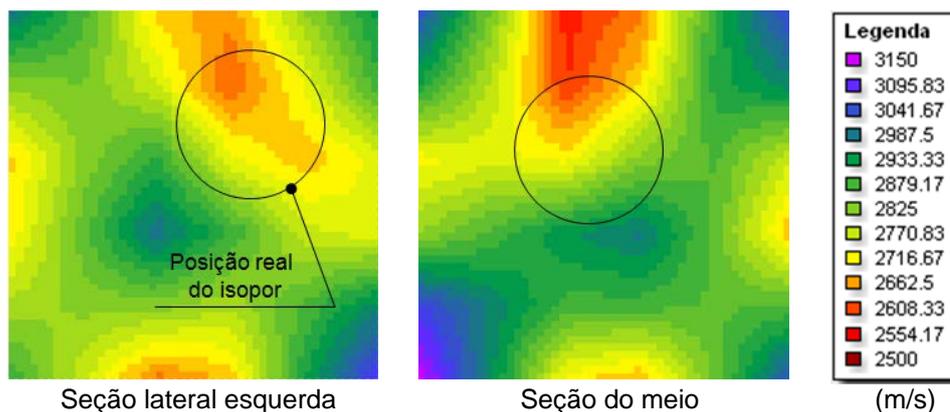


Figura 5.19 – Tomogramas com 250 kHz de ondas de cisalhamento do caso 5 para o prisma P2

Nas imagens podem-se observar áreas em cor vermelho e de menores velocidades próximas da região onde se localiza o isopor. Embora seja possível afirmar que existe alguma heterogeneidade na zona superior central das imagens, é

difícil relacionar aquelas áreas vermelhas com alguma geometria e localização específica.

Como foi observado através dos diversos ensaios realizados, é importante destacar que as melhores imagens tomográficas não foram reconstruídas a partir dos casos com maior quantidade de medições. O arranjo de transdutores mais conveniente resultou com medições feitas desde as quatro faces de maior comprimento, realizando uma distribuição uniforme através de seções transversais ao longo de todo o prisma.

Em relação à influência das frequências encontrou-se que as imagens geradas a partir de frequências iguais a 250 kHz, em geral, foram mais satisfatórias. Contudo, este fato está ligado especificamente às condições geométricas e ao tamanho dos corpos de prova e dos defeitos simulados nos ensaios desta pesquisa e, portanto, não pode ser generalizado para qualquer ensaio de ultrassom.

Por fim, no que se refere aos tipos de onda, é possível concluir que tanto as ondas longitudinais como as transversais são alternativas igualmente confiáveis para gerar imagens tomográficas desde que condições como o acoplamento, superfícies dos corpos de prova, entre outras, sejam adequadas. No entanto, é de destacar que parâmetros como a alta viscosidade do gel de cisalhamento e o tratamento adicional sobre os sinais, necessário para determinar o tempo de chegada das ondas de cisalhamento, podem elevar o tempo dos ensaios.

5.1.4. Estudo da influência da variação do ângulo de leituras de ultrassom, diâmetro dos transdutores e distância entre eles

Como foi mencionado anteriormente, acredita-se que existem diversos parâmetros ligados à geometria dos transdutores e ao arranjo das medições que podem influenciar a realização dos ensaios de ultrassom e a geração de imagens tomográficas.

Teoricamente o programa TUSom considera os percursos das leituras de ultrassom como os comprimentos de centro a centro de cada transdutor e permite inserir medições com diferentes graus de inclinação sem considerar alguma influência destes fatos na reconstrução das imagens. Por isso foi realizada uma análise teórica avaliando a distância entre transdutores (emissor e receptor) e o ângulo de inclinação das leituras para determinar a influência destes fatores nos ensaios de ultrassom.

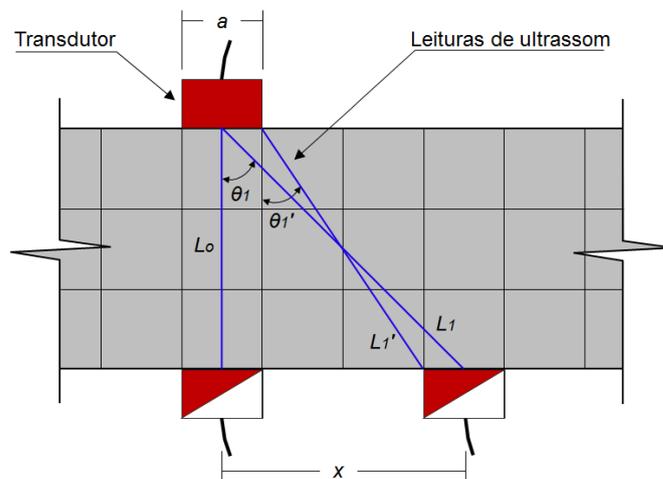


Figura 5.20 – Modelo discretizado, posição dos transdutores e leituras.

Para a análise foram consideradas duas medições diretas, uma delas ortogonal e a outra oblíqua, sobre um corpo de material homogêneo com dimensões conhecidas e uma malha de discretização, conforme a Figura 5.20.

Focados na leitura inclinada, assumindo que o ângulo θ não tem influência nas leituras, pode-se dizer que a velocidade do pulso de centro a centro do transdutor (V_1) é igual à de canto a canto do transdutor (V_1). Como o material é homogêneo, esta velocidade é também igual que à velocidade na medição direta ortogonal (V_0), conforme a Equação 5.3.

$$V_0 = \frac{L_0}{t_0} \quad \text{Equação 5.1}$$

$$V_1 = \frac{L_1}{t_1} \quad \text{Equação 5.2}$$

$$V_1' = \frac{L_1'}{t_1} = V_0 \quad \text{Equação 5.3}$$

Substituindo o valor do tempo t_1 da Equação 5.3 na Equação 5.2 resulta uma relação entre V_1 e V_0 equivalente à relação entre L_1 e L_1' . Da mesma forma, V_1/V_0 pode ser reescrita como uma função do ângulo θ e da distância L_0 , conforme a Equação 5.4.

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{L_1}{L_1'} = f(L_0, \theta) \quad \text{Equação 5.4}$$

Conforme a Figura 5.21 é possível encontrar geometricamente a relação entre L_1 e L_1' em função do ângulo θ e o comprimento L_0 . Como resultado, a Equação 5.7 relaciona a velocidade de ultrassom com parâmetros geométricos como o ângulo entre o percurso e o eixo axial do transdutor, o diâmetro do transdutor e a distância entre transdutores (emissor e receptor).

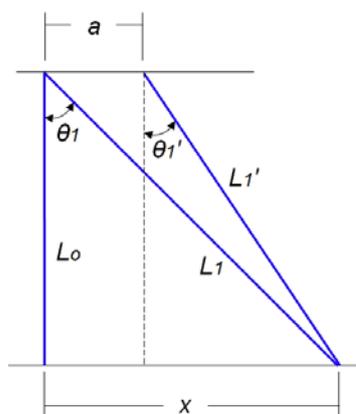


Figura 5.21 – Relação da inclinação das medições e a distância entre pontos de emissão e recepção.

$$L_1 \cdot \cos \theta_1 = L'_1 \cdot \cos \theta'_1 \quad \text{Equação 5.5}$$

$$\tan \theta'_1 = \frac{x - a}{L_0} \Rightarrow \theta'_1 = \tan^{-1} \left(\frac{x - a}{L_0} \right) \quad \text{Equação 5.6}$$

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{L_1}{L'_1} = \frac{\cos[\tan^{-1}((x - a)/L_0)]}{\cos \theta_1} \quad \text{Equação 5.7}$$

Para material homogêneo, se o ângulo das medições não tivesse influência nas leituras, esperava-se que a relação V/V_0 fosse igual a um, contudo não foi isso que ocorreu. A Figura 5.22 mostra a variação da velocidade em relação ao ângulo de inclinação das leituras para distâncias L_0 iguais a 15, 30 e 60 cm e diâmetros de transdutores ' ϕ ' de 50 e 30 mm.

Pode-se observar que o diâmetro do transdutor e a distância percorrida pelo pulso desde o ponto de emissão até o receptor são os principais fatores que influenciam nas leituras. Este problema é mais significativo com ângulos de leituras entre 40 e 60 graus aproximadamente e aumenta conforme seja maior a razão entre o tamanho do transdutor e a distância total percorrida pelo pulso.

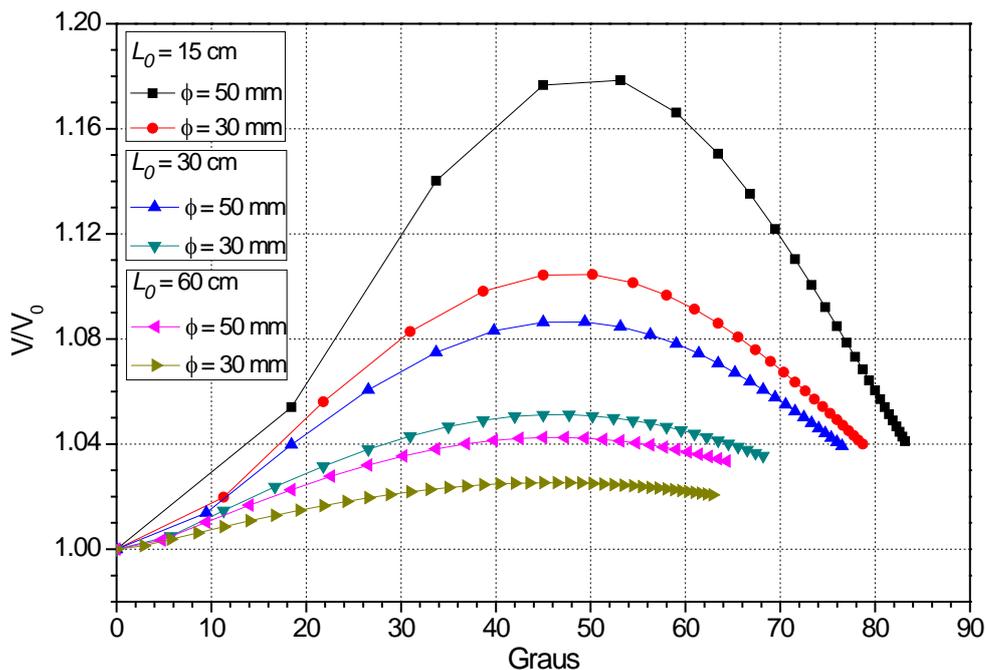


Figura 5.22 – Relação da velocidade de propagação com o grau de inclinação das leituras

Após serem obtidos os resultados teóricos, foi realizada uma comparação com o estudo experimental feito por Perlin (2013). Este estudo consistiu em verificar que a velocidade de propagação do pulso ultrassônico depende do ângulo de leitura; para isso foi concretada uma placa de 100 x 100 x 20 cm e foram realizadas medições diretas através da espessura da placa com diferentes ângulos de inclinação utilizando transdutores de 54 kHz.

A partir dos resultados das leituras foi realizado um gráfico que descreve a variação da velocidade de ultrassom (V/V_0) com relação ao ângulo de inclinação das medições. Encontrou-se para ângulos menores a 42.9° uma função matemática que descreve o aumento da variação da velocidade conforme cresce o ângulo das medições, mas para ângulos superiores, a razão V/V_0 é praticamente constante. A fim de observar a diferença dos resultados entre o estudo experimental de Perlin (2013) e o estudo teórico realizado nesta pesquisa, a Figura 5.23 apresenta os dois resultados para L_0 igual a 20 cm e diâmetro de transdutor ' ϕ ' de 50 mm, que corresponde ao tamanho do transdutor de 54 kHz.

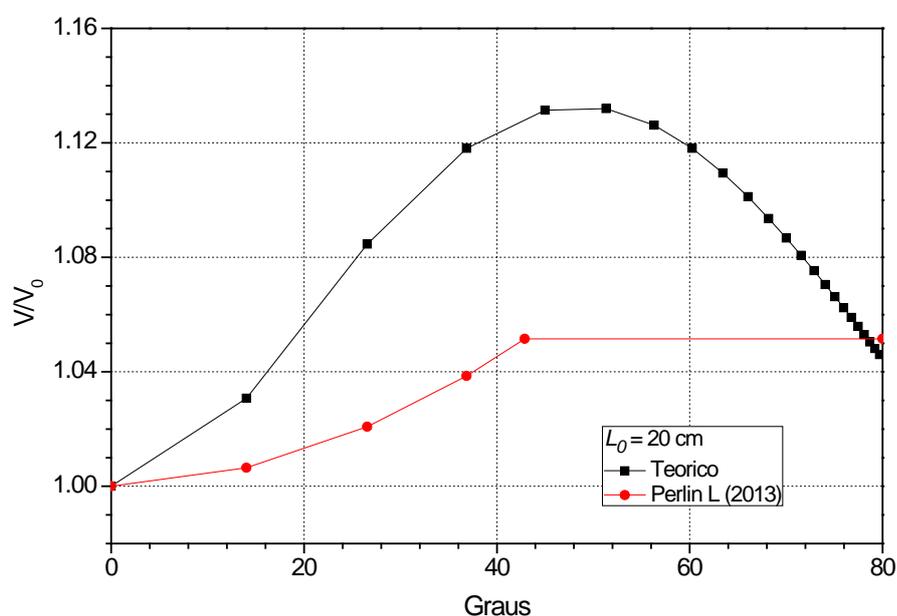


Figura 5.23 – Comparação da variação da velocidade de propagação com o ângulo de leituras

Da mesma forma que para os transdutores de 54 kHz, Perlin L (2013) realizou o mesmo estudo experimental utilizando transdutores de 200 kHz, no entanto neste

caso não foi detectado alguma influência do ângulo da leitura e seu tempo de propagação.

Assim, o autor conclui que, para o estudo realizado, leituras em elementos de 20 cm de espessura com transdutores de 200 kHz não precisam ser corrigidas, mas para leituras com transdutores de 54 kHz deve-se utilizar um fator de correção dependendo o ângulo de cada leitura.

Apesar das discrepâncias entre os dois estudos, é possível afirmar que tanto o tamanho dos transdutores como o grau de inclinação das medições tem uma importante influência nas leituras. Para transdutores de 54 kHz ou 50 mm de diâmetro existe uma variação da velocidade significativa que depende do ângulo de inclinação das medições e da distância entre os transdutores. Além disso, conforme o tamanho dos transdutores seja menor e a distância entre eles aumente, essa variação da velocidade pode diminuir e até ser desprezível dependendo do ângulo de inclinação da leitura e da espessura do elemento ensaiado.

Além disso, acreditasse que a heterogeneidade do material também contribui com aquela variação da velocidade, isto é pelo fato do concreto ser um material anisotrópico, as trajetórias das ondas não seguem sempre caminhos com características idênticas.

Finalmente é importante ressaltar que devem ser realizados estudos mais amplos com o propósito de melhorar a compreensão acerca da influência dos transdutores nos ensaios de ultrassom.

5.2. Avaliação da homogeneidade do concreto

Nesta etapa foram utilizados nove prismas nomeados em ordem da resistência à compressão média aos 28 dias, de maior a menor. Uma vez feitos os ensaios de ultrassom foram realizadas duas análises dos dados, primeiramente foram consideradas as velocidades de propagação das **medições** de ultrassom e,

posteriormente, as velocidades dos **elementos** discretizados da malha após ser feito o processo tomográfico; isto com o propósito de avaliar a influência dos cálculos matemáticos dos métodos de geração de imagens sobre os dados obtidos nos ensaios de ultrassom.

5.2.1. Análise das velocidades de propagação das medições de ultrassom

A Tabela 5.1 apresenta, para cada prisma de concreto, sua resistência à compressão ($f'c$), assim como os valores máximos e mínimos de velocidades de propagação das ondas de ultrassom e a diferença entre cada intervalo de velocidades. Além disso, são apresentados os valores médios das velocidades de ultrassom para cada prisma e os coeficientes de variação.

Tabela 5.1 – Velocidades de propagação das ondas ultrassônicas das medições para os prismas P3 a P11

Prisma	$f'c$ (MPa)	V_{\min} (m/s)	V_{\max} (m/s)	Δ_v (%)	$V_{\text{méd}}$ (m/s)	C.V. (%)
P3	52.39	4194.96	5099.00	17.73	4688.29	1.74
P4	50.35	4285.71	4960.59	13.60	4604.23	2.19
P5	46.06	4430.01	4982.74	11.09	4676.76	1.70
P6	43.39	4357.93	4970.77	12.33	4640.44	1.75
P7	43.15	4077.49	4950.85	17.64	4623.77	1.70
P8	39.61	4370.57	4874.76	10.34	4634.35	2.29
P9	30.28	4069.27	4828.15	15.72	4527.58	1.55
P10	29.08	3973.88	4940.37	19.56	4540.21	1.83
P11	23.91	4164.35	4895.04	14.93	4478.58	2.15

Em geral, é possível observar uma leve tendência das velocidades médias a reduzir com a diminuição da resistência à compressão do concreto, ou seja, enquanto a variação das resistências foi de 54,4%, a variação das velocidades médias foi só de 4,5%. Esta tendência ocorre devido a que com o incremento da resistência à compressão dos prismas, as microestruturas tornam-se mais densas,

com menos quantidade de poros, o que proporciona maiores velocidades de propagação das ondas ultrassônicas (HAACH; JULIANI, 2014).

No que se refere aos coeficientes de variação, observa-se que não superam o 2,3%, valores relativamente baixos que indicam a pouca variabilidade das velocidades no interior dos prismas.

Resulta também interessante avaliar a diferença entre as velocidades de propagação de ultrassom máximas e mínimas para cada prisma. Na Tabela 5.1 observam-se variações das velocidades (Δ_v) com valores entre 10% e 20%, ocasionadas não unicamente pela heterogeneidade do concreto; neste caso as velocidades mais extremas foram observadas principalmente nos cantos dos prismas, pelo efeito de borda.

Como os prismas foram moldados com concreto sem nenhum tipo de heterogeneidade significativa, decidiu-se realizar um tratamento aos dados experimentais das velocidades de propagação das ondas a fim de ajustar a faixa de velocidades para cada prisma tirando aqueles dados atípicos ocasionados por efeitos de borda e possíveis erros durante os ensaios. A análise foi realizada por meio de digramas de caixas ou “*box-plot*”; estes diagramas proporcionam uma visão geral da simetria da distribuição dos dados e são úteis para identificar valores atípicos, pontos máximos e mínimos e ver a dispersão dos dados com relação à mediana (MARTINS, 2005).

O diagrama de caixa (Figura 5.24) é construído a partir de cinco valores que representam o 1º quartil (Q_1), o 3º quartil (Q_3), a mediana ou 2º quartil, o limite inferior e o limite superior. Os quartis são medidas que localizam alguns pontos da distribuição dos dados de tal forma que aproximadamente 25% dos dados são inferiores ou iguais a Q_1 , aproximadamente 25% dos dados são superiores ou iguais a Q_3 e os restantes dados, aproximadamente 50%, situam-se entre Q_1 e Q_3 .

O diagrama é representado por um retângulo (caixa) compreendido entre o 1º quartil e o 3º quartil, com o valor da mediana indicado por uma barra no interior do retângulo. Seguidamente consideram-se duas linhas que unem os meios dos lados

do retângulo com os valores limites. Os valores dos limites inferior (L_I) e superior (L_S) são considerados como o menor e o maior valor da amostra respectivamente e são definidos a seguir:

$$L_I = Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1) \quad \text{Equação 5.8}$$

$$L_S = Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1) \quad \text{Equação 5.9}$$

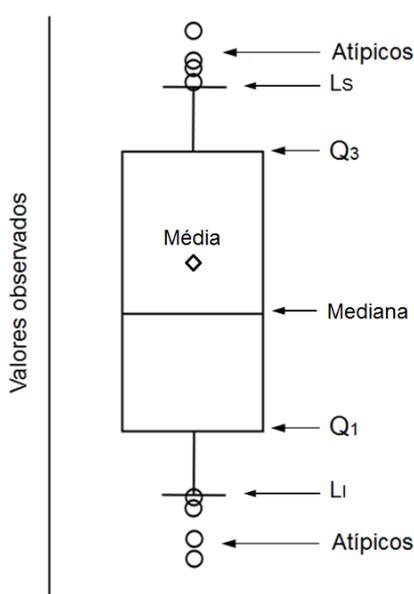


Figura 5.24 – Diagrama de caixa típico

Existem casos em que as amostras contêm valores que se distinguem dos restantes por serem muito grandes ou muito pequenos. Esses valores são conhecidos como atípicos ou *outliers* e se distinguem por não estarem compreendidos entre os limites inferior e superior do diagrama de caixas.

Após o tratamento dos dados experimentais, mediante o diagrama de caixas (Figura 5.25) foi observado primeiramente que existe uma simetria na distribuição dos dados das velocidades de propagação das ondas de ultrassom, confirmando a uniformidade dos prismas de concreto. Além disso, foram definidos os limites máximos e mínimos de velocidades mediante as Equações 5.8 e 5.9, desta forma, foram identificados valores atípicos dos grupos de dados para cada prisma. Assim,

excluindo aqueles dados atípicos que influenciam negativamente os resultados, são apresentados os dados de velocidades máximas, mínimas e médias na Tabela 5.2.

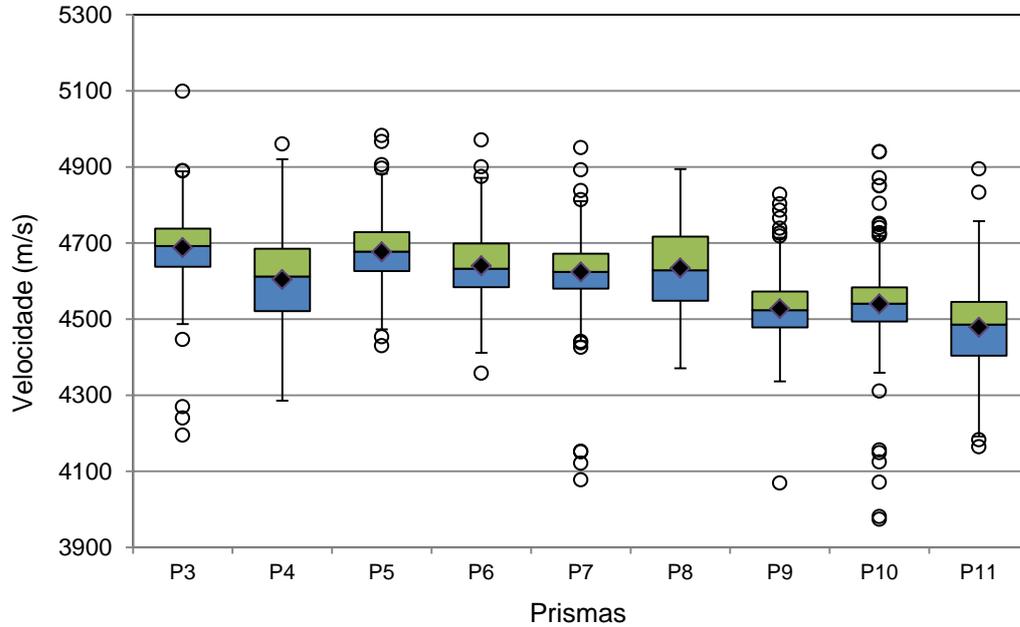


Figura 5.25 – Diagrama de caixas das velocidades de propagação de ondas de ultrassom das medições para os prismas P3 a P11

Tabela 5.2 – Velocidades de propagação das ondas ultrassônicas das medições para os prismas P3 a P11 após o tratamento estatístico dos dados experimentais

Prisma	f'c (MPa)	V _{min} (m/s)	V _{máx} (m/s)	Δ _v (%)	V _{méd} (m/s)	C.V. (%)
P3	52.39	4486.83	4888.44	8.22	4689.43	1.56
P4	50.35	4285.71	4930.99	13.09	4603.72	2.18
P5	46.06	4473.03	4882.04	8.38	4675.93	1.63
P6	43.39	4411.58	4871.37	9.44	4639.66	1.69
P7	43.15	4442.00	4809.85	7.65	4626.03	1.42
P8	39.61	4370.57	4874.76	10.34	4634.35	2.29
P9	30.28	4336.50	4713.93	8.01	4525.54	1.41
P10	29.08	4359.10	4718.38	7.61	4540.41	1.34
P11	23.91	4191.53	4757.81	11.90	4478.35	2.08

Como era esperado, observa-se uma diminuição dos coeficientes de variação para todos os prismas além de uma redução nas faixas de velocidades. Mantem-se a leve tendência da redução das velocidades de propagação de ultrassom à medida que a resistência à compressão também diminui. No entanto, apesar do ajuste nos dados, é difícil estabelecer faixas independentes de velocidades para cada tipo de concreto.

Dado que os prismas foram feitos com concreto íntegro, são compreensíveis as dispersões pequenas das velocidades; além disso, como os dados atípicos de velocidades foram ocasionados por possíveis erros durante as medições ou por efeitos de borda e não por regiões danificadas, a quantidade destes dados é pequena em comparação com o total dos dados. Neste sentido, espera-se que os coeficientes de variação dos dados antes e após o tratamento estatístico sejam similares. A Tabela 5.3 apresenta a comparação entre os coeficientes de variação antes e após o tratamento estatístico. Pode-se observar que a média das variações (Δ_{CV}) é aproximadamente 10%.

Tabela 5.3 – Comparação dos coeficientes de variação das velocidades de propagação das medições para os prismas P3 a P11

Prisma	C.V.* (%)	C.V.** (%)	Δ_{CV} (%)
P3	1,74	1,56	11,20
P4	2,19	2,18	0,75
P5	1,70	1,63	4,18
P6	1,75	1,69	3,19
P7	1,70	1,42	19,08
P8	2,29	2,29	0,07
P9	1,55	1,41	10,37
P10	1,83	1,34	37,00
P11	2,15	2,08	3,58

* Coeficientes de variação antes do tratamento estatístico

** Coeficientes de variação após o tratamento estatístico

5.2.2. Análise das velocidades de propagação nos elementos discretizados da malha

A Tabela 5.4 apresenta, para cada prisma de concreto os valores máximos e mínimos de velocidades de propagação das ondas de ultrassom e a diferença entre cada intervalo de velocidades. Além disso, são apresentados os valores médios das velocidades de ultrassom para cada prisma e os coeficientes de variação.

Tabela 5.4 – Velocidades de propagação das ondas ultrassônicas nos elementos discretizados da malha para os prismas P3 a P11

Prisma	f'c (MPa)	V _{mín} (m/s)	V _{máx} (m/s)	Δ (%)	V _{méd} (m/s)	C.V. (%)
P3	52,39	4168,52	5347,67	22,05	4700,36	3,68
P4	50,35	4124,75	5120,04	19,44	4610,19	3,73
P5	46,06	4109,49	5175,73	20,60	4679,99	4,16
P6	43,39	4043,25	5199,58	22,24	4648,02	3,96
P7	43,15	3774,99	5300,05	28,77	4640,32	4,15
P8	39,61	4148,94	5179,71	19,90	4642,44	4,23
P9	30,28	4028,95	5310,03	24,13	4543,85	3,92
P10	29,08	3803,76	5254,20	27,61	4554,59	4,42
P11	23,91	3934,56	5050,92	22,10	4489,27	3,92

De igual forma que na análise das velocidades de propagação das medições de ultrassom (item 5.2.1), observa-se a mesma redução das velocidades médias com a diminuição da resistência à compressão do concreto.

Em referência aos coeficientes de variação, observa-se que o processo matemático da tomografia ocasionou um pequeno aumento nos coeficientes em comparação à análise das velocidades de propagação das medições, mas continuaram sendo relativamente baixos indicando a distribuição uniforme das velocidades nos prismas. Esse mesmo efeito é observado nas variações das velocidades de propagação (Δ_v) mínimas e máximas, neste caso a variação está entre 20% e 29%.

A seguir, nas Figura 5.26 e Figura 5.27, são apresentadas as imagens tomográficas dos prismas P3 a P11, correspondentes às seções indicadas na Figura 4.6. É de observar nas imagens que, apesar dos efeitos de borda em várias das imagens, existe uma distribuição uniforme de velocidades em todos os prismas, com variações pequenas oriundas da heterogeneidade do concreto.

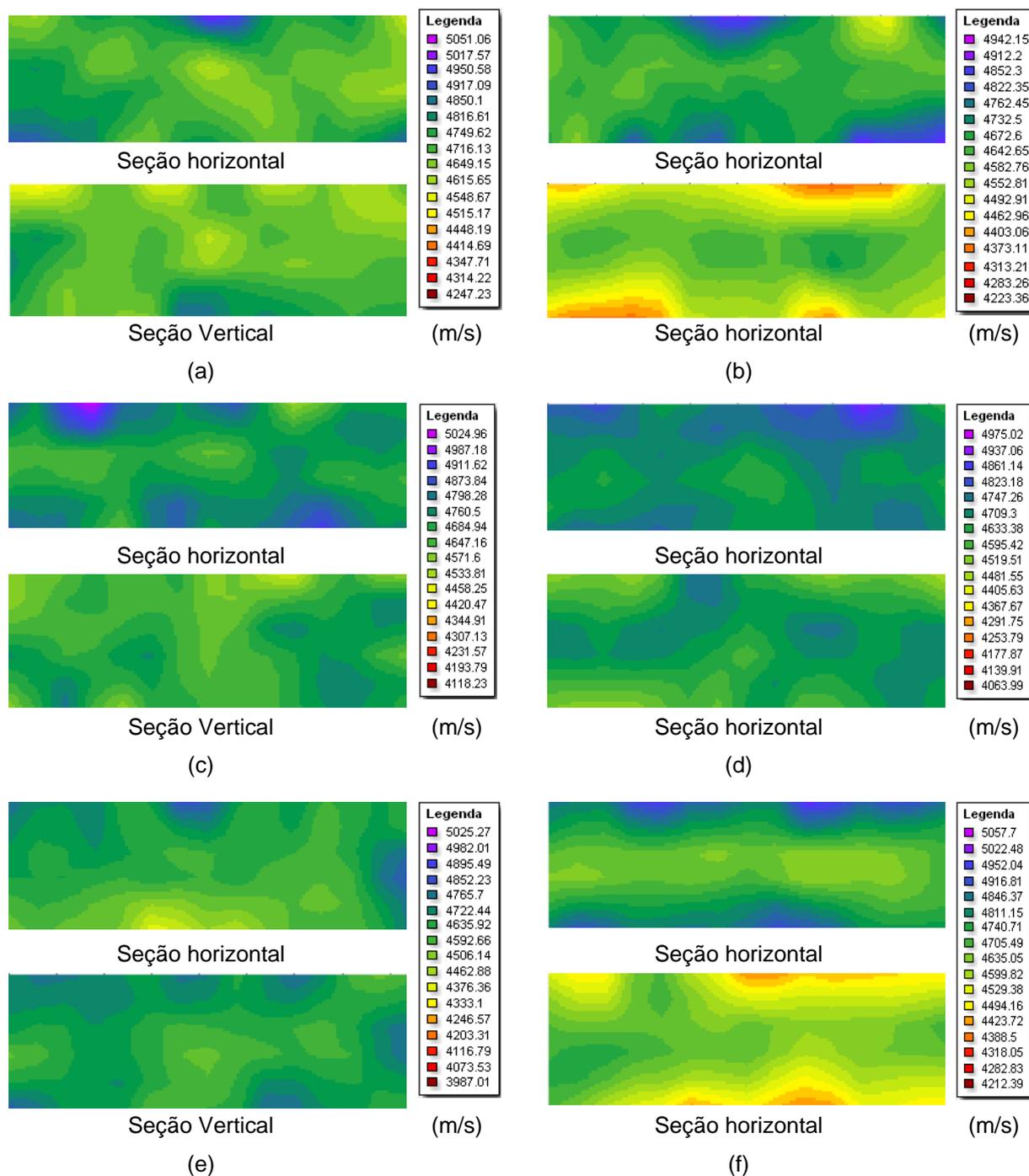


Figura 5.26 – Imagens tomográficas dos prismas a) P3, b) P4, c) P5, d) P6, e) P7 e f) P8

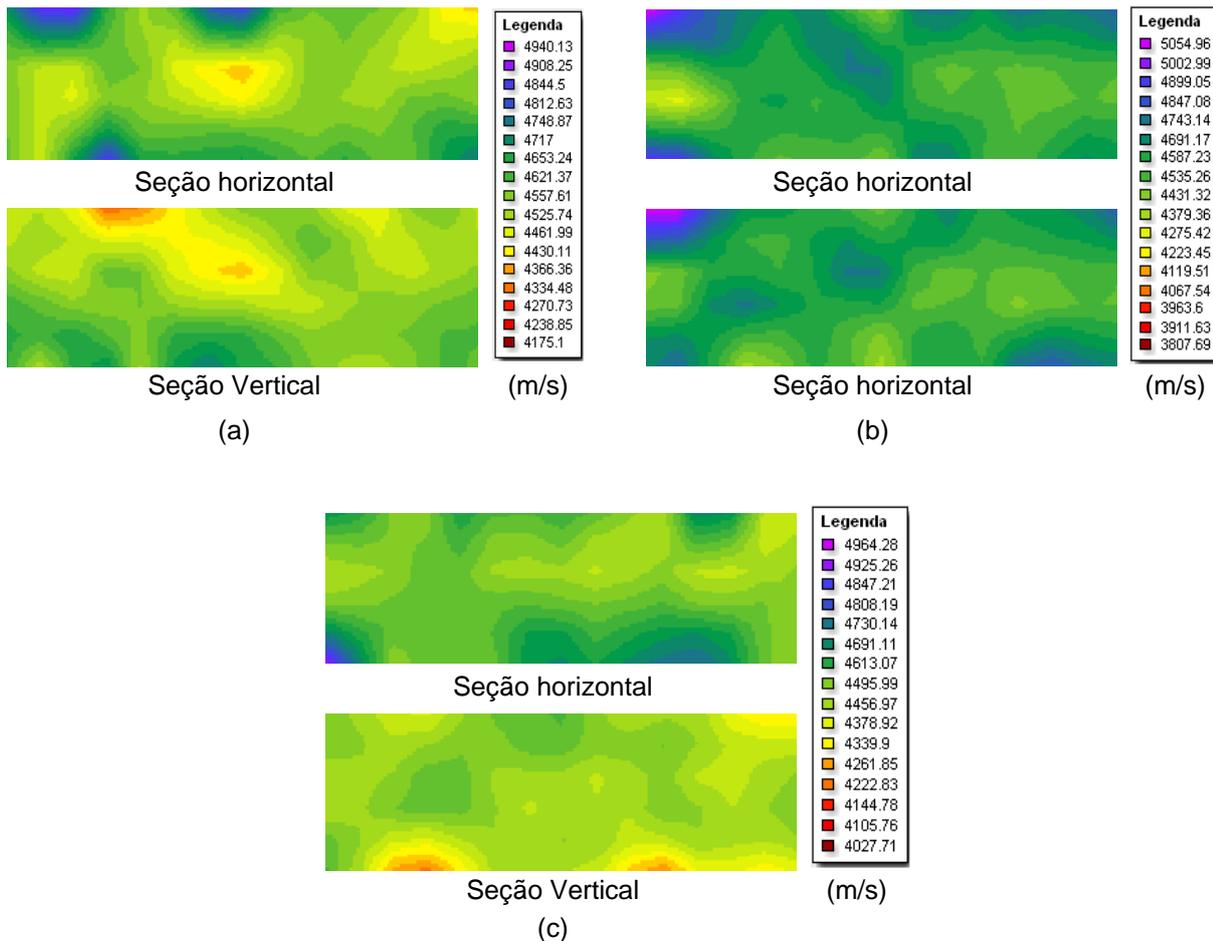


Figura 5.27 – Imagens tomográficas dos prismas a) P9, b) P10 e c) P11

Da mesma forma que com os dados das velocidades de propagação das medições, foi realizado o tratamento dos dados das velocidades dos elementos da malha mediante diagramas de caixas. Na Figura 5.28 são apresentados os diagramas de caixas para os nove prismas de concreto. Continua-se observando nos diagramas a simetria na distribuição dos dados das velocidades de propagação confirmando a uniformidade dos prismas de concreto. Uma vez identificados os dados atípicos, foram excluídos e o ajuste das velocidades máximas, mínimas e médias é apresentado na Tabela 5.5.

Os resultados mostram uma leve diminuição da dispersão dos dados de velocidades para todos os prismas além de uma redução na variação entre as velocidades mínimas e máximas. Neste caso também continua a relação entre a redução das velocidades de propagação de ultrassom e a diminuição da resistência

à compressão. Contudo, como no item anterior, não se observa uma relação clara que permita relacionar faixas de velocidades com cada resistência à compressão do concreto.

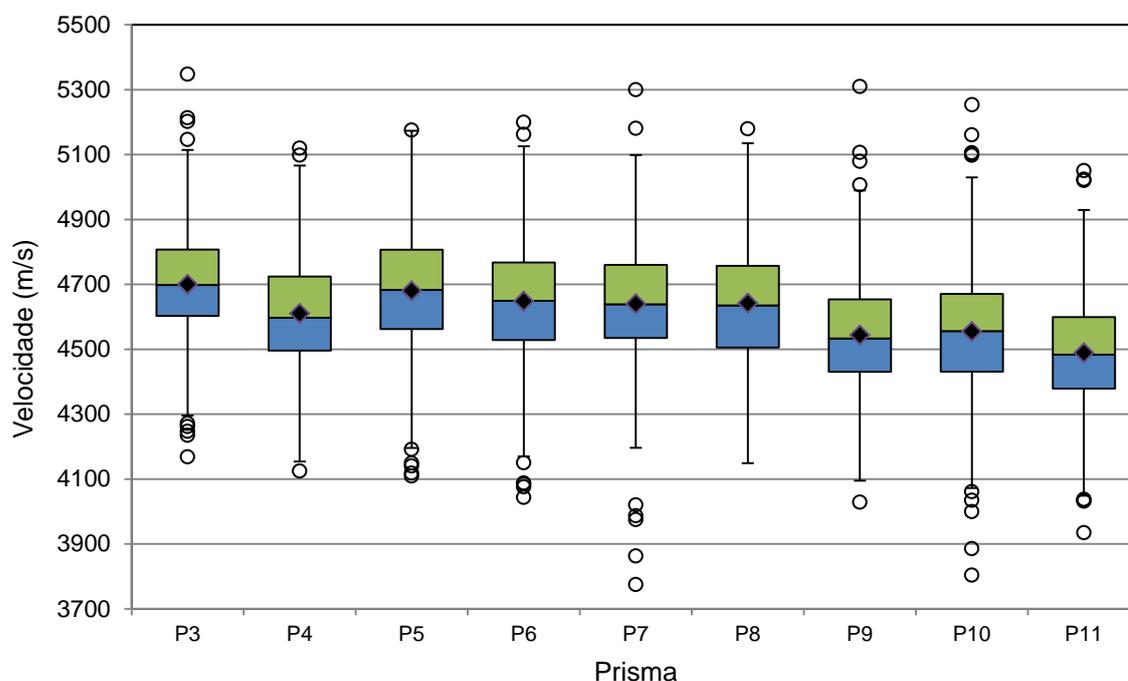


Figura 5.28 – Diagrama de caixas das velocidades de propagação de ondas de ultrassom nos elementos discretizados da malha para os prismas P3 a P11

Tabela 5.5 – Velocidades de propagação das ondas ultrassônicas nos elementos discretizados da malha para os prismas P3 a P11 após o tratamento estatístico dos dados experimentais

Prisma	$f'c$ (MPa)	V_{\min} (m/s)	V_{\max} (m/s)	Δ (%)	$V_{\text{méd}}$ (m/s)	C.V. (%)
P3	52,39	4295,75	5114,59	16,01	4700,97	3,31
P4	50,35	4153,83	5066,08	18,01	4608,71	3,61
P5	46,06	4195,96	5173,44	18,89	4686,38	3,91
P6	43,39	4169,81	5125,90	18,65	4653,07	3,61
P7	43,15	4196,14	5098,74	17,70	4647,26	3,60
P8	39,61	4148,94	5134,85	19,20	4640,90	4,19
P9	30,28	4094,69	4989,57	17,94	4538,60	3,65
P10	29,08	4072,10	5029,58	19,04	4554,71	3,88
P11	23,91	4048,49	4929,57	17,87	4490,12	3,61

Foram comparados também os coeficientes de variação antes e após de ser realizado o tratamento dos dados e os resultados são apresentados na Tabela 5.6. Como no caso onde foram analisadas as velocidades de propagação das medições, na tabela se observa que a média das variações (Δ_{CV}) é aproximadamente 9%.

Tabela 5.6 – Comparação dos coeficientes de variação das velocidades de propagação nos elementos discretizados da malha para os prismas P3 a P11

Prisma	C.V.* (%)	C.V.** (%)	Δ_{CV} (%)
P3	3,68	3,31	11,18
P4	3,73	3,61	3,32
P5	4,16	3,91	6,39
P6	3,96	3,61	9,70
P7	4,15	3,60	15,28
P8	4,23	4,19	0,95
P9	3,92	3,65	7,40
P10	4,42	3,88	14,07
P11	3,92	3,61	8,59

* Coeficientes de variação antes do tratamento estatístico

** Coeficientes de variação após o tratamento estatístico

Por outro lado, embora não seja possível dar uma classificação aos tipos de concreto baseados nas velocidades de ultrassom, é interessante ver que a análise gerou uma faixa mais ampla de velocidades entre 4000 e 5200 m/s que agrupa todos os tipos de concreto utilizados. Assim, é válido afirmar que esta faixa de velocidades está associada a concretos de boa qualidade baseados em que eles foram produzidos no laboratório com boas condições de mistura, compactação e curado. Então, fazendo uma comparação com a classificação sugerida por Whitehurst (1966) apresentada na Tabela 2.2 do item 2.2.4, confirma-se que os concretos bons e excelentes possuem velocidades de propagação de ondas ultrassônicas acima de 3500 m/s e 4500 m/s respectivamente.

5.2.3. Avaliação das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas na presença de defeitos

Até este momento, têm sido realizadas análises sobre o grau de homogeneidade de prismas íntegros com resultados satisfatórios, no entanto, com o propósito de avaliar a influência de algum tipo de defeito nos valores das velocidades, foi realizada uma análise adicional sobre os prismas P1 e P2, utilizados na primeira etapa experimental. Para estes dois prismas também foram analisados os dados das velocidades de propagação das medições de ultrassom e os dados das velocidades dos elementos discretizados na malha após ser feito o processo tomográfico.

Os dados das velocidades mínimas, máximas e médias relacionadas às medições de ultrassom são mostrados a seguir. Nas Tabela 5.7 são apresentados os resultados para os dados com e sem tratamento estatístico.

Tabela 5.7 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas das medições nos prismas P1 e P2: a) antes do tratamento estatístico e b) após o tratamento estatístico

	Prisma	$V_{\text{mín}}$ (m/s)	$V_{\text{máx}}$ (m/s)	Δ_V (%)	$V_{\text{méd}}$ (m/s)	C.V. (%)
(a)	P1	4125.71	5339.27	22.73	4709.76	2.68
	P2 (com isopor)	4071.30	5032.71	19.10	4679.17	3.13
(b)	P1	4316.89	5120.47	15.69	4708.21	2.53
	P2 (com isopor)	4263.35	5032.71	15.29	4680.66	3.07

É importante observar que as variações das velocidades de propagação (Δ_V) em todos os casos estão pela mesma ordem de grandeza. Isto seria compreensível se ambos os prismas estivessem moldados com concreto íntegro, mas no caso do prisma P2 se esperava uma variação maior devido à presença do isopor.

Além disso, a dispersão dos dados das velocidades em geral é pequena, o que pode representar uma aparente distribuição homogênea das velocidades. Comparando os coeficientes de variação antes e após realizar o tratamento

estatístico para cada prisma, encontrou-se uma diferença de 6% e 2% para os prismas P1 e P2 respectivamente. Da mesma forma que com as variações das velocidades máximas e mínimas, estes valores não estão representando a realidade do prisma com isopor.

A mesma análise dos dados foi realizada considerando as velocidades nos elementos discretizados após realizar o processo tomográfico e os resultados são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas dos elementos discretizados da malha nos prismas P1 e P2: a) antes do tratamento estatístico e b) após o tratamento estatístico

	Prisma	V_{\min} (m/s)	V_{\max} (m/s)	Δ_V (%)	$V_{\text{méd}}$ (m/s)	C.V. (%)
(a)	P1	3911,99	5466,70	28,44	4700,23	5,41
	P2 (com isopor)	3479,56	5405,94	35,63	4726,11	5,99
(b)	P1	4044.44	5373.35	24.73	4698.24	5.23
	P2 (com isopor)	4208.46	5320.25	20.90	4766.6	4.45

Notam-se nos dados sem tratamento estatístico, como era esperado, que o prisma P2 apresenta uma variação das velocidades maior que o prisma P1. Sendo o mesmo tipo de concreto para os dois prismas, tem sentido que as velocidades máximas estejam pela mesma ordem de grandeza, mas devido à presença do isopor no prisma P2, o tempo de propagação das ondas é maior e conseqüentemente as velocidades mínimas são menores que no prisma P1.

Cabe ressaltar que realizar um tratamento estatístico sobre os dados do prisma P2 para tentar ajustar alguma faixa de velocidades não tem muito sentido, pois as velocidades menores fazem referência principalmente à presença do isopor. O anterior pode ser visto na Tabela 5.8b onde as velocidades de propagação foram ajustadas excluindo os dados das menores velocidades por fazer parte dos dados atípicos segundo o diagrama de caixas. Isto pode ser também observado na Figura 5.29, que apresenta os diagramas de caixa dos valores de velocidades experimentais para os prismas P1 e P2. Observa-se, como foi mencionado

anteriormente, que uma grande quantidade de valores atípicos presentes no prisma P2 está associada às velocidades menores que representam a presença do isopor.

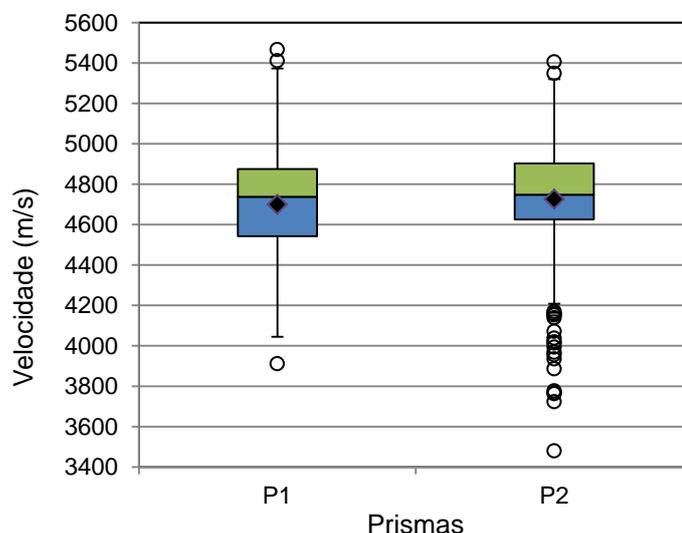


Figura 5.29 – Diagrama de caixas das velocidades de propagação de ondas de ultrassom nos elementos discretizados da malha para os prismas P1 e P2

No que se refere aos coeficientes de variação, a Tabela 5.9 apresenta a diferença para cada prisma entre as dispersões das velocidades de propagação antes e após o tratamento estatístico. Neste caso, para o prisma P1 a variação foi bem pequena confirmando a uniformidade do prisma, e em contraste, o prisma P2 apresentou uma variação de aproximadamente 35%. Este valor elevado resulta interessante, pois pode ser um indicativo de uma quantidade importante de dados atípicos em um grupo de dados uniformes, representando assim regiões danificadas ou irregulares.

Tabela 5.9 – Comparação dos coeficientes de variação das velocidades de propagação nos elementos discretizados da malha para os prismas P1 e P2

Prisma	C.V.* (%)	C.V.** (%)	Δ_{cv} (%)
P1	5.41	5.23	3.44
P2 (com isopor)	5.99	4.45	34.61

* Coeficientes de variação antes do tratamento estatístico

** Coeficientes de variação após o tratamento estatístico

Uma vez realizadas as análises das dispersões das velocidades de propagação a partir dos **elementos** discretizados após realizar o processo tomográfico nos diferentes prismas é interessante ressaltar que o procedimento pode ser uma ferramenta útil para ter uma ideia do estado das estruturas; aparentemente no processo matemático de geração de imagens a presença de não homogeneidades influencia consideravelmente sobre o conjunto total de dados de velocidades. Em contraste, foi observado que analisar o conjunto de dados das velocidades referentes às **medições** de ultrassom, antes de realizar o processo tomográfico, pode não ser um procedimento confiável, pois a variação dos dados na presença de não homogeneidades não tem suficiente influência sobre o total dos dados. Neste caso, ressalta-se a necessidade de realizar estudos mais amplos deste tema para determinar com clareza a influência dos dados das velocidades antes e após realizar o processo tomográfico na identificação de não homogeneidades.

Por outro lado, a variação entre as velocidades máximas e mínimas pode também ser um indicativo para determinar se o elemento analisado está danificado ou não, no entanto é necessário ter conhecimento prévio das velocidades sobre o mesmo concreto sem nenhum dano.

Finalmente, é interessante observar que no prisma P2 a faixa de velocidades está aproximadamente entre 3500 e 5400 m/s e conhecendo que o prisma contém no seu interior um elemento de isopor simulando um dano que reduz consideravelmente sua seção transversal, não seria confiável realizar uma comparação com a classificação dada por Whitehurst (1966) apresentada na Tabela 2.2. Assim, baseados unicamente na faixa de velocidades, o prisma pode ser classificado como um elemento de concreto com qualidade boa ou excelente, mascarando o real estado da estrutura. Neste sentido, não é recomendável realizar um diagnóstico da estrutura baseados unicamente nos valores de velocidades de propagação de ondas e, por isso, é importante mencionar que a geração de imagens tomográficas por ultrassom é muito necessária na hora de avaliar a homogeneidade de estruturas de concreto e identificar possíveis danos.

5.3. Detecção de não homogeneidades

Como foi mostrado no tópico anterior, a técnica da tomografia ultrassônica é uma importante ferramenta para a avaliação da homogeneidade do concreto. Agora, é de interesse observar a sensibilidade da técnica na detecção de não homogeneidades significativas no interior do concreto.

Inicialmente se realizou um ensaio de ultrassom no prisma sem nenhum defeito (P12) para ter uma referência das velocidades e ser comparado com os resultados dos outros prismas utilizados nesta etapa.

Deste primeiro ensaio de ultrassom sobre o prisma P12 foi possível observar uma distribuição uniforme das velocidades de propagação das ondas com um valor médio de 4726,15 m/s e um coeficiente de variação de 3.39%, conforme a Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no prisma P12

V_{\min} (m/s)	V_{\max} (m/s)	Δ (%)	$V_{\text{méd}}$ (m/s)	C.V. (%)
4136,53	5186,38	20,24	4726,15	3,39

5.3.1. Detecção de fissuras ou falhas

Posteriormente, o prisma P12 foi submetido a ensaios de compressão como foi descrito no item 4.3.1. Após o primeiro ensaio à compressão até 200 kN não foi possível observar fissuras ou danos superficiais sobre o prisma, no entanto foi realizado o ensaio de ultrassom para tentar identificar regiões danificadas no interior do elemento. A Tabela 5.11 apresenta os valores de velocidades de propagação dos pulsos de ultrassom através do prisma. É interessante observar que tanto o valor médio de velocidade como o intervalo entre velocidade mínima e máxima são praticamente iguais que no prisma sem carregamento aplicado. Isto pode significar que o nível de carregamento aplicado não ocasionou dano algum no interior do

prisma ou possivelmente o dano não foi significativo para detectar-se através do ensaio de ultrassom.

Com o ensaio à compressão levado até 500 kN, foi possível observar danos importantes nas duas regiões de aplicação da carga, aparecendo fissuras ao redor das quatro faces maiores do prisma (Figura 5.30). No entanto uma das regiões do prisma onde foi aplicada a carga ficou bem danificada o que dificultou realizar algumas leituras de ultrassom.

A análise dos resultados das imagens foi feita em duas partes; primeiramente foram gerados os tomogramas do prisma completo conforme a Figura 5.31, onde a escala de cores em TUSom foi ajustada para observar com clareza a região com maior dano no prisma. Em seguida, foi analisada só a metade do prisma com menor deterioração, isto é a parte direita do prisma segundo a Figura 5.30.

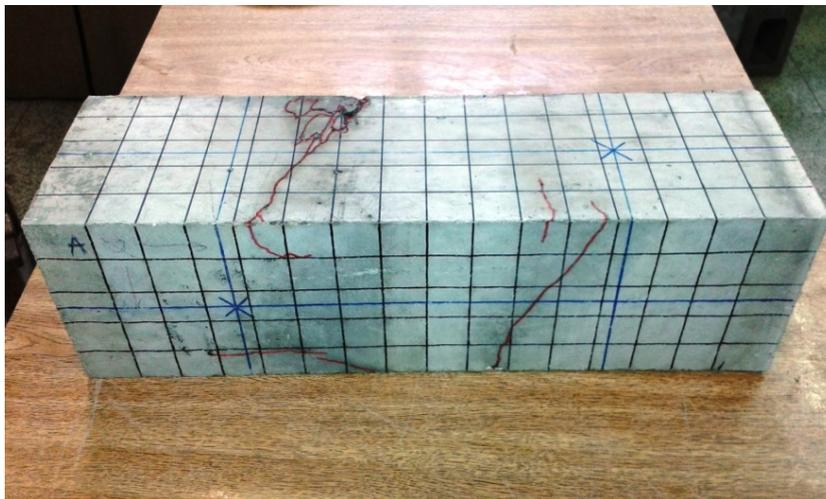


Figura 5.30 – Fissuras geradas no prisma P12

A Figura 5.31 apresenta as imagens geradas de duas seções longitudinais do prisma e uma seção transversal na zona de aplicação da carga. As imagens mostram claramente áreas danificadas representadas por regiões em cor amarela e vermelha.

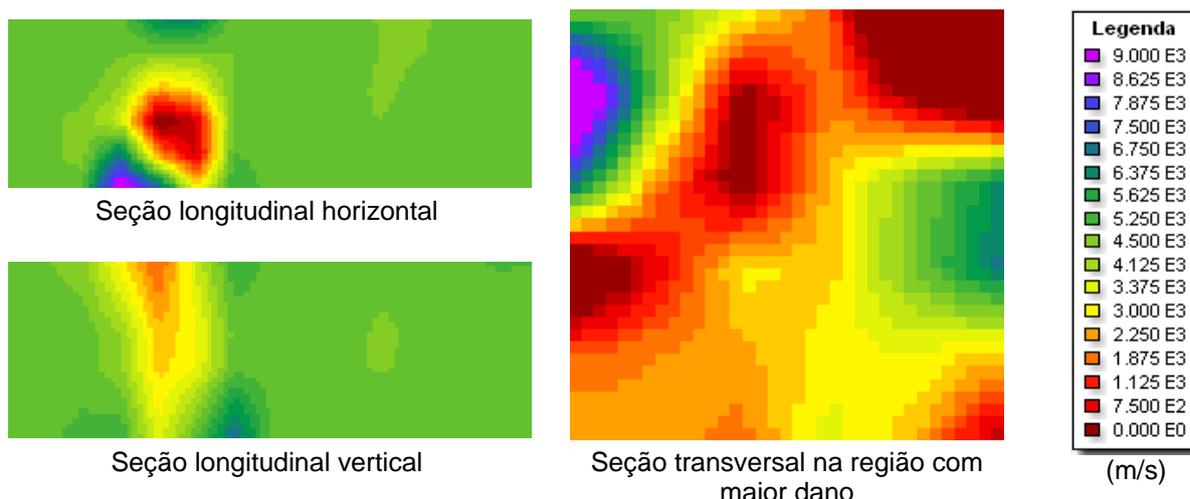


Figura 5.31 – Tomogramas do prisma P12 completo após aplicação da carga (500 kN)

Em relação à análise da metade do prisma com menor deterioração, a Tabela 5.11 apresenta os valores de velocidades de propagação dos pulsos de ultrassom correspondentes ao carregamento aplicado de 500 kN.

Tabela 5.11 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no prisma P12 para as duas etapas de carregamento

Força (kN)	V_{\min} (m/s)	V_{\max} (m/s)	Δ (%)	$V_{\text{méd}}$ (m/s)	C.V. (%)
200	4302,93	5153,45	16,50	4704,80	2,71
500	4070,44	5079,08	19,86	4648,22	4.20

Dos dados obtidos foi possível observar que as velocidades mais baixas foram levemente menores que no prisma íntegro e que no prisma ensaiado com 200 kN, além disso, o coeficiente de variação aumentou ligeiramente. Contudo, dificilmente é possível concluir algo sobre o estado do prisma a partir dos valores obtidos. Apesar de conhecer as velocidades de propagação dos pulsos de ultrassom no prisma íntegro, sua comparação com as velocidades medidas através do prisma danificado não revela a presença de descontinuidades ou fissuras que comprometam a integridade do prisma. Neste sentido, baseado unicamente nos valores numéricos das velocidades obtidas, fica mascarado o estado real do prisma tanto no interior como na superfície do elemento.

Como através dos valores de velocidades dos pulsos de ultrassom não é possível identificar a existência de danos no concreto, foram geradas imagens tomográficas do prisma para ser analisadas. A Figura 5.32a apresenta a imagem de uma seção transversal do prisma afastada da região de aplicação da carga e a Figura 5.32b refere-se a uma seção transversal na região de aplicação do carregamento.

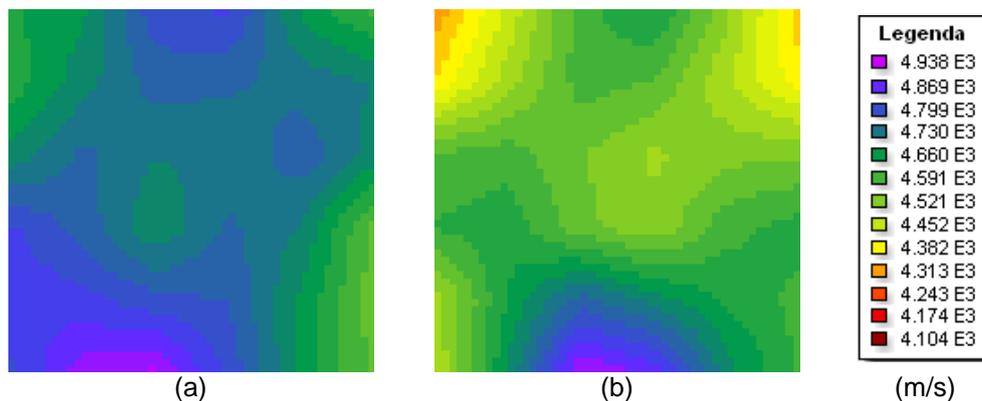


Figura 5.32 – Tomogramas transversais da metade menos danificada do prisma P12, a) seção afastada da região de aplicação da carga, b) seção na região de aplicação da carga (500 kN).

Resulta interessante observar que existe uma diferença entre as duas seções, a imagem embaixo da aplicação da carga apresenta em geral menores velocidades que a outra imagem. Esta variação de velocidades não é muito clara nem define regiões específicas de fissurações, no entanto a diferença no mapa de cores poderia indicar a existência de áreas micro fissuradas formando pequenas descontinuidades, mas ao mesmo tempo não representam uma falha importante que proporcione grandes variações nos tempos de propagação de ultrassom.

5.3.2. Detecção de grandes vazios

Neste tópico é analisado o prisma P13 concretado com dois blocos de isopor no interior dele, conforme descrito no item 4.3.2. A Tabela 5.12 apresenta a faixa de velocidades de propagação do ultrassom que apresentou o prisma durante o ensaio.

Igualmente, na Figura 5.34 são apresentadas cinco imagens tomografias do prisma, sendo duas seções longitudinais e três seções transversais (A, B e C), representadas na Figura 5.33.

Tabela 5.12 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no prisma P13

V_{\min} (m/s)	V_{\max} (m/s)	Δ (%)	$V_{\text{méd}}$ (m/s)	C.V. (%)
2421,18	6458,14	62,51	4683,70	7,98

Nos valores da Tabela 5.12 pode-se observar claramente a variação das velocidades de propagação dos pulsos de ultrassom ocasionando assim um aumento significativo no coeficiente de variação. Estes dados proporcionam informação importante que permite suspeitar do estado do prisma, além disso, como foi mencionado em tópicos anteriores, a variação entre as velocidades máximas e mínimas pode dar um indício de que o elemento analisado possui alguma deterioração.

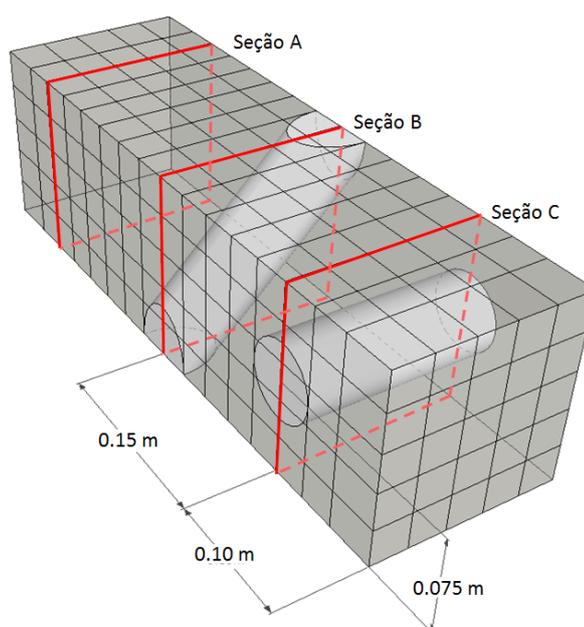


Figura 5.33 – Modelo do prisma P13 e seções de visualização dos tomogramas

Além dos dados numéricos obtidos de velocidades, é importante observar que nas imagens tomográficas apresentadas na Figura 5.34 é possível identificar regiões em cor vermelha relacionadas a velocidades baixas e que indicam a presença dos blocos de isopor. Mais especificamente, tanto a localização como a forma do isopor aparece claramente na imagem tomográfica da seção C; em relação à seção B, apesar da presença do isopor ser observada, a geometria dele não é muito clara, no entanto este fato é atribuído a erros nas medições devido a dificuldades para acoplar os transdutores nas zonas onde o isopor ficou exposto. Por outro lado, é possível observar que a seção A apresenta uma distribuição uniforme de velocidades.

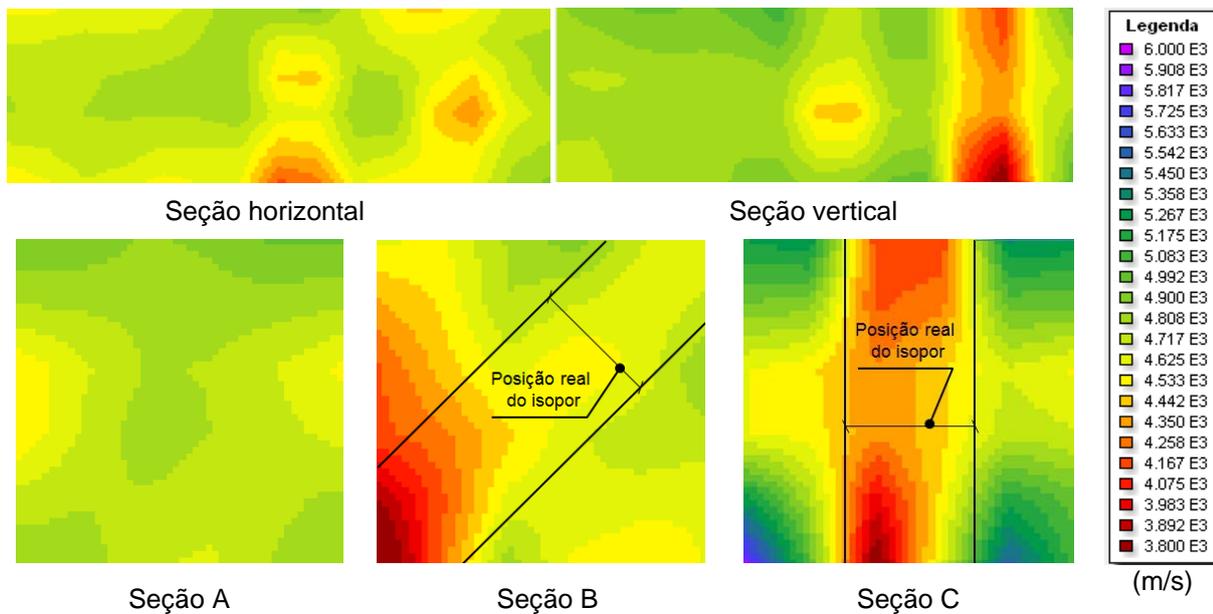


Figura 5.34 – Tomogramas do prisma P13

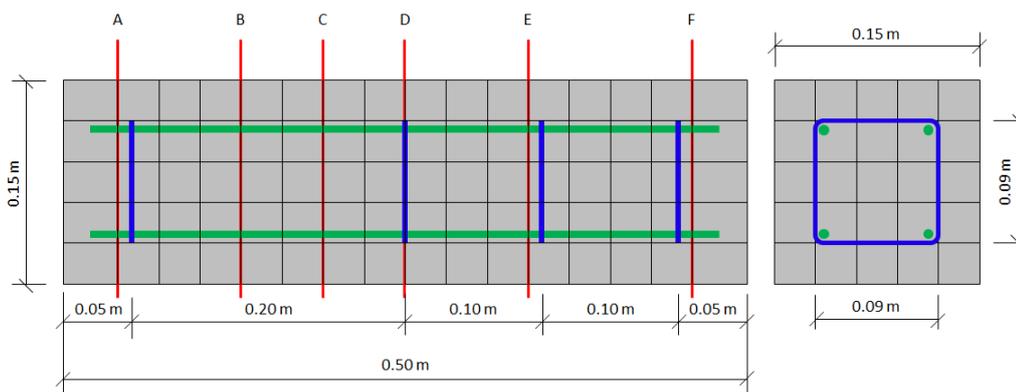
5.3.3. Influência do aço de reforço

Por ultimo foi avaliado o prisma P14 moldado com concreto armado, conforme o item 4.3.3. A Tabela 5.13 apresenta os valores das velocidades de propagação das ondas de ultrassom através do prisma. A Figura 5.36 apresenta as imagens tomográficas do prisma, correspondentes às seções indicadas na Figura 5.35.

Tabela 5.13 – Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no prisma P14

V_{\min} (m/s)	V_{\max} (m/s)	Δ (%)	$V_{\text{méd}}$ (m/s)	C.V. (%)
4198,87	5473,21	23,28	4772,75	4,04

Conforme aos dados da Tabela 5.13, observa-se que os valores não variam muito em comparação com os dados do prisma sem armadura (Tabela 5.10). Apesar do leve aumento na velocidade máxima apresentada no prisma, não é um motivo suficiente para afirmar a presença de armadura, pois a variação é tão pequena que pode ser atribuída à heterogeneidade do concreto e efeitos de borda ou erros de leituras.

**Figura 5.35** – Detalhes da localização da armadura do prisma P14 e seções de visualização dos tomogramas

Da mesma forma, com base nas imagens tomográficas (Figura 5.36), é difícil identificar alguma heterogeneidade importante no prisma. Embora seja possível observar áreas em cor azul nas bordas do prisma referentes a velocidades maiores, isto não representa um motivo importante para concluir algo acerca do aço de reforço.

Com a presença da armadura no prisma de concreto, poderia se esperar uma variação significativa nas velocidades de propagação dos pulsos de ultrassom devido à velocidade das ondas de compressão no aço ser 1.4 a 1.7 vezes maiores que a velocidade no concreto simples. Contudo, é importante considerar que o

aumento aparente na velocidade dos pulsos depende da proximidade das medições com a barra de reforço, às dimensões e ao número de barras de reforço e a sua orientação em relação ao percurso da propagação (MALHOTRA, NAIK E POPOVICS; 2004).

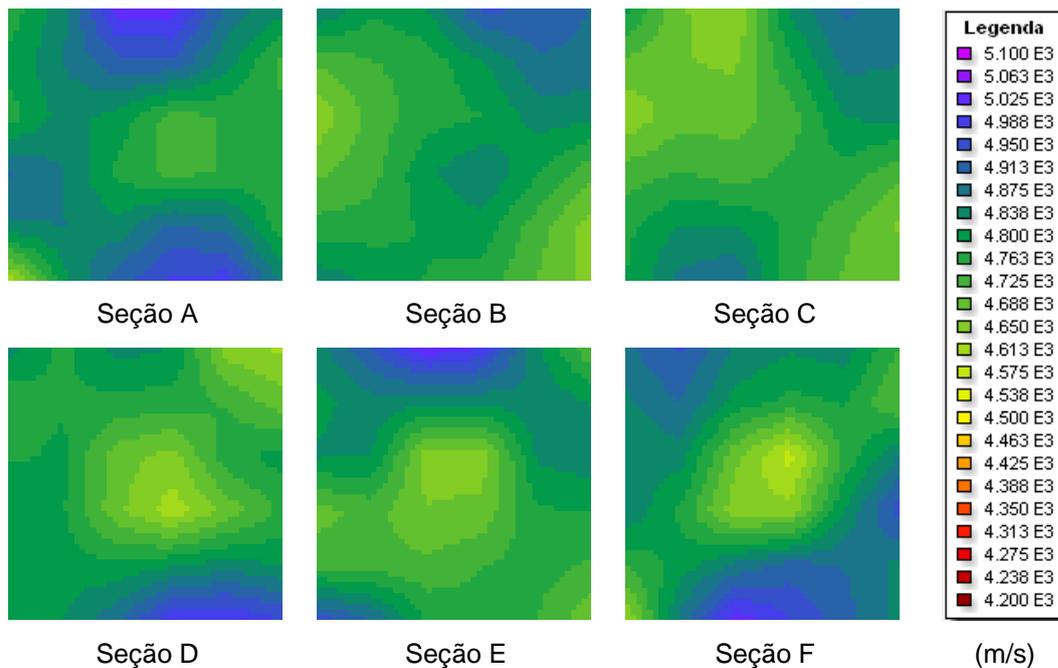


Figura 5.36 – Tomogramas do prisma P14

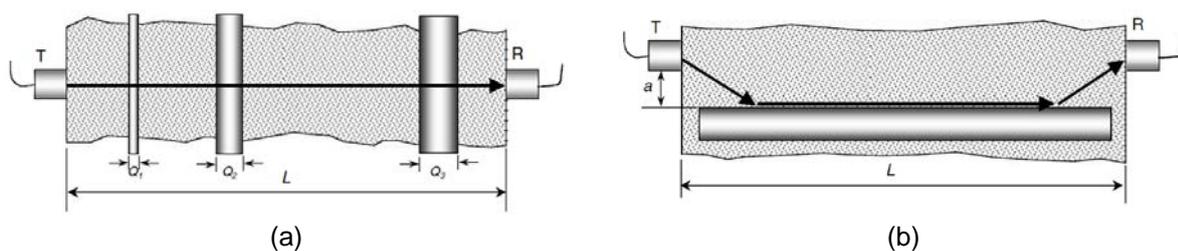


Figura 5.37 – Medições em concreto armado, a) barra de reforço perpendicular à direção de propagação, b) barra de reforço paralela à direção de propagação (Adaptado: MALHOTRA; NAIK; POPOVICS, 2004)

Para barras de reforço perpendiculares à direção de propagação (Figura 5.37a), segundo a norma Britânica BS 1881-Part 203 (1986), sua influência pode ser calculada assumindo que o pulso atravessa o diâmetro total de cada barra durante o

seu caminho. Se existem 'n' diferentes barras de diâmetro 'Q' perpendicularmente ao percurso de propagação, então:

$$\frac{V_c}{V} = 1 - \frac{L_s}{L} \left(1 - \frac{V_c}{V_s}\right) \quad \text{Equação 5.10}$$

Onde,

V = velocidade de pulso no concreto armado,

V_c = velocidade de pulso no concreto simples,

V_s = velocidade de pulso no aço,

L = comprimento total do caminho,

$$L_s = \sum_{1}^n Q_i, \quad \text{comprimento do caminho através do aço}$$

Em consequência, para o prisma P14, com uma velocidade média no concreto simples (V_c) de aproximadamente 4700 m/s segundo a Tabela 5.10, um comprimento total (L) de 0,15 m equivalente a uma medição direta através da seção transversal do prisma, e no caso dos pulsos atravessarem duas barras de aço de dez milímetros cada ($L_s = 0,002$ m), resulta que o valor da velocidade dos pulsos no concreto reforçado (V) seria aproximadamente 3% maior que no concreto simples, ou seja, 4841 m/s . Neste sentido, nota-se que a influência da armadura localizada perpendicularmente à trajetória dos pulsos no prisma é muito pequena, ocasionando que a variação da velocidade de ultrassom seja muito similar à variação referente à heterogeneidade do concreto simples. Assim fica mais claro o fato da pequena variação das velocidades no ensaio experimental do prisma armado em comparação com o prisma sem armadura.

Para barras em posição paralela à direção de propagação do pulso (Figura 5.37b), segundo a norma Britânica BS 1881-Part 203 (1986), se a extremidade da barra está localizada a uma distância 'a' da linha que une os pontos mais próximos dos dois transdutores e o comprimento do caminho entre os transdutores é L , então o tempo de viagem ' T ' pode ser calculado como a Equação 5.11.

$$T = \frac{L}{V_s} + 2a \frac{\sqrt{V_s^2 - V_c^2}}{V_s V_c} \quad \text{Equação 5.11}$$

A influência das barras de aço paralelas à direção de propagação poderá ser desprezível quando:

$$\frac{a}{L} \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c}} \quad \text{Equação 5.12}$$

Aplicando a Equação 5.11 com os parâmetros do prisma P14, isto é uma velocidade média no concreto simples (V_c) de aproximadamente 4700 m/s, a distância (a) de 0,01 m à base do estribo da armadura e um comprimento total (L) de 0,15 m equivalente a uma medição direta através da seção transversal do prisma, é obtido o valor do tempo de propagação igual a 30,66 μ s. Assim, com o tempo de propagação e a distância total percorrida pelo pulso igual a 0,15 m é calculado o valor da velocidade de propagação da onda através do concreto armado. Este valor é de aproximadamente 4891 m/s sendo 4% maior que o valor médio da velocidade dos pulsos no prisma de concreto sem armadura. Nota-se que a influência das barras de aço paralelas à direção de propagação dos pulsos, para o caso particular de pesquisa, teoricamente não é significativa, concordando com os resultados das medições experimentais e das imagens tomográficas.

Conclui-se, portanto, que para este caso de estudo, as dimensões e o número de barras de reforço não constituem um fator significativo que ocasione uma variação importante nos valores das velocidades dos pulsos de ultrassom, mas não por isso significa que seja um fator desprezível de forma geral nos ensaios de ultrassom. De fato, a norma Britânica BS 1881-Part 203 (1986) propõe a utilização de fatores de correção, que são função da geometria estudada, calculados a partir da Equação 5.10 e Equação 5.11.

5.4. Resumo

Neste capítulo foi possível observar primeiramente a influência nos ensaios de ultrassom de fatores como o arranjo entre transdutores, a frequência de medições e do tipo de onda utilizada. Assim, foram definidos alguns parâmetros de acordo com os bons resultados apresentados e os quais foram fundamentais para o desenvolvimento das outras etapas experimentais.

Em seguida foi realizada uma avaliação da homogeneidade de prismas de concreto com diferentes resistências à compressão. Por fim, foram apresentados os resultados da última etapa experimental relacionada à detecção de vazios, áreas danificadas através de ensaios à compressão e à sensibilidade das medições na presença de aço de reforço no concreto.

Através dos resultados obtidos foi observada a importância da geração de imagens tomográficas para a avaliação da homogeneidade do concreto e para a detecção de não homogeneidades internas, pois foi visto que seria uma tarefa difícil de realizar a partir só dos valores das velocidades de propagação de ondas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusões

No presente trabalho foi estudada a técnica da tomografia ultrassônica abordando a análise de diversos parâmetros intrínsecos dos ensaios de ultrassom e da reconstrução de imagens tomográficas. Tal abordagem forneceu informação importante das características dos ensaios de ultrassom permitindo identificar condições favoráveis e limitações na realização dos ensaios. Foi desenvolvido um programa computacional de geração de imagens tomográficas a partir de leituras de velocidades de propagação de ondas de ultrassom.

A técnica da tomografia ultrassônica se mostrou como uma potente ferramenta para a avaliação da homogeneidade de elementos de concreto e para a detecção de não homogeneidades no interior deles. Contudo cada situação deve ser analisada particularmente dependendo das exigências dos resultados esperados e das condições do ensaio. Isto é, a escolha de parâmetros como frequência, arranjo dos transdutores, quantidade de medições, tipo de onda, entre outros, variam em cada ensaio dependendo do tamanho das não homogeneidades que se desejam identificar e da facilidade para realizar medições sobre todas as faces do elemento analisado.

Entre os três métodos de reconstrução de imagens implementados no programa TUSom desenvolvido nesta pesquisa, em forma geral o SIRT e o método dos Mínimos Quadrados retornaram imagens confiáveis e de melhor qualidade que o método ART. Apesar disso, sistemas tomográficos de equações indeterminados são uma limitante para os Mínimos Quadrados, como foi o caso onde se realizaram só medições diretas, sendo isto uma desvantagem frente ao método SIRT.

Medições diretas ortogonais (Caso1), diretas ortogonais e oblíquas (Caso 2) e semidiretas (Caso 3) não representaram a realidade dos prismas analisados com transdutores de 54 kHz de ondas longitudinais. Em contraste, medições de seções

transversais ao longo do prisma (Caso 4) com os mesmos transdutores geraram imagens de melhor qualidade, representando satisfatoriamente a realidade do elemento.

No caso dos transdutores de 250 kHz de ondas longitudinais, as medições diretas ortogonais (Caso 1) apresentaram uma melhoria em comparação com as medições feitas com transdutores de 54 kHz, no entanto as medições diretas ortogonais e oblíquas (Caso 2) não geraram imagens aceitáveis apesar de ser uma grande quantidade de medições. Da mesma forma que com transdutores de 54 kHz, as medições por seções transversais ao longo dos prismas (Caso 4), abarcando as quatro faces, geraram as melhores imagens tomográficas. Contudo, este último caso de leituras pode se tornar pouco viável, pois apesar de não ser o caso com a maior quantidade de medições, pode ocasionar tempos de ensaios excessivos dependendo do tamanho do elemento analisado. Assim, o Caso 5 de medições, correspondente a medições por seções transversais entre faces opostas, sendo uma variação do Caso 4, mostrou-se como a melhor alternativa para realizar os ensaios diminuindo consideravelmente a quantidade de medições e retornando imagens muito satisfatórias.

Em relação ao número de leituras, para analisar cada prisma com os transdutores de 54 kHz e uma malha de discretização de 50 mm de aresta, foram necessárias de 69 medições no Caso 1, 900 no Caso 2, 1800 no Caso 3 e 540 no caso 4. Ressalta-se que os melhores resultados não foram obtidos com o caso de maior número de medições, senão a partir do Caso 4. Em referência aos transdutores de 250 kHz e uma malha de 30 mm de aresta, para analisar cada prisma foram necessárias 160 medições no Caso 1, 4900 no Caso 2, 2100 no Caso 4 e 700 no Caso 5, sendo este último caso o que apresentou resultados muito satisfatórios em termos de tempos de ensaio e de imagens tomográficas.

Conclui-se, portanto, que a qualidade das imagens depende consideravelmente do arranjo dos transdutores e da frequência utilizada para os ensaios, mas não necessariamente uma maior quantidade de medições retorna melhores imagens. Neste caso de pesquisa, frequências maiores e o arranjo entre transdutores referente ao Caso 5 geraram resultados mais satisfatórios.

No que se refere ao tipo de onda utilizado nos ensaios, observou-se que tanto as ondas longitudinais como as transversais são boa alternativa para detectar não homogeneidades internas. Neste caso não foram identificadas diferenças ou vantagens em referência à qualidade de imagens geradas a partir dos dados de velocidade das ondas. Contudo, a utilização dos transdutores de cisalhamento requer do uso de um gel especial de acoplamento de alta viscosidade, o que provoca maiores tempos de ensaios; além disso, o programa de aquisição dos dados das medições de ultrassom utilizado nesta pesquisa só fornece o tempo de viagem das ondas longitudinais e não das transversais, o que implica um tratamento adicional dos dados experimentais para obter o tempo das ondas de cisalhamento.

Foi evidenciada, mediante um estudo teórico, a dependência das leituras com parâmetros geométricos como a inclinação das medições, o tamanho dos transdutores e a espessura do corpo de prova analisado. Isto é, o tamanho do transdutor e a inclinação das leituras influenciam consideravelmente os resultados das velocidades obtidos nos ensaios. Esta influência é mais significativa para ângulos de leituras entre 40 e 60 graus aproximadamente e aumenta conforme seja maior a razão entre o tamanho do transdutor e a distância total percorrida pelo pulso.

Mediante a avaliação do grau de homogeneidade de prismas de concreto com diferentes resistências, foi observada uma leve diminuição das velocidades de propagação das ondas com a redução da resistência à compressão dos prismas. Além disso, foram observadas distribuições relativamente uniformes das velocidades de ultrassom nas imagens geradas, confirmando a aplicabilidade da técnica tomográfica na avaliação da homogeneidade de estruturas de concreto.

Cabe ressaltar a importância que tem a análise da homogeneidade do concreto a partir das imagens geradas e não só dos valores de velocidades. Isto é, segundo a classificação da qualidade do concreto baseada na velocidade de ultrassom, encontrada na literatura, o estado real da estrutura pode ficar mascarado, como foi o caso do prisma analisado com um vazio significativo no interior mostrando velocidades acima de 3500 m/s fazendo referência a um concreto de boa qualidade.

Em relação à identificação do dano gerado pela aplicação de carregamento, encontrou-se uma leve variação das velocidades na região de menor danificação, no entanto não foi clara a presença do dano em termos de localização e geometria específica. Acredita-se que o dano gerado nessa região faz referência a microfissuras formando pequenas descontinuidades que não permitem uma variação significativa dos tempos de propagação de ondas. Em relação à região de maior deterioração, além do dano ser identificado visualmente muito fácil, as imagens tomográficas permitiram observar com facilidade estas áreas do prisma.

Finalmente, para estruturas de concreto armado os resultados mostraram muita pouca influência das barras de aço sobre as velocidades de propagação das ondas. Neste caso é importante realizar estudos mais amplos variando a quantidade, o diâmetro e a localização das barras de aço a fim de avaliar melhor a sensibilidade dos ensaios de ultrassom. É importante mencionar que a aplicação da técnica de tomografia ultrassônica não está voltada à detecção de aço no concreto, pois existem outras técnicas especializadas nesse tópico, contudo é importante avaliar a capacidade da técnica para detectar danos ou não homogeneidades maiores no interior de estruturas de concreto armado.

6.2. Recomendações

Com relação às conclusões obtidas neste trabalho há ainda uma grande quantidade de pontos a serem examinados, dentre os quais se destacam:

- Analisar a técnica de tomografia a partir da atenuação de ondas ultrassônicas.
- Estudar a sensibilidade dos ensaios de ultrassom e das imagens tomográficas em elementos de concreto armado com não homogeneidades internas.
- Efetuar uma revisão bibliográfica mais ampla sobre outros algoritmos de geração de imagens tomográficas a fim de melhorar a resolução dos resultados.

REFERÊNCIAS

AGGELIS, D.G.; SHIOTANI, T. **Repair evaluation of concrete cracks using surface and through-transmission wave measurements**. Cement & Concrete Composites, v. 29, p. 700-711, 2007.

AGGELIS, D.G.; TSIMPRIS, N.; CHAI, H.K.; SHIOTANI, T.; KOBAYASHI, Y. **Numerical simulation of elastic waves for visualization of defects**. Construction and Building Materials, Oxford, v. 36, p. 1503-1512, 2011.

AGGELIS, D.G.; KORDATOS, E.Z.; STRANZA, M.; SOULIOTI, D.V.; MATIKAS, T.E. **NDT approach for characterization of subsurface cracks**. Construction and Building Materials, Oxford, v. 25, p. 3089-3097, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.2R**. Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Farmington Hills, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C597 – 09**. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Pennsylvania, United States. 2010.

ANDERSEN, A.H.; KAK, A.C. **Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): A superior implementation of the ART algorithm**. Ultrasonic Imaging, v. 6, p. 81-94, 1984.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. São Paulo, Associação Brasileira de ensaios não destrutivos e inspeção – ABENDI, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 1994.

BENOUIS, A.; GRINI, A. **Estimation of concrete's porosity by ultrasounds**. Physics Procedia. V. 21, p. 53-58, 2011

BUNGEY, J.H.; MILLARD, S.G. **Testing of Concrete in Structures**. 3.ed. London: Chapman & Hall, 1996, 292 p.

BRITISH STANDARD **BS 1881, Part 203**: Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete. British Standards Institution, London, 1986.

CARINO, N.J. **Pullout Test**. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

_____. **Nondestructive Tests Methods**. In: NAWY E.J. Concrete Construction Engineering Handbook, 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

CARTZ, L. **Nondestructive Testing: radiography, ultrasonics, liquid penetrant, magnetic particle, eddy current**. ASM International. Milwaukee WI USA, 1995.

CHAI, H.K.; MOMOKI, S.; KOBAYASHI, Y.; AGGELIS, D.G.; SHIOTANI, T. **Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound**. NDT & E International, v. 44, n. 2, p. 206-215, 2011.

DA SILVA, S.F., VILLANI, P. **Ensaaios não destrutivos**. Belo Horizonte, 2006, 96 p.

FERRARO, C.C.; BOYD, J.A.; CONSOLAZIO, R.G. **Evaluation of damage to bridge piers using pulse velocity tomography**. Construction and Building Materials, v. 38, p. 1303-1309, 2013.

GILBERT, P. **Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections**. J. Theor. Biol., v. 36, p. 105-117, 1972.

GORDON, R.; BENDER, R.; HERMAN, G.T. **Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography**. J. Theor. Biol., v. 29, p. 471-482, 1970.

HAACH, V.; JULIANI, L. **Application of ultrasonic tomography to detection of damages in concrete**. Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODDN 2014, Porto, Portugal, p. 3351-3357, 2014.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília DF: SENAI, 1992.

HOLA, J.; SCHABOWICZ, K. **State of the art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends**. Archives of civil and mechanical engineering, v. 10, p. 5-18, 2010.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. IAEA, Training course series 17. **Guidebook on nondestructive testing of concrete structures**. Vienna, 2002.

IUSEM, A. N.; PIERRO A. R. de. **Fundamentos matemáticos da tomografia computadorizada: método de expansão em séries**. Revista Matemática Universitária, São Paulo, n. 12, p. 57-85, 1990.

JONES, R. **Non-Destructive Testing of Concrete**, London: Cambridge University Press, 1962.

KALK, C.A.; SLANEY, M. **Principles of Computerized Tomographic Imaging**. New York: IEEE Press, 1988.

KRAUTKAMER, J.; KRAUTKAMER, H. **Ultrasonic Testing of Materials**. Springer-Verlag, 4 ed. New York, 1990.

LAUER, K.R. **Magnetic/Electrical Methods**. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

LORENZI, A.; FONSECA, L.; TRÄSEL, M.; PINTO, L.C. **Utilização de ultra-som para o monitoramento de estruturas de concreto**. 3rd Pan American conference for nondestructive testing – PANNDT. Rio de Janeiro, 2003.

LORENZO, I. **Aspectos Matemáticos de la Tomografía Computarizada.** Dissertação (Licenciatura) – Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, Mexico, 2008.

MALHOTRA, V.M.; NAIK, T.R; POPOVICS, J.S. **The Ultrasonic Pulse Velocity Method.** In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MARTIN, J.; BROUGHTON, K.J; GIANNOPOLOUS, A.; HARDY, M.S.A.; FORDE, M.C. **Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams.** NDT&E International, Oxford, v. 31, p. 107-113, 2001.

MARTINS, M.E. **Introdução à probabilidade e à estatística.** Departamento de Estatística e Investigação Operacional da FCUL. 2005.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** Editora Ibracon. 2008.

MITCHELL, T.M. **Radioactive/Nuclear Methods.** In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MOLERO, M.; APARICIO, S.; AL-ASSADI, G.; CASATI, M.J.; HERNÁNDEZ, M.G.; ANAYA, J.J. **Evaluation of freeze–thaw damage in concrete by ultrasonic imaging.** NDT&E International, v. 52, p, 86–94, 2012.

MULDOON, R.; CHALKER, A.; FORDE, M.C.; OHTSU, M; KUNISUE, F. **Identifying voids in plastic ducts in post-tensioning prestressed concrete members by resonant frequency of impact–echo, SIBIE and tomography.** Construction and Building Materials, Oxford, v. 21, p. 527-537, 2007.

OULD-NAFFA, S.; GOUEYGOU, M.; PIWAKOWSKI, B.; BUYLE-BODIN, F. **Detection of chemical damage in concrete using ultrasound.** Ultrasonics, v. 40, p. 247-251, 2002.

PERLIN, L.P. **Tomografia Ultrassônica em concreto: Desenvolvimento de ferramenta computacional**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PERLIN, L.P.; PINTO, R.C.A. **Tomografia ultrassônica em concreto**. Ibracon, Santa Catarina, v. 6, p. 246-269, 2013.

WATANABE, T.; TRANG, H.T.; HARADA, K.; HASHIMOTO, C. **Evaluation of corrosion-induced crack and rebar corrosion**. Construction and Buildings Materials, v. 67, p. 197-201, 2014.

WHITEHURST, E. A. **Evaluation of concrete properties from Sonic test**. Detroit, American Concrete Institute, 1966. 84 p.