

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LOURENÇO PANOSSO PERLIN

**TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA EM CONCRETO:
DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL**

Florianópolis

2011

LOURENÇO PANOSSO PERLIN

**TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA EM CONCRETO:
DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.

Florianópolis

2011

Catlogação na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

P451t Perlin, Lourenço Panosso
Tomografia ultrassônica em concreto [dissertação] /
Lourenço Panosso Perlin ; orientador, Roberto Caldas de
Andrade Pinto. - Florianópolis, SC, 2011.
1 v.: il., tabs., grafs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Concreto. 3. Ultrassom. 4.
Descontinuidades. 5. Tomografia. I. Pinto, Roberto Caldas de
Andrade. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

LOURENÇO PANOSSO PERLIN

**TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA EM CONCRETO:
DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC.

Florianópolis, 13 de junho de 2011.

Prof^a. Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.Ing. – Coordenadora do PPGEC

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D. – Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Ivo José Padaratz, Ph.D. – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a. Poliana Dias de Moraes, Dr^a. – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^{da}. Mônica Pinto Barbosa, Dr.Ing. – Universidade Estadual Paulista

Dedico a toda minha família,
amigos, em especial à minha
noiva Renata por todo carinho e
compreensão, te amo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Eneida e Ayres e meu irmão Rafael pelo apoio incondicional aos meus estudos, tanto na graduação quanto no mestrado. À minha noiva Renata pela compreensão e apoio nesse caminho trilhado, suportando minha ausência devida aos estudos. É com muito orgulho e felicidade que divido com vocês essa jornada da vida. Amo todos vocês.

Ao professor Roberto, que acreditou no meu trabalho e apostou que eu poderia desenvolver este tema. Por ser uma ótima pessoa, bem como um grande professor e orientador, suas sugestões e incentivos foram fundamentais para que o meu trabalho fosse o melhor possível. Parabéns e muito obrigado.

Ao professor Ivo, que sempre ajudou com seus conselhos valiosos, devido à sua grande experiência profissional com ensaios não destrutivos e ultrassom.

À professora Henriette, que se eu adquirir 5% de seu conhecimento já seria um gênio. Muito obrigado pelo carinho e atenção proporcionados a mim durante esse mestrado e parabéns.

Aos colegas do GPEND, Mário, Silvana, Thaini, Alcides, Bruno, Nílton e Thuyton. Aos colegas do GRUPEX, Paulo, Isabel, Daniel, Beth, Flávia, Kleyser, Artur, Gustavo, Fernando, Carlos, entre tantos outros que passaram pela salinha. Aos colegas do GIEM, Prof. Szücs, Manuel, João, entre outros, que ajudaram na confecção das formas. A Prof^a. Poliana pelo auxílio no uso do LEE.

A todos os outros professores da Engenharia Civil, principalmente da Área de Estruturas, que sempre estavam disponíveis para sanar as mais diversas dúvidas.

À empresa ENGEMIX, pelo fornecimento de material para confecção dos corpos de prova. Ao CNPq, pelo provimento da minha bolsa de estudos, muito importante para minha vida pessoal.

A todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o sucesso dessa pesquisa.

RESUMO

Nessa pesquisa efetua-se uma revisão bibliográfica da técnica ultrassônica convencional, demonstrando suas capacidades e limitações na localização de não homogeneidades no concreto. A proposta dessa dissertação é utilizar a técnica tomográfica aplicada com os resultados dos equipamentos já disponíveis para as leituras ultrassônicas no concreto, de modo a melhorar consideravelmente o potencial de visualização dessas não homogeneidades. Para tal, a tomografia também é estudada e adaptada ao uso com o ultrassom. Como é indispensável a utilização de programas de computador para a resolução do problema tomográfico, também nessa pesquisa é efetuada a implementação computacional da tomografia adaptada para o uso do ultrassom. Com o programa TUCon implementado e numericamente verificado, vários ensaios experimentais são executados em corpos de prova de concreto sem armadura e com diferentes não homogeneidades internas conhecidas. Pesquisadores internacionais afirmam que a técnica da tomografia ultrassônica em concreto tem grandes potencialidades para ser utilizada na reconstituição de seções internas de concreto para identificação de não homogeneidades. Através de ensaios experimentais, os resultados dessa dissertação reafirmam tal constatação.

Palavras-chaves: concreto, ensaios não destrutivos, ultrassom, tomografia.

ABSTRACT

This work presents a review of the ultrasonic pulse velocity method, showing its capacity and limitations for internal flaws identification in plain concrete members. To further improve this ability, the main goal of this work is to use the tomography technique with the results from of conventional ultrasonic equipment already available. Thus, the tomography theory is also presented and adapted to be used with ultrasound equipment. Since is necessary to solve the system of equations yielded by the tomography technique, a software was developed in this work, called TUCon. After TUCon has been numerically checked, several experiments were performed on plain concrete specimens with known internal flaws. International researchers agree that ultrasonic tomography technique has great potential to be used in the reconstitution of internal sections of concrete members and to identify flaws. The experiments performed in this work endorse this statement.

Keywords: concrete, nondestructive test, ultrasonic, tomography.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Extração de testemunho.....	20
Figura 1.2 – Exemplo típico de varredura por ultrassom para detecção de não homogeneidades em uma seção de concreto (a) leituras – (b) resultado.....	21
Figura 2.1 – Características de uma onda	25
Figura 2.2 – Forma de propagação das ondas longitudinais	26
Figura 2.3 – Forma de propagação das ondas transversais	27
Figura 2.4 – Forma de propagação das ondas superficiais.....	27
Figura 2.5 – Representação padrão de um aparelho de ultrassom	28
Figura 2.6 – Vários transdutores de diferentes frequências	29
Figura 2.7 – Quartzo	30
Figura 2.8 – Estrutura bidimensional simplificada do dióxido de silício – (a) e (c) respectivamente alongamento e redução do tamanho provocado por diferença de potencial elétrico – (b) estado natural	30
Figura 2.9 – Efeito do arranjo das moléculas – (a) desordenado – (b) semiordenado	31
Figura 2.10 – Orientação de corte do quartzo	31
Figura 2.11 – Comportamento do material piezoelétrico - (a) sem carregamento – (b) compressão – (c) tração	32
Figura 2.12 – Estrutura típica de um transdutor.....	33
Figura 2.13 – Exemplo de ensaio ultrassônico.....	34
Figura 2.14 – Classificação das leituras conforme a posição dos transdutores.....	35
Figura 2.15 – Variação da velocidade do pulso pela resistência à compressão para concretos com proporções diferentes de agregado graúdo (cimento:areia:brita).....	36
Figura 2.16 – Relação entre dimensão máxima do agregado graúdo, a velocidade do ultrassom e a resistência do elemento.....	37
Figura 2.17 – Correlação entre resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico para concretos com diferentes relações de água-cimento.....	40
Figura 2.18 – Cubo de 20 cm de aresta com defeito simulado por argamassa interna e presença de barras de aço – (a) corpo de prova – (b) resultado das leituras (m/s)	44
Figura 2.19 – Exibição do pilar com as curvas de velocidade (m/s) obtidas nas leituras ultrassônicas	45
Figura 2.20 – Prisma de concreto com bainha concretada.....	46
Figura 2.21 – Resultado do ensaio do ultrassom para detecção de bainha de protensão (m/s).....	46

Figura 2.22 – Representação da malha utilizada nas leituras e das zonas vibradas através de hachuras	47
Figura 2.23 – Resultados obtidos no estudo de homogeneidade de adensamento	47
Figura 2.24 – Modos de leitura – (a) faces opostas simples – (b) faces adjacentes – (c) faces opostas e adjacente – (d) faces opostas completo – (e) faces opostas e adjacentes completo	49
Figura 2.25 – Bloco de concreto com duas bainhas e seus respectivos preenchimentos	50
Figura 2.26 – Tomograma da seção 1 (a) e seção 2 (b).....	51
Figura 2.27 – Tomograma da seção 3	51
Figura 2.28 – Desenhos das duas vigas concretadas – dimensões em mm	52
Figura 2.29 – Tomograma da viga A, seção completamente grauteada	53
Figura 2.30 – Tomograma da viga A, seção sem graute	53
Figura 2.31 – Tomograma da viga B.....	54
Figura 2.32 – Simulação numérica com um cubo de ar – (a) discretização – (b)(c)(d) sucessivas fotografias das frentes de onda.....	55
Figura 2.33 – Tomogramas da seção com um vazio quadrado - (a) 20 kHz – (b) 200 kHz.....	56
Figura 2.34 – Simulação com vazio circular – (a) modelo discretizado – (b) tomograma.....	57
Figura 2.35 – Simulação com deterioração lateral – (a) modelo discretizado – (b) tomograma com 20 kHz – (c) tomograma com 200 kHz	58
Figura 2.36 – Simulação com deterioração lateral e vazio circular – (a) modelo discretizado – (b) tomograma com 200 kHz	59
Figura 2.37 – Simulação com deterioração lateral e vazio circular com leituras nas quatro faces – (a) modelo discretizado – (b) tomograma com 20 kHz - (c) tomograma com 200 kHz.....	60
Figura 2.38 – Simulação com deterioração lateral, armaduras e leituras nas quatro faces – (a) modelo discretizado – (b) tomograma com 20 kHz - (c) tomograma com 200 kHz	61
Figura 2.39 – Posicionamento dos transdutores em torno da fissura	62
Figura 2.40 – Execução do ensaio - (a) fixação dos transdutores - (b) fonte de impacto.....	63
Figura 2.41 – Tomogramas com setas indicando a posição da fissura - (a) antes do reparo – (b) depois do reparo.....	63
Figura 2.42 – Tomograma de um prisma de concreto com fissuras induzidas detectadas.....	64

Figura 2.43 – Disposição dos receptores e dos emissores na seção da barragem	65
Figura 2.44 – Tomograma produzido pelas leituras na barragem	66
Figura 3.1 – O primeiro raio-X	67
Figura 3.2 – Projeto do primeiro equipamento de tomografia computadorizada	68
Figura 3.3 – Transmissão de um feixe de raios X	69
Figura 3.4 – Discretização do corpo em elementos	69
Figura 3.5 – Obtenção de várias leituras	70
Figura 3.6 – Leitura inclinada - (a) sem discretização - (b) com discretização	73
Figura 3.7 – Todas as leituras com discretização	75
Figura 3.8 – Classificação do sistema de equações lineares – (a) indeterminado – (b) determinado – (c) sobredeterminado consistente – (d) sobredeterminado inconsistente	76
Figura 3.9 – Representação do processo iterativo de Kaczmarz	79
Figura 3.10 – Representação da distância entre o ponto P e a reta r	80
Figura 3.11 – Representação do processo iterativo de Cimmino	84
Figura 3.12 – Convergência do processo de Cimmino	86
Figura 3.13 – Processos iterativos resultam em laço infinito – (a) Gauss-Jacobi – (b) Gauss-Seidel	87
Figura 3.14 – Convergência dos processos iterativos – (a) Kaczmarz – (b) Cimmino	88
Figura 3.15 – Convergência dos processos iterativos para sistemas de equações sobredeterminados inconsistentes – (a) Kaczmarz – (b) Cimmino	88
Figura 3.16 – Convergência do processo de Cimmino e Cimmino Otimizado	90
Figura 4.1 – Fluxograma de utilização e processamento do TUCon	96
Figura 4.2 – Estudo seccional de um elemento linear	97
Figura 4.3 – Nomenclatura utilizada para duas dimensões - (a) faces do elemento em estudo – (b) dimensões do elemento	97
Figura 4.4 – Nomenclatura utilizada para três dimensões - (a) faces do elemento em estudo – (b) dimensões do elemento	98
Figura 4.5 – Malha dos elementos discretizados - (a) bidimensional (b) tridimensional	98
Figura 4.6 – Ordem numérica dos elementos de acordo com sua posição	99
Figura 4.7 – Localização dos pontos de leitura – (a) caso bidimensional - (b) caso tridimensional	100
Figura 4.8 – Corte das arestas do objeto e posicionamento das faces.	101

Figura 4.9 – Pontos de leitura das faces Frontal, Superior e Esquerda - caso tridimensional.....	101
Figura 4.10 – Pontos de leitura das faces Fundos e Direita - caso tridimensional.....	101
Figura 4.11 – Pontos de leitura da face Inferior - caso tridimensional	102
Figura 4.12 – Pontos de leituras das faces Frontal e Fundos - caso tridimensional.....	102
Figura 4.13 – Pontos de leitura - caso bidimensional.....	102
Figura 4.14 – Representação da leitura <i>Frontal-C1-L2/Fundos-C2-L4</i>	103
Figura 4.15 – Percurso do pulso passando por diferentes elementos discretizados.....	104
Figura 4.16 – Pontos de interseção entre o percurso do pulso e a grade da malha discretizada	105
Figura 4.17 – Todos os pontos de interseção entre o percurso do pulso e a grade da malha discretizada.....	106
Figura 4.18 – Pontos selecionados e corretamente ordenados	107
Figura 4.19 – Pontos médios de cada trecho percorrido (medidas em cm)	108
Figura 4.20 – Formato final do TUCon.....	109
Figura 5.1 – Diferentes CPs concretados com blocos de EPS.....	112
Figura 5.2 – Confecção dos blocos – (a,b) concretagem – (c) desfôrma – (d) malha de leitura	113
Figura 5.3 – Posicionamento dos transdutores de 200 kHz – (a) localização dos pontos de leitura – (b) leituras no plano analisado.....	114
Figura 5.4 – Posicionamento dos transdutores de 54 kHz para o ensaio no CP1 – (a) localização dos pontos de leituras – (b) representação das leituras bidimensionais	115
Figura 5.5 – Posicionamento dos transdutores de 54 kHz para os ensaios no CP2, CP3 e CP4 – (a) localização dos pontos de leituras – (b) representação das leituras tridimensionais	115
Figura 5.6 – Análise da base – (a) seção e leituras utilizadas – (b) campo de velocidades em m/s para cada elemento da base do CP2	116
Figura 5.7 – Tomograma da base – (a) seção e leituras utilizadas – (b) legenda em m/s – (c) CP2 – (d) CP3 – (e) CP4.....	117
Figura 5.8 – Posicionamento dos transdutores na seção da base.....	118
Figura 5.9 – Dependência do ângulo de inclinação da leitura em relação à velocidade de propagação – dados seção base do CP2 (Frontal-Fundos).....	119

Figura 5.10 – Ondas de tensão se propagando por sólido com uma fissura interna - (a) simulação numérica – (b) ensaio experimental fotoelástico.....	120
Figura 5.11 – Dificuldade de mensuração da real distância percorrida pelo pulso – (a) sobreposição das frentes de ondas – (b) zona onde o trajeto do pulso está contido.....	121
Figura 5.12 – Placa utilizada nos estudos angulares do transdutor de 54 kHz.....	122
Figura 5.13 – Dependência do ângulo de inclinação da leitura em relação à velocidade de propagação.....	123
Figura 5.14 – Tomograma da base – (a) seção e leituras utilizadas (b) legenda (c) CP2 – (d) CP3 – (e) CP4.....	125
Figura 5.15 – Leituras do estudo angular.....	126
Figura 5.16 – Dependência do ângulo de inclinação da leitura em relação à velocidade de propagação – dados do CP5.....	127
Figura 5.17 – Estudo angular com os transdutores de 54 kHz no CP5.....	127
Figura 5.18 – Dependência do ângulo de inclinação da leitura em relação à velocidade de propagação com transdutores de 54 kHz.....	128
Figura 5.19 – Tomograma do CP1 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s.....	129
Figura 5.20 – Tomograma do CP2 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s.....	130
Figura 5.21 – Caminhos de onda utilizadas nas leituras mais inclinadas da seção – (a) CP1 – (b) CP2.....	131
Figura 5.22 – Tomograma do CP3 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s.....	131
Figura 5.23 – Tomograma do CP4 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s.....	132
Figura 5.24 – Tomograma do CP1 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s.....	133
Figura 5.25 – Tomogramas verticais do CP2 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4.....	134
Figura 5.26 – Tomogramas horizontais do CP2 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4.....	135
Figura 5.27 – Face frontal do CP2 com malha utilizada [cm].....	136
Figura 5.28 – Tomogramas verticais do CP3 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4.....	137

Figura 5.29 – Tomogramas horizontais do CP3 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4 138

Figura 5.30 – Tomogramas verticais do CP4 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4 140

Figura 5.31 – Tomogramas horizontais do CP4 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4 141

Figura 8.1 – Representação gráfica do processo iterativo de Gauss-Jacobi 155

Figura 8.2 – Representação gráfica do processo iterativo de Gauss-Seidel..... 156

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Velocidade de propagação de ondas mecânicas para diferentes rochas	38
Tabela 2.2 – Comprimentos de onda para transdutores de diferentes frequências aplicados em um concreto com velocidade de 4000 m/s... 39	39
Tabela 2.3 – Correções entre a frequência do transdutor, a menor dimensão lateral, o diâmetro máximo do agregado graúdo e o tamanho do percurso de onda	42
Tabela 3.1 – Comparação entre os dois métodos quanto ao número de iterações necessárias para convergência	91
Tabela 5.1 – Traço do concreto utilizado.....	111
Tabela 5.2 – Leituras da base do CP2 (Frontal-Fundos).....	118
Tabela 5.3 – Velocidades obtidas por cálculo manual da seção base do CP2 (Frontal-Fundos)	119
Tabela 5.4 – Velocidades obtidas das leituras na placa	122
Tabela 5.5 – Velocidades obtidas das leituras na placa	123
Tabela 5.6 – Fatores de correção para o transdutor de 54 kHz	124
Tabela 5.7 – Velocidades obtidas das leituras no CP5.....	126

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA.....	21
1.2 OBJETIVO GERAL	22
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2 ULTRASSOM NO CONCRETO.....	25
2.1 A ONDA MECÂNICA	25
2.1.1 Ondas longitudinais.....	25
2.1.2 Ondas transversais	26
2.1.3 Ondas superficiais	27
2.2 EQUIPAMENTO.....	28
2.2.1 Transdutores	29
2.3 ENSAIO DO ULTRASSOM EM CONCRETO	33
2.3.1 Fatores que influenciam na velocidade do pulso ultrassônico no concreto.....	35
2.3.1.1 Agregado graúdo	36
2.3.1.1.1 <i>Proporção do agregado graúdo.....</i>	36
2.3.1.1.2 <i>Dimensão máxima do agregado graúdo</i>	37
2.3.1.1.3 <i>Origem mineralógica do agregado graúdo</i>	37
2.3.1.2 Agregado graúdo e frequência dos transdutores	38
2.3.1.3 Interface transdutor-concreto	39
2.3.1.4 Relação água-cimento	40
2.3.1.5 Idade do concreto, grau de hidratação e aditivos	41
2.3.1.6 Tamanho do caminho de onda	41
2.3.1.7 Posicionamento dos transdutores próximos às bordas	41
2.3.1.8 Intensidade do carregamento.....	42
2.3.1.9 Presença de armadura.....	42
2.4 APLICAÇÕES DO ULTRASSOM NA DETECÇÃO DE NÃO HOMOGENEIDADES	42
2.5 APLICAÇÕES DA TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA NA DETECÇÃO DE NÃO HOMOGENEIDADES	48
2.5.1 Detecção de dutos	49
2.5.2 Simulação computacional	55
2.5.3 Detecção de fissuras.....	62
3 TOMOGRAFIA	67
3.1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA	67
3.2 TOMOGRAFIA POR RAIOS X.....	68
3.3 TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA EM CONCRETO	71
3.3.1 Parâmetros utilizados.....	71

3.3.2	Fundamentação matemática	72
3.3.3	Resolução por Processos Diretos.....	77
3.3.4	Resolução por Processos Iterativos.....	78
3.3.4.1	Kaczmarz	78
3.3.4.2	Cimmino	83
3.3.4.3	Crêterios de Convergência dos Métodos Iterativos	87
3.3.4.4	Cimmino Otimizado	89
3.3.4.5	Cimmino Otimizado em Formato Matricial.....	91
4	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	95
4.1	DESCRIÇÃO DO PROGRAMA	95
4.2	DADOS GEOMÉTRICOS	96
4.2.1	Malha Discretizada	98
4.2.2	Pontos de Leitura	100
4.3	LEITURAS	103
4.3.1	Caminho do Pulso	104
4.4	EXECUÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL.....	108
4.5	PROCESSAMENTO TOMOGRÁFICO.....	109
4.6	FINALIZAÇÃO DO PROGRAMA.....	109
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	111
5.1	DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	111
5.1.1	Ensaio com transdutores de 200 kHz.....	113
5.1.2	Ensaio com transdutores de 54 kHz.....	114
5.2	RESULTADOS	116
5.2.1	Análises Preliminares das Leituras de 54 kHz.....	116
5.2.2	Estudo Angular.....	121
5.2.2.1	Transdutores de 54 kHz	121
5.2.2.2	Transdutores de 200 kHz	125
5.2.3	Análise e resultados utilizando as leituras corrigidas	129
5.2.3.1	Transdutores de 200 kHz	129
5.2.3.2	Transdutores de 54 kHz	132
6	COMENTÁRIOS FINAIS	143
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	145
7	BIBLIOGRAFIA.....	147
8	ANEXOS.....	153
8.1	ANEXO A – RESOLUÇÃO DE SISTEMA DE EQUAÇÕES POR MÍNIMOS QUADRADOS.....	153
8.2	ANEXO B – SISTEMA DE RESOLUÇÃO ITERATIVA GAUSS-JACOBI	154
8.3	ANEXO C – SISTEMA DE RESOLUÇÃO ITERATIVA GAUSS-SEIDEL.....	156

1 INTRODUÇÃO

Grande parte das edificações construídas no Brasil e no mundo foi edificada com estrutura de concreto armado. Considerando que quase toda a atividade humana envolve alguma estrutura civil, não é de se surpreender que o concreto produzido a partir do cimento Portland é o material artificial de maior consumo pelo homem (ISAIA, 2010). Apenas em 2010, no Brasil, foram produzidas 49 milhões de toneladas de cimento Portland (SNIC, 2011). Efetuando uma estimativa, utilizando para cada tonelada de cimento, 5,5 toneladas de agregados e 0,6 toneladas de água, teriam 348 milhões toneladas de produtos cimentícios consumidos apenas em 2010.

É inegável que um consumo tão alto desse material gera grandes impactos ambientais, bem como eleva os custos da construção. Com o objetivo de amenizar esses pontos negativos, novos processos de cálculo vem sendo desenvolvidos para a concepção de estruturas mais esbeltas e leves. Associado a esse cenário está a utilização de novos materiais e o desenvolvimento de concretos com resistência maior.

Infelizmente, muitas edificações estão apresentando problemas patológicos e sua vida útil está menor do que inicialmente projetado. Motivos são vários e estão relacionados ao projeto, execução e uso da edificação.

Deste modo foram desenvolvidas técnicas de inspeção, que possuem o seguinte procedimento (ISAIA, 2005):

- Análise da estrutura: analisar a segurança da edificação e levantar os sintomas apresentados;
- Anamnese: pesquisar a evolução do quadro patológico;
- Ações investigativas: de laboratório e *in-loco*, com a utilização de **ensaios destrutivos e não destrutivos**;
- Diagnóstico das causas prováveis: selecionar as causas das patologias para consolidação do diagnóstico final.

Quanto aos ensaios destrutivos, destaca-se a extração de corpos de prova (Figura 1.1), onde é retirado um testemunho de dentro do elemento estrutural que será ensaiado. Essa extração produz no elemento uma grande avaria a ser corrigida posteriormente.



Figura 1.1 – Extração de testemunho

Fonte: Rodrigues (2011)

Portanto, quando possível, é preferível a utilização dos ensaios não destrutivos, que são muito menos onerosos, provocam menos danos à estrutura e podem ser aplicados várias vezes, com as devidas limitações de cada método.

Quanto aos métodos não destrutivos, têm-se duas categorias:

- parcialmente destrutivos - que resultam em algum dano superficial, como por exemplo: ensaios de arrancamento, break-off, penetração de pinos e ensaios de aderência;
- verdadeiramente não destrutivos – que não ocorrem em dano, como por exemplo: auscultação, esclerometria, ultrassom, ecoimpacto, termografia infravermelha, radar de sub-superfície e métodos nucleares.

Concentrando o assunto especificamente no ultrassom, trata-se de um método que consegue mensurar o tempo de propagação do pulso ultrassônico no concreto, possibilitando calcular sua velocidade, uma vez que a distância entre os transdutores é conhecida.

Dentre as aplicabilidades conhecidas dessa técnica, há duas mais relevantes:

- estimar a resistência do concreto a partir da velocidade do pulso ultrassônico no mesmo, usando para tal uma curva de correlação previamente construída para um concreto com os mesmos materiais e traços semelhantes;
- verificação da homogeneidade interna de um elemento de concreto, identificando falhas de concretagem, fissuras e outras anomalias.

1.1 JUSTIFICATIVA

Um exemplo típico da detecção de não homogeneidades internas em uma seção de concreto pelo método do ultrassom é a varredura exibida na Figura 1.2 (a), onde o percurso da onda é supostamente retilíneo. Nessa figura considere que a região S representa um concreto de pior qualidade, o que proporciona um maior tempo de percurso para a onda transitar por este material. O resultado proporcionado pelo método está representado na Figura 1.2 (b).

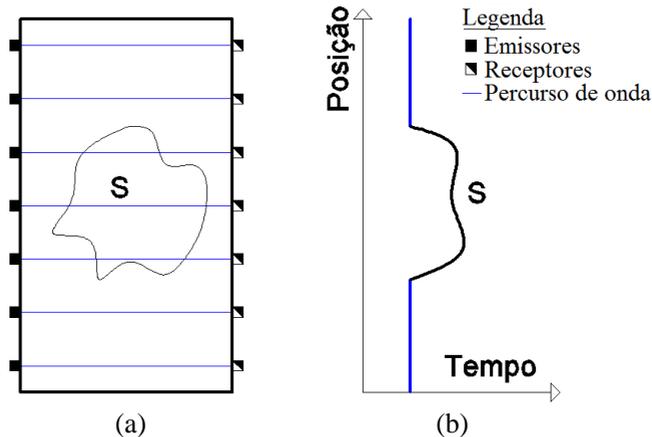


Figura 1.2 – Exemplo típico de varredura por ultrassom para detecção de não homogeneidades em uma seção de concreto (a) leituras – (b) resultado

Nota-se que os resultados não exibem a profundidade precisa da região S no espaço bidimensional, bem como seu tamanho e forma ficam com representação deficiente. Isso porque o elemento de concreto é bidimensional e o resultado é unidimensional.

Para resolver esse problema, a proposta dessa pesquisa é utilizar a técnica da tomografia computadorizada, muito aplicada na área médica, com o uso do ultrassom no concreto como medida física ao invés dos raios X. Essa técnica, já utilizada internacionalmente, é nomeada **Tomografia Ultrassônica em Concreto**, sendo que o autor dessa dissertação desconhece trabalhos publicados sobre o assunto no âmbito nacional.

1.2 OBJETIVO GERAL

Objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional que utilize as técnicas tomográficas para possibilitar a identificação de não homogeneidades internas dentro do concreto.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos dessa dissertação são:

- ✓ efetuar a adaptação necessária para o uso da técnica tomográfica com o ultrassom no concreto;
- ✓ avaliar a influência que o ângulo de leitura do transdutor provoca no tempo de propagação do pulso ultrassônico;
- ✓ desenvolver no programa saída gráfica dos resultados para melhor interpretação.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esse trabalho está organizado em seis partes: introdução, ensaio ultrassônico no concreto, tomografia, implementação computacional, programa experimental e conclusões.

Na introdução, estão abordadas a apresentação do concreto, suas patologias e a aplicação do ultrassom na detecção das mesmas. É também apresentada a proposta dessa dissertação, bem como seus objetivos. No capítulo 2, faz-se uma revisão do uso do ultrassom no concreto. Iniciando pelos princípios básicos de uma onda se propagando em sólidos, posteriormente abordando os equipamentos utilizados no ensaio ultrassônico, bem como os fatores que afetam suas leituras. Por final é efetuada uma revisão bibliográfica das aplicações do uso do ultrassom e da tomografia ultrassônica para detecção de não homogeneidades.

O terceiro capítulo é uma síntese sobre os vários aspectos da tomografia, bem como a forma que a mesma será convertida para o uso com o ultrassom. Como o problema tomográfico resulta em uma resolução de um sistema de equações lineares, vários métodos de resolução das mesmas são abordados e comparados. Um dos métodos é escolhido e aperfeiçoado para futura implementação computacional.

No capítulo 4 está a explicação do funcionamento do programa tomográfico a ser desenvolvido nessa dissertação, bem como seus detalhes operacionais.

No capítulo 5, encontram-se os ensaios realizados, seus resultados e conclusões utilizados para validar o bom funcionamento do programa. Por final, no capítulo 6, 7 e 8, estão respectivamente as conclusões extraídas da pesquisa realizada, as referências bibliográficas utilizadas e os anexos.

2 ULTRASSOM NO CONCRETO

2.1 A ONDA MECÂNICA

Uma onda mecânica é um estado instável da matéria, cuja perturbação se propaga em qualquer meio material. Seja em um gás, líquido ou sólido, toda onda tem as seguintes características: frequência (f), comprimento de onda (λ) e amplitude (a), conforme a Figura 2.1.

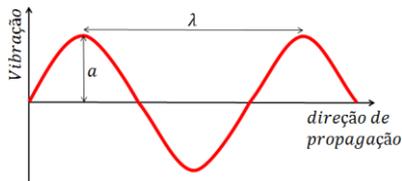


Figura 2.1 – Características de uma onda

A frequência se relaciona com a velocidade de propagação (V) e o comprimento de onda (λ) de acordo com a Equação 2.1 (HALLIDAY *et al.*, 1991).

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad 2.1$$

Tratando especificamente de ondas em sólidos, quando uma rápida perturbação é provocada, seu sistema de partículas sofre um distúrbio do estado estacionário. Essa perturbação, de origem cinética, provoca o aparecimento de forças conservativas que tendem a estabilizar o sistema novamente. Nessa sistemática de trocas de energias cinéticas por potenciais e vice-versa, o sólido acaba sofrendo ondas de tensão. Tais ondas são classificadas em três principais tipos: longitudinais, transversais e de superfície.

2.1.1 Ondas longitudinais

Nas ondas longitudinais as partículas sofrem deslocamentos na mesma direção de propagação da onda, assim como ocorre no ar. Por esse motivo as ondas longitudinais provocam compressões e trações sucessivas nas ligações entre as partículas. Como é o tipo de onda mais rápida, também são conhecidas como ondas primárias ou *p-waves*. Para

um material elástico linear, homogêneo e isotrópico, sua velocidade é dada pela Equação 2.2. A Figura 2.2 ilustra o seu movimento.

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

onde:

V_p : velocidade da onda primária;

E : módulo de elasticidade dinâmico;

ρ : massa específica;

ν : coeficiente de Poisson.

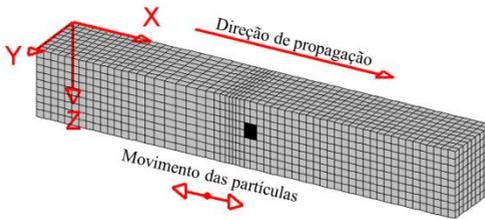


Figura 2.2 – Forma de propagação das ondas longitudinais

Fonte: adaptado de Braile (2004)

2.1.2 Ondas transversais

As ondas transversais são caracterizadas pela vibração perpendicular que as partículas fazem em relação à direção de movimento. Dessa forma são caracterizadas típicas tensões de cisalhamento no sólido, fazendo com que esse tipo de onda receba também o nome de *shear-waves* ou *s-waves*. Também são conhecidas por ondas secundárias, haja vista que se trata do segundo tipo de onda mais rápido. Novamente para um material ideal, sua velocidade é dada pela Equação 2.3. A Figura 2.3 ilustra o seu movimento.

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

onde:

V_s : velocidade da onda secundária;

E : módulo de elasticidade dinâmico;

ρ : massa específica;

ν : coeficiente de Poisson.

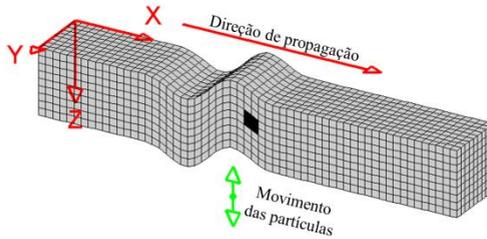


Figura 2.3 – Forma de propagação das ondas transversais

Fonte: adaptado de Braile (2004)

2.1.3 Ondas superficiais

Esse tipo de onda atua apenas na interface de dois materiais distintos, sendo que suas partículas desenvolvem um movimento elíptico com plano paralelo à direção de propagação. Sua descoberta realizou-se em 1885 pelo físico inglês Lord Rayleigh, levando tais ondas também serem conhecidas por ondas de Rayleigh ou *r-waves*.

Quanto à sua velocidade em um material ideal, sua obtenção passa pela resolução de uma equação de sexto grau. Por esse motivo não há uma fórmula exata para calcular sua velocidade. Contudo, Viktorov (1967), *apud* Malhotra *et al.* (2004), desenvolveu uma expressão aproximada exibida na Equação 2.4. A Figura 2.4 ilustra o seu movimento.

$$V_r = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} * V_s \quad , \quad 2.4$$

onde:

V_R : velocidade da onda de Rayleigh;

V_s : velocidade da onda secundária;

ν : coeficiente de Poisson.

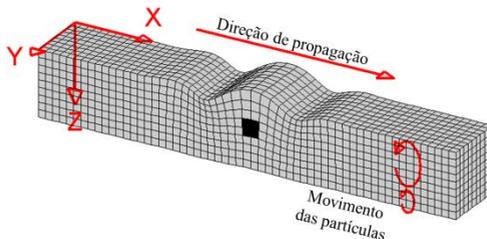


Figura 2.4 – Forma de propagação das ondas superficiais

Fonte: adaptado de Braile (2004)

2.2 EQUIPAMENTO

Para determinar a velocidade de propagação de um pulso ultrassônico dentro do concreto são utilizados equipamentos capazes de medir o tempo necessário de propagação deste pulso de alta frequência de um ponto a outro do elemento. Como a distância entre os transdutores é conhecida, a mesma é dividida pelo tempo fornecido pelo aparelho, o que resulta na velocidade média do pulso ultrassônico ao longo do seu percurso.

O aparelho eletrônico é composto pelo transdutor emissor e o receptor do pulso, um gerador de pulsos, um circuito medidor de tempo, um amplificador da corrente proveniente do receptor e um mostrador de tempo (MALHOTRA *et al.*, 2004), conforme a Figura 2.5. Maiores detalhes são descritos na ASTM Test Designation C 597-02 de 2003.

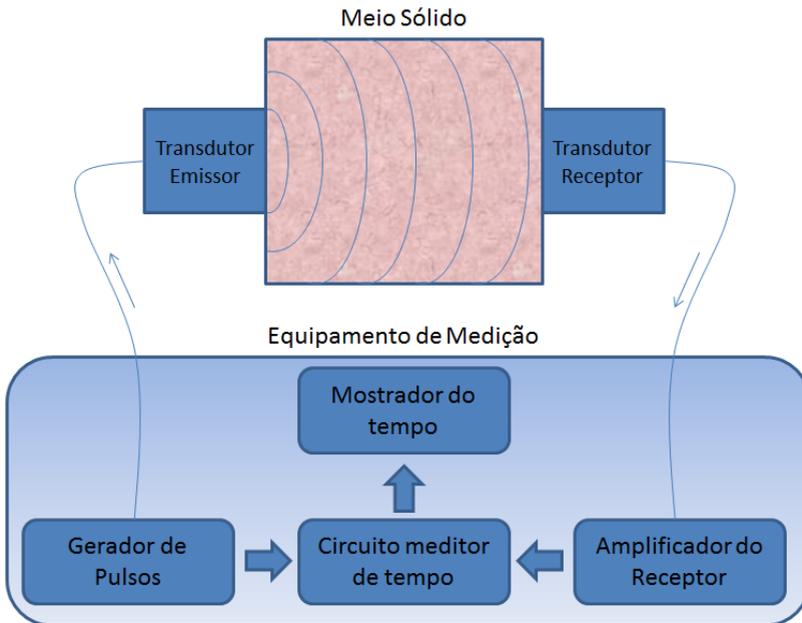


Figura 2.5 – Representação padrão de um aparelho de ultrassom

Usualmente, para o concreto, os pulsos gerados estão compreendidos entre as faixas de frequência de 20 kHz a 100 kHz, contudo, dependendo do objeto ensaiado, a frequência máxima utilizada pode chegar a 500 kHz (MALHOTRA *et al.*, 2004). A escolha da

melhor frequência que deve ser utilizada no ensaio varia de caso a caso, maiores detalhes serão abordados no item 2.3.1.

Com a frequência determinada, pode-se escolher os transdutores que trabalham na frequência pretendida. Na Figura 2.6 há exemplos de vários transdutores comerciais.

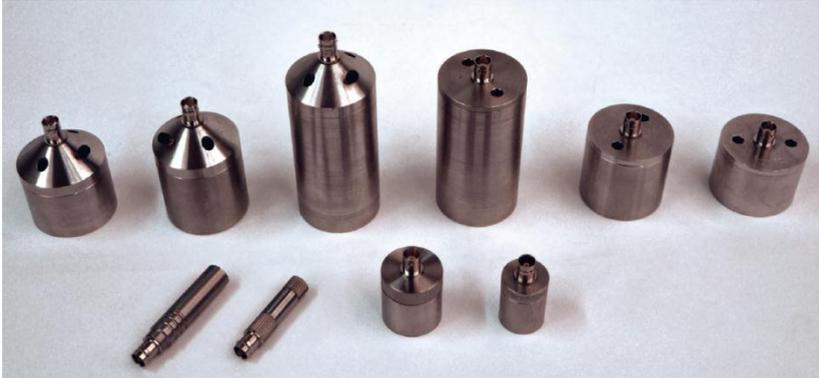


Figura 2.6 – Vários transdutores de diferentes frequências

Fonte: PROCEQ (2011)

2.2.1 Transdutores

Em uma definição genérica, transdutor é um equipamento que transforma um tipo de energia em outro. Como exemplos têm-se: LVDT, célula fotovoltaica, lâmpadas, resistores, microfones, entre tantos outros. Para esta pesquisa o interesse se foca nos transdutores feitos a partir dos materiais piezoelétricos.

O efeito piezoelétrico foi descoberto pelos irmãos e físicos franceses Pierre e Jacques Curie em 1880, que não encontraram muita utilidade na época (GALLEGO-JUAREZ, 1989). Seus estudos utilizaram cristais de quartzo, mineral extremamente comum na Terra.

O quartzo (Figura 2.7) é composto por várias cadeias de moléculas de dióxido de silício (SiO_2), ou simplesmente sílica. Essa matéria é muito conhecida pela Engenharia Civil, já que esta é a principal componente da areia, usada no processo de fabricação do cimento Portland.



Figura 2.7 – Quartzo

Fonte: webmineral.com

O dióxido de silício (SiO_2) tem a estrutura bidimensional simplificada exibida de acordo com a Figura 2.8 (b). Nota-se uma polarização de sua estrutura uma vez que o silício e o oxigênio são carregados positiva e negativamente, respectivamente. Aproveitando dessa polaridade pode-se utilizar um campo elétrico para alongar ou encurtar a estrutura molecular, conforme exibem as Figuras 2.8 (a) e (c).

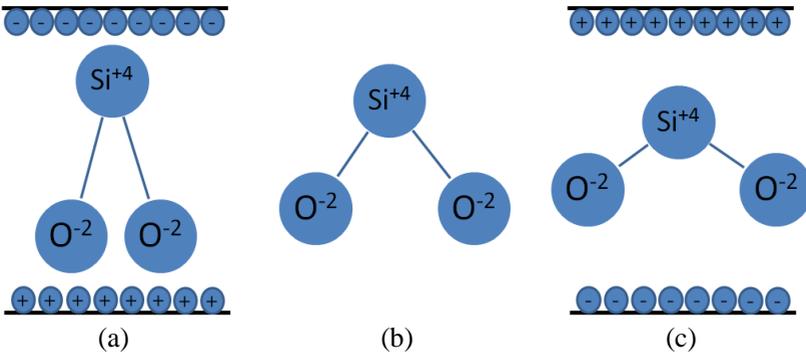


Figura 2.8 – Estrutura bidimensional simplificada do dióxido de silício
 – (a) e (c) respectivamente alongamento e redução do tamanho
 provocado por diferença de potencial elétrico – (b) estado natural

Quanto ao arranjo das moléculas, se as mesmas estiverem fora de um padrão, quando aplicadas diferenças de potenciais elétricos em suas extremidades ocorrerão múltiplas deformações em várias direções. Dessa forma a superposição de todas as deformações provocará um efeito nulo no objeto como um todo, ou seja, não haverá alterações de tamanho (GALLEGO-JUAREZ, 1989). Quando as moléculas

encontram-se em um melhor arranjo, a soma das deformações individuais provocará uma resultante global de deformações, proporcionando ao objeto uma deformação no sentido da resultante. A Figura 2.9 representa ambos os casos comentados.

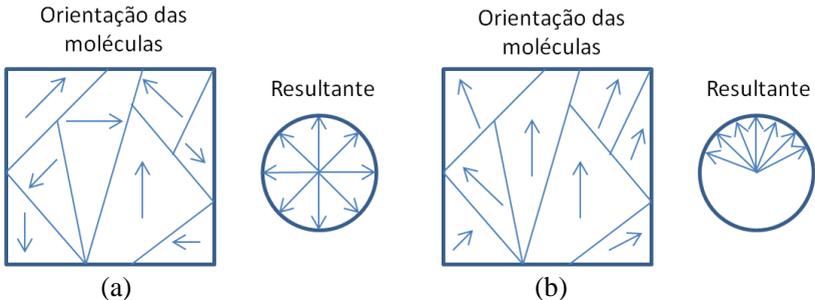


Figura 2.9 – Efeito do arranjo das moléculas – (a) desordenado – (b) semiordenado

Fonte: adaptado de Gallego-Juarez (1989)

Quanto mais alinhadas as moléculas estiverem, melhor será a deformação obtida no objeto. Isso combina exatamente com a definição de cristal, cuja característica principal é a repetição regular, nas três dimensões, de moléculas ou grupo de moléculas, podendo possuir milhares de repetições (GIACOVAZZO *et al.*, 2002). Como o quartzo é um cristal formado por sílica, fica justificado o motivo do mesmo apresentar características piezoelétricas. Além disso, seu efeito piezoelétrico é considerado extremamente estável (MEHTA, 2009) (MALIK *et al.*, 2010).

Então para construir um transdutor deve-se cortar o quartzo na orientação pretendida, de forma que as polarizações moleculares tenham o melhor alinhamento possível com o campo elétrico que será aplicado, conforme a Figura 2.10.

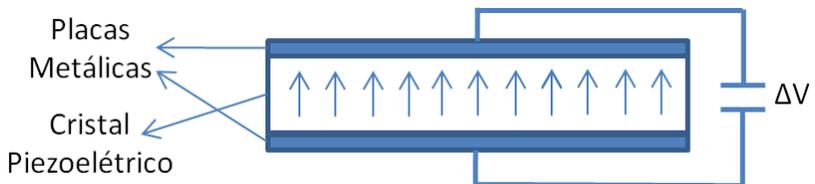


Figura 2.10 – Orientação de corte do quartzo

Entretanto, atualmente, o quartzo já foi substituído por outros materiais cerâmicos sintetizados, como, por exemplo, o titano-zirconato de chumbo, ou simplesmente PZT. Essa substituição fora efetuada pelo fato do PZT apresentar maior resistência, melhor estabilidade das propriedades piezoelétricas, grande faixa de operação e flexibilidade em formatos e tamanhos, quando comparado aos cristais naturais. Assim quartzo caiu em desuso e o PZT vem sendo aprimorado pela indústria, porém mantendo o princípio e mecanismo de ser um elemento polarizado assim como quartzo (GALLEGO-JUAREZ, 1989).

Voltando ao efeito piezoelétrico, quando um material desse tipo é submetido à compressão ou tração, uma diferença de potencial elétrico é criada em suas extremidades. O sinal dessa diferença de potencial elétrico está vinculado ao fato do material estar sendo comprimido ou tracionado, como mostra a Figura 2.11.

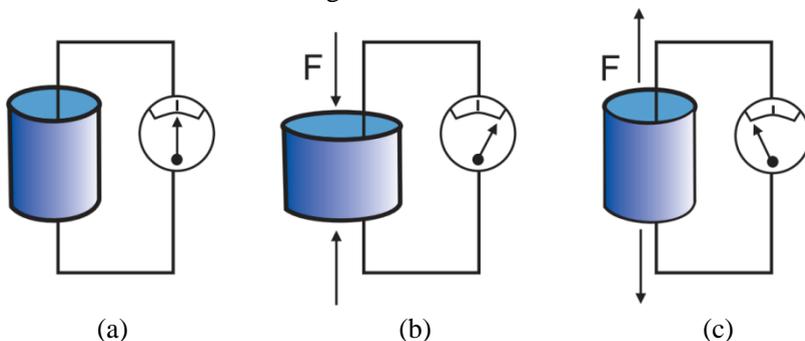


Figura 2.11 – Comportamento do material piezoelétrico - (a) sem carregamento – (b) compressão – (c) tração

Fonte: adaptado de www.piceramic.com

Dessa forma é possível a criação de um transdutor, que recebe sinais elétricos e emite ondas mecânicas, e vice-versa. A espessura do material piezoelétrico deve ser ajustada para que a frequência de vibração natural do elemento piezoelétrico seja a mesma pretendida para o transdutor. Adicionalmente, os sinais elétricos recebidos pelo transdutor devem possuir a mesma frequência de vibração natural do material piezoelétrico para melhor desempenho do processo dinâmico oscilatório. A estrutura típica de um transdutor está exibida na Figura 2.12.

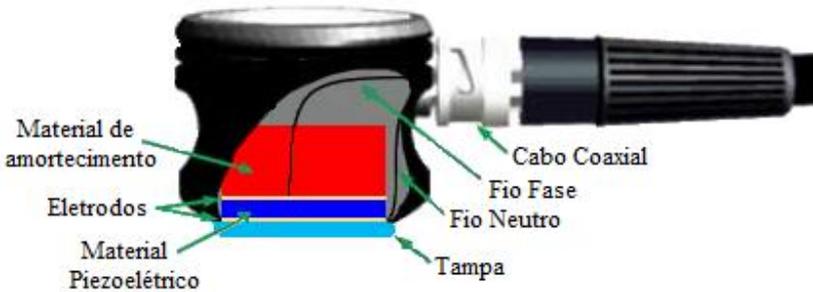


Figura 2.12 – Estrutura típica de um transdutor

Fonte: adaptado de www.ndt-ed.org

O material de amortecimento desempenha um importante papel no funcionamento do transdutor. Caso sua impedância seja próxima da impedância do material piezoelétrico, o transdutor será muito sensível às ondas mecânicas, tornando o mesmo ideal para trabalhar como receptor. Já quanto maior a diferença de impedância do material de amortecimento e do piezoelétrico, maior será a energia emitida para o concreto, porém tal transdutor terá uma reduzida sensibilidade às ondas mecânicas. Isso torna tal tipo de transdutor ideal para trabalhar como emissor de pulsos (NDT, 2011).

O cabo coaxial é formado por um fio metálico interno centrado envolvido por uma camada isolante e por outra condutora. Esse formato confere ao cabo a blindagem eletromagnética necessária para transmissão de correntes de baixa intensidade. Dessa forma, o cabo coaxial é ideal para conduzir os sinais entre os transdutores e o equipamento de ultrassom, principalmente no receptor, aonde os sinais são muito fracos.

2.3 ENSAIO DO ULTRASSOM EM CONCRETO

O ensaio de ultrassom no concreto consiste em medir o tempo de propagação das ondas ultrassônicas dentro de um elemento de concreto permitindo a obtenção da sua velocidade de propagação. O primeiro passo é escolher os transdutores adequados para o caso em questão, maiores detalhes podem ser vistos no item 2.3.1.

Com o par de transdutores escolhidos, pode-se calibrá-los de acordo com procedimento específico do fabricante. Então os transdutores são pressionados em uma superfície lisa e limpa de concreto, com o uso de um acoplante. O acoplante serve para retirar o ar da interface transdutor-concreto, melhorando a transmissão de energia,

podendo ser utilizadas graxas siliconadas ou de origem mineral, ou vaselina (NBR 8802-1994).

Finalmente efetua-se a leitura do tempo necessário para o pulso ultrassônico percorrer a distância conhecida entre os transdutores e obtém-se a velocidade média de propagação do mesmo ao longo do trajeto interno no elemento de concreto, conforme mostra a Figura 2.13.



Figura 2.13 – Exemplo de ensaio ultrassônico

Fonte: PROCEQ (2011)

Três posições de leituras são possíveis para a realização do ensaio: direta, semidireta e indireta (Figura 2.14). Contudo, devido à natureza dessa dissertação, é conveniente subdividir as leituras diretas em ortogonais e oblíquas. Nas leituras diretas ortogonais, os transdutores são posicionados em faces opostas e seus eixos normais são coincidentes. Já para as leituras diretas oblíquas os transdutores são postos em faces opostas, contudo os eixos não são coincidentes, ou seja, a captação não é efetuada no mesmo eixo da emissão.

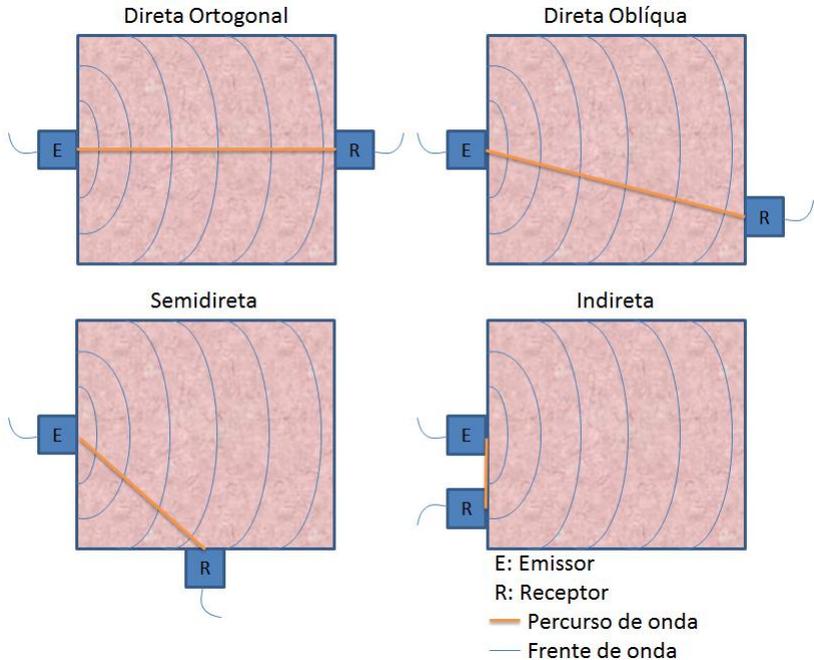


Figura 2.14 – Classificação das leituras conforme a posição dos transdutores

Normalmente, as leituras diretas são as preferíveis já que a maior parte da energia de ondas longitudinais é direcionada para a parte frontal do transdutor emissor.

2.3.1 Fatores que influenciam na velocidade do pulso ultrassônico no concreto

Vários fatores influenciam a propagação de ondas em um elemento de concreto, dentre os quais se destacam: agregado graúdo, frequência dos transdutores, relação água-cimento, idade do concreto, grau de hidratação, uso de aditivos, presença de armadura, entre outros.

Nos próximos itens tais fatores serão detalhados, pois seu conhecimento é importante para a condução de um ensaio representativo.

2.3.1.1 Agregado graúdo

Segundo Malhotra *et al.* (2004), quanto maior a presença de agregado graúdo dentro do concreto, maior será a velocidade do pulso no mesmo. Isso é explicado pelo fato que, devido as suas propriedades físicas (Equação 2.2), a velocidade do pulso nas rochas é superior ao da pasta de cimento. Por esse motivo a onda mais rápida, ou seja, a primeira a chegar no transdutor receptor, é fortemente influenciada pelas propriedades do agregado graúdo.

2.3.1.1.1 Proporção do agregado graúdo

A Figura 2.15 representa uma avaliação da velocidade do pulso pela resistência à compressão para diferentes proporções de agregado graúdo. Fica visível que a adição proporcional de mais agregado graúdo aumenta a velocidade do pulso, apesar de manter a resistência final do concreto.

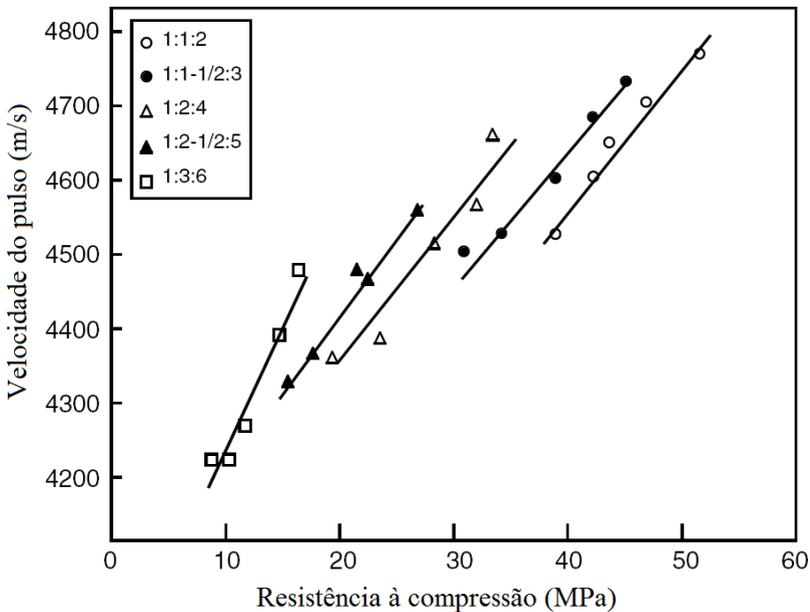


Figura 2.15 – Variação da velocidade do pulso pela resistência à compressão para concretos com proporções diferentes de agregado graúdo (cimento:areia:brita)

Fonte: adaptado de Jones (1962) *apud* Malhotra, *et al.* (2004)

2.3.1.1.2 Dimensão máxima do agregado graúdo

A dimensão máxima do agregado graúdo também interfere nas leituras de ultrassom. Sturup *et al.* (1984) estudaram duas amostras de concretos com idades de 3, 7 e 28 dias. Em uma amostra a dimensão máxima do agregado graúdo era de 20 mm, enquanto na outra era de 40 mm. A Figura 2.16 ilustra claramente que o aumento da dimensão máxima do agregado graúdo, também aumenta a velocidade do pulso ultrassônico, porém sem alterar sua resistência.

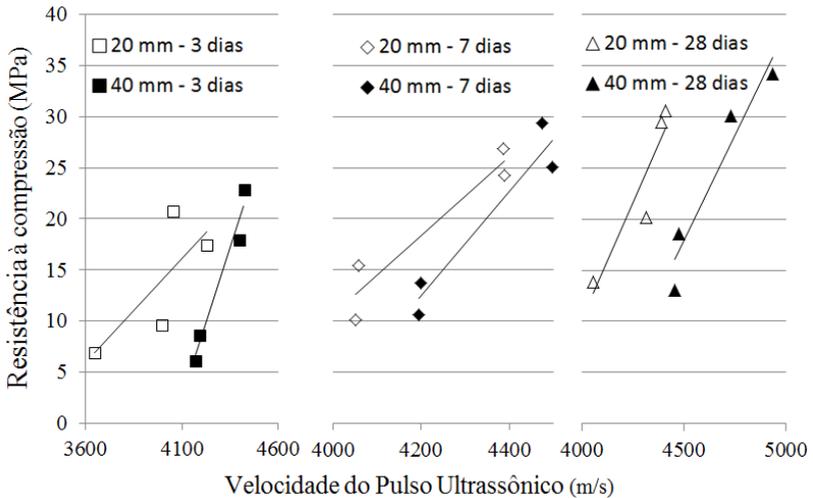


Figura 2.16 – Relação entre dimensão máxima do agregado graúdo, a velocidade do ultrassom e a resistência do elemento

Fonte: adaptado de Sturup *et al.* (1984) *apud* Evangelista (2002)

2.3.1.1.3 Origem mineralógica do agregado graúdo

O agregado graúdo terá a mesma velocidade de propagação de ondas mecânicas do que a rocha que lhe deu origem. Portanto o uso de diferentes rochas na britagem produz concretos com diferentes velocidades de pulso ultrassônico, apesar da possibilidade de a resistência se manter a mesma para a maioria dos concretos comuns. Na Tabela 2.1 encontram-se faixas de velocidades de propagação do pulso ultrassônico para diferentes rochas.

Tabela 2.1 – Velocidade de propagação de ondas mecânicas para diferentes rochas

Origem mineralógica	Velocidade (m/s)
Arenito	2550 / 4230
Basalto	5270 / 6020
Calcário	3910 / 5780
Dolomita	4370 / 6090
Granito	4000 / 5790
Quartzito	5570 / 5720

Fonte: Chung *et al.* (1983)

2.3.1.2 Agregado graúdo e frequência dos transdutores

Uma onda de tensão propagando em um meio infinito, homogêneo e isotrópico terá sua energia disseminada igualmente em todas as direções. Contudo se há distintos materiais, trincas ou buracos, as ondas são refletidas e refratadas entre esses dois meios em diferentes direções. Isso faz com que a energia seja distribuída sem homogeneidade ao longo do elemento.

Em uma leitura ultrassônica, o pulso sônico deve sair do emissor e ter energia suficiente para atravessar todas as anomalias do material e chegar ao receptor. Quanto mais anomalias o material possuir, menor será a energia que o receptor receberá, resultando em grande atenuação da onda. A atenuação de onda será ainda maior se o comprimento de onda for menor ou igual à anomalia encontrada (MALHOTRA *et al.*, 2004).

No caso específico do concreto, o maior problema encontra-se com o agregado graúdo. Se for utilizado um comprimento de onda menor que a dimensão máxima do agregado graúdo, grande parte da energia emitida nunca chegará ao receptor. Na verdade, com esse cenário, a distância de propagação da onda não passará de alguns centímetros (MALHOTRA *et al.*, 2004).

Por esse motivo limita-se o comprimento de onda a valores superiores à dimensão máxima do agregado graúdo. Contudo não basta simplesmente diminuir a frequência utilizada (aumentando o comprimento de onda), pois os pulsos serão menos sensíveis às anomalias internas do concreto e os resultados menos satisfatórios.

Por esses motivos fica claro a necessidade de procurar uma frequência que proporcione comprimentos de onda que não sejam

afetados pelos agregados internos do concreto, consigam detectar as anomalias e, ao mesmo tempo, tenham energia para chegar ao receptor.

Supondo que a velocidade de propagação do pulso ultrassônico para um concreto de boa qualidade fique em torno de 4000 m/s , pode-se calcular usando a Equação 2.1 o comprimento de onda para diferentes frequências utilizadas, conforme mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Comprimentos de onda para transdutores de diferentes frequências aplicados em um concreto com velocidade de 4000 m/s

Frequência (kHz)	Comprimento de onda (cm)
20	20,0
37	10,8
54	7,4
82	4,9
150	2,7
200	2,0
400	1,0

Portanto abaixo de 20 kHz o comprimento de onda fica maior que 20 cm, resultando em uma onda pouco sensível às anomalias do concreto. Já acima de 200 kHz a dimensão máxima da brita deve ser menor que 2 cm, o que é incomum na grande maioria das obras correntes. Dessa forma as frequências que devem ser utilizadas ficam entre 20 e 200 kHz e são escolhidas de acordo com o elemento de concreto a ser ensaiado.

2.3.1.3 Interface transdutor-concreto

Para a realização do ensaio, a superfície deve estar limpa e lisa (NBR8802-1994). Caso a superfície apresente-se áspera, é aconselhável o uso de um acoplante mais viscoso, de tal modo a melhorar a conexão física entre o transdutor e o concreto (MALHOTRA *et al.*, 2004). Uma pressão uniforme também deve ser aplicada no transdutor, de modo a permitir que o pulso seja integralmente transmitido ao concreto.

Superfícies irregulares devem ser lixadas de modo a melhorar o contato do transdutor. Caso isso não resolva, é possível a correção da superfície com pasta de cimento, gesso ou resina epóxi.

Superfícies rebocadas ou acabadas com outros materiais devem ser evitadas, pois provavelmente o acabamento não representará as características internas do concreto (MACHADO, 2005).

2.3.1.4 Relação água-cimento

Estudos feitos por Kaplan (1959), *apud* Malhotra *et al.* (2004), demonstraram que somente o aumento da relação água-cimento diminui a resistência final do concreto, bem como sua velocidade de ultrassom. Fato perfeitamente explicável, já que a resistência final do concreto está ligada ao módulo de elasticidade do mesmo, que, por sua vez, é muito importante para a propagação de uma onda de tensão.

Estudos efetuados por Facaoaru (1961), *apud* Hamassaki (1986), demonstraram que, quando se aplica somente uma variação da relação água-cimento e são mantidas as outras proporções inalteradas, a velocidade do pulso ultrassônico varia proporcionalmente com a resistência do concreto. A Figura 2.17 mostra que, quanto menor a relação água-cimento, maior a resistência adquirida pelo concreto e também maior será a velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

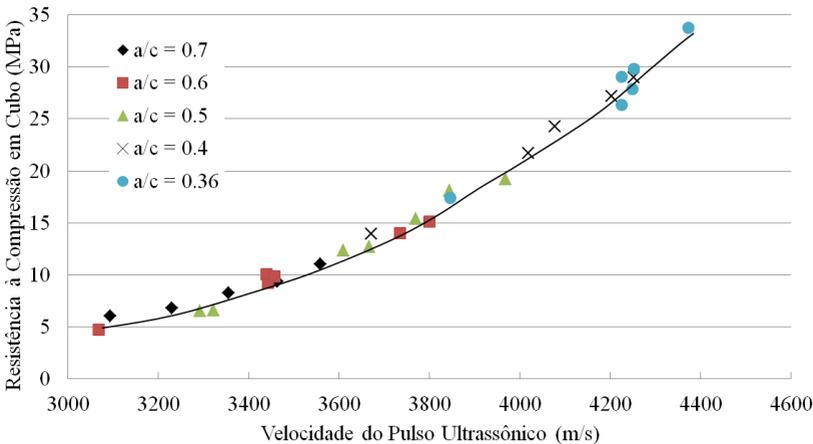


Figura 2.17 – Correlação entre resistência à compressão e velocidade do pulso ultrassônico para concretos com diferentes relações de água-cimento

Fonte: adaptado de Facaoaru (1961) *apud* Hamassaki (1986)

2.3.1.5 Idade do concreto, grau de hidratação e aditivos

A velocidade do pulso ultrassônico está intimamente ligada ao grau de hidratação do concreto. Dessa forma o uso de cimentos de Alta Resistência Inicial (ARI), bem como aditivos aceleradores de pega, proporciona uma elevada taxa de hidratação do concreto que irá refletir na velocidade do ultrassom. Aditivos redutores de água também aumentam a velocidade do ultrassom uma vez que reduzem a relação água-cimento, como já comentado.

Tipicamente, a evolução da velocidade do pulso ultrassônico no concreto acompanha o ganho de resistência até algumas horas (ou dias) após a concretagem. Então a velocidade tende a se manter constante, apesar do contínuo ganho de resistência (MALHOTRA *et al.*, 2004).

2.3.1.6 Tamanho do caminho de onda

A princípio, a velocidade do pulso ultrassônico não depende do tamanho do caminho de onda percorrido. Contudo, através de ensaios experimentais, sabe-se que percursos muito pequenos não são representativos. A RILEM (ND1-1972) recomenda que o tamanho mínimo do caminho de onda deve ser de:

- ✓ 100 mm para concreto com agregado graúdo de dimensão máxima de 30 mm;
- ✓ 150 mm para concreto com agregado graúdo de dimensão máxima de 45 mm.

2.3.1.7 Posicionamento dos transdutores próximos às bordas

As expressões desenvolvidas no item 2.1 são aplicadas em meio infinito, sendo que para elementos de concreto finitos algumas observações devem ser levadas em consideração.

Pelo fato do elemento ser finito, os transdutores devem ser posicionados com uma distância mínima das bordas maior ou igual ao comprimento de onda utilizado pelo pulso (MALHOTRA *et al.*, 2004). Como a velocidade do pulso ultrassônico no concreto é fixa, o que determina o comprimento de onda a ser utilizado é a frequência do transdutor escolhido, conforme a Equação 2.1.

Além da condição anterior, a frequência deve também ser ajustada para que o comprimento de onda seja maior que a dimensão máxima do agregado graúdo, conforme já comentado no item 2.3.1.2. Baseada nesses conceitos a RILEM (ND1-1972) apresenta a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Correções entre a frequência do transdutor, a menor dimensão lateral, o diâmetro máximo do agregado graúdo e o tamanho do percurso de onda

Frequência Mínima do Transdutor (kHz)	Menor Dimensão Lateral e Diâmetro Máximo do Agregado Graúdo (mm)	Tamanho do Percurso de Onda (mm)
60	70	100 - 700
40	150	200 - 1500
20	300	>1500

Fonte: RILEM (ND1-1972)

2.3.1.8 Intensidade do carregamento

Em geral, a velocidade do pulso ultrassônico não é afetada pelo nível de tensões atuantes no elemento. Contudo, para tensões muito elevadas, em torno de 65% da tensão de ruptura, ocorrem microfissurações no concreto que provocam uma diminuição da velocidade de propagação (MALHOTRA *et al.*, 2004).

2.3.1.9 Presença de armadura

A presença de armadura é um fator que altera muito as leituras ultrassônicas no concreto, pois o aço apresenta velocidade de propagação do pulso ultrassônico da ordem de 1,4 a 1,7 vezes a do concreto simples (MALHOTRA *et al.*, 2004).

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) propõem a utilização de fatores de correção, que são função da geometria estudada.

2.4 APLICAÇÕES DO ULTRASSOM NA DETECÇÃO DE NÃO HOMOGENEIDADES

Por diversos motivos as estruturas podem apresentar problemas internos como, por exemplo, deterioração, trincas internas, falhas de concretagem não superficiais, variações na qualidade do concreto utilizado, entre outras. Na detecção dessas patologias, quando internamente localizadas, o ultrassom desempenha uma ótima função,

pois o pulso ultrassônico percorre o interior do elemento estrutural ensaiado e seus resultados refletirão a natureza física do percurso utilizado.

O procedimento do ensaio ultrassônico consiste em efetuar leituras diretas ortogonais de ultrassom com uma malha retangular de espaçamento definido. O espaçamento pode variar de acordo com o nível de varredura pretendido e com o grau de deterioração encontrado. Usualmente, os espaçamentos ficam em torno de 30 a 100 cm (MALHOTRA *et al.*, 2004).

Um exemplo típico de detecção de não homogeneidade encontra-se na Figura 1.2. Quando as leituras são realizadas fora da não homogeneidade, um tempo constante de percurso é obtido. Já quando são realizadas em um plano que corta o defeito, a leitura resulta em um tempo de propagação maior, consequência da presença de um elemento de baixa velocidade em seu trajeto.

Vários pesquisadores fizeram trabalhos relacionados com estudo de homogeneidade em laboratório e em campo. A seguir estão apresentados apenas alguns dos estudos desenvolvidos na Universidade Federal de Santa Catarina (SOARES JUNIOR *et al.*, 2006; RHEINHEIMER *et al.*, 2006; EMANUELLI JUNIOR *et al.*, 2010; BUTTCHEVITZ *et al.*, 2010).

Soares Junior *et al.* (2006) pesquisaram a capacidade de detecção do ultrassom com relação à geometria da não homogeneidade e do elemento de concreto. Para tal, foram moldados 5 corpos de prova cúbicos de 20 cm de aresta. Internamente, nos corpos de prova, foram adicionados cubos de EPS ou argamassa de 10 cm de aresta para simular o defeito em questão. Alguns corpos de prova receberam barras de aço internas para verificar sua influência sobre as leituras. A Figura 2.18 ilustra a composição de um dos corpos de prova confeccionados pelos autores e o resultado do mesmo. Na Figura 2.18 (b), é perceptível a detecção da argamassa e conclui-se que a barra de aço, nesse caso, não apresentou significativas influências nos resultados, principalmente pela sua orientação em relação às leituras.

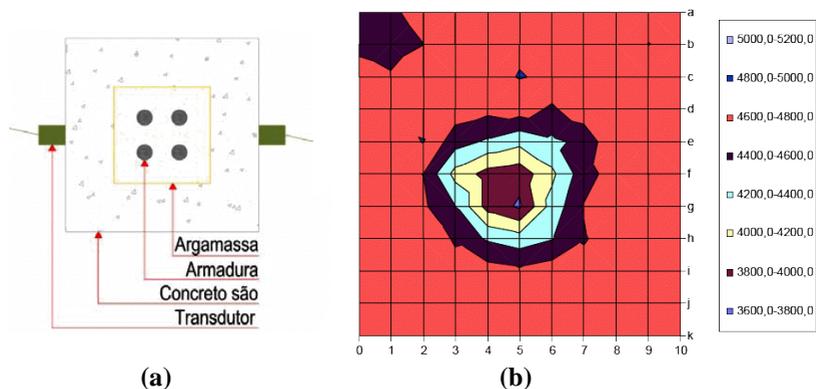


Figura 2.18 – Cubo de 20 cm de aresta com defeito simulado por argamassa interna e presença de barras de aço – (a) corpo de prova – (b) resultado das leituras (m/s)

Fonte: Soares Junior *et al.* (2006)

Rheinheimer *et al.* (2006) efetuaram uma análise de homogeneidade com ultrassom em um pilar de uma ponte de concreto armado. Para tal, foi discretizada uma malha de pontos de leitura com abertura predominante de 50 cm. Os resultados foram transcritos em curvas e estão exibidos sobre a foto do pilar apresentada na Figura 2.19. Na figura, observa-se pontos de baixa velocidade na base e no topo da área inspecionada. Essas regiões provavelmente apresentam algum processo de deterioração.



Figura 2.19 – Exibição do pilar com as curvas de velocidade (m/s) obtidas nas leituras ultrassônicas

Fonte: Rheinheimer *et al.* (2006)

Emanuelli Junior *et al.* (2010) utilizaram a técnica do ultrassom para avaliar a capacidade de detecção de cordoalhas de protensão em uma viga de concreto. Para tal, foi concretado um prisma de concreto com as dimensões de 100 cm × 96 cm × 20 cm com uma cordoalha interna. Para efetuar as leituras, foi utilizada uma malha quadrada de 4,5 cm conforme ilustra a Figura 2.20. Na Figura 2.21 encontra-se o resultado do ensaio.

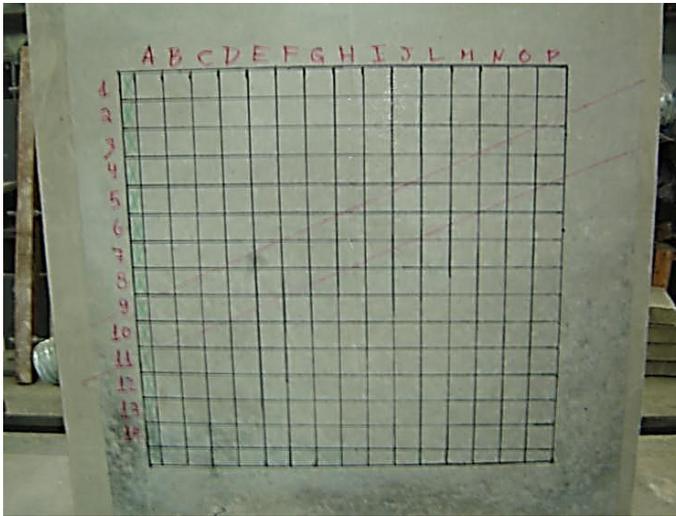


Figura 2.20 – Prisma de concreto com bainha concretada
 Fonte: Emanuelli Junior *et al.* (2010)

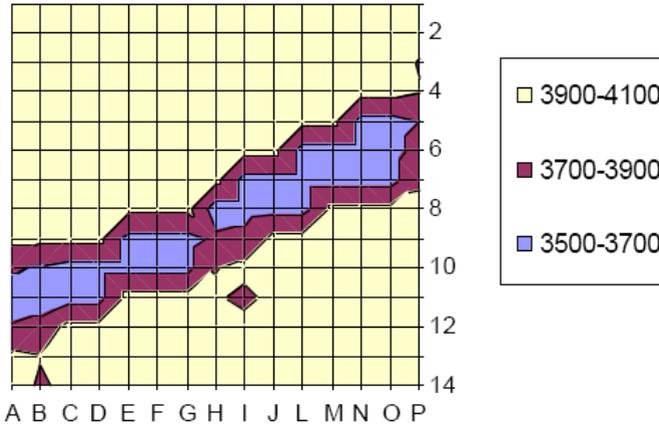


Figura 2.21 – Resultado do ensaio do ultrassom para detecção de bainha de protensão (m/s)
 Fonte: Emanuelli Junior *et al.* (2010)

Buttchevitz *et al.* (2010) pesquisaram a capacidade do ultrassom em detectar regiões com falhas de adensamento, i.e., sem vibração adequada. Para tal foi confeccionado um prisma de concreto com dimensões de 60 cm × 90 cm × 15 cm no qual foram produzidas zonas

com boa e sem vibração. Na Figura 2.22, está representada a malha de leituras utilizada neste estudo, bem como as regiões onde o vibrador de agulha foi introduzido (hachuras). Já na Figura 2.23 encontra-se o resultado onde é possível identificar as zonas não vibradas pela ocorrência de baixa velocidade de propagação o pulso ultrassônico.

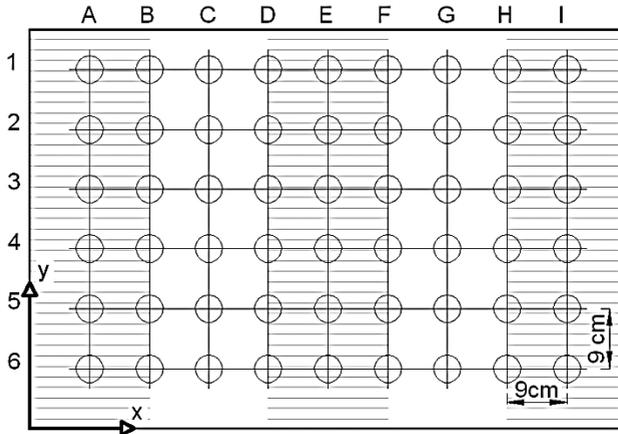


Figura 2.22 – Representação da malha utilizada nas leituras e das zonas vibradas através de hachuras

Fonte: Buttechevitz *et al.* (2010)

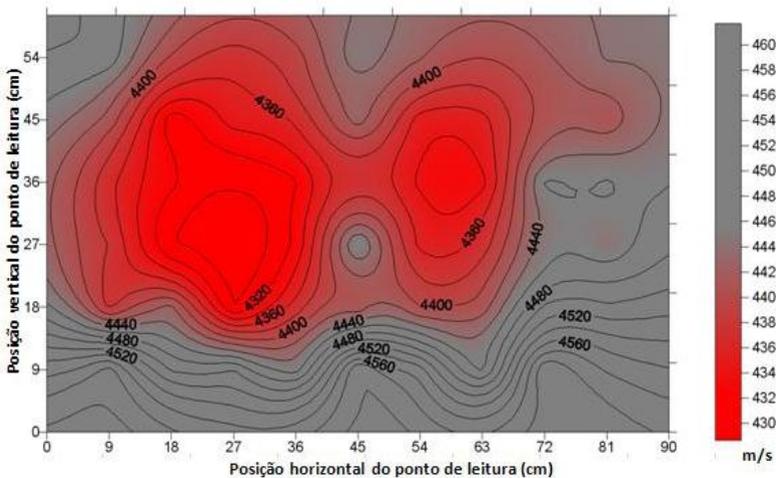


Figura 2.23 – Resultados obtidos no estudo de homogeneidade de adensamento

Fonte: Buttechevitz *et al.* (2010)

Como pode ser percebido, exemplos de aplicações da técnica ultrassônica para avaliar a homogeneidade interna de uma peça de concreto possuem os mais variados objetivos.

Uma limitação dessa técnica é a incapacidade de localizar a profundidade (no sentido da propagação dos pulsos) na qual se encontram as não homogeneidades, bem como determinar suas formas com mais precisão. Por analogia, os resultados obtidos são como uma projeção paralela do objeto, como uma sombra de uma pessoa exposta à luz solar.

Devido a essa imprecisão, a técnica tomográfica pode ser utilizada para melhorar consideravelmente os resultados obtidos dos ensaios. Tal melhoria é proporcionada por um resultado que contempla a localização na profundidade da não homogeneidade, como está exibido no item 2.5.

2.5 APLICAÇÕES DA TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA NA DETECÇÃO DE NÃO HOMOGENEIDADES

A tomografia é um método totalmente não destrutivo que possibilita o mapeamento de toda a seção interna do objeto a partir de múltiplas projeções do mesmo. Seu procedimento consiste em selecionar o elemento e seção, escolher o modo de leitura, efetuar as leituras e inserir os tempos de propagação, juntamente com a geometria envolvida, no programa tomográfico. Então o programa é responsável pela resolução do problema tomográfico, possibilitando a exportação numérica dos resultados, bem como os exibindo graficamente (tomograma).

Os modos de leitura dependem da quantidade e das faces acessíveis, bem como do tempo disponível para a realização do ensaio. Quanto maior o número de leituras efetuadas, melhor será o resultado tomográfico, ao custo da elevação do tempo de ensaio. Os modos de leituras estão expostos na Figura 2.24.

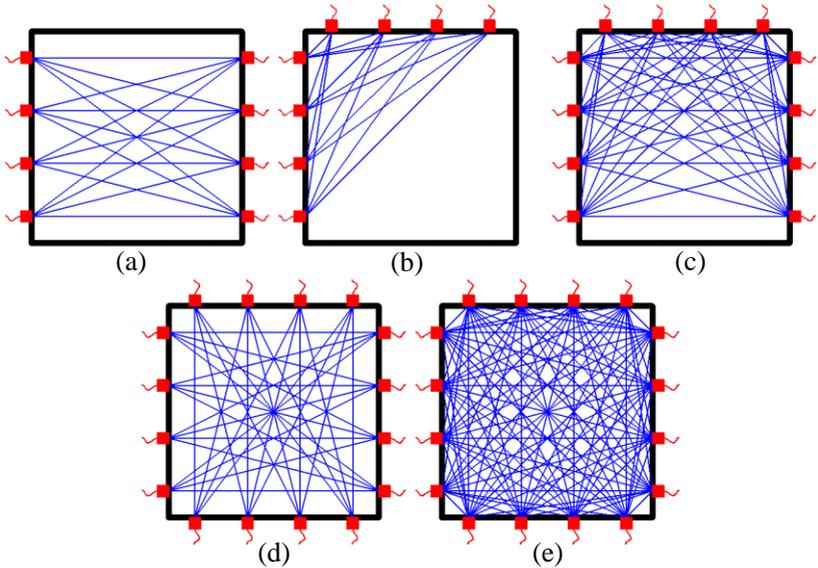


Figura 2.24 – Modos de leitura – (a) faces opostas simples – (b) faces adjacentes – (c) faces opostas e adjacente – (d) faces opostas completo – (e) faces opostas e adjacentes completo

Nota-se na Figura 2.24 que todos os modos de leitura têm distribuições desproporcionais de concentração de caminhos de onda. Atenção especial deve ser dada aos casos *b* e *c*, onde essas diferenças são grandes e podem causar tomogramas com distorções elevadas, pois as regiões com mais leituras serão melhores representadas no tomograma, ao passo que as demais terão uma representação com menor qualidade.

A seguir será efetuada uma revisão bibliográfica das aplicações da tomografia ultrassônica em concreto, onde se destacam a detecção de dutos, fissuras, falhas de concretagem e a avaliação do resultado de restauração de elementos estruturais. Infelizmente não foi encontrado nenhum trabalho nacional publicado sobre o tema, sendo então expostas apenas experiências internacionais.

2.5.1 Detecção de dutos

Martin *et al.* (2001) relatam que muitas pontes na Inglaterra, feitas de concreto protendido, estão sofrendo processos de deterioração na argamassa interna da bainha de protensão. Essa deterioração resulta

em vazios que são a porta de entrada para ataques químicos corrosivos no cabo de protensão, bem como tornam deficiente a distribuição de tensões de cisalhamento no contato entre o cabo e o concreto da viga. Tais fatores colocam em risco a segurança das pontes, sendo necessária uma rotina de inspeções periódicas e, quando necessário, processos de restauração.

Na Inglaterra, essas inspeções são geralmente formadas por vistorias visuais e endoscopia via furos na bainha. O fato é que esses métodos não são muito eficazes, sendo preferível a aplicação de ensaios não destrutivos de detecção de não homogeneidades, como, por exemplo, a tomografia por ultrassom.

Para tal, os autores estudaram, em laboratório, a capacidade de detecção de vazios internos na bainha através da tomografia ultrassônica. Foi confeccionado um bloco de concreto com dimensões de 120 cm × 75 cm × 40 cm contendo duas bainhas semipreenchidas de 10 cm, conforme mostra a Figura 2.25.

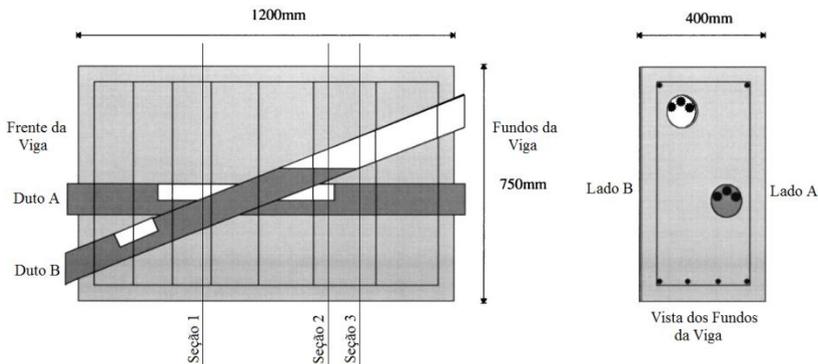


Figura 2.25 – Bloco de concreto com duas bainhas e seus respectivos preenchimentos

Fonte: adaptado de Martin *et al.* (2001)

Neste caso, foram feitas reconstituições bidimensionais de três seções exibidas na Figura 2.25. Para tal foram realizadas leituras ultrassônicas na parte superior e nas laterais da viga (Figura 2.24 (c)), com espaçamento de 10 cm, utilizando o aparelho Pundit.

Os dados geométricos e os tempos de leitura foram inseridos no programa tomográfico, cujos resultados estão exibidos nas Figuras 2.26 e 2.27.

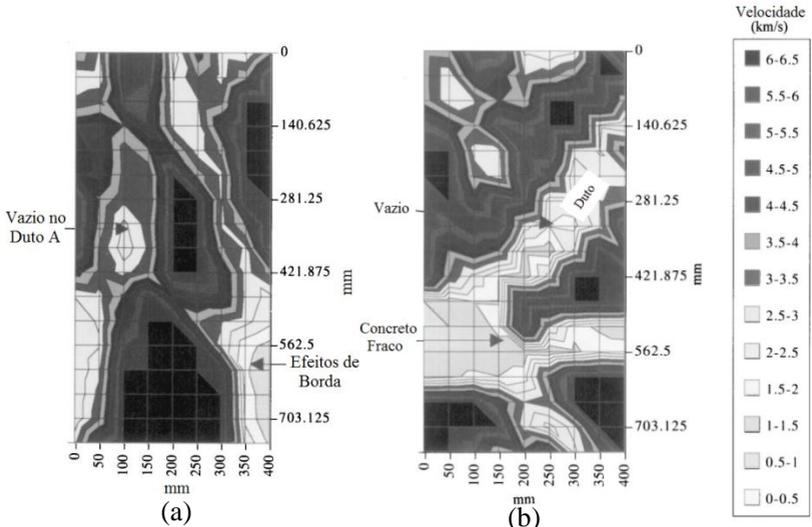


Figura 2.26 – Tomograma da seção 1 (a) e seção 2 (b)
 Fonte: adaptado de Martin *et al.* (2001)

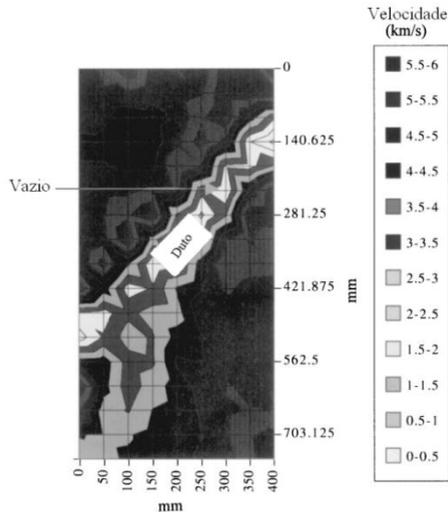


Figura 2.27 – Tomograma da seção 3
 Fonte: adaptado de Martin *et al.* (2001)

Na Figura 2.26 (a), seção 1, obtém-se uma velocidade inferior na posição do duto A, indicando o vazio. Já o duto B não pode ser localizado, sugestionando seu completo preenchimento. Nas Figuras

2.26 (b) e 2.27, seções 2 e 3 respectivamente, os tomogramas não ficaram muito claros. Os autores argumentam que essa dificuldade foi causada pelo fato de estarem utilizando uma malha de 10 cm para localizar dois objetos próximos de também 10 cm. Além disso, o modo de varredura adotado, indicado na Figura 2.24 (c), proporciona distorções em seus resultados pela carência de leituras na parte inferior da viga.

Em outro estudo, Muldoon *et al.* (2007) procuram detectar vazios em dutos de cabos de protensão em vigas. Para tal utilizaram os métodos do ecoimpacto, SIBIE, radar de subsuperfície e a tomografia ultrassônica. Foram concretadas quatro vigas, porém apenas em duas a técnica tomográfica foi aplicada, cujos desenhos encontram-se na Figura 2.28.

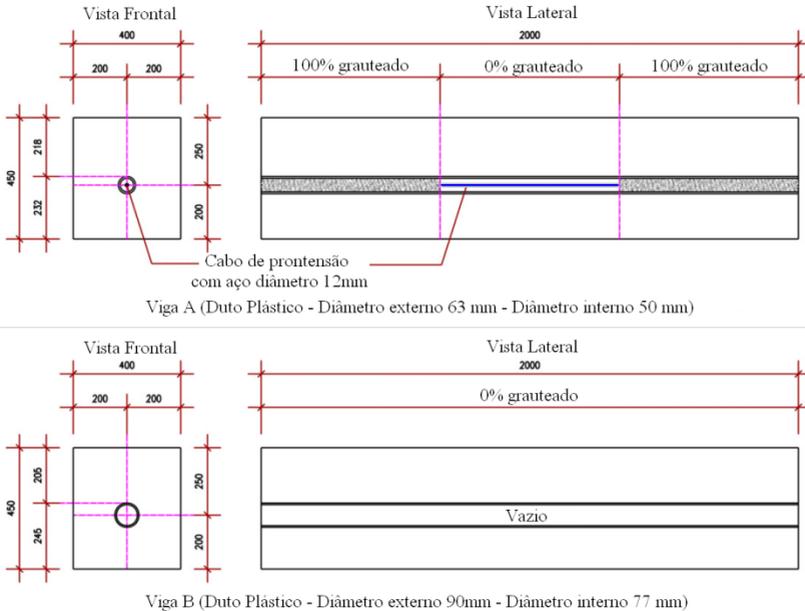


Figura 2.28 – Desenhos das duas vigas concretadas – dimensões em mm

Fonte: adaptado de Muldoon *et al.* (2007)

Utilizando uma malha de 5 cm as leituras foram procedidas com o aparelho Pundit e um transdutor de 82 kHz. O modo de leitura empregado incluía as quatro faces em todas as combinações possíveis de leituras (Figura 2.24 (e)). Foram efetuadas leituras em duas seções da

viga A (com e sem graute) e uma seção da viga B. Novamente, as leituras e geometria foram inseridas no programa tomográfico que apresentou os resultados exibidos nas Figuras 2.29 a 2.31.

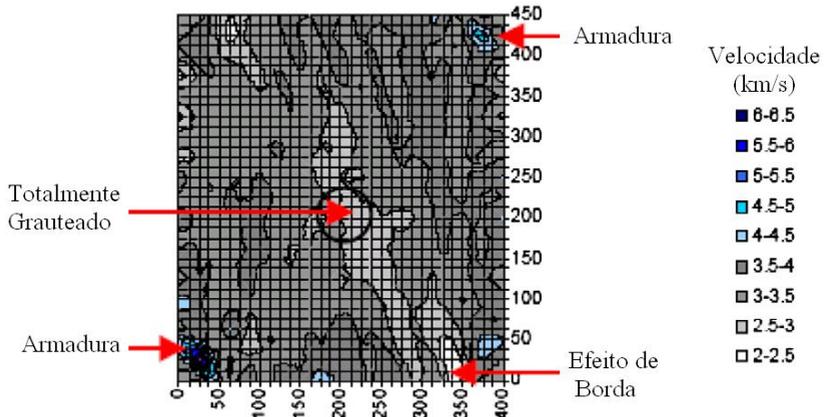


Figura 2.29 – Tomograma da viga A, seção completamente grauteada
 Fonte: adaptado de Muldoon *et al.* (2007)

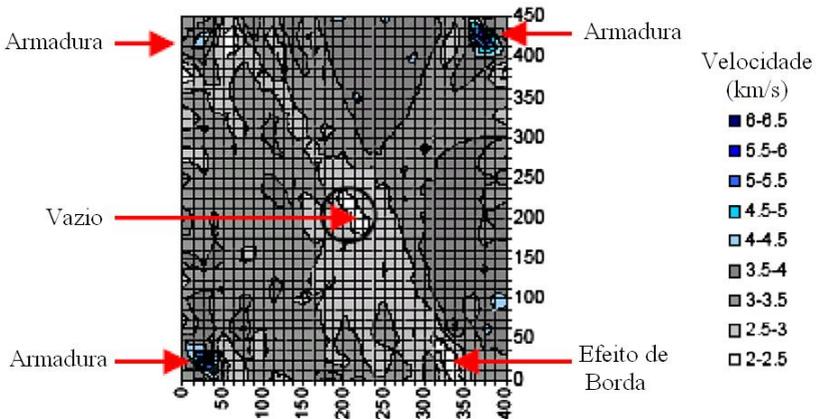


Figura 2.30 – Tomograma da viga A, seção sem graute
 Fonte: adaptado de Muldoon *et al.* (2007)

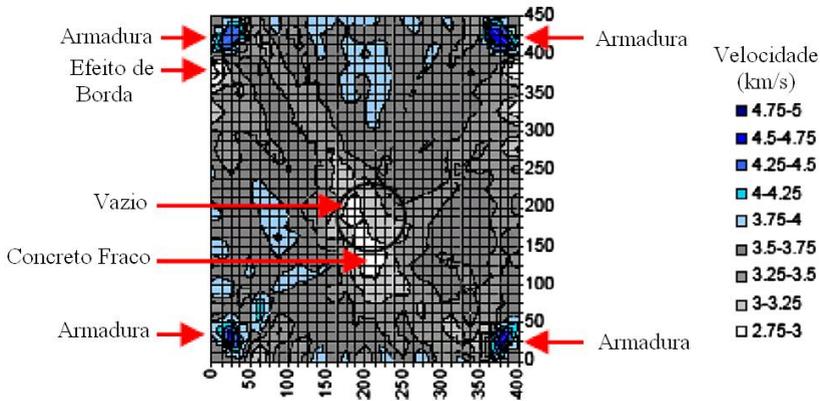


Figura 2.31 – Tomograma da viga B

Fonte: adaptado de Muldoon *et al.* (2007)

Na Figura 2.29, como o duto estava completamente grauteado, o tomograma não indicou nenhuma área visível de baixa velocidade na posição do duto. Em alguns cantos foi possível inclusive detectar a presença da armadura utilizada (14 e 18 mm de diâmetro com 30 mm de cobrimento). Efeitos de borda também foram visualizados. No centro do duto grauteado, foi utilizada uma barra de aço de 12 mm, que não foi detectada no tomograma.

Na Figura 2.30, o duto não grauteado mostra-se evidente pelo aparecimento de uma região de baixa velocidade no centro do tomograma. Novamente, em alguns cantos, a armadura foi detectada, bem como efeitos de borda também estão presentes.

Por fim, na Figura 2.31, a armadura foi detectada nos quatro cantos, bem como o duto vazio. Logo abaixo do duto, os autores acreditam que houve a formação de um concreto mais fraco, identificado por uma zona de baixa velocidade. Esse concreto mais fraco foi possivelmente formado por uma compactação deficiente, fato que não pode ser comprovado, pois o corpo de prova não foi perfurado para avaliação.

Os autores concluem que a tomografia ultrassônica tem uma alta potencialidade de detectar vazios em dutos de concreto protendido. Como desvantagem destacam a necessidade de se efetuar um grande número de leituras.

2.5.2 Simulação computacional

Aggelis *et al.* (2011) efetuaram um estudo teórico bidimensional sobre a tomografia ultrassônica e os fatores que a afetam. Para tal, utilizando um programa simulador de ondas elásticas em sólidos, leituras foram realizadas em um quadrado de concreto de 50 cm de aresta, preenchido com diferentes não homogeneidades.

A primeira simulação numérica foi realizada contendo um vazio quadrado preenchido com ar e com 5 cm de aresta, posicionado no centro do elemento. Os transdutores foram posicionados em faces opostas do quadrado, com espaçamento de 10 cm, conforme o arranjo da Figura 2.24 (a). A Figura 2.32 (a) mostra a seção virtualmente ensaiada, com o arranjo dos transdutores e as propriedades do concreto utilizado. As Figuras 2.32 (b) a (d) exibem os passos do processo iterativo do programa utilizado para a propagação do pulso sonoro.

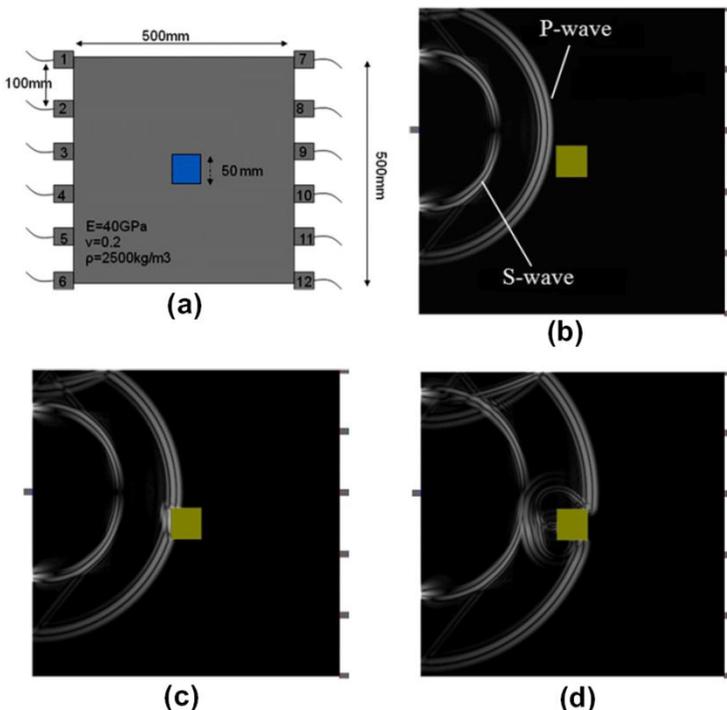


Figura 2.32 – Simulação numérica com um cubo de ar – (a) discretização – (b)(c)(d) sucessivas fotografias das frentes de onda

Fonte: adaptado de Aggelis *et al.* (2011)

Nesta simulação foram efetuadas leituras com duas frequências distintas, 20 kHz e 200 kHz. Após serem realizadas 72 leituras simuladas para cada frequência, as mesmas foram inseridas, junto com a geometria do problema, no programa tomográfico, que resultou nos tomogramas exibidos na Figura 2.33.

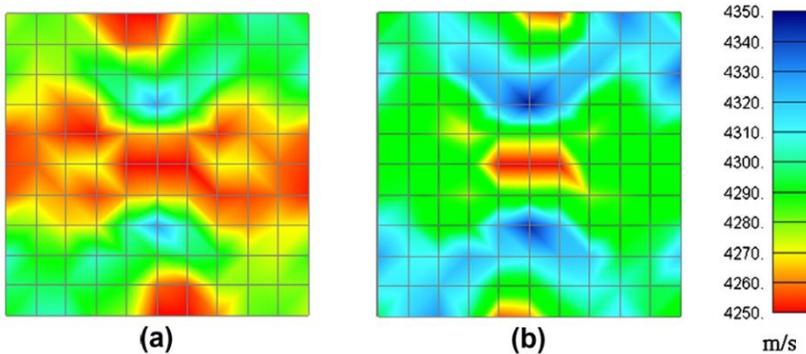


Figura 2.33 – Tomogramas da seção com um vazio quadrado - (a) 20 kHz – (b) 200 kHz

Fonte: adaptado de Aggelis *et al.* (2011)

A Figura 2.33 (a) ilustra uma zona de baixa velocidade no centro da seção com dimensão muito superior à discretizada. O maior motivo dessa diferença foi o fato que nessa simulação foi utilizado apenas dois lados do elemento. Isso proporciona poucos dados para o programa tomográfico calcular uma resposta realística. Já a Figura 2.33 (b) ilustra uma a zona do vazio com tamanho compatível com a realidade e as zonas de baixa velocidade na parte superior e inferior do tomograma reduziram-se muito.

A segunda simulação foi semelhante, com a diferença que foi utilizado um vazio circular de 5 cm de diâmetro. Nessa simulação apenas foram realizadas leituras com a frequência de 200 kHz. A Figura 2.34 (a) mostra o modelo utilizado e a Figura 2.34 (b) o tomograma resultante.

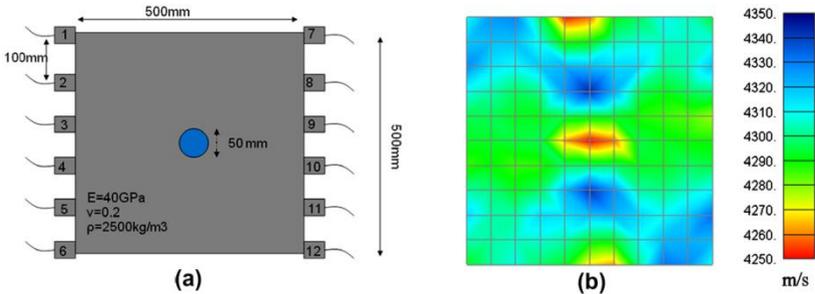


Figura 2.34 – Simulação com vazio circular – (a) modelo discretizado – (b) tomograma

Fonte: adaptado de Aggelis *et al.* (2011)

Comparando os resultados do vazio quadrado e circular para a mesma frequência, ilustrados pelas Figura 2.33 (b) e Figura 2.34 (b) respectivamente, nota-se que tomograma do vazio circular apresentou um tamanho reduzido. Isso se explica pelo fato que a onda tem um percurso menor ao contornar o vazio circular do que contornar o vazio quadrado, assim reduzindo o seu tempo de propagação. Dessa forma fica claro que, considerando o mesmo tamanho, não homogeneidades circulares são mais difíceis de serem detectadas do que as quadradas.

Na terceira simulação, os autores simulam uma superfície deteriorada, típica de elementos estruturais expostos ao ambiente. Para tal discretizaram faixas de concreto deteriorado de espessura igual a 10 cm em volta de um concreto íntegro de 30 cm de espessura, como mostra a Figura 2.35 (a). As Figuras 2.35 (b) e (c) mostram os tomogramas utilizando como frequência 20 e 200 kHz, respectivamente.

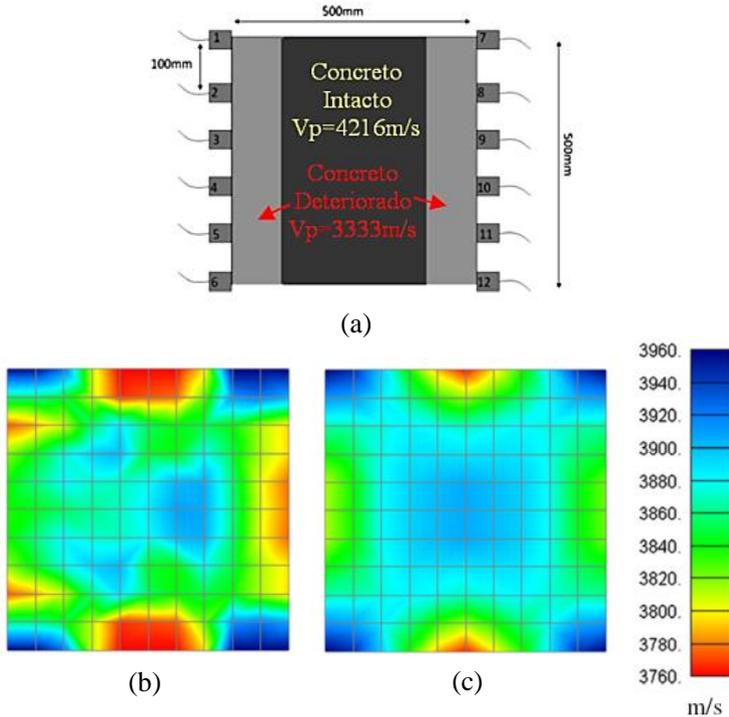


Figura 2.35 – Simulação com deterioração lateral – (a) modelo discretizado – (b) tomograma com 20 kHz – (c) tomograma com 200 kHz

Fonte: adaptado de Aggelis *et al.* (2011)

Situações como aquela exibida pela Figura 2.35 (a) são um verdadeiro desafio para a tomografia, visto que todas as leituras irão passar pelo concreto deteriorado e íntegro. Isso resulta em um sistema tomográfico indeterminado, tornando sua resolução quase impossível para esse arranjo de transdutores, como será visto no item 3.3.2.

Na Figura 2.35 (c) o tomograma resultante das leituras de 200 kHz resultou em duas zonas de baixa velocidade nas laterais, contudo as partes superior e inferior também apresentaram zonas de baixa velocidade que não são compatíveis com a realidade. Já o tomograma das leituras de 20 kHz (Figura 2.35 (b)) não é representativo.

Na quarta simulação foram utilizadas as zonas laterais (10 cm) degradadas com um vazio central circular, conforme a Figura 2.36 (a).

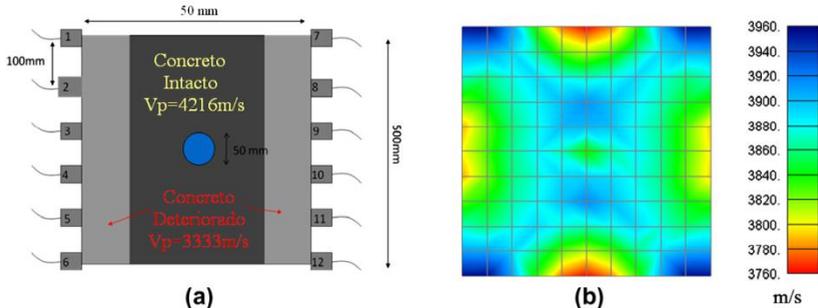


Figura 2.36 – Simulação com deterioração lateral e vazio circular – (a) modelo discretizado – (b) tomograma com 200 kHz

Fonte: adaptado de Aggelis *et al.* (2011)

Mesmo escondido atrás de faixas de concreto deteriorado, o tomograma da Figura 2.36 (b) exibiu o vazio circular no seu centro. Os autores explicam que a faixa de baixa velocidade pode distorcer os resultados, contudo os vazios internos ainda são detectáveis pela técnica tomográfica. Segundo os autores, mais estudos ainda devem ser efetuados em torno deste problema.

Já na quinta simulação, foi utilizada a mesma seção com faixas deterioradas e o vazio central, porém efetuando as leituras nas quatro faces, conforme exhibe a Figura 2.37 (a).

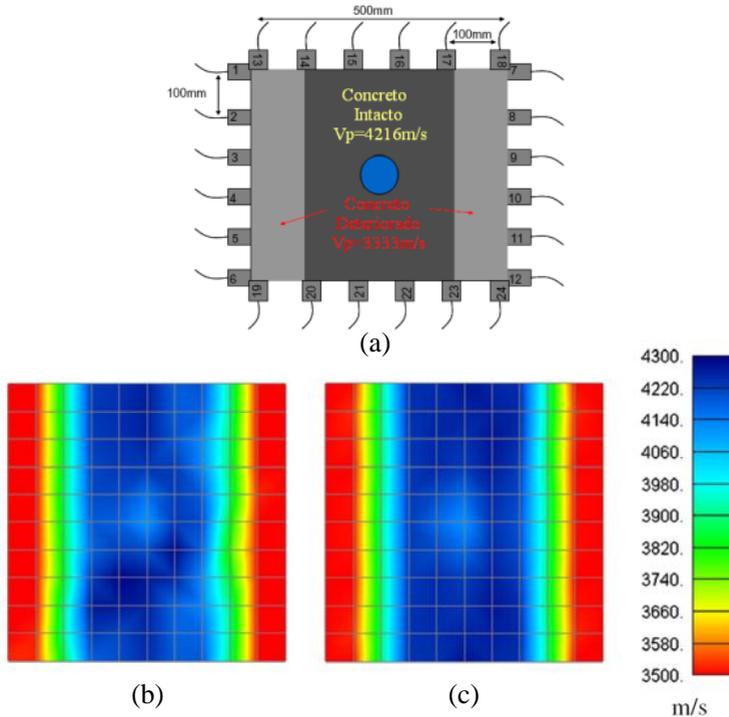


Figura 2.37 – Simulação com deterioração lateral e vazio circular com leituras nas quatro faces – (a) modelo discretizado – (b) tomograma com 20 kHz - (c) tomograma com 200 kHz

Fonte: adaptado de Aggelis *et al.* (2011)

A diferença é enorme, pois os tomogramas apresentados nas Figuras 2.37 (b) e (c) são mais nítidos e representativos da realidade modelada. Essa diferença é devido ao uso das quatro faces para efetuar as leituras, gerando mais dados para o programa tomográfico. Um exemplo disso são as leituras verticais, que cruzam somente um tipo de material: deteriorado ou intacto. Dessa forma a resolução tomográfica consegue projeções novas para realizar seu processamento. Quanto às frequências, a de 200 kHz demonstrou novamente resultados mais fidedignos.

Para avaliar a influência que barras de aço desempenhariam na identificação de zonas superficiais deterioradas, os autores propuseram uma sexta simulação, com a seguinte configuração exibida na Figura 2.38 (a). No modelo, as barras de aço foram discretizadas com espessura de 16 mm, posicionadas horizontalmente e com 10 cm de espaçamento.

Além disso, foi adotada uma velocidade de 6023 m/s para os pulsos que percorrerem o aço.

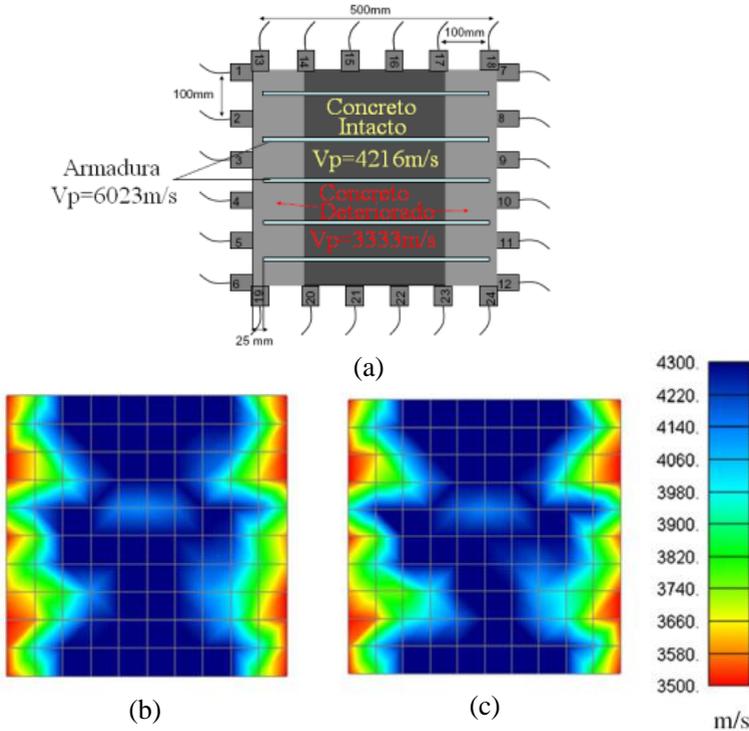


Figura 2.38 – Simulação com deterioração lateral, armaduras e leituras nas quatro faces – (a) modelo discretizado – (b) tomograma com 20 kHz - (c) tomograma com 200 kHz

Fonte: adaptado de Aggelis *et al.* (2011)

As leituras horizontais realizadas no modelo acima são muito dependentes do aço, uma vez que o pulso mais rápido usará mais o aço do que o concreto como meio de propagação. Dessa forma, se forem realizadas somente leituras horizontais, o tomograma resultante apresentaria áreas de grande velocidade, aumentando a dificuldade de detectar as faixas deterioradas de concreto. Contudo, como estão sendo utilizadas as quatro faces para efetuar as leituras, existem diferentes ângulos de propagação dos pulsos, sendo que vários deles não são paralelos às barras de aço. Essa mistura de projeções em vários ângulos proporciona as Figuras 2.38 (b) e (c), onde as áreas com concreto

deteriorado são detectadas, porém apresentam deformações em suas espessuras.

2.5.3 Detecção de fissuras

Aggelis e Shiotani (2007) utilizaram a tomografia ultrassônica para avaliar o trabalho de recuperação de uma fissura em uma viga de ponte de concreto armado. Para poder avaliar o trabalho de recuperação dois ensaios tomográficos foram executados: o primeiro antes da recuperação e o segundo depois. Foram utilizados 2 conjuntos de transdutores, sendo 5 posicionados no topo da viga e 5 na parte inferior, conforme a Figura 2.39, seguindo o modo de leitura exposto na Figura 2.24 (a).

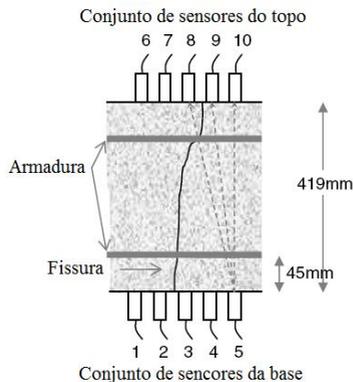


Figura 2.39 – Posicionamento dos transdutores em torno da fissura

Fonte: adaptado de Aggelis e Shiotani (2007)

Os transdutores foram fixados na viga usando cera derretida eletrônica com espaçamento de 5 cm (Figura 2.40 (a)). Para gerar o pulso, um impacto foi executado ao lado de cada um dos dez transdutores, ficando esse como marcador do início da propagação da onda. Após o impacto, os transdutores situados na face oposta da viga iniciam o registro de oscilações mecânicas. Como instrumento impactante foi utilizado uma lapiseira, onde era quebrada a ponta de seu grafite, conforme mostra a Figura 2.40 (b).



Figura 2.40 – Execução do ensaio - (a) fixação dos transdutores - (b) fonte de impacto

Fonte: Aggelis e Shiotani (2007)

Efetuada os dois ensaios, antes e depois do reparo com injeção de resina epóxi, foram obtidos os tomogramas exibidos na Figura 2.41.

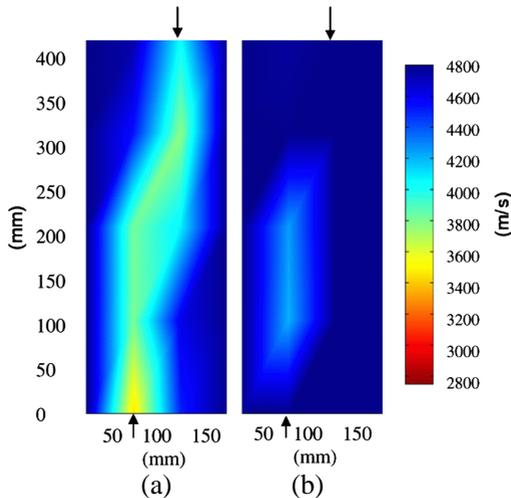


Figura 2.41 – Tomogramas com setas indicando a posição da fissura - (a) antes do reparo - (b) depois do reparo

Fonte: adaptado de Aggelis e Shiotani (2007)

Os tomogramas da Figura 2.41 mostram claramente a detecção da fissura e o sucesso de seu preenchimento pela resina epóxi. Aggelis e Shiotani (2007) concluem que o método da tomografia ultrassônica apresenta grandes vantagens na avaliação da eficácia de injeções de resina epóxi e pode ser utilizado sem grandes esforços.

Em outro estudo, Kepler, Bond e Frangopol (2000ab) estudaram a viabilidade de uso da tomografia ultrassônica para a localização de fissuras em barragens. Para tal, empregaram um grande prisma de concreto com dimensões de 60 cm × 245 cm × 490 cm. Posteriormente foram introduzidas fissuras com profundidades de 30 cm, 60 cm e 120 cm, que servissem de referência laboratorial para o ensaio de campo.

Após a execução de 435 leituras, os tempos de propagação e a geometria do problema foram inseridos o programa 3DTOM (JACKSON *et al.*, 1996). O resultado encontra-se na Figura 2.42.

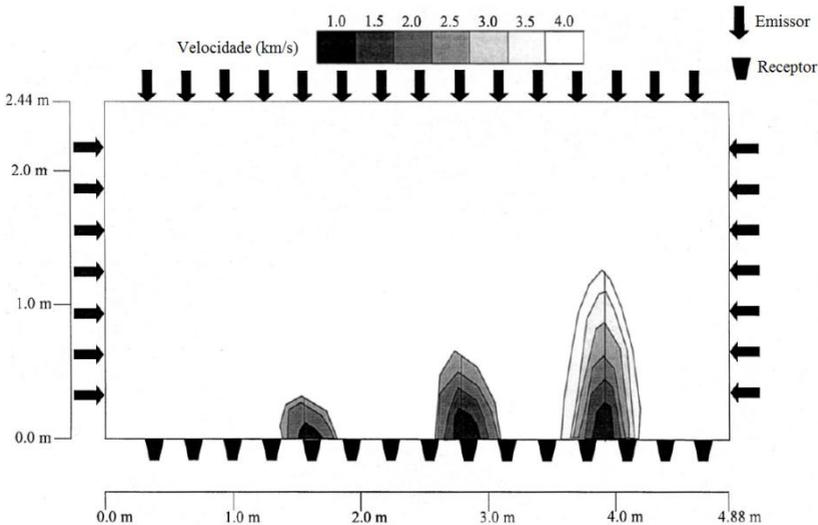


Figura 2.42 – Tomograma de um prisma de concreto com fissuras induzidas detectadas

Fonte: adaptado de Kepler *et al.* (2000)

Após o sucesso do estudo laboratorial os pesquisadores escolheram a barragem de Barker Meadow, na cidade de Boulder, Colorado-US. Trata-se de uma barragem de gravidade feita de concreto ciclópico com 53,3 m de altura, 220 m de comprimento e construída em 1909. As leituras foram realizadas com receptores de baixo custo que foram instalados na estrutura por alpinistas. Como emissor foi necessário um instrumento que gerasse um pulso com energia suficiente para atingir todos os transdutores, sendo escolhida uma marreta de 3,2 kg. A Figura 2.43 mostra a disposição dos emissores e receptores.

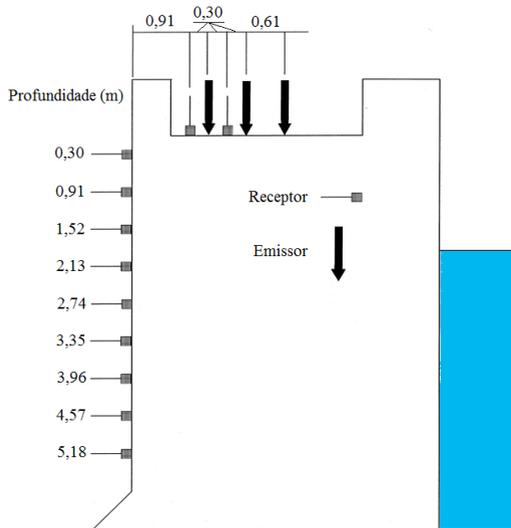


Figura 2.43 – Disposição dos receptores e dos emissores na seção da barragem

Fonte: adaptado de Kepler *et al.* (2000)

O tomograma resultante exibe regiões de baixa velocidade em 4 posições, que, após interpretação técnica adequada, conclui-se que são as representações de 4 das 5 fissuras externamente visíveis. A fissura mais elevada não foi detectada devida à geometria do problema. O resultado tomográfico está exibido na Figura 2.44. Por final, os autores concluem que a tomografia ultrassônica é um ótimo instrumento para avaliação de grandes estruturas de concreto como, por exemplo, barragens. Ainda destacam que a técnica tomográfica, quando associada a algumas extrações de corpos de prova, pode fornecer dados numéricos suficientes para alimentar um modelo de elementos finitos que irá simular o comportamento da estrutura real, avaliando sua segurança.

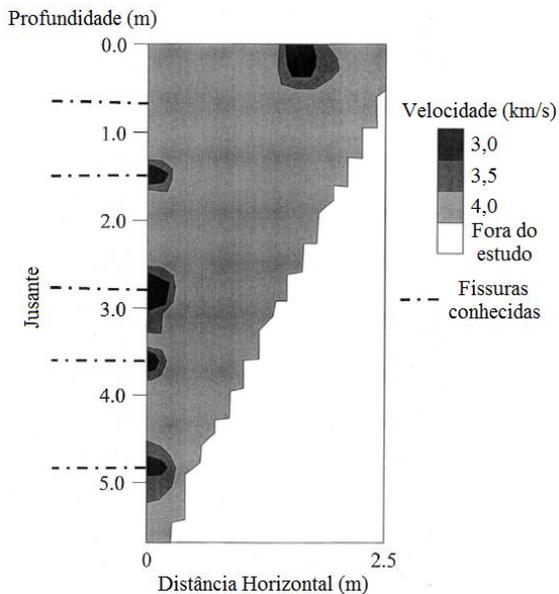


Figura 2.44 – Tomograma produzido pelas leituras na barragem
Fonte: adaptado de Kepler *et al.* (2000)

3 TOMOGRAFIA

3.1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA

Tomografia é uma palavra derivada da união de duas palavras gregas, *tomus* e *grafos* que significam respectivamente “corte” e “imagem ou desenho”.

A história da tomografia começa em 1895, quando o físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen produziu radiação eletromagnética nos comprimentos de onda correspondentes aos atualmente chamados raios X. Tal feito rendeu-lhe o título de “pai da radiologia” e o prêmio Nobel de Física em 1901 (MARTINS, 2006). Na Figura 3.1, há a primeira radiografia efetuada da mão da esposa do descobridor.



Figura 3.1 – O primeiro raio-X

Fonte: Haase (1997)

Com tal advento os cientistas se perguntaram se era possível, a partir de várias radiografias, construir uma imagem tridimensional dos objetos e do corpo humano.

Em 1917, o matemático austríaco Johann Radon provou matematicamente que é possível a reconstrução tridimensional completa de qualquer objeto submetido a várias projeções em diferentes ângulos até somar uma volta completa. Tal técnica foi chamada de transformada de Radon (DEANS, 1983) e é considerada a base matemática para a futura tomografia computadorizada.

Apesar de matematicamente possível, era extremamente complicado e trabalhoso efetuar uma tomografia sem o uso de computadores e equipamentos automáticos. Portanto, apenas em 1972, o primeiro equipamento de tomografia computadorizada foi inventado

pelo engenheiro eletricitista inglês Godfrey Newbold Hounsfield e pelo físico sul-africano Allan MacLeod Cormack, o que lhes rendeu o prêmio Nobel em Fisiologia e Medicina em 1979 (FILLER, 2009). O esboço deste equipamento é apresentado na Figura 3.2. Fato curioso é que a pesquisa foi financiada pela banda musical The Beatles.

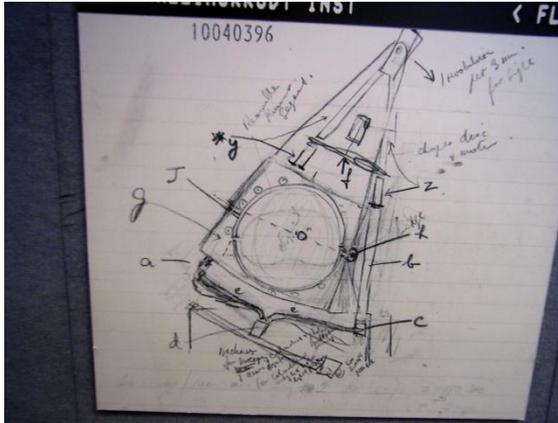


Figura 3.2 – Projeto do primeiro equipamento de tomografia computadorizada

Fonte: UK Radiological Congress 2005

A partir de então a tomografia computadorizada evoluiu consideravelmente, contudo os conceitos básicos são os mesmos desenvolvidos por Radon.

3.2 TOMOGRAFIA POR RAIOS X

Existem dois métodos matemáticos para o desenvolvimento da tomografia: o Método de Expansão em Séries e o Método da Transformada de Radon (IUSEM *et al.*, 1990a; FARIDANI, 2003). O conceito básico exposto aqui é da tomografia por Método de Expansão em Séries, sendo que a tomografia pelo Método de Transformação (ou transformada de Radon) não será abordada, pois foge do escopo desse trabalho.

Ao efetuar uma emissão de um feixe de raios X em um paciente, o mesmo passa pelo seu corpo em linha supostamente reta e tem parte de sua energia absorvida pelos diferentes tecidos orgânicos em seu trajeto. Ao final, a onda é captada por um receptor do outro lado do paciente, conforme esquematicamente apresentado na Figura 3.3. A

diferença entre a energia emitida e a energia recebida pelo aparelho é igual à energia absorvida pelo corpo humano durante o trajeto da onda.

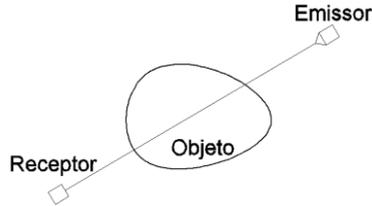


Figura 3.3 – Transmissão de um feixe de raios X

Cada tecido tem uma taxa de absorção diferente dos raios X, que é função das suas propriedades físicas, como, por exemplo, massa, condução elétrica e permeabilidade magnética (JACKSON *et al.*, 1994). Portanto, a energia total absorvida pelo organismo é a soma das pequenas energias absorvidas em cada ponto do corpo pelo qual a onda transitou, que pode ser calculada pela integral de linha da Equação 3.1.

$$\Delta E = \int_L d_j * a_j , \quad 3.1$$

onde:

ΔE : diferença de leitura proveniente do receptor e emissor, sendo a energia total absorvida pelo corpo;

d_j : distância percorrida pelo feixe no elemento infinitesimal j ;

a_j : energia absorvida pelo elemento infinitesimal j por unidade de comprimento.

Discretizando o problema em pequenos elementos, conforme a Figura 3.4, a integral de linha da Equação 3.1 pode ser convertida para o somatório da Equação 3.2, onde M é o número total de elementos discretizados.

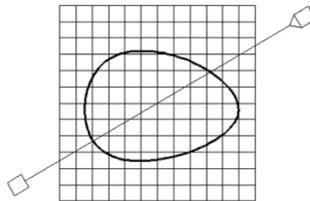


Figura 3.4 – Discretização do corpo em elementos

$$\Delta E = \sum_{j=1}^M d_j * a_j \quad 3.2$$

Na Equação 3.2, ΔE e d_j são valores conhecidos, pois o primeiro é a leitura proveniente do aparelho utilizado e o segundo é função do posicionamento do emissor e do receptor. Portanto, a variável a ser resolvida é absorção por unidade de comprimento a_j , que varia para cada elemento j .

Para obter novas leituras são utilizados vários receptores que giram entorno do paciente, como mostra a Figura 3.5. Cada nova leitura resulta em uma nova equação, conforme expresso na Equação 3.2. Desta forma quando efetuadas N leituras serão obtidas N equações. Manipulando-se a Equação 3.2 para cada nova leitura i , é obtida a Equação 3.3, onde i varia de 1 a N .

$$\Delta E_i = \sum_{j=1}^M d_{ij} * a_j \quad 3.3$$

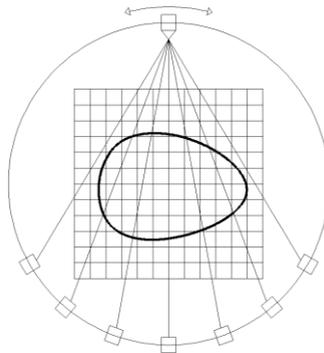


Figura 3.5 – Obtenção de várias leituras

Após um giro completo pelo paciente, todas as leituras necessárias estarão realizadas. Tais leituras juntas formam um sistema de equações linearmente independente (IUSEM *et al.*, 1990b) como mostra a Equação 3.4, que é a forma matricial das equações. A primeira vista, o sistema exposto parece ser facilmente resolvível, porém como o sistema resultante normalmente é retangular e com grandes dimensões, sua resolução pode ser computacionalmente custosa. Portanto, para

esses casos, é recomendado o uso de algum processo iterativo, como, por exemplo, o desenvolvido por Cimmino (IUSEM *et al.*, 1990b), que será discutido a frente.

$$\underline{\Delta E_n} = \underline{D_{nm}} * \underline{A_m} \quad 3.4$$

Depois de obtido os valores de $\underline{A_m}$, pode-se reconstruir tridimensionalmente uma representação gráfica do paciente em exame.

Como pode ser notada, a ideia principal da tomografia consiste em formar imagens do interior de objetos somente tendo como dados diferentes leituras em várias posições angulares distintas. Ciente desse princípio, várias formas de tomografias foram construídas, onde sua diferenciação está em qual tipo de medida física é utilizada.

No caso da tomografia por raios X, a medida mensurada é a absorção dos raios X pelo objeto. Portanto a imagem final resultante refletirá tal propriedade, ou seja, objetos diferentes, porém com a mesma taxa de absorção dos raios X, não se distinguirão em uma tomografia desse tipo. Já quanto maior essa diferença, melhor será a distinção entre os dois objetos.

É possível a utilização de outros tipos de medidas, como, por exemplo, ressonância eletromagnética, resistividade ou condutividade elétrica e velocidade de propagação das ondas mecânicas no concreto, a qual é tema dessa dissertação.

Portanto, para a construção de um tipo diferente de tomografia, é necessária a adaptação dos métodos aqui expostos de tal forma a contemplar a natureza comportamental do novo tipo de medição. No próximo item, tal adaptação será efetuada para o desenvolvimento do processo de tomografia utilizando como medição o ultrassom aplicado no concreto, ou **Tomografia Ultrassônica em Concreto**.

3.3 TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA EM CONCRETO

Nesta seção será efetuada a adaptação dos procedimentos básicos da tomografia com raios X para a tomografia utilizando ultrassom em peças de concreto.

3.3.1 Parâmetros utilizados

O primeiro parâmetro a ser definido é o tipo de grandeza física que será mensurada. Na tomografia por ultrassom os parâmetros que

podem ser medidos são a velocidade e a atenuação da onda nos diferentes materiais.

A velocidade é a razão entre a distância percorrida pelo pulso ultrassônico e o seu tempo de propagação, que pode ser obtido com os aparelhos de ultrassom disponíveis no mercado.

Já a atenuação é a quantidade de energia absorvida pelo material durante a passagem da onda, algo análogo no caso dos raios X. Sua medição pode ser efetuada por osciloscópios posicionados na emissão e na recepção da onda.

Devido à complexidade do tema, essa dissertação se limitará ao estudo da tomografia por velocidade do ultrassom, ficando a tomografia por atenuação de onda como recomendação para futuros trabalhos.

3.3.2 Fundamentação matemática

A velocidade de um pulso ultrassônico trafegando entre dois transdutores (Figura 3.6 (a)) é dada pela Equação 3.5.

$$V = \frac{L}{T} \quad \therefore \quad T = \frac{L}{V} \quad 3.5$$

Percebe-se que, como a geometria e o posicionamento dos transdutores são conhecidos, a distância total L pode ser determinada. Como o tempo total T de propagação da onda é medido pelo aparelho de leitura ultrassônica, a velocidade total V é automaticamente conhecida.

Como exemplo de aplicação, uma peça de concreto apresentada na Figura 3.6 (a) é discretizada em N elementos menores ($N=28$ neste exemplo). Ao se realizar uma leitura do tempo de propagação da onda ultrassônica, posicionam-se os transdutores em lados opostos da peça. Como demonstrado na Figura 3.6 (b), percebe-se que o pulso ultrassônico percorre diferentes elementos com distâncias variáveis em cada elemento. A distância total percorrida L é dada pela soma das distâncias percorridas em cada elemento. Analogamente, a soma dos tempos de percurso em cada elemento resulta no tempo total T .

Considerando que a velocidade de propagação da onda em cada elemento é o parâmetro a ser determinado, o tempo total de propagação T pode ser expresso como apresentado na Equação 3.6.

$$T = \int_E^R \frac{1}{V_j} * dL_j , \quad 3.6$$

onde:

V_j : velocidade de propagação no elemento j ;

dL_j : distância percorrida no elemento j .

A Equação 3.6 pode ser reescrita considerando o termo vagarosidade (p) como inverso da velocidade, conforme Equação 3.7 (JACKSON *et al.*, 1994).

$$T = \int_E^R p_j * dL_j , \quad 3.7$$

onde:

T : tempo total de propagação da onda do emissor ao receptor;

p_j : vagarosidade da onda no elemento j .

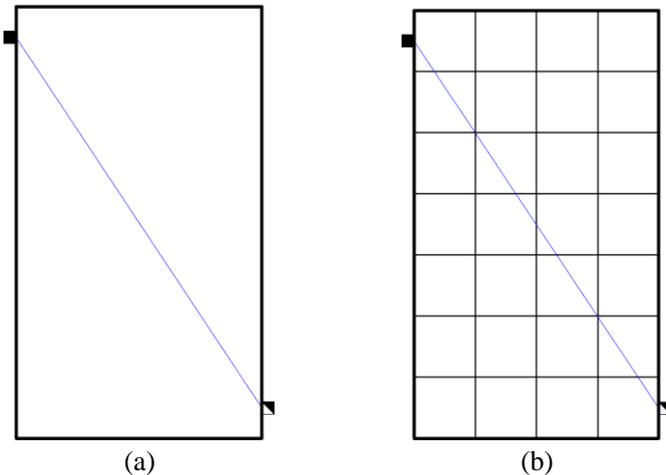


Figura 3.6 – Leitura inclinada - (a) sem discretização - (b) com discretização

No exemplo indicado, a Equação 3.7 se transforma em um somatório como apresentado na Equação 3.8, onde n é o numero total de elementos discretizados.

$$T = \sum_{j=1}^n p_j * dL_j \quad 3.8$$

Cada nova leitura i efetuada cria uma nova equação. Quando forem efetuadas todas as leituras (m), obtém-se a Equação 3.9, representada pela Figura 3.7.

$$T_i = \sum_{j=1}^n p_j * dL_{i,j} \quad (i = 1, \dots, m) \quad 3.9$$

A equação acima pode ser transformada para a forma matricial, conforme a Equação 3.10.

$$\underline{T}_m = \underline{D}_{m,n} * \underline{P}_n, \quad 3.10$$

onde:

m : número total de leituras realizadas;

n : número total de elementos discretizados;

\underline{D} : matriz com m linhas e n colunas que armazena as distâncias percorridas pelas ondas ultrassônicas nos elementos j , quando realizado nas leituras i ;

\underline{P} : vetor com n linhas que armazena as vagarosidades dos diferentes elementos discretizados j ;

\underline{T} : vetor com m linhas que armazena os tempos de todas as leituras i .

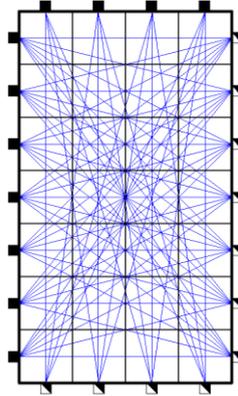


Figura 3.7 – Todas as leituras com discretização

Nota-se que os elementos da matriz \underline{D} são conhecidos, pois a malha e a posição dos transdutores são conhecidas para as diferentes leituras. Os valores do vetor \underline{T} também são conhecidos, pois são os resultados das leituras. Restando apenas a determinação dos valores do vetor \underline{P} .

O problema posto conforme Equação 3.10 é um sistema de equações lineares, que aparentemente poderia ser facilmente resolvido por métodos simplificados. Contudo, o sistema de equações é normalmente retangular e não quadrado, ou seja, o número de equações é diferente do número de incógnitas. Somado a isso, dentro da lista de equações há equações linearmente dependentes, que podem tornar o problema singular, i.e., sem unicidade na resposta.

Portanto, dependendo da quantidade e das leituras que foram efetuadas, pode-se ter um problema:

- **indeterminado:** o número de equações linearmente independentes é menor que o número de incógnitas, não existindo uma única solução (Figura 3.8 (a));
- **determinado:** o número de equações linearmente independentes é igual ao número de incógnitas, existindo uma solução (Figura 3.8 (b));
- **sobredeterminado:** o número de equações linearmente independentes é superior ao número de incógnitas. Leituras precisas resultam em um sistema **consistente**, com solução única (Figura 3.8 (c)). Já leituras imprecisas resultam em um sistema **inconsistente**, sem solução adequada a todas as leituras (Figura 3.8 (d)).

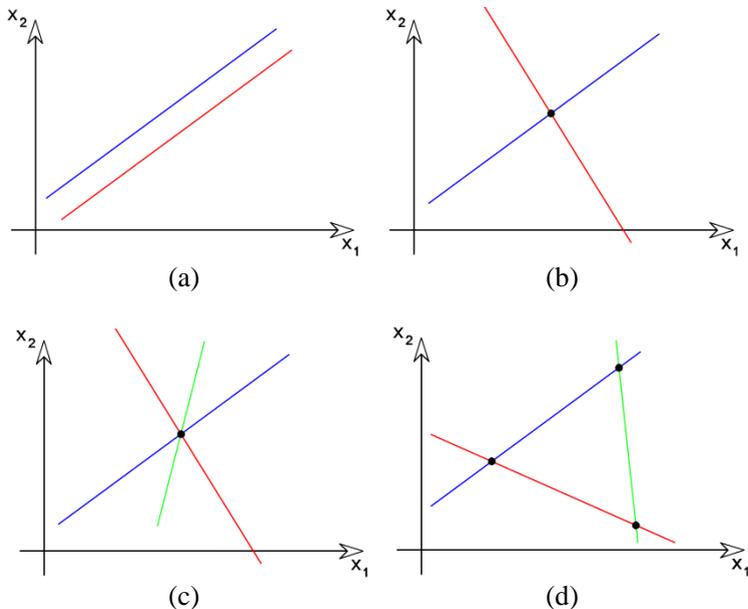


Figura 3.8 – Classificação do sistema de equações lineares – (a) indeterminado – (b) determinado – (c) sobredeterminado consistente – (d) sobredeterminado inconsistente

Na Figura 3.8 estão representados quatro sistemas de equações de duas variáveis, pois se considera apenas o espaço \mathbb{R}^2 . Na Figura 3.8 (a) existem duas retas paralelas produzidas por equações linearmente dependentes para resolver um sistema de duas incógnitas. Isto cria uma situação onde não há solução para o problema, ou seja, um sistema de equações indeterminado.

Já na Figura 3.8 (b) há duas equações (retas) linearmente independentes, gerando um sistema de equações determinado. Nas Figuras 3.8 (c) e (d) existem três equações linearmente independentes, sendo, portanto, um sistema sobredeterminado. A diferença entre as Figuras 3.8 (c) e (d) é que na primeira as retas se cruzam em apenas um ponto, que é a solução do problema, e na segunda não há uma única solução que satisfaça todas as equações, sendo então os sistemas classificados em consistentes e inconsistentes, respectivamente.

A Equação 3.10 pode ser resolvida por processos diretos ou por processos iterativos.

3.3.3 Resolução por Processos Diretos

Processos diretos são caracterizados por apresentar uma resposta precisa e sem passos iterativos. Dependendo do sistema de equações que se deseja resolver, alguns processos podem ser mais trabalhosos que outros.

Como processos diretos podem ser indicados a: inversão da matriz $\underline{D}_{m,n}$, regra de Cramer, escalonamento de Gauss e dos mínimos quadrados.

O processo de inversão, bem como a regra de Cramer, são computacionalmente muito custosos, gerando grandes tempos de processamento. Além disso, ambos os processos servem apenas para a resolução de sistemas de equações determinados e portanto quadrados (Figura 3.8 (b)), ficando os outros tipos de sistemas sem amparo.

O método de escalonamento de Gauss é rápido e aplicável, com pequenas modificações, a todos os casos ilustrados na Figura 3.8. Porém apresenta uma grande desvantagem devido à natureza da matriz $\underline{D}_{m,n}$.

As linhas da matriz $\underline{D}_{m,n}$ são compostas pelas distâncias percorridas por cada leitura em cada elemento. Como uma leitura passa por poucos elementos, em comparação com o número total de elementos, a maior parte dos elementos da matriz $\underline{D}_{m,n}$ é nula. Sendo assim, não é necessário construir toda a matriz, bastando apenas armazenar os números diferentes de zero e referenciá-los corretamente.

Contudo, ao aplicar o método de escalonamento de Gauss, linhas serão somadas e os termos zerados serão substituídos por números, criando o efeito *fill-in* (IUSEM *et al.*, 1990b). Tal efeito exige a construção completa da matriz $\underline{D}_{m,n}$, tornando o processo mais lento e exigindo esforço computacional.

O método dos mínimos quadrados, também pode ser utilizado em todos os casos da Figura 3.8. Tem como desvantagens a obrigatoriedade da construção completa da matriz \underline{D} (que contém muitos elementos nulos), e a necessidade de inversão de matrizes, processo computacionalmente custoso.

Conclui-se, portanto que, todos os métodos diretos têm como vantagem o fato de obter o resultado com um número conhecido de passos, já que seguem sequências finitas de cálculos até obter o resultado final. Por outro lado, os métodos iterativos necessitam de uma quantidade desconhecida de ciclos iterativos até obter a precisão pretendida, podendo variar de caso a caso.

Os métodos de inversão, regra de Cramer e escalonamento de Gauss já são bem conhecidos, entretanto o método dos mínimos quadrados para a resolução de sistemas lineares não o é, e por esse motivo é apresentado no Anexo A.

3.3.4 Resolução por Processos Iterativos

Na família dos métodos iterativos, destacam-se os métodos de Gauss-Jacobi, de Gauss-Seidel, de Kaczmarz e de Cimmino. Pelo fato de haver a possibilidade do sistema de equações resultante do processo tomográfico ser sobredeterminado, os métodos de Gauss-Jacobi e Gauss-Seidel não podem ser aplicados, uma vez que servem apenas para resolver sistemas determinados. De qualquer forma os mesmos estão revisados nos Anexos B e C, respectivamente.

O método de Kaczmarz também é conhecido como ART - Técnica da Reconstrução Algébrica. Já o método de Cimmino como SIRT - Técnica da Reconstrução Algébrica Simultânea (BENZI, 2004). O motivo desses nomes é justificado pelo fato que o ART utiliza uma equação por vez, já o SIRT utiliza simultaneamente todas as equações a cada passo iterativo, como será demonstrado nos próximos tópicos.

3.3.4.1 Kaczmarz

Este método foi criado pelo matemático polonês Stefan Kaczmarz (1895-1940) (IUSEM *et al.*, 1990b), sendo utilizado para resolução de sistemas de equações no formato $\underline{A} * \underline{x} = \underline{B}$.

A ideia do processo de Kaczmarz é, a partir de um ponto inicial $\vec{x}^{(0)}$ qualquer, obter o valor seguinte do processo iterativo dado pelo ponto que se encontra mais próximo de $\vec{x}^{(0)}$ pertencente à primeira equação ($\vec{x}^{(1,1)}$). A partir de $\vec{x}^{(1,1)}$, calcula-se o ponto mais próximo pertencente à segunda equação $\vec{x}^{(1,2)}$ e assim sucessivamente conforme o número de equações até atingir $\vec{x}^{(1,m)}$. Esse será então o valor inicial do segundo passo iterativo.

Graficamente, o processo iterativo de Kaczmarz é representado pela Figura 3.9.

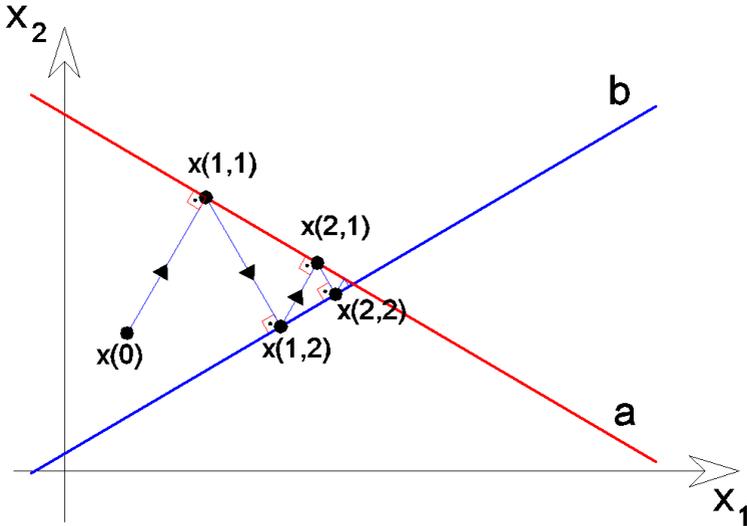


Figura 3.9 – Representação do processo iterativo de Kaczmarz

A seguir, apresenta-se o método de Kaczmarz para um sistema com 2 equações, posteriormente faz-se sua generalização para um sistema de m equações.

Sejam conhecidos o ponto P e uma reta r definidos no espaço R^2 , dados por:

$$\begin{aligned} P &: x_{1P}, x_{2P} \\ r &: a * x_1 + b * x_2 = c \end{aligned} \quad \mathbf{3.11}$$

Sejam os pontos A e B pertencentes à reta r , sendo A o ponto mais próximo de P e B um ponto qualquer, conforme mostrado na Figura 3.10.

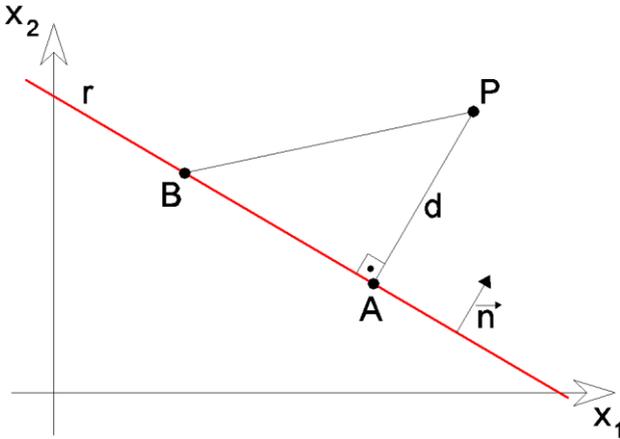


Figura 3.10 – Representação da distância entre o ponto P e a reta r

A distância d é dada pela projeção do vetor \overrightarrow{BP} na direção do vetor \overrightarrow{AP} , podendo ser escrita como o produto escalar de \overrightarrow{BP} com o vetor unitário na direção \overrightarrow{AP} , conforme Equação 3.12 (STEINBRUCH, 1987).

$$d = \overrightarrow{BP} \cdot \frac{\overrightarrow{AP}}{|\overrightarrow{AP}|} \quad 3.12$$

O vetor normal \vec{n} à reta r , dado pela Equação 3.13, possui a mesma direção do vetor \overrightarrow{AP} .

$$\vec{n} : a, b \quad 3.13$$

Assim sendo, a normalização de ambos os vetores resultará no mesmo vetor, ou seja,

$$\frac{\overrightarrow{AP}}{|\overrightarrow{AP}|} = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} ,$$

e, portanto:

$$d = \overrightarrow{BP} \cdot \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} .$$

Sabendo-se que:

$$\overrightarrow{BP} = (x_{1P} - x_{1B}, y_{2P} - y_{2B}) .$$

Tem-se que:

$$d = (x_P - x_B, y_P - y_B) \cdot \frac{(a; b)}{|\vec{n}|} ,$$

$$d = \frac{a * x_P + b * y_P - a * x_B - b * y_B}{|\vec{n}|} .$$

Lembrando que B pertence à reta r , têm-se:

$$+a * x_B + b * y_B = c \quad \therefore \quad -a * x_B - b * y_B = -c .$$

Então:

$$d = \frac{a * x_P + b * y_P - c}{|\vec{n}|} ,$$

ou:

$$d = \frac{\vec{n} \cdot \vec{P} - c}{|\vec{n}|} . \quad \mathbf{3.14}$$

Sabendo que

$$\vec{A} = \vec{P} - d * \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} . \quad \mathbf{3.15}$$

Substituindo 3.14 em 3.15, têm-se:

$$\vec{A} = \vec{P} - \frac{\vec{n} \cdot \vec{P} - c}{|\vec{n}|} * \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} ,$$

$$\vec{A} = \vec{P} - \frac{(\vec{n} \cdot \vec{P} - c)}{|\vec{n}|^2} * \vec{n} . \quad \mathbf{3.16}$$

A Equação 3.16, apesar de ser deduzida para o espaço bidimensional, ou R^2 , tem sua validade estendida para todo o R^n , considerando que o termo c sempre será o termo independente. Essa

equação permite o cálculo da posição de um ponto A , pertencente a um ente matemático no R^n , que possui a menor distância com um ponto P fornecido.

Para o caso de um sistema de equações lineares da forma $\underline{A}_{m,n} * \underline{x}_n = \underline{B}_m$, aplica-se a expressão 3.16 para cada equação do sistema.

Sendo \vec{a}_i o vetor composto pelos termos da linha i da matriz $\underline{A}_{m,n}$, que representa o vetor normal \vec{n} da equação i e b_i o valor da linha i da matriz \underline{B}_m ou o termo independente da equação i .

Então, o cálculo de um ponto $\vec{x}^{(i)}$ pertencente à equação i , mais próximo do ponto conhecido \vec{P} , é dado pela Equação 3.17.

$$\vec{x}^{(i)} = \vec{P} - \frac{(\vec{a}_i \cdot \vec{P} - b_i) * \vec{a}_i}{|\vec{a}_i|^2} \quad 3.17$$

Algebricamente, o processo iterativo de Kaczmarz é expresso pela Equação 3.18.

$$\vec{x}^{(k,i)} = \vec{x}^{(k,i-1)} - \frac{(\vec{a}_i \cdot \vec{x}^{(k,i-1)} - b_i) * \vec{a}_i}{|\vec{a}_i|^2}, \quad 3.18$$

onde:

k : é o número do processo iterativo;

i : é a equação utilizada;

$\vec{x}^{(k,i)}$: é o ponto obtido na equação i durante a iteração k .

Na Equação 3.18, primeiramente estipula-se um valor arbitrário para o ponto $x^{(1,0)}$. Então desenvolve-se a Equação 3.18 fazendo $k=1$ e i variando de 1 a m . Na sequência faz-se $x^{(2,0)} = x^{(1,m)}$ e $k=2$. Novamente varia-se i de 1 a m , faz-se $x^{(3,0)} = x^{(2,m)}$ e $k=3$. Dessa forma, o processo iterativo continua até a precisão almejada seja alcançada.

3.3.4.2 Cimmino

Desenvolvido pelo matemático italiano Gianfranco Cimmino (1908-1989) (BENZI, 2004), o processo iterativo de Cimmino é semelhante ao de Kaczmarz, porém com diferenças internas no passo iterativo. O passo iterativo de Kaczmarz consiste em percorrer pontos mais próximos pertencentes às equações, até passar por todas as equações, conforme já mostrando na Figura 3.9. Já o passo iterativo de Cimmino efetua uma média de todos os pontos mais próximos (de todas as equações) ao ponto atual, sendo que essa média resultará no ponto a ser utilizado no próximo passo iterativo. Tal média ainda pode possuir um fator de ponderação especial chamado λ_i , que pode ser diferente para cada equação i .

Algebricamente, o processo iterativo de Cimmino, para a iteração k , é dado pela Equação 3.19 (IUSEM *et al.*, 1990b).

$$\vec{x}^{(k)} = \vec{x}^{(k-1)} - \sum_{i=1}^m \lambda_i \left[\frac{(\vec{a}_i \cdot \vec{x}^{(k-1)} - b_i) * \vec{a}_i}{|\vec{a}_i|^2} \right], \quad 3.19$$

onde:

k : número do processo iterativo;

$\vec{x}^{(k)}$: ponto obtido na iteração k ;

$\vec{x}^{(k-1)}$: ponto obtido na iteração anterior;

i : número da equação utilizada;

m : número total de equações, ou de linhas na matriz $\underline{A}_{m,n}$;

λ_i : fator de ponderação para a equação i , sendo que:

- $\lambda_i > 0$ ($1 \leq i \leq m$);
- $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$;

\vec{a}_i : é o vetor composto pelos termos da linha i da matriz $\underline{A}_{m,n}$;

b_i : é o valor da linha i da matriz \underline{B}_m .

Utilizando o processo de Cimmino sem privilegiar nenhuma equação, ou seja, $\lambda_i = 1/m$ ($1 \leq i \leq m$), obtém-se a representação gráfica exposta na Figura 3.11, onde os resultados de cada passo iterativo não dependem da ordem das equações.

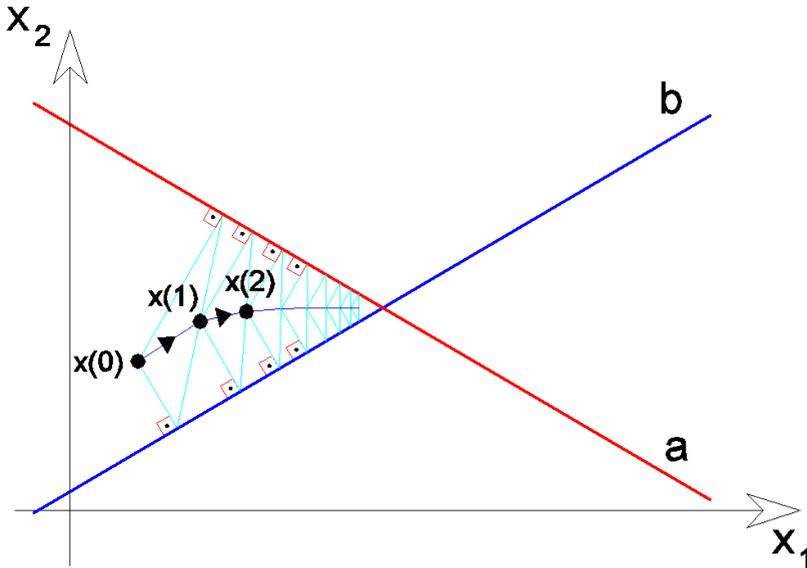


Figura 3.11 – Representação do processo iterativo de Cimmino

Para compreender melhor o processo iterativo de Cimmino, seja o sistema de equações definido pela Equação 3.20.

$$\underline{A} * \underline{x} = \underline{B} \quad 3.20$$

onde:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} ; \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 4 \\ 6 \end{bmatrix} ; \quad \underline{x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} .$$

Destaca-se que a primeira equação está zerada na segunda e terceira dimensão ($a_{1,2}$ e $a_{1,3}$), e que somente a última equação não está zerada na terceira dimensão ($a_{4,3}$). Utilizando o processo iterativo de Cimmino (Equação 3.19), efetua-se o primeiro passo iterativo para a resolução desse sistema de equações.

Primeiramente, estipula-se uma aproximação inicial de:

$$\vec{x}^{(0)} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} . \quad 3.21$$

Definindo que o fator de ponderação não privilegiará nenhuma equação, tratando todas igualmente, tem-se que:

$$\lambda_i = \frac{1}{m} = \frac{1}{4}, \quad 3.22$$

onde:

m : número total de equações.

Substituindo 3.21 e 3.22 na equação 3.19, tem-se que:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}^{(1)} &= \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} - \sum_{i=1}^4 \frac{1}{4} * \left[\frac{(\vec{a}_i \cdot \vec{x}^{(k-1)} - b_i) * \vec{a}_i}{|\vec{a}_i|^2} \right], \\ \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}^{(1)} &= \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} - \frac{1}{4} * \left[\begin{array}{l} \frac{\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - 1 \right) * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}{(\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2})^2} + \frac{\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - 3 \right) * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}}{(\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2})^2} + \\ + \frac{\left(\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - 4 \right) * \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}}{(\sqrt{2^2 + 1^2 + 0^2})^2} + \frac{\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - 6 \right) * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}}{(\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2})^2} \end{array} \right], \\ \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}^{(1)} &= \begin{Bmatrix} 1,48 \\ 1,42 \\ 1,25 \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 1,49 \\ 1,57 \\ 1,40 \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}^{(3)} = \begin{Bmatrix} 1,43 \\ 1,67 \\ 1,53 \end{Bmatrix}. \end{aligned}$$

Obtido o valor de $\underline{x}^{(1)}$, basta reinseri-lo na Equação 3.19 e calcular a segunda interação $\underline{x}^{(2)}$ com $k = 2$. Efetuando esse processo repetidas vezes o método é convergente, conforme mostra a Figura 3.12.

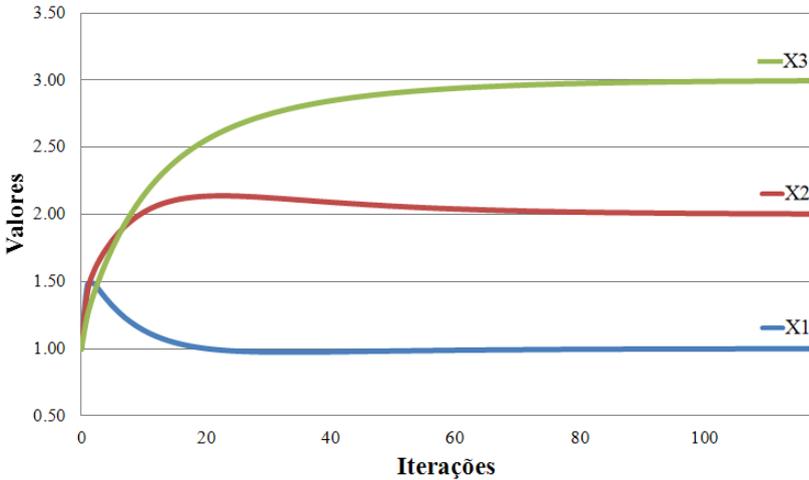


Figura 3.12 – Convergência do processo de Cimmino

Conforme exibido na Figura 3.12, a quantidade de iterações necessárias para a convergência é diferente para x_1 , x_2 e x_3 . Usando uma precisão de duas casas decimais, x_1 necessitou 81 iterações, x_2 108 iterações e x_3 117 iterações para a convergência.

Estudando melhor o assunto, percebe-se que a evolução do processo iterativo é diretamente ligada ao termo dentro da somatória da Equação 3.19, que por sua vez é influenciado pelo fator de ponderação λ_i . Como nesse processo foi escolhido que o fator de ponderação não privilegiaria nenhuma equação, todas receberam um fator de ponderação igual (Equação 3.22). Isso fez com que a terceira dimensão tivesse uma aproximação menor que as outras, pois há somente uma equação com valores na terceira dimensão, conforme mostra a matriz \underline{A} (Equação 3.20), repetida abaixo.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad 3.20$$

Tendo somente uma equação, a mesma ainda tem sua aproximação dividida por 4, pois seu fator de ponderação é $\lambda_4 = 1/4$. Enquanto isso, a primeira dimensão tem as 4 equações para agilizar o processo de conversão. Isso provoca essa diferença de velocidade no

processo iterativo, que ficará pior se forem adicionadas mais equações onde a terceira dimensão esteja zerada.

3.3.4.3 Critérios de Convergência dos Métodos Iterativos

Os métodos de Gauss-Jacobi e Gauss-Seidel são muito semelhantes e também bem conhecidos na literatura de cálculo numérico (RUGGIERO *et al.*, 1996). A grande desvantagem desses dois processos iterativos é a necessidade de satisfazer condições para garantir sua convergência (IUSEM *et al.*, 1990b). Até para sistemas lineares simples a convergência pode ser um problema, pois ambos os métodos se baseiam em projeções paralelas aos eixos coordenados, como mostra a Figura 3.13. Outra desvantagem é que ambos os métodos são aplicáveis somente a matrizes quadradas, pois é necessário isolar a diagonal principal, sendo que nos processamentos tomográficos normalmente tem-se matrizes retangulares.

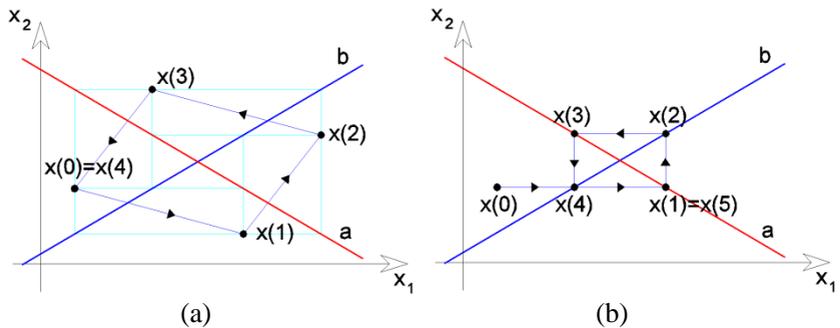


Figura 3.13 – Processos iterativos resultam em laço infinito – (a) Gauss-Jacobi – (b) Gauss-Seidel

Já os métodos de Kaczmarz e Cimmino são mais modernos uma vez que utilizam projeções ortogonais sobre os hiperplanos definidos pelas equações do sistema, dessa forma convergindo para o resultado independente dos eixos coordenados adotados, conforme a Figura 3.14. Ainda há o fato que os processos de Kaczmarz e Cimmino podem resolver sistemas retangulares de equações lineares, e não somente sistemas quadrados.

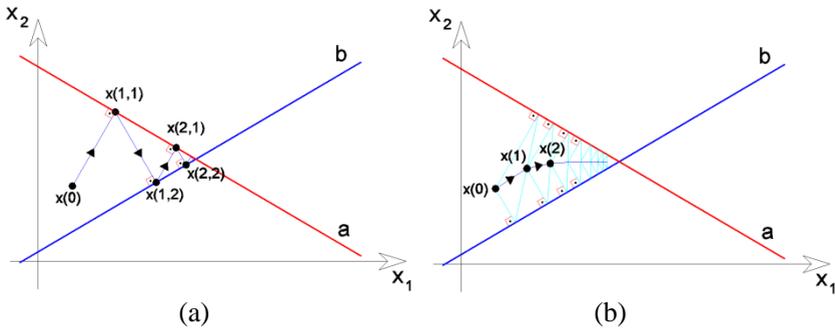


Figura 3.14 – Convergência dos processos iterativos – (a) Kaczmarz – (b) Cimmino

Tanto o método de Kaczmarz, quanto o de Cimmino obtêm resultados iguais ao resolver os sistemas de equações do tipo indeterminado, determinado e sobredeterminado consistente, Figura 3.8 (a), (b) e (c), respectivamente. Contudo, para resolver sistemas de equações inconsistentes (Figura 3.8 (d)) o de Cimmino apresenta um resultado único e igual ao método dos mínimos quadrados apresentado no Anexo A. Já o de Kaczmarz não consegue obter um resultado único e entra em laço infinito em volta da melhor resposta, sem nunca alcançá-la. Na Figura 3.15, há a representação gráfica da questão comentada, onde pode ser percebido que o algoritmo de Kaczmarz entra em ciclo infinito, enquanto o de Cimmino permanece no mesmo ponto ao longo das novas iterações.

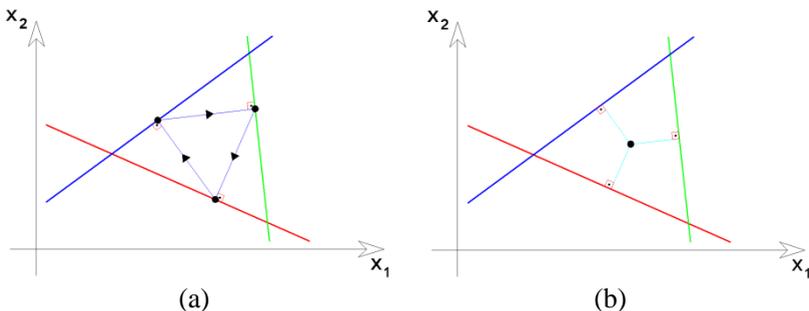


Figura 3.15 – Convergência dos processos iterativos para sistemas de equações sobredeterminados inconsistentes – (a) Kaczmarz – (b) Cimmino

Dentre as qualidades do processo de Cimmino podem ser destacadas:

- não necessita do cálculo de determinantes ou inversão de matrizes, como ocorre com os métodos de inversão, regra de Cramer e mínimos quadrados;
- não provoca efeito *fill-in* como ocorre com o método de escalonamento de Gauss, portanto não necessitando da construção completa da matriz \underline{A} do sistema $\underline{A} * \underline{x} = \underline{B}$;
- pode resolver sistemas sobredeterminados, caso que não pode ser aplicado com os métodos de Gauss-Jacobi e Gauss-Seidel;
- resulta em um processo iterativo estável quando aplicado com um sistema de equações sobredeterminado inconsistente, fato que não ocorre com o método de Kaczmarz.

Por estes motivos escolheu-se o método de Cimmino para ser adotado nesse trabalho. Sendo apresentado em forma matricial e otimizado para diminuir o tempo de processamento a seguir.

3.3.4.4 Cimmino Otimizado

Como já comentado no item 3.3.4.2, o processo iterativo de Cimmino pode apresentar, dependendo do sistema de equações, sérios problemas com relação à demora no tempo de processamento. Jackson *et al.* (1994) utiliza uma variação do processo iterativo de Cimmino, que proporciona uma aceleração na convergência para o resultado.

Essa variação consiste em aplicar os fatores de ponderação não mais nas equações e sim nas dimensões. Dessa forma, visando que as dimensões que tenham menos equações recebam mais peso, assim competindo em igual paridade com as outras dimensões.

Para tal a Equação 3.19, repetida abaixo, será transformada conforme Equação 3.23.

$$\vec{x}^{(k)} = \vec{x}^{(k-1)} - \sum_{i=1}^m \lambda_i \left[\frac{(\vec{a}_i \cdot \vec{x}^{(k-1)} - b_i) * \vec{a}_i}{|\vec{a}_i|^2} \right] \quad 3.19$$

$$\vec{x}^{(k)} = \vec{x}^{(k-1)} - \sum_{i=1}^m \left[\frac{(\vec{a}_i \cdot \vec{x}^{(k-1)} - b_i) * \vec{r}_i}{|\vec{a}_i|^2} \right], \tag{3.23}$$

onde:

\vec{r}_i : é o vetor composto com os elementos da linha i da matriz R_{ij} , dada pela Equação 3.24.

$$r_{ij} = \beta_j * a_{ij} \tag{3.24}$$

Com $\beta_j = 1/N_j$ representando o fator de ponderação aplicado nas dimensões, e N_j o número de equações onde o termo da dimensão j é diferente de zero. Portanto:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{N_j} .$$

Dessa forma, as dimensões terão pesos iguais, mesmo que as equações tenham valores nulos, pois a ponderação é efetuada por N_j que representa exatamente a quantidade de equações que atuam na dimensão j .

Refazendo o processo iterativo para o mesmo exemplo apresentado no item 3.3.4.2, contudo agora utilizado o método de Cimmino Otimizado (Equação 3.23), elabora-se a Figura 3.16.

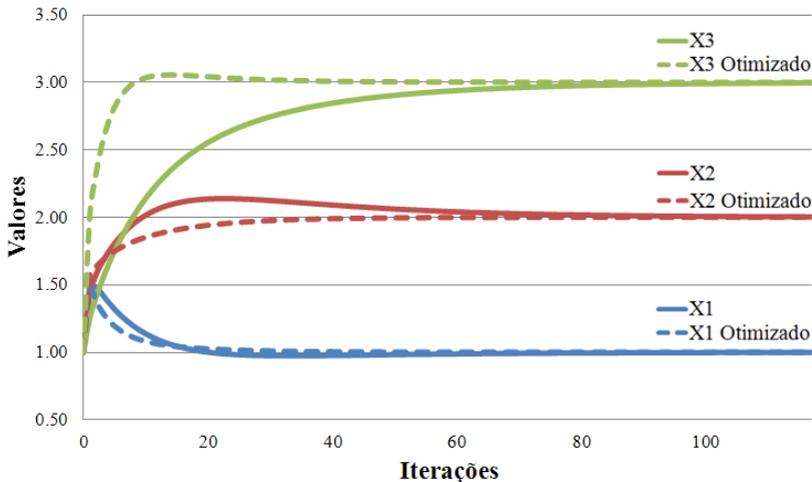


Figura 3.16 – Convergência do processo de Cimmino e Cimmino Otimizado

É visível que a otimização resultou em uma convergência melhor. Na Tabela 3.1, há a comparação entre os dois métodos, quanto ao número de iterações necessárias para atingir a resposta considerando duas casas decimais.

Tabela 3.1 – Comparação entre os dois métodos quanto ao número de iterações necessárias para convergência

Método	Incógnitas		
	x_1	x_2	x_3
Cimmino Normal	81	108	117
Cimmino Otimizado	39	48	45

Percebe-se que além de reduzir o número de iterações, há uma melhor homogeneidade na quantidade de iterações para as diferentes incógnitas. Destaca-se que, além de x_3 , x_2 também obteve uma redução considerável na quantidade de iterações, pois somente 3 das 4 equações tinham valores não nulos na segunda dimensão.

3.3.4.5 Cimmino Otimizado em Formato Matricial

Efetuada algumas modificações na Equação 3.23, tem-se que:

$$\vec{x}^{(k)} = \vec{x}^{(k-1)} + \sum_{i=1}^m \left[\frac{\vec{r}_i}{|\vec{a}_i|^2} * (b_i - \vec{a}_i \cdot \vec{x}^{(k-1)}) \right].$$

Fazendo $z_i = b_i - \vec{a}_i \cdot \vec{x}^{(k-1)}$, obtém-se:

$$\vec{x}^{(k)} = \vec{x}^{(k-1)} + \sum_{i=1}^m \left[\frac{\vec{r}_i}{|\vec{a}_i|^2} * z_i \right].$$

Transformando em formato matricial, fica:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}^{(k-1)} + \begin{bmatrix} \frac{a_{1,1}}{N_1 * |\vec{a}_1|^2} & \frac{a_{2,1}}{N_1 * |\vec{a}_2|^2} & \cdots & \frac{a_{m,1}}{N_1 * |\vec{a}_m|^2} \\ \frac{a_{1,2}}{N_2 * |\vec{a}_1|^2} & \frac{a_{2,2}}{N_2 * |\vec{a}_2|^2} & \cdots & \frac{a_{m,2}}{N_2 * |\vec{a}_m|^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{1,n}}{N_n * |\vec{a}_1|^2} & \frac{a_{2,n}}{N_n * |\vec{a}_2|^2} & \cdots & \frac{a_{m,n}}{N_n * |\vec{a}_m|^2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} .$$

Chamando a maior matriz de $\underline{W}_{n,m}$ e transpondo-a, obtém-se que $\underline{W}_{n,m} = \underline{W}_{m,n}^T$. Então:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}^{(k-1)} + \underline{W}_{m,n}^T * \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} , \tag{3.25}$$

onde $\underline{W}_{m,n}$ é dado por:

$$w_{ij} = \frac{a_{ij}}{N_j * |\vec{a}_i|^2} = \frac{a_{ij}}{N_j * \sum_{k=1}^m (a_{ik})^2} .$$

Comprimindo a Equação 3.25 e transformando seus valores z_i para um formato matricial, tem-se a Equação 3.26, que é a versão matricial do processo iterativo de Cimmino Otimizado, utilizado para resolver um sistema $\underline{A}_{m,n} * \underline{x}_n = \underline{B}_m$ (JACKSON *et al.*, 1994).

$$\underline{x}_n^{(k)} = \underline{x}_n^{(k-1)} + \underline{W}_{m,n}^T * [\underline{B}_m - \underline{A}_{m,n} * \underline{x}_n^{(k-1)}] , \tag{3.26}$$

onde:

k : é número da iteração atual;

m : é o número de equações do sistema;

n : é o número de incógnitas do sistema;

$\underline{x}_n^{(k)}$: armazena os valores do passo iterativo atual k ;

$\underline{x}_n^{(k-1)}$: armazena os valores do passo iterativo anterior $k - 1$;

$W_{m,n}$: matriz construída por:

$$w_{ij} = \frac{a_{ij}}{N_j * \sum_{k=1}^m (a_{ik})^2} ;$$

N_j : número de equações onde o termo da dimensão j é diferente de zero;

a_{ij} : termo da linha i e coluna j da matriz $A_{m,n}$.

4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Pela complexidade dos cálculos envolvidos, o desenvolvimento de um sistema computacional é quase que obrigatório para a resolução prática do problema tomográfico. Para tal foi escolhido o ambiente de desenvolvimento REAL Studio, da empresa americana REAL Software (REAL SOFTWARE, 2009; LORIGGIO, 2009).

O REAL Studio é uma linguagem que proporciona várias funções especiais, como por exemplo, orientação a objetos, herança, polimorfismo, gerenciamento automático de memória, banco de dados, funções, depuração em tempo de execução, ferramentas de desenho 2D e 3D, conexões TCP/IP e UDP, manipulação de binários, entre tantas outras.

Enfim, é uma linguagem de fácil aprendizado, em constante atualização, e que contém a grande maioria das funções avançadas, possibilitando o programador a ampliar seu trabalho conforme suas necessidades e não de acordo com as limitações da linguagem.

4.1 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

O programa tomográfico desenvolvido em interface Windows possui a função de obter os dados do problema e, utilizando o processo tomográfico, reconstituir as diferentes seções internas do objeto em estudo, funcionando em modo bidimensional ou, até mesmo, tridimensional. O nome conferido ao programa é **TUCon**, oriundo de Tomografia Ultrassônica em Concreto.

Primeiramente, os dados geométricos do objeto a ser investigado tais como suas dimensões e a malha adotada são introduzidos no TUCon. Utilizando esta malha, que serve de referência para o correto posicionamento dos transdutores, o pesquisador efetua as leituras ultrassônicas no objeto.

Uma vez efetuada as leituras ultrassônicas, são obtidos os tempos de propagação das respectivas leituras no, as quais são introduzidas no TUCon, que efetuará o processamento e exibirá os tomogramas resultantes.

O fluxograma geral do programa é dado na Figura 4.1 e as explicações sobre cada etapa serão efetuadas nos próximos tópicos dessa dissertação.

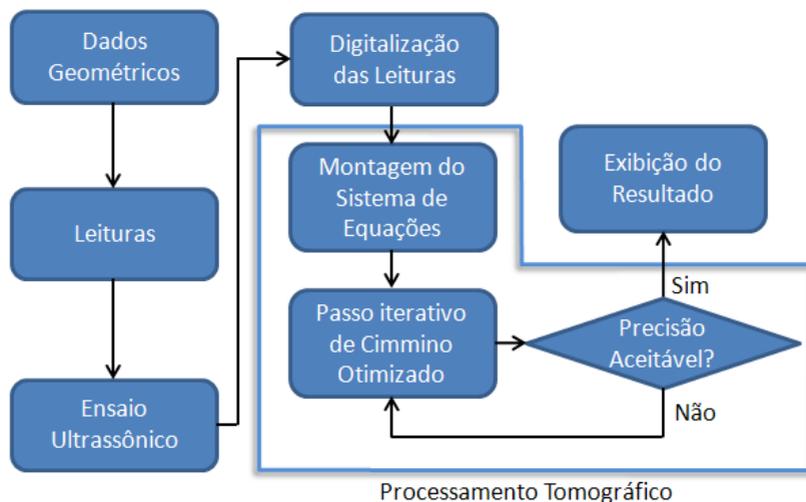


Figura 4.1 – Fluxograma de utilização e processamento do TUCon

4.2 DADOS GEOMÉTRICOS

O programa computacional está implementado para operar no modo bidimensional ou tridimensional. A análise bidimensional resultará em uma interface mais simples quando comparada com o caso tridimensional. Contudo os conceitos, bem como os processos internos efetuados pelo programa, são rigorosamente os mesmos.

A determinação de qual tipo de estudo que deve ser utilizado ficará a cargo do usuário, que deve avaliar a complexidade do problema a ser abordado.

Para o caso bidimensional poderão ser somente utilizadas seções retangulares, conforme mostra a Figura 4.3, já com a nomenclatura das faces e dimensões associadas. Um caso bidimensional típico é o estudo de uma seção de um elemento linear de concreto, conforme Figura 4.2 (b).

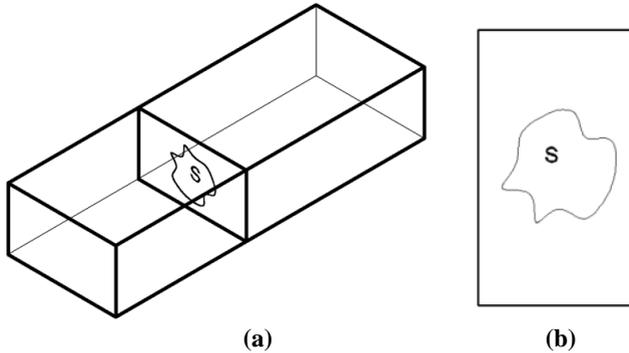


Figura 4.2 – Estudo seccional de um elemento linear

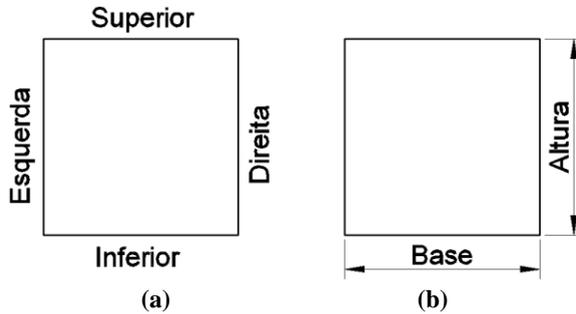


Figura 4.3 – Nomenclatura utilizada para duas dimensões - (a) faces do elemento em estudo - (b) dimensões do elemento

E para o caso tridimensional somente são aceitos paralelepípedos retos, ou seja, suas seis faces também são retangulares. Na Figura 4.4, há a representação já com a nomenclatura das faces e dimensões associadas.

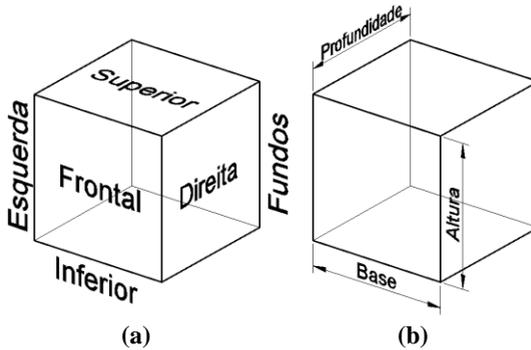


Figura 4.4 – Nomenclatura utilizada para três dimensões - (a) faces do elemento em estudo - (b) dimensões do elemento

A nomenclatura para o caso bidimensional é uma simplificação do caso tridimensional, onde foi retirada a profundidade.

4.2.1 Malha Discretizada

Todo processo tomográfico requer que o objeto seja discretizado em pequenos elementos a serem computados, como mostra a Figura 4.5. Com as dimensões da base, altura, profundidade e malha, fornecidas pelo usuário, é possível determinar as quantidades de colunas, linhas e seções, nas quais o objeto será discretizado.

Tais elementos são identificados pela sua coluna, linha e seção pertencentes, correspondendo respectivamente aos eixos ortogonais x , y e z .

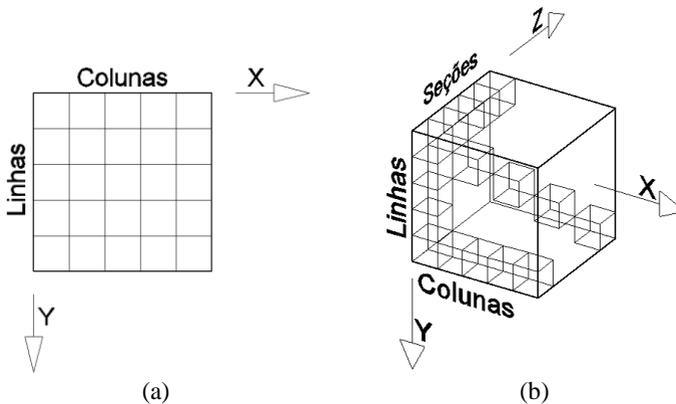


Figura 4.5 – Malha dos elementos discretizados - (a) bidimensional (b) tridimensional

Para armazenar as informações de cada elemento, foi utilizada uma matriz tridimensional chamada *elementos(coluna,linha,seção)*, onde seus índices representam a localização do respectivo elemento quanto à sua posição na referência coluna, linha e seção no objeto discretizado. Por exemplo, seja um elemento localizado na 2ª coluna, 3ª linha e 4ª seção, seu armazenamento se dará em *elementos(2,3,4)*.

Cada elemento armazenado na matriz *elementos* tem as seguintes propriedades: *velocidade*, *vagarosidade* e *ordem*. A *velocidade* e *vagarosidade* são os campos onde são armazenados os respectivos valores resultantes do processamento tomográfico para o elemento. Já a *ordem* é a posição do respectivo elemento dentro de uma sequência lógica dos elementos caracterizada pela prioridade: colunas, linhas e seções, conforme exibe a Figura 4.6. A mesma figura já exibe o modelo adotado para a localização dos elementos, segundo seu posicionamento nas diferentes colunas, linhas e seções.

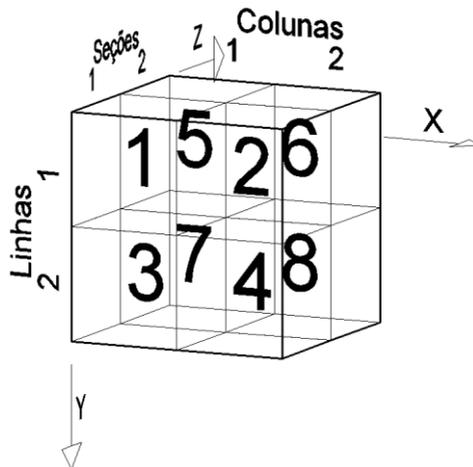


Figura 4.6 – Ordem numérica dos elementos de acordo com sua posição

Voltando à ordem numérica exibida na Figura 4.6, a mesma é muito importante, pois será utilizada para ordenar e identificar todos os elementos discretizados dentro da matriz das distâncias $\underline{D}_{m,n}$ e no vetor das vagarosidades \underline{P}_n , constantes na Equação 3.10.

4.2.2 Pontos de Leitura

Os pontos de leitura são as posições, no espaço R^3 , onde os centros dos transdutores poderão ser alocados para a realização dos ensaios ultrassônicos. Essa posição será utilizada para o futuro cálculo do caminho de onda, necessária para a construção da matriz $D_{m,n}$ da Equação 3.10.

Dessa forma, é preciso mapear os pontos de leitura que podem ser utilizados na superfície do objeto. Por definição dessa pesquisa, os pontos estão localizados exatamente no meio das facetas externas dos elementos discretizados externos, conforme a Figura 4.7.

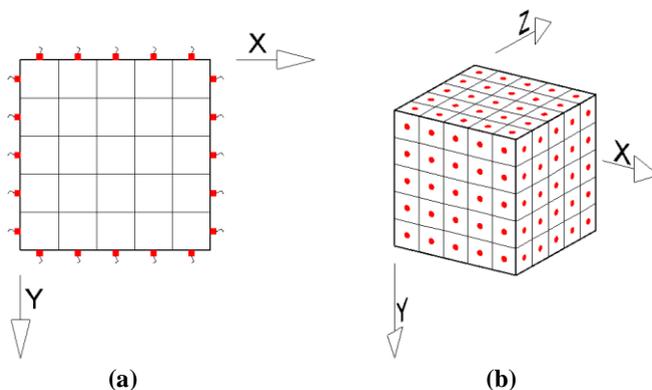


Figura 4.7 – Localização dos pontos de leitura – (a) caso bidimensional - (b) caso tridimensional

Para identificar os pontos de leitura, de tal forma a possibilitar ao usuário a correta execução do ensaio, será adotada uma identificação diferente da utilizada para os elementos discretizados.

Primeiramente, imagine que o objeto a ser estudado teve algumas de suas arestas cortadas e suas faces foram posicionadas conforme mostra a Figura 4.8.

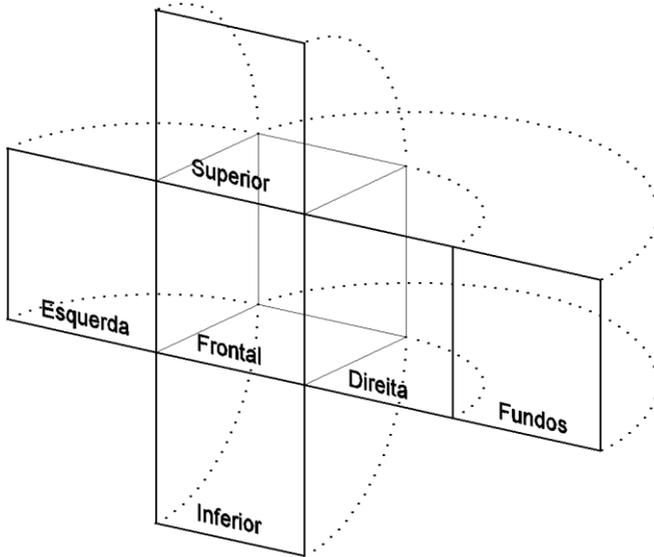


Figura 4.8 – Corte das arestas do objeto e posicionamento das faces

A partir da orientação das faces de acordo com a Figura 4.8, os pontos de leitura são identificados pela face, linha e coluna pertencentes, de acordo com as Figuras 4.9, 4.10 e 4.11.

	C1	C2	C3	C4	C5
L1	•	•	•	•	•
L2	•	•	•	•	•
L3	•	•	•	•	•
L4	•	•	•	•	•
L5	•	•	•	•	•

Figura 4.9 – Pontos de leitura das faces Frontal, Superior e Esquerda - caso tridimensional

	C5	C4	C3	C2	C1
L1	•	•	•	•	•
L2	•	•	•	•	•
L3	•	•	•	•	•
L4	•	•	•	•	•
L5	•	•	•	•	•

Figura 4.10 – Pontos de leitura das faces Fundos e Direita - caso tridimensional

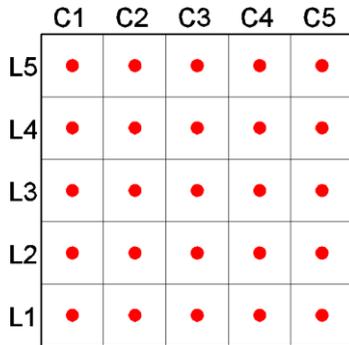


Figura 4.11 – Pontos de leitura da face Inferior - caso tridimensional

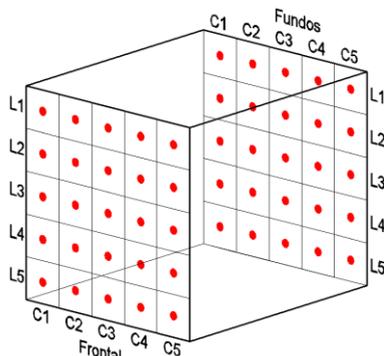


Figura 4.12 – Pontos de leituras das faces Frontal e Fundos - caso tridimensional

Foi adotado tal modelo para facilitar a execução das leituras diretas ortogonais, como mostra a Figura 4.12, onde há correspondência na identificação dos pontos, neste tipo de leitura.

Então os pontos de leitura são identificados pela face, linha e coluna pertencentes, por exemplo, Frontal-L1-C1, Direita-L3-C2 e tantos outros.

Para o caso bidimensional a visualização fica mais fácil, pois trata-se de uma simplificação do caso tridimensional. Como não há profundidade, as faces Frontal e Fundos não receberão pontos de leitura. Já as faces Superior, Inferior, Esquerda e Direita terão apenas a primeira fileira de pontos de leitura no sentido da profundidade, como mostra a Figura 4.13.

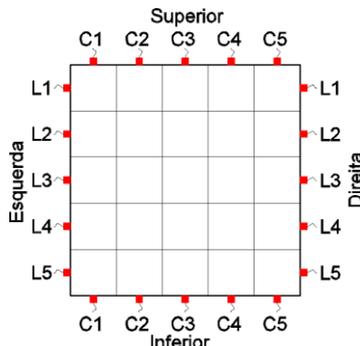


Figura 4.13 – Pontos de leitura - caso bidimensional

Para armazenar os pontos de leitura na memória são utilizadas seis matrizes bidimensionais, uma para cada face:

- *pontos de leituras frontal*(linha,coluna);
- *pontos de leituras fundos*(linha,coluna);
- *pontos de leituras superior*(linha,coluna);
- *pontos de leituras inferior*(linha,coluna);
- *pontos de leituras esquerda*(linha,coluna);
- *pontos de leituras direita*(linha,coluna).

Os pontos de leituras são alocados na matriz da sua face e identificados pela sua localização da linha e coluna pertencentes. Cada ponto de leitura armazenado nas matrizes acima tem como propriedades as posições coordenadas x , y e z , que são utilizadas para alocar o posicionamento espacial do ponto de leitura em questão. Como se conhece a malha e o número de colunas, linhas e seções, pode-se calcular a posição espacial de cada ponto.

Com os pontos de leituras devidamente identificados e suas posições espaciais armazenadas, pode-se partir para a próxima etapa, a identificação das leituras.

4.3 LEITURAS

As leituras são nomeadas pela união dos dois pontos de leituras utilizados para a mesma. Ou seja, a leitura *Frontal-C1-L2/Fundos-C2-L4* é originada pelo posicionamento dos transdutores nos pontos de leitura *Frontal-C1-L2* e *Fundos-C2-L4*, como mostra a Figura 4.14.

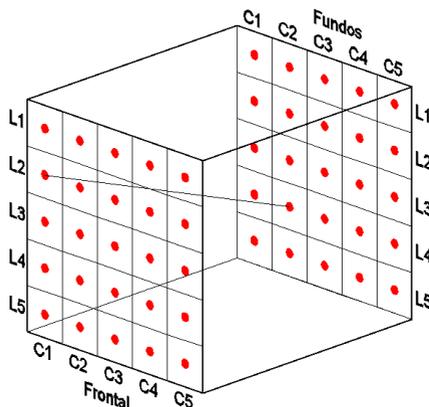


Figura 4.14 – Representação da leitura *Frontal-C1-L2/Fundos-C2-L4*

Por definição dessa pesquisa, o programa aceita somente os dados oriundos de pontos de leituras instalados em faces opostas, ou seja, frontal com fundos, superior com inferior e esquerda com direita. Desta forma, somente são permitidas leituras diretas ortogonais ou oblíquas (Figura 2.14).

Quanto ao armazenamento das leituras, devem ser armazenadas apenas as utilizadas, pois tentar armazenar todas as leituras geraria um consumo computacional desnecessário. Para ilustrar, considere um modelo discretizado com apenas oito colunas, linhas e seções de elementos, portanto ter-se-iam 64 pontos de leituras em cada uma de suas seis faces. Isso resultaria num total de 12.288 possibilidades de leituras diretas ortogonais ou oblíquas. Para evitar esse problema, somente as leituras utilizadas pelo usuário são armazenadas no vetor *leituras*.

Cada leitura armazenada no vetor *leituras* tem as seguintes propriedades: posição espacial x , y e z dos dois pontos de leitura utilizados e o *percurso do pulso* entre os dois pontos de leitura.

A posição espacial dos dois pontos de leitura já é determinada na etapa geométrica. Já o percurso do pulso é a distância percorrida, em cada elemento discretizado, pelo pulso sonoro que sai do transdutor emissor e chega ao receptor. O cálculo de tal caminho será explicado no próximo item.

4.3.1 Caminho do Pulso

Por definição desse projeto, o trajeto de tal pulso será considerado retilíneo, ligando o ponto de emissão ao de recepção, conforme ilustrado na Figura 4.15.

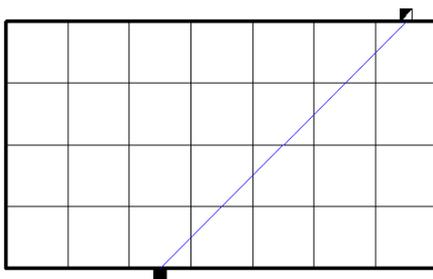


Figura 4.15 – Percurso do pulso passando por diferentes elementos discretizados

Para calcular as distâncias percorridas em cada elemento discretizado pelo pulso que trafega entre os pontos de emissão e recepção, é necessário encontrar os pontos de interseção entre o percurso do pulso e a grade da malha utilizada para a discretização, conforme a Figura 4.16.

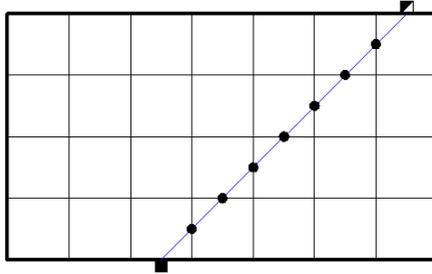


Figura 4.16 – Pontos de interseção entre o percurso do pulso e a grade da malha discretizada

Quando forem conhecidas as localizações desses pontos, basta calcular a distância entre os mesmos para obter o comprimento de trajeto do pulso no referido elemento discretizado.

Para a implementação computacional do cálculo desses pontos, deve-se adotar um procedimento universal, aplicável a qualquer leitura. Primeiramente são calculados todos os pontos de interseção entre a reta de trajeto do pulso e as retas da grade de discretização, conforme a Figura 4.17.

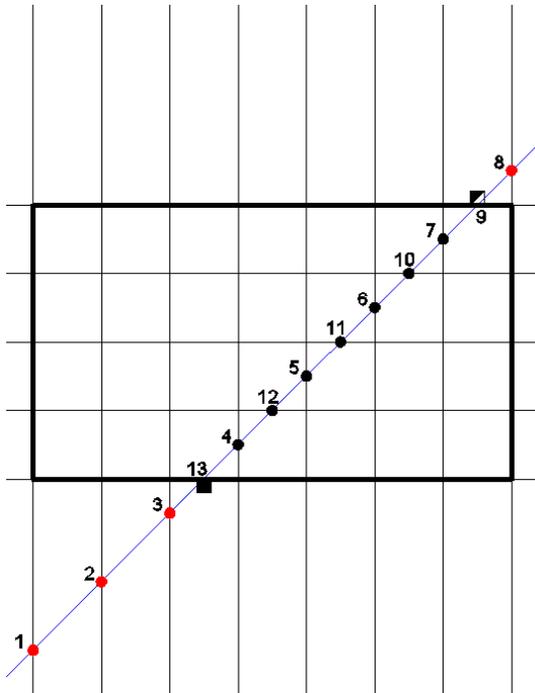


Figura 4.17 – Todos os pontos de interseção entre o percurso do pulso e a grade da malha discretizada

Como a malha e a reta do percurso são conhecidas, o cálculo dos pontos exibidos na Figura 4.17 é efetuado pela resolução de sistemas lineares entre cada reta da malha e a reta da leitura. Esse cálculo segue uma sequência fixa, primeiramente varrendo as retas verticais (esquerda para direita) e, posteriormente, as horizontais (de cima para baixo) da malha. Desse modo a sequência de cálculo e armazenamento dos pontos segue a numeração exibida na Figura 4.17.

Contudo, infelizmente, alguns pontos indesejados são obtidos, sendo que nesse exemplo são os pontos 1, 2, 3 e 8 da Figura 4.17. Como os pontos desejados estão todos entre os dois transdutores e os indesejados fora, para selecionar apenas os pontos desejados faz-se a seguinte verificação em todos os pontos:

$$d_{p,e} + d_{p,r} = d_{e,r} \quad ,$$

onde:

$d_{p,e}$: distância entre o ponto e o emissor;

$d_{p,r}$: distância entre o ponto e o receptor;

$d_{e,r}$: distância entre o emissor e o receptor.

Caso a verificação seja verdadeira, o ponto está entre os dois transdutores, ou é o próprio ponto de um transdutor. Com apenas os pontos desejados selecionados, é necessário ordená-los sequencialmente para ser possível calcular a distância de percurso em cada elemento discretizado.

Para ordená-los, utiliza-se o critério que a ordem se inicia no ponto do transdutor emissor e continua sequencialmente até o transdutor receptor. Para tal, as distâncias entre todos os pontos selecionados e o ponto do transdutor emissor são calculadas. Então, os pontos selecionados são ordenados em ordem crescente dessa distância.

Portanto, obtém-se a localização cartesiana dos pontos de interesse em sua ordem correta, conforme a Figura 4.18.

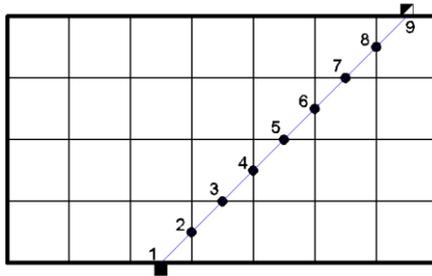


Figura 4.18 – Pontos selecionados e corretamente ordenados

Nesta parte do algoritmo, pode-se calcular a distância entre cada par sequencial de pontos, obtendo a distância trafegada pelo pulso em cada elemento discretizado. Com isso, possui-se uma listagem das distâncias trafegadas em cada elemento. A identificação dos elementos trafegados dá-se a partir dos pontos médios de cada trecho percorrido, conforme a Figura 4.19.

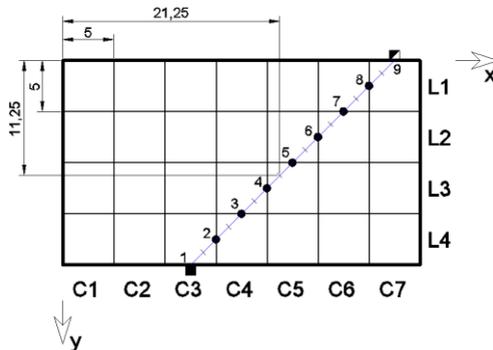


Figura 4.19 – Pontos médios de cada trecho percorrido (medidas em cm)

Tomando o ponto médio entre os pontos 4 e 5 como exemplo, conhecido o tamanho da malha, obtém-se facilmente o elemento do trecho entre os pontos 4 e 5 como sendo o elemento da 5ª coluna e 3ª linha.

Efetuando o mesmo procedimento para todos os trechos, obtém-se uma lista sequencial dos elementos discretizados trafegados pelo pulso, juntamente com as suas respectivas distâncias percorridas.

Apesar do exemplo dado nessa explicação ser bidimensional, seus conceitos são aplicáveis para o espaço tridimensional, sendo que, no 3D, as grades da malha discretizadora são planos e não retas.

Então, com o percurso calculado, o mesmo é armazenado no vetor *leituras*, na propriedade *percurso do pulso*, como comentado anteriormente.

4.4 EXECUÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL

Para as leituras das velocidades de propagação do pulso ultrassônico, primeiramente é necessário identificar as faces do mesmo e efetuar as marcações dos pontos nas suas devidas localizações. Dependendo do objeto ensaiado, o uso de gabaritos para posicionar os transdutores pode tornar o ensaio mais fácil e preciso.

Após o ensaio, os valores de propagação dos pulsos são digitados no programa.

4.5 PROCESSAMENTO TOMOGRÁFICO

Com o caminho do pulso já determinado para cada leitura e armazenado na propriedade *caminho do pulso* do vetor *leituras*, constrói-se a matriz $D_{m,n}$. Também é armazenado o vetor T_m , pois as leituras de campo já foram digitadas.

Dessa forma, se possuem todos os elementos da Equação 3.10, bastando resolvê-la. Para tal, será utilizado o processo iterativo de Cimmino Otimizado, já abordado no item 3.3.4.4, lembrando que $A_{m,n} = D_{m,n}$ e $B_m = T_m$. Nesse processo iterativo é adotado que $x_n^{(0)} = \underline{0}$, e seu fim se dará quando a precisão almejada pelo usuário for atingida.

Com o resultado obtido, o mesmo pode ser exportado para um arquivo de texto ou exibido em uma escala de cores na tela do próprio programa.

4.6 FINALIZAÇÃO DO PROGRAMA

Com o programa TUCon implementado, iniciou-se a verificação numérica do mesmo, que proporcionou considerável trabalho devido à grande quantidade de dados numéricos resultantes do caminho de onda e do processamento global.

Após finalizada a verificação numérica, o programa encontra-se pronto para receber os dados experimentais reais. Essa etapa representa um novo desafio à pesquisa, haja vista que os dados experimentais sempre carregam erros relativos às leituras. Na Figura 4.20 encontra-se o formato final do programa TUCon.



Figura 4.20 – Formato final do TUCon

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

5.1 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Quatro corpos de prova cúbicos de concreto foram produzidos com traço especificado na Tabela 5.1. Sendo necessário efetuar um ensaio tomográfico tridimensional para a verificação do programa, foi adotada uma aresta de 20 cm para os corpos de prova, pois tal dimensão já proporcionava pontos de leitura suficientes para a análise pretendida.

Dentro dos mesmos foram inseridos pequenos blocos de EPS de diferentes geometrias, conforme exhibe a Figura 5.1. Fôrmas metálicas foram utilizadas de forma a se obter superfícies sem irregularidades, o que facilitaria a execução dos ensaios de ultrassom. O traço do concreto utilizado encontra-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Traço do concreto utilizado

Material	Massa (kg)
Cimento CP V-ARI RS	1
Areia Artificial	1,684
Areia Natural	0,722
Brita	2,787
Água	0,55

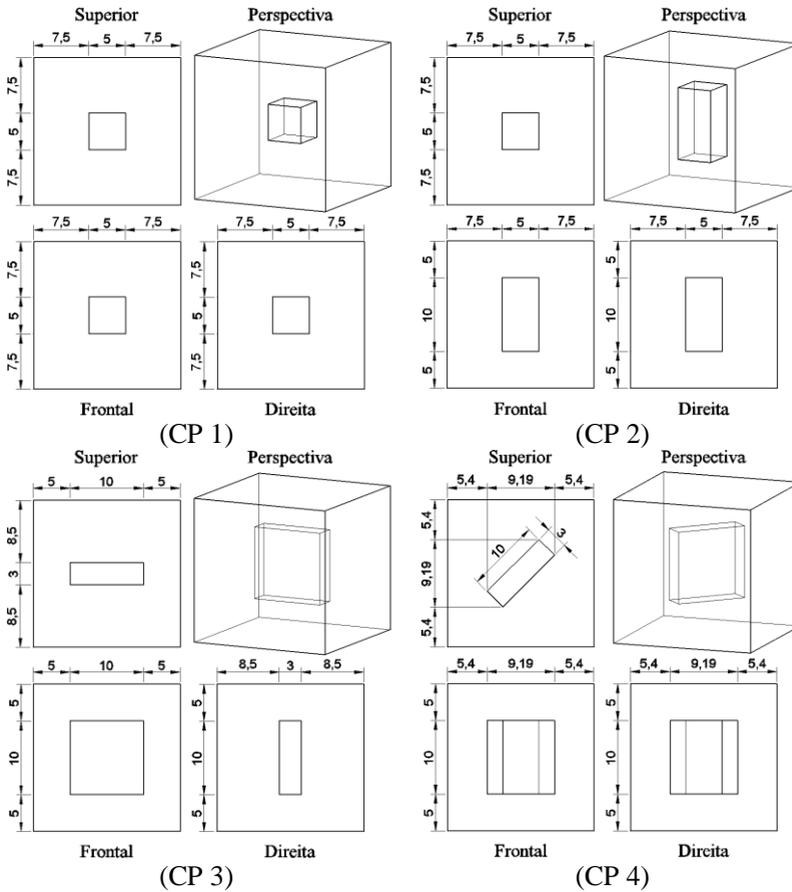


Figura 5.1 – Diferentes CPs concretados com blocos de EPS

Na Figura 5.2 encontra-se o processo de concretagem e preparo dos corpos de prova.

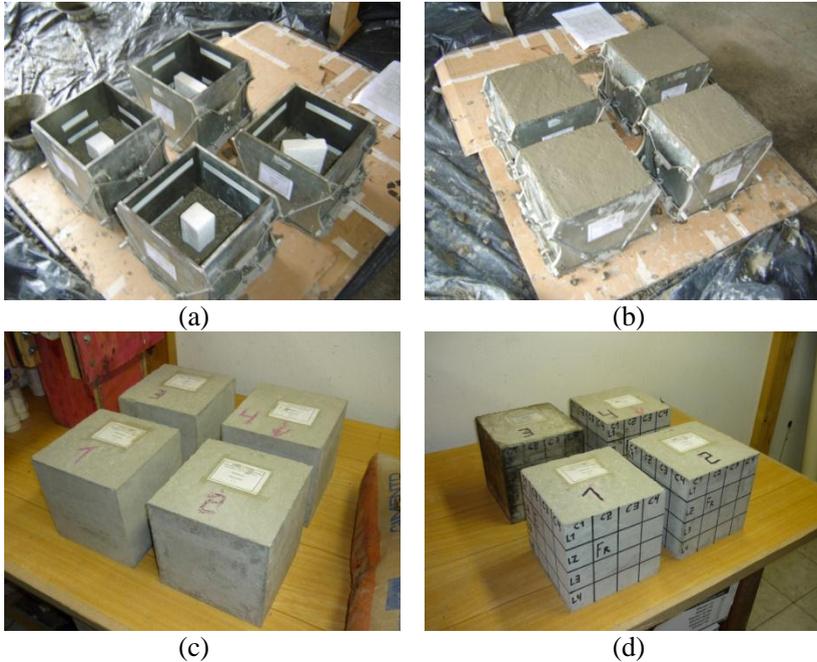


Figura 5.2 – Confeção dos blocos – (a,b) concretagem – (c) desfôrma – (d) malha de leitura

Após moldados, os CPs foram envolvidos com filme plástico por 10 dias. Então foram externamente marcados com uma malha de leitura de 5 cm (Figura 5.2 (d)), que serviu de referência para o posicionamento dos transdutores nas leituras. Essa marcação foi efetuada apenas nas faces frontal, fundos, esquerda e direita, sendo que as faces superior e inferior não receberam marcação da malha. O número de leituras a partir destas faces já é mais do que suficiente para a resolução do problema tomográfico. Essa configuração se assemelha a uma possível utilização real em um elemento linear, como, por exemplo, um pilar.

Passados mais de 30 dias da concretagem, cada corpo de prova foi ensaiado utilizando transdutores de 200 kHz e 54 kHz, a seguir detalhados.

5.1.1 Ensaios com transdutores de 200 kHz

As leituras com transdutores de 200 kHz foram realizadas em modo bidimensional, com malha de 2,5 cm, analisando o plano horizontal médio dos corpos de prova (CPs), exatamente no meio das

não homogeneidades de EPS (ou seja a meia altura do cubo). A Figura 5.3 ilustra o posicionamento dos transdutores.

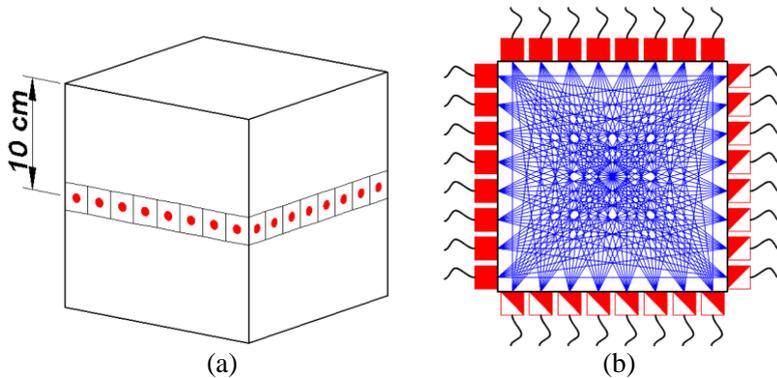


Figura 5.3 – Posicionamento dos transdutores de 200 kHz – (a) localização dos pontos de leitura – (b) leituras no plano analisado

A partir desta malha de 2,5 cm foi possível obter 8 pontos de leitura por face. Dessa forma, foram realizadas em cada corpo de prova 128 leituras, totalizando 512 leituras nos 4 corpos de prova. Para melhor precisão no ensaio as leituras foram realizadas utilizando gabaritos.

Nessas leituras não foi possível respeitar a recomendação sobre o espaçamento mínimo dos transdutores em relação às bordas do objeto, mencionada no item 2.3.1.7. Desse modo já é esperado alguma variação nos resultados dos tempos de propagação dos pulsos, o que refletirá também nos tomogramas gerados.

Caso as leituras nas bordas não fossem executadas, o sistema tomográfico de equações seria indeterminado (Figura 3.8 (a)), impossibilitando sua resolução para uma solução única.

5.1.2 Ensaios com transdutores de 54 kHz

Para os ensaios com os transdutores de 54 kHz optou-se por uma abordagem bidimensional para o CP1, realizado no plano horizontal médio, e tridimensional para o CP2, CP3 e CP4.

Decidiu-se não efetuar o ensaio tridimensional no CP1, pois se suspeitava que os transdutores de 54 kHz não conseguiriam detectar o pequeno EPS do CP1, já que seu comprimento de onda é superior ao tamanho do EPS. Desse modo, não é justificável efetuar um ensaio tridimensional, aonde a quantidade de leituras é muito elevada.

Nesses ensaios foi adotada uma malha de 5 cm, conforme exibem as Figuras 5.4 e 5.5.

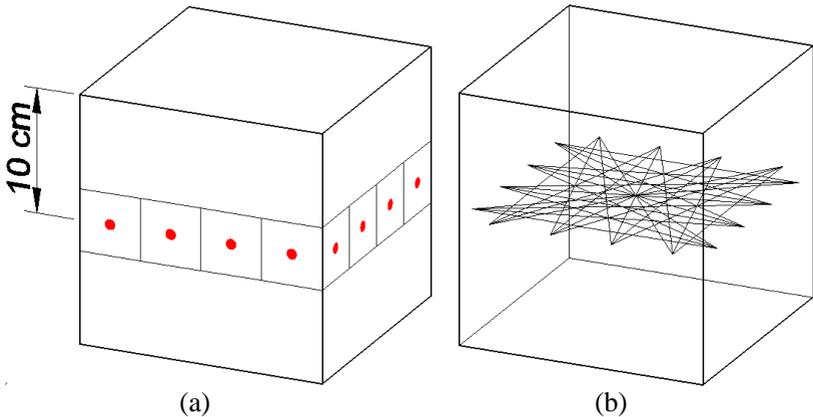


Figura 5.4 – Posicionamento dos transdutores de 54 kHz para o ensaio no CP1 – (a) localização dos pontos de leituras – (b) representação das leituras bidimensionais

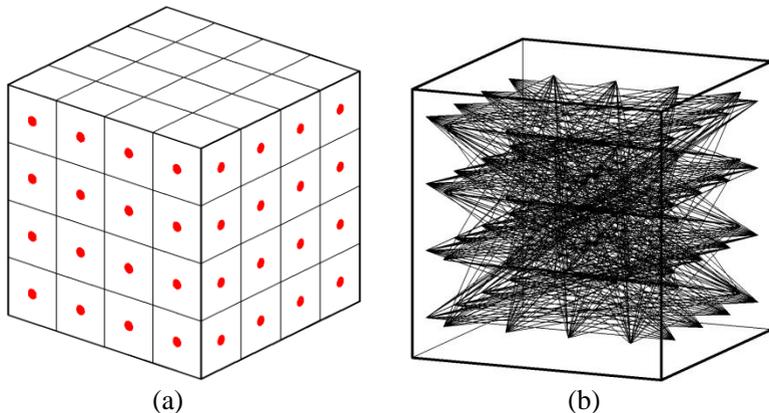


Figura 5.5 – Posicionamento dos transdutores de 54 kHz para os ensaios no CP2, CP3 e CP4 – (a) localização dos pontos de leituras – (b) representação das leituras tridimensionais

Para o CP1, 4 pontos de leitura foram realizados por face, proporcionando ao total 32 leituras. Já nos ensaios realizados nos CP2, CP3 e CP4, como cada face do corpo de prova tem 16 pontos de leituras, cada corpo de prova possui 512 leituras. Portanto, ao total nos

três corpos de prova foram realizadas 1536 leituras. Para melhor precisão no ensaio, as leituras também foram realizadas utilizando gabaritos.

Assim como nas leituras com transdutores de 200 kHz, nas leituras com os de 54 kHz também não foi possível respeitar o espaçamento mínimo dos transdutores em relação às bordas do objeto. Por isso, também já são esperadas algumas variações nos tempos de propagação das ondas, bem como nos tomogramas resultantes.

Após efetuadas todas as leituras, os dados geométricos e tempos de propagação obtidos foram inseridos no TUCon, cujos resultados são exibidos e discutidos nos próximos tópicos.

5.2 RESULTADOS

5.2.1 Análises Preliminares das Leituras de 54 kHz

Inicialmente, de forma a verificar a confiabilidade do programa, fez-se um estudo bidimensional na seção horizontal da base dos CP2, CP3 e CP4, utilizando apenas as leituras da própria seção, conforme mostra a Figura 5.6 (a). Tal seção é formada somente por concreto, sem EPS, dessa forma os tomogramas resultantes devem indicar seções homogêneas. O resultado do processamento tomográfico para cada elemento discretizado da base do CP2 está exibido na Figura 5.6 (b).

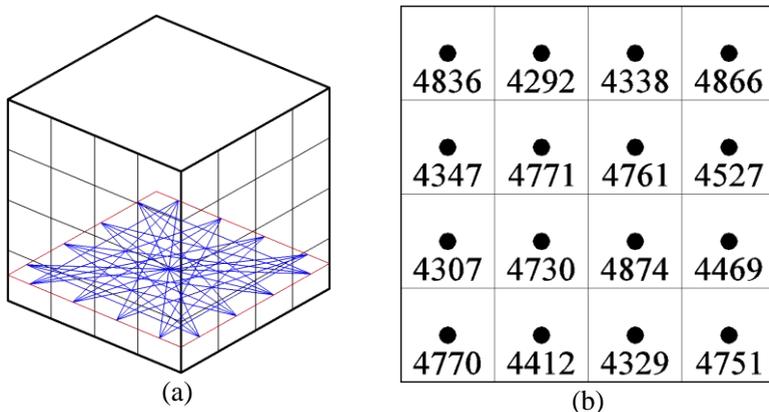


Figura 5.6 – Análise da base – (a) seção e leituras utilizadas – (b) campo de velocidades em m/s para cada elemento da base do CP2

Com o intuito de proporcionar uma representação gráfica com os valores exibidos na Figura 5.6 (b), bem como para os outros

tomogramas gerados nesse trabalho, utilizou-se o programa Surfer. Tal programa é muito empregado na topografia para gerar curvas de nível, haja vista que executa a interpolação linear entre os dados fornecidos. São inseridos neste programa o tamanho da seção, a localização cartesiana e a velocidade atribuída a cada elemento discretizado. A localização utilizada para cada elemento é representada pelo ponto central do elemento, exibido na Figura 5.6 (b). Com este procedimento foram gerados todos os tomogramas apresentados neste trabalho. Na Figura 5.7 podem ser visualizados os tomogramas das seções das bases dos CP2, CP3 e CP4.

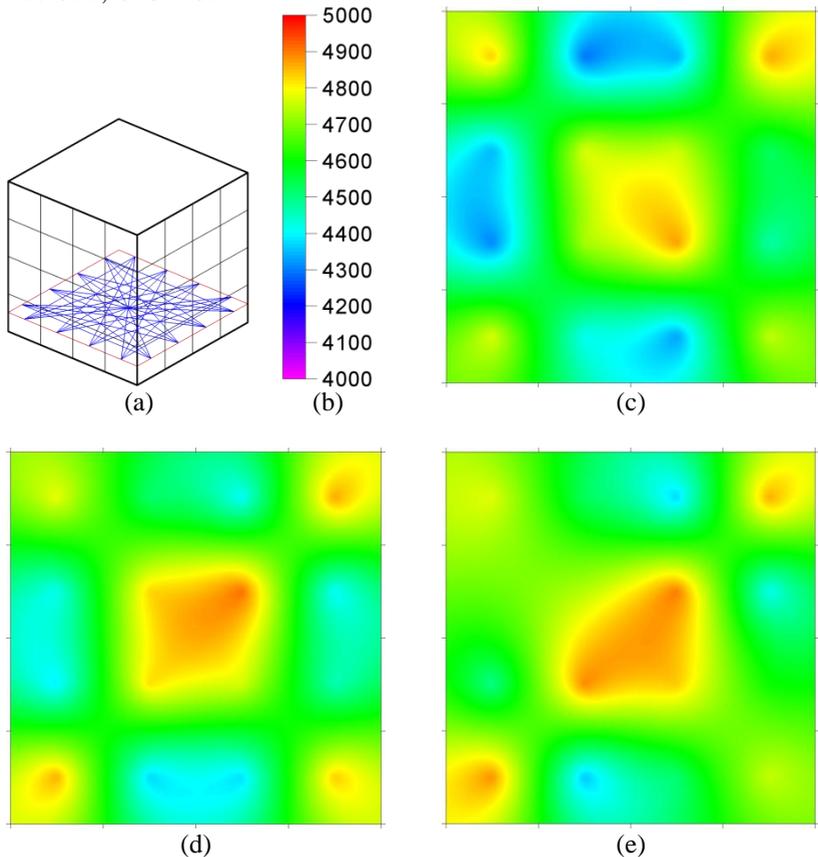


Figura 5.7 – Tomograma da base – (a) seção e leituras utilizadas – (b) legenda em m/s – (c) CP2 – (d) CP3 – (e) CP4

Considerando que a seção da base de todos os CPs é feita com o mesmo concreto, vibrado da mesma forma e não contém nenhum EPS,

não há motivos para existir variações de velocidade tão intensas, conforme exibe a Figura 5.7.

Sendo esses, os primeiros ensaios experimentais inseridos no TUCon, a suspeita a respeito do que estaria causando o erro recaiu sobre o programa. Foi efetuado, então, uma nova bateria de testes numéricos, e os algoritmos do programa também foram revisados, sem encontrar nenhum erro. Ao final, surpreendentemente, a distorção estava nas leituras de ultrassom, que demonstraram um comportamento diferente quando são realizadas com alguma inclinação, como será explicado a seguir.

Conforme a Figura 5.8, as leituras diretas oblíquas variavam entre 14° e $36,9^\circ$. A Tabela 5.2 apresenta os tempos de propagação das leituras obtidas na seção de base do CP2 (Figura 5.7 (a)).

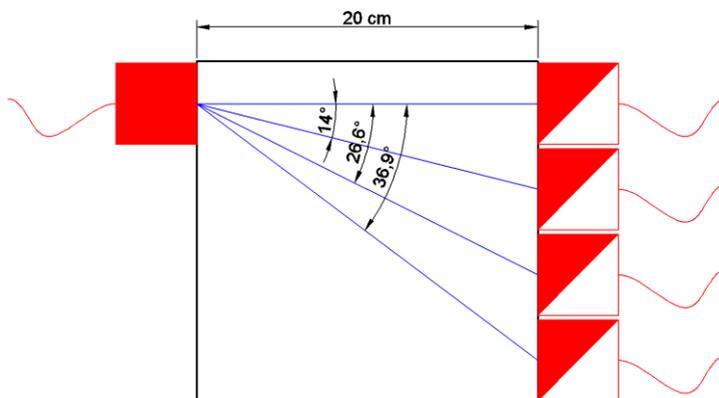


Figura 5.8 – Posicionamento dos transdutores na seção da base

Tabela 5.2 – Leituras da base do CP2 (Frontal-Fundos)

CP2 - Frontal-Fundos				
Inclinação (graus)	0	14,0	26,6	36,9
Leituras (us)	44,7	45,5	48,7	53,5
	44,4	45,1	48,1	53,3
	44,1	45,1	48,2	
	43,7	45,2	48,4	
		44,4		
		45,1		

Como os cubos ensaiados têm 20 cm e as leituras da Tabela 5.2 estão efetuadas no mesmo plano (Figura 5.7 (a)), pode-se calcular a distância retilínea de trajeto da onda para as diferentes leituras, de acordo com a inclinação (Figura 5.8) e a correspondente velocidade de propagação, apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Velocidades obtidas por cálculo manual da seção base do CP2 (Frontal-Fundos)

Ângulo (graus)	0	14,0	26,6	36,9
Velocidades (m/s)	4474	4531	4592	4673
	4505	4571	4649	4690
	4535	4571	4639	
	4577	4561	4620	
		4643		
		4571		
Médias (m/s)	4523	4558	4625	4682
V/V_{0°	1	1,012	1,023	1,035

A Figura 5.9 mostra a dependência da velocidade obtida com o ângulo de inclinação das leituras diretas oblíquas.

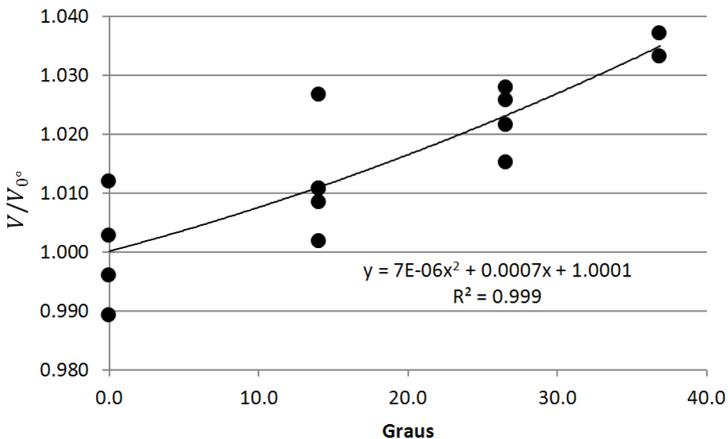


Figura 5.9 – Dependência do ângulo de inclinação da leitura em relação à velocidade de propagação – dados seção base do CP2 (Frontal-Fundos)

Na Figura 5.9 observa-se que a velocidade do pulso ultrassônico aumentou com o aumento dos ângulos das leituras. Conclui-se que algo está alterando as leituras de forma desconhecida.

A hipótese mais provável que explica essa distorção é o fato do transdutor apresentar uma superfície de contato contínua com o concreto, enquanto o método do ensaio ultrassônico utilizado nessa pesquisa preconiza que o concreto é vibrado por apenas um ponto oscilatório.

Na Figura 5.10 (a) apresentam-se imagens sucessivas de ondas de tensão atuantes em um sólido, obtidas a partir de uma simulação numérica (SCHECHTER *et al.*, 1994). Tais ondas interagem com uma fissura discretizada no centro deste sólido. Já na Figura 5.10 (b) há a mesma sequência de imagens obtidas do mesmo sólido, contudo estas foram produzidas pela técnica experimental fotoelástica.

A simulação numérica apresenta uma frente de onda circular, remontando a ideia de uma oscilação pontual. Já o experimento real exhibe uma frente de onda achatada, como sendo a sobreposição de várias frentes de ondas geradas pelos infinitos pontos de contato entre a superfície do transdutor e o concreto, conforme a Figura 5.11 (a).

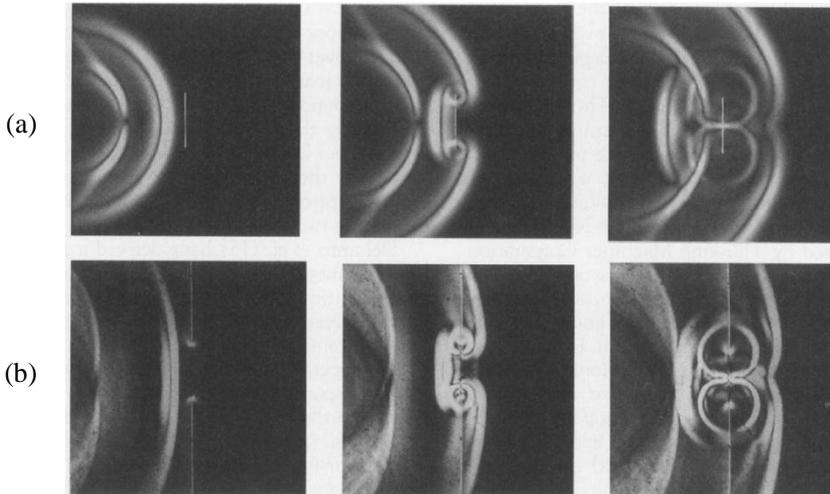


Figura 5.10 – Ondas de tensão se propagando por sólido com uma fissura interna - (a) simulação numérica – (b) ensaio experimental fotoelástico

Fonte: Schechter *et al.* (1994)

Do ponto de vista da tomografia, o problema incide na redução do tamanho total percorrido pelo pulso, uma vez que esse percurso não se daria ligando centro a centro dos transdutores, nem em canto a canto, e sim em uma posição intermediária, conforme a Figura 5.11 (b).

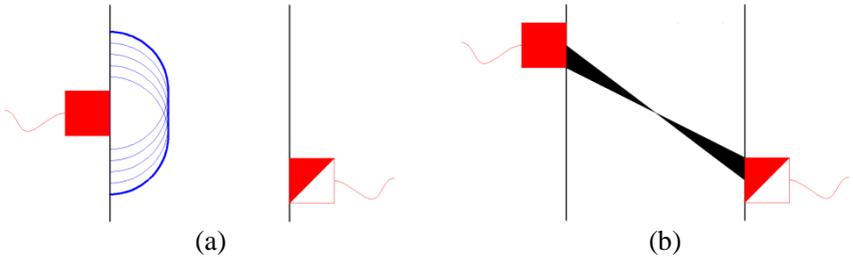


Figura 5.11 – Dificuldade de mensuração da real distância percorrida pelo pulso – (a) sobreposição das frentes de ondas – (b) zona onde o trajeto do pulso está contido

Considerando essa hipótese, o tamanho do transdutor e a distância total percorrida pelo pulso são os principais fatores influenciadores nessa não linearidade. Quanto maior a razão entre o tamanho do transdutor e a distância total percorrida, maior será a influência na leitura obtida. Dessa forma, esse problema apenas aparece em pequenos objetos, sendo que nos grandes tal efeito seria desprezível.

5.2.2 Estudo Angular

Neste trabalho verificou-se que a velocidade de propagação do pulso ultrassônico depende do ângulo de leitura. Para compreender melhor o comportamento das leituras ultrassônicas quando se varia o ângulo do percurso com o eixo axial do transdutor, foram desenvolvidos experimentos para os transdutores de 54 kHz e 200 kHz.

5.2.2.1 Transdutores de 54 kHz

Para o estudo angular com o transdutor de 54 kHz não era possível a utilização de cubos de concreto de 20 cm, pois não há como respeitar os espaçamentos mínimos dos transdutores com as bordas do objeto. Por este motivo utilizou-se uma pequena parede de concreto com as dimensões de 100 cm × 100 cm × 20 cm, exibida na Figura 5.12. Esta estrutura foi utilizada anteriormente em outras pesquisas (VENTURA *et al.*, 2010; EMANUELLI JUNIOR *et al.*, 2010).

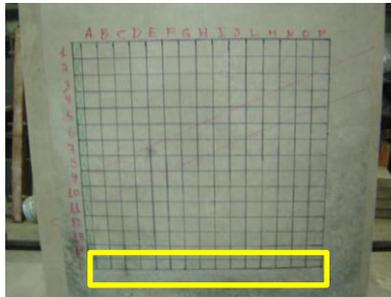


Figura 5.12 – Placa utilizada nos estudos angulares do transdutor de 54 kHz

Fonte: adaptado de Emanuelli Junior *et al.* (2010)

Nesse prisma foi concretada uma bainha para concreto protendido utilizada nas outras pesquisas mencionadas. Sua presença não afetou os estudos angulares, pois as leituras foram executadas com, no mínimo, 20 cm de distância da bainha, na região destacada da Figura 5.12. Para confirmar tal independência, leituras ultrassônicas diretas ortogonais foram realizadas e seus resultados não detectaram nenhuma influência metálica.

A partir das leituras, as velocidades de propagação foram calculadas e novamente classificadas de acordo com a sua angulação. Efetuando a média entre as velocidades de mesma inclinação obtêve-se os valores apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 5.4 – Velocidades obtidas das leituras na placa

Ângulo (graus)	0	17,2	31,7	42,9	51,1
Velocidades Médias (m/s)	4158	4188	4286	4366	4379
V/V_0°	1,000	1,007	1,031	1,050	1,053

Tabela 5.5 – Velocidades obtidas das leituras na placa

Ângulo (graus)	57,1	61,7	65,2	68,0
Velocidades Médias (m/s)	4381	4377	4364	4371
V/V_{0°	1,054	1,053	1,050	1,051

Com esses valores de V/V_{0° elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 5.13, obtendo-se uma função matemática que melhor os representa, apresentada na Equação 5.1.

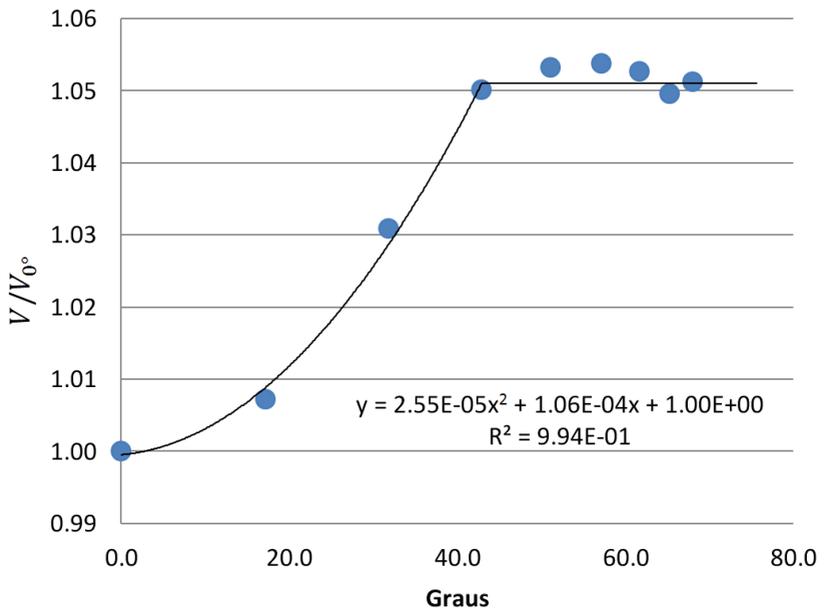


Figura 5.13 – Dependência do ângulo de inclinação da leitura em relação à velocidade de propagação

$$y = 2,55E^{-5} * x^2 + 1,06E^{-4} * x + 1 \quad \mathbf{5.1}$$

Utilizando a Equação 5.1 pode-se corrigir os valores das leituras efetuadas com os transdutores de 54 kHz. A validade da Equação 5.1 se

estende até o ângulo de 42,9°. Após esse ângulo foi adotado que o fator de correção é igual à média dos pontos na parte reta do gráfico, com o numerário de 1,052. Os fatores de correção utilizados para o transdutor de 54 kHz estão expostos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Fatores de correção para o transdutor de 54 kHz

Graus	0,00	14,04	19,47	26,57	29,21
Fator	1,000	1,007	1,012	1,021	1,025
Graus	35,26	36,87	38,33	42,03	46,69
Fator	1,035	1,039	1,042	1,050	1,052

A Figura 5.14 apresenta os tomogramas da seção da base do CP2, CP3 e CP4, já considerando as correções nas leituras de 54 kHz. Nota-se que os tomogramas estão uniformes e representativos das seções analisadas, indicando a necessidade de se efetuar a correção das leituras oblíquas.

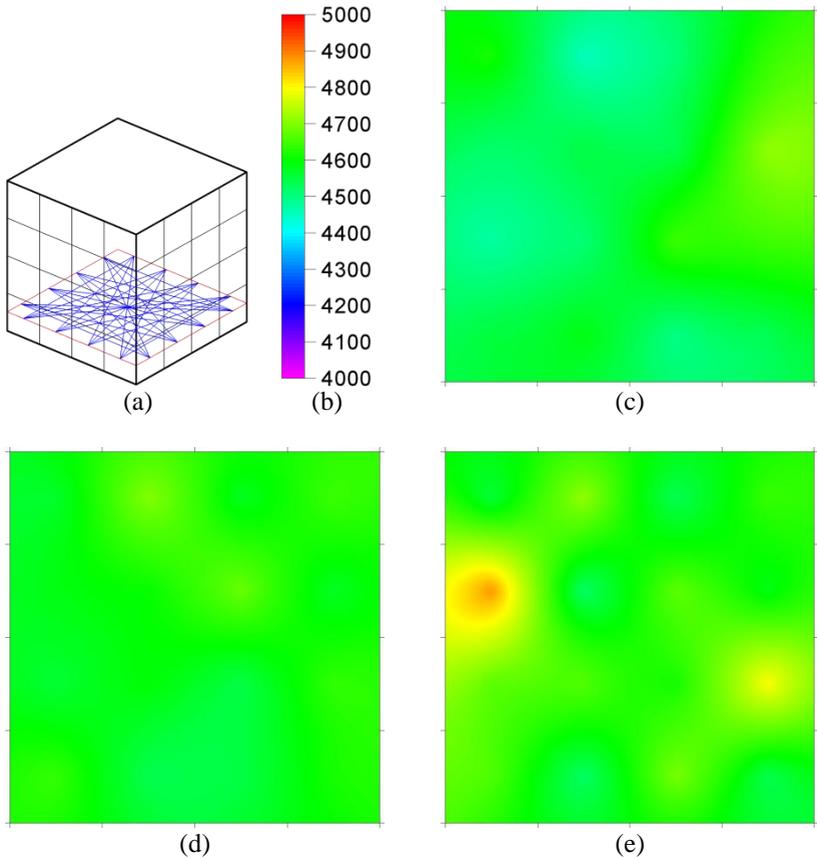


Figura 5.14 – Tomograma da base – (a) seção e leituras utilizadas (b) legenda (c) CP2 – (d) CP3 – (e) CP4

5.2.2.2 Transdutores de 200 kHz

Para o estudo angular com os transdutores de 200 kHz foi concretado um novo corpo de prova cúbico com 20 cm de aresta sem nenhuma não homogeneidade interna, nomeado de CP5. Como o espaçamento lateral mínimo dos transdutores com as bordas do objeto para as leituras de 200 kHz é de aproximadamente 2 cm, é possível a utilização dos corpos de prova de 20 cm ao invés do corpo de prova prismático utilizado anteriormente.

Nele foram executadas leituras diretas oblíquas e ortogonais, conforme a Figura 5.15. Nas leituras foi respeitado o limite lateral igual a 2,75 cm, superior ao comprimento de onda do pulso principal.

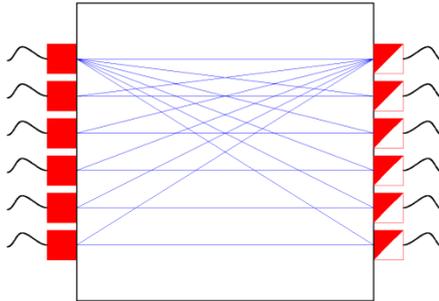


Figura 5.15 – Leituras do estudo angular

A partir das leituras obtidas, as velocidades de propagação foram calculadas e classificadas de acordo com a sua angulação. Efetuando a média entre as velocidades de mesma inclinação obtêve-se os valores apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Velocidades obtidas das leituras no CP5

Ângulo (graus)	0	7,1	14,0	20,6	26,6	32,0
Velocidades Médias (m/s)	4507	4439	4496	4515	4467	4479
V/V_{0°	1.000	0.985	0.997	1.002	0.991	0.994

Os valores de V/V_{0° exibem claramente que não foi possível detectar alguma influência do ângulo da leitura e seu tempo de propagação, como exhibe a Figura 5.16.

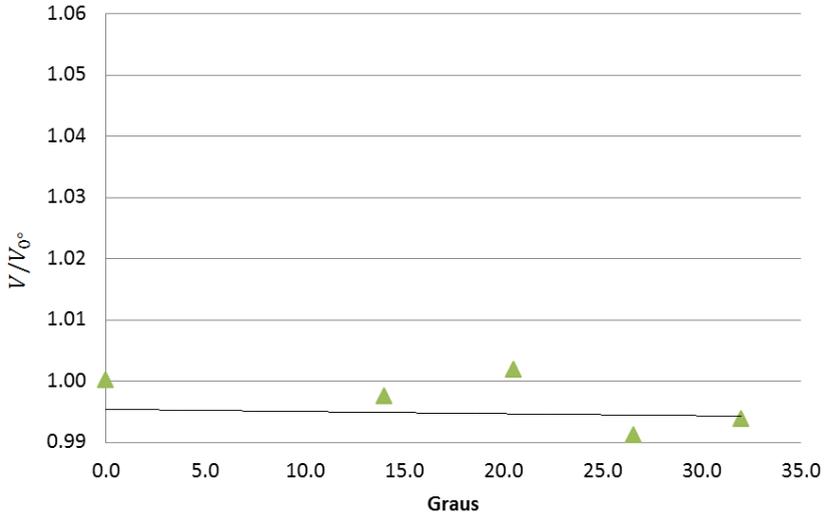


Figura 5.16 – Dependência do ângulo de inclinação da leitura em relação à velocidade de propagação – dados do CP5

Neste momento da pesquisa, conjecturou-se a hipótese que a independência entre ângulo da leitura e o tempo de propagação poderia ser devido ao corpo de prova utilizado (CP5) e não do transdutor de 200 kHz. Para averiguar tal hipótese, um estudo angular também foi conduzido com o transdutor de 54 kHz na mesma seção do CP5. Foram executadas as leituras na seção horizontal mediana do CP5, conforme exibe a Figura 5.17. Nota-se a impossibilidade de se efetuar tal estudo e respeitar o espaçamento mínimo entre os transdutores e às bordas do corpo de prova.

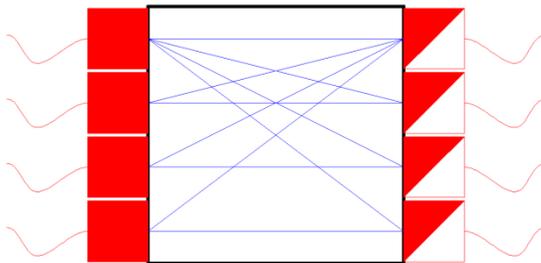


Figura 5.17 – Estudo angular com os transdutores de 54 kHz no CP5

Os resultados seguem plotados na Figura 5.18, juntamente com os dados do estudo angular efetuado com os transdutores de 54 kHz no item 5.2.2.1.

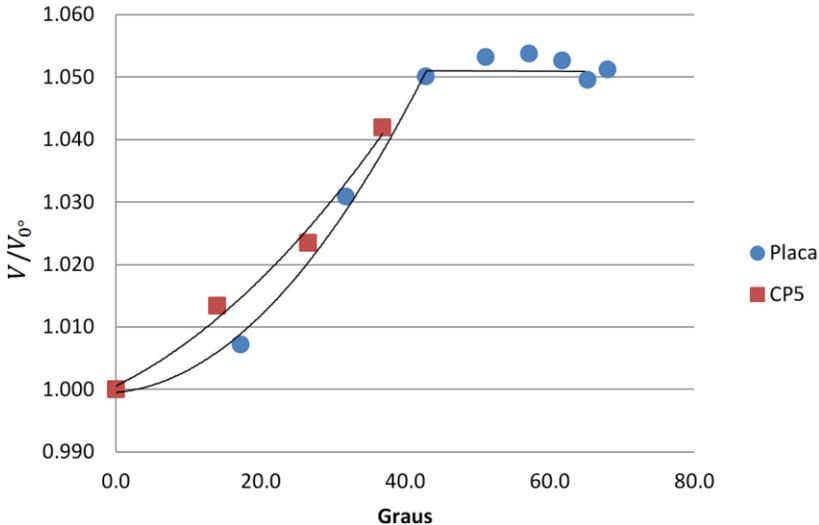


Figura 5.18 – Dependência do ângulo de inclinação da leitura em relação à velocidade de propagação com transdutores de 54 kHz

Pela Figura 5.18 conclui-se que, utilizando o transdutor de 54 kHz no CP5, ocorre a influência angular nas leituras ultrassônicas, semelhante ao obtido das leituras na placa. Dessa forma, conclui-se que não há necessidade de se corrigir as leituras efetuadas, nessa pesquisa, com os transdutores de 200 kHz podendo ser inseridas no TUCon sem alterações.

Não se pretende aqui afirmar que qualquer leitura efetuada com transdutores de 200 kHz não necessite de correção, da mesma forma que qualquer leitura de 54 kHz precise de correção. Apenas foi desenvolvido um estudo que indicou que certas leituras executadas nesta pesquisa, em elementos com 20 cm de espessura, precisam de correção. Estudos mais abrangentes devem ser executados para melhorar a compreensão do comportamento de tais transdutores em diferentes situações.

5.2.3 Análise e resultados utilizando as leituras corrigidas

Com os tempos de propagação das leituras corrigidos utilizando-se a Equação 5.1, inseriram-se os dados no TUCon que emitiu os tomogramas de cada ensaio.

A análise de tomogramas é um processo complexo, que somente pode ser desenvolvido por engenheiros experientes, cujos conhecimentos sobre propagação de ondas em meios sólidos heterogêneos devem estar consolidados. A escolha das escalas a serem utilizadas necessita estar em harmonia com o padrão de precisão empregado no ensaio ultrassônico, bem como serem adotadas conforme o caso estudado.

5.2.3.1 Transdutores de 200 kHz

Na Figura 5.19 está apresentado o tomograma horizontal da seção mediana do corpo de prova CP1.

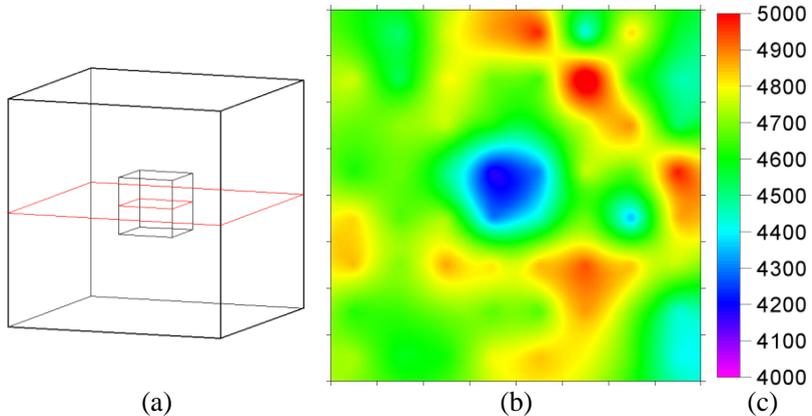


Figura 5.19 – Tomograma do CP1 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s

O tomograma do CP1 apresentou uma ótima reconstituição da seção analisada. Percebe-se claramente que o bloco de 5 cm de EPS está no centro da seção e com o seu tamanho correto.

No tomograma da Figura 5.19, bem como em outros produzidos nessa pesquisa, existe uma variação da velocidade nas regiões de concreto, indo do amarelo ao vermelho. Isso é perfeitamente aceitável, haja vista que se trata de um experimento real, onde os materiais não são

homogêneos e as leituras não são perfeitas. Além disso, alguns efeitos de borda existentes possivelmente foram gerados por algumas leituras que foram executadas nas bordas, conforme já comentado nos itens 5.1.1 e 5.1.2.

Na Figura 5.20 está apresentado o tomograma horizontal da seção mediana do corpo de prova CP2.

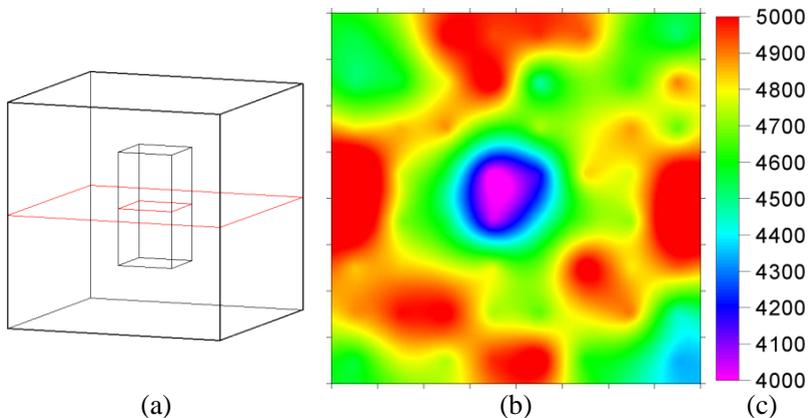


Figura 5.20 – Tomograma do CP2 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s

O tomograma do CP2 apresenta uma forma semelhante ao da Figura 5.19, contudo a área em azul está ligeiramente maior e com velocidades menores. Como a única diferença entre o CP1 e o CP2 é a altura de 10 cm do EPS contido no CP2, deduz-se que tal diferença provoca alterações nas leituras.

Os caminhos de onda das leituras conduzidas no CP1 tendem a passar não só pelas laterais do bloco de EPS, como também por cima e por baixo do mesmo, dependendo de qual leitura está se realizando. Por exemplo, as leituras mais inclinadas, onde, no CP1, o caminho de onda que passa pela face superior do bloco de EPS possui 25,6 cm e o caminho que passa pela lateral possui 25,9 cm, como mostra a Figura 5.21 (a). Dessa forma, o caminho de onda mais rápido é o que passa pela parte superior do bloco de EPS.

Tal fato não ocorre com o CP2, pois sua altura impossibilita que o caminho mais rápido passe por sua face superior, já que tal percurso é de 27,5 cm, enquanto o caminho que passa pela lateral é de 25,9 cm (Figura 5.21 (b)).

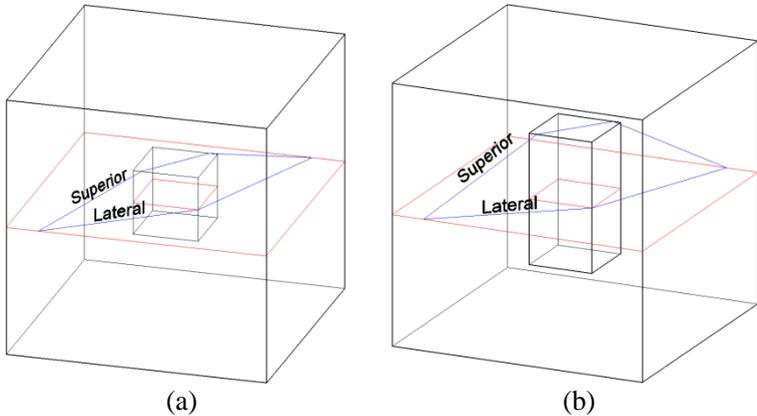


Figura 5.21 – Caminhos de onda utilizadas nas leituras mais inclinadas da seção – (a) CP1 – (b) CP2

Tal diferença entre os blocos de EPS do CP1 e CP2 gera caminhos de ondas maiores para o CP2, justificando então uma zona azulada maior e mais intensa no tomograma da Figura 5.20, quando comparado com o tomograma da Figura 5.19.

Na Figura 5.22 está apresentado o tomograma horizontal da seção mediana do corpo de prova CP3.

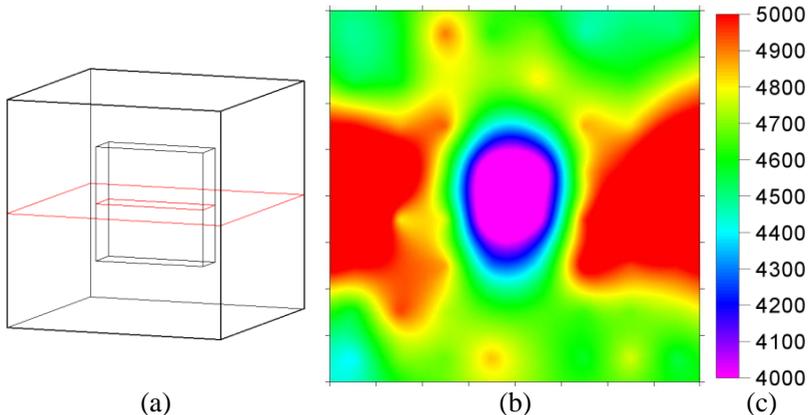


Figura 5.22 – Tomograma do CP3 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s

O tomograma do CP3 apresenta uma região azulada oval, onde a maior dimensão está na vertical e perpendicular ao plano do EPS. Esse formato vertical das baixas velocidades é devido à forma do EPS, pois

as leituras que passam pelo centro do EPS são as mais afetadas pelo mesmo, haja vista a 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 EPS e regiões perpendiculares ao mesmo. Tal efeito foi denominado de **efeito parede**.

Na Figura 5.23 está apresentado o tomograma horizontal da seção mediana do corpo de prova CP4.

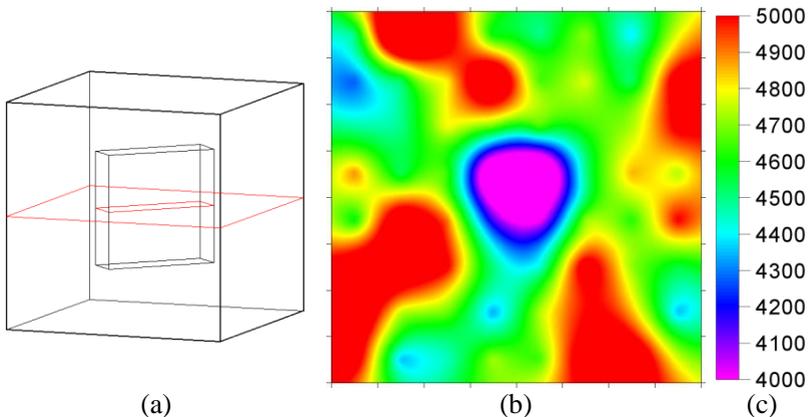


Figura 5.23 – Tomograma do CP4 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s

O tomograma do CP4 apresentou um comportamento semelhante ao tomograma do CP3 (Figura 5.22), contudo o efeito parede observado no CP4 está presente, e sobreposto, nas direções vertical e horizontal. Conforme observado, isso proporciona ao tomograma um formato mais arredondado.

5.2.3.2 Transdutores de 54 kHz

Na Figura 5.24 está apresentado o tomograma horizontal da seção mediana do corpo de prova CP1.

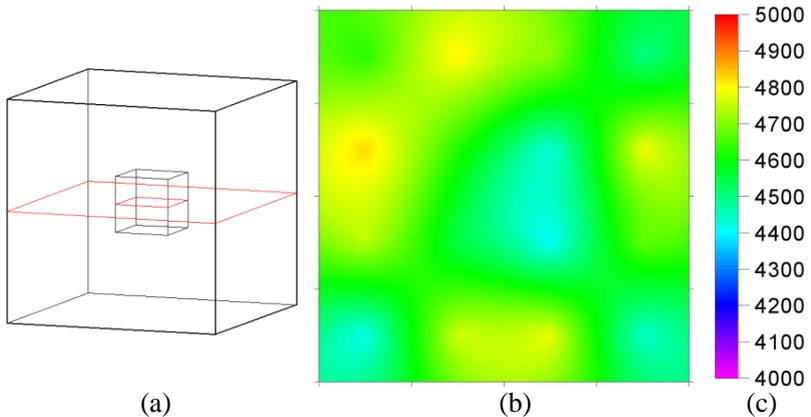


Figura 5.24 – Tomograma do CP1 – (a) corpo de prova e localização da seção – (b) tomograma – (c) legenda em m/s

O tomograma do CP1 apresentou uma leve cor azulada no centro da seção, contudo tal tonalidade encontra-se dentro da faixa de variação do ensaio. Portanto, o ensaio não conseguiu detectar a presença do EPS de 5 cm concretado internamente. Esse resultado já era esperado, pois o comprimento de onda para o transdutor de 54 kHz no concreto utilizado (~ 8 cm) é superior ao tamanho do EPS inserido. Além disso, o efeito da tridimensionalidade também contribuiu consideravelmente para a não detecção do EPS, conforme já explicado na Figura 5.21.

Nas Figuras 5.25 e 5.26 estão respectivamente apresentados os tomogramas verticais e horizontais das seções do corpo de prova CP2.

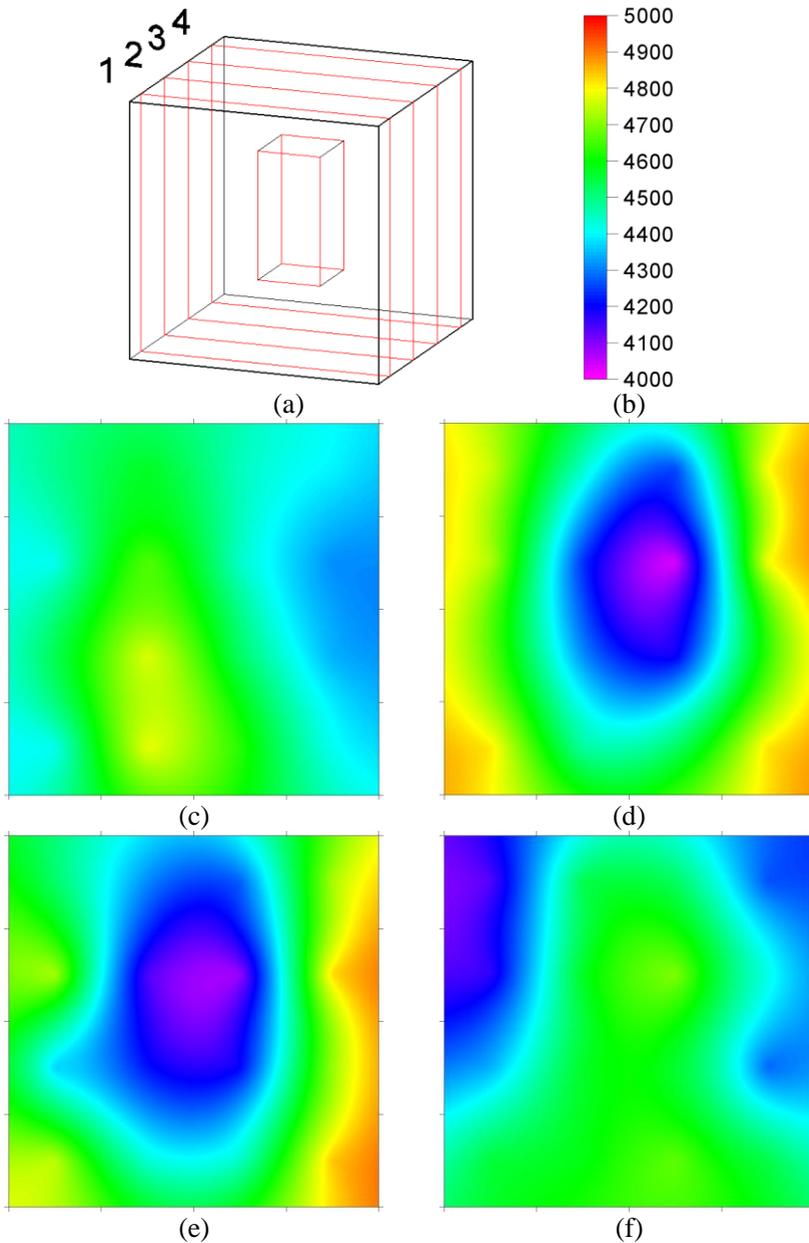


Figura 5.25 – Tomogramas verticais do CP2 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4

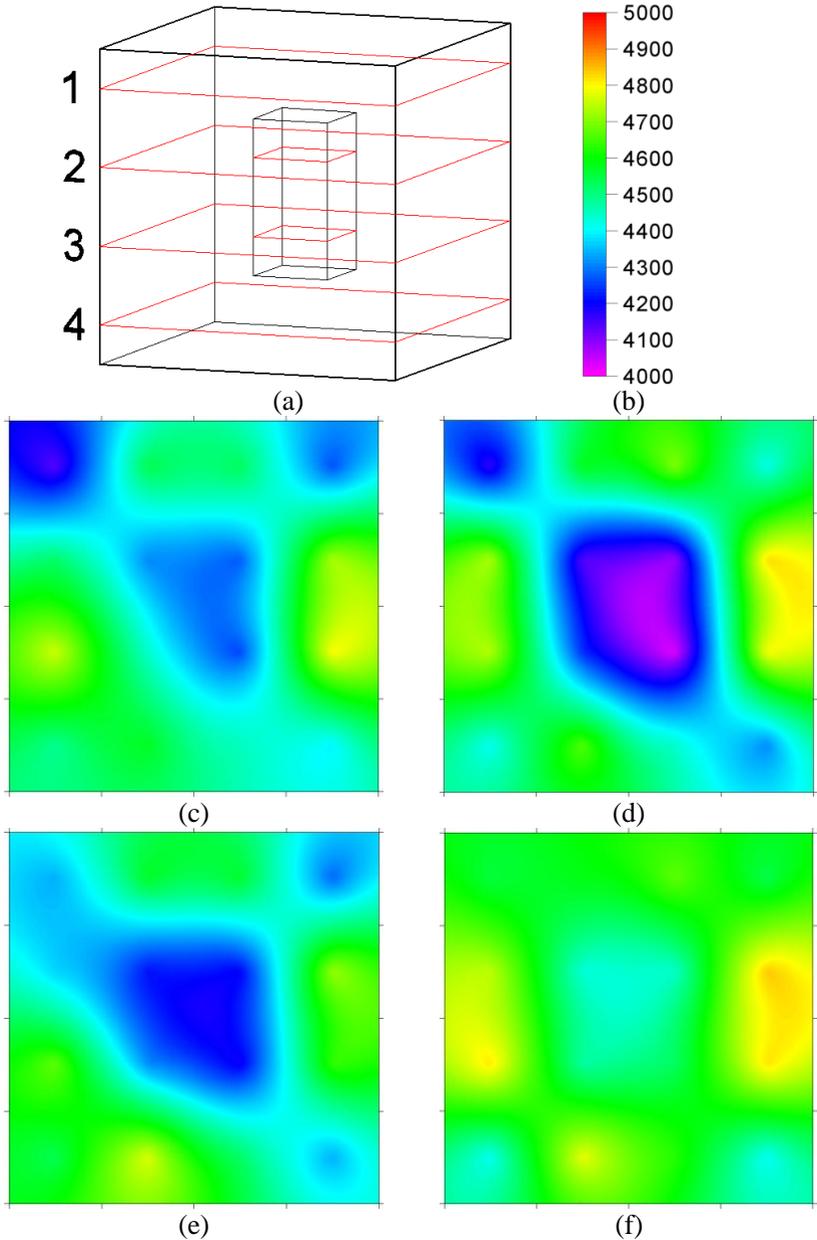


Figura 5.26 – Tomogramas horizontais do CP2 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4

Estudos tridimensionais são muito poderosos, pois efetuam a varredura completa do objeto estudado. Contudo, a quantidade de leituras necessárias para sua execução é realmente grande.

Os tomogramas do CP2 (Figuras 5.25 e 5.26) conseguiram exibir um objeto na vertical, com uma forma semelhante ao EPS concretado. A localização da zona em azul também reflete a posição do EPS dentro do corpo de prova. A maior diferença encontra-se no tamanho da área em azul, que é o tamanho do EPS. Isso ocorreu, pois o EPS fora concretado no centro do elemento, sendo que uma malha de 5 cm não coincide com as faces do EPS (Figura 5.27), gerando essa representação maior do que a real.

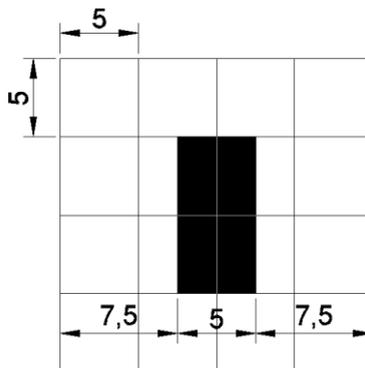


Figura 5.27 – Face frontal do CP2 com malha utilizada [cm]

Duas faixas de baixa velocidade estão representadas no tomograma da Figura 5.25 (f). Tais áreas podem representar alguma zona com baixo adensamento ou um erro provocado pelas leituras estarem sendo executadas próximas às bordas do corpo de prova.

Nas Figuras 5.28 e 5.29 estão respectivamente apresentados os tomogramas verticais e horizontais das seções do corpo de prova CP3.

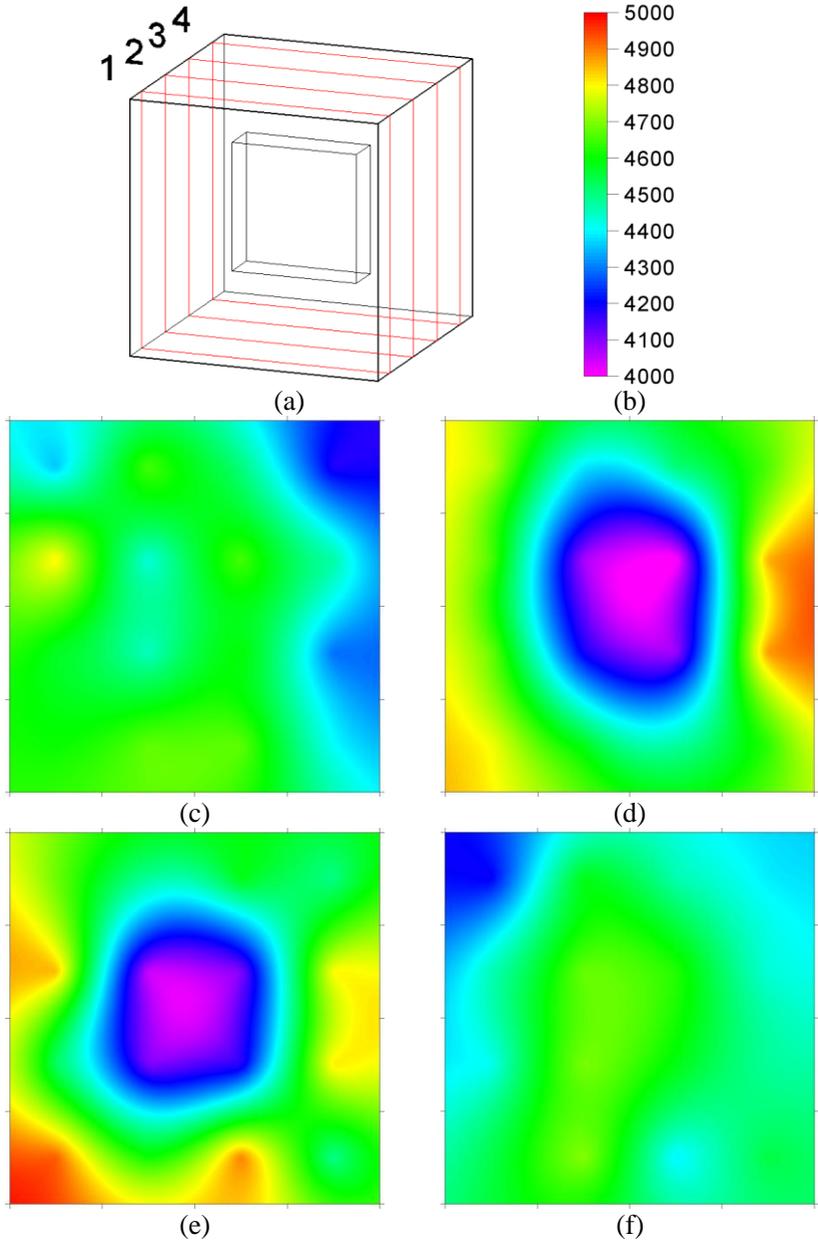


Figura 5.28 – Tomogramas verticais do CP3 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4

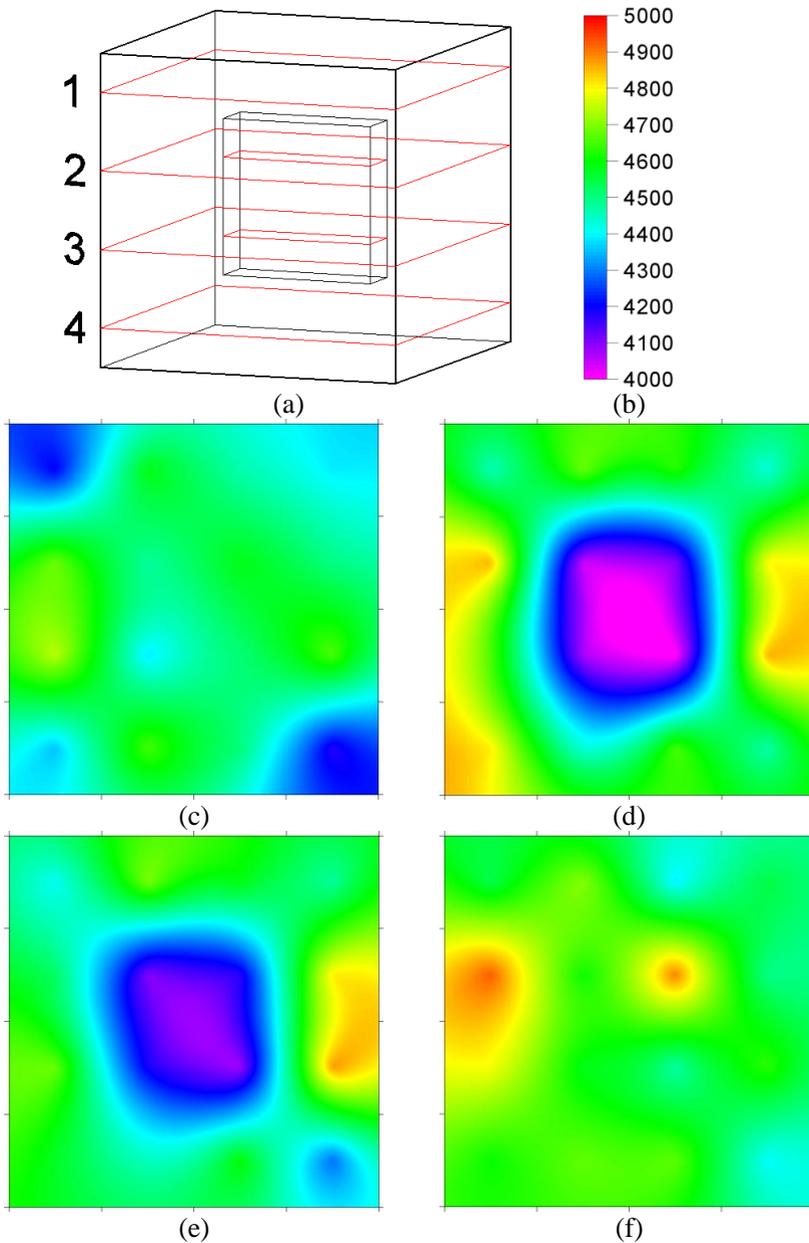


Figura 5.29 – Tomogramas horizontais do CP3 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4

Os tomogramas verticais do CP3 resultaram em uma ótima representação da placa de EPS concretada (Figura 5.28). Seu tamanho e localização refletem muito bem a realidade. Em partes isso foi possível porque, ao contrário do CP2, o CP3 tem seu EPS concretado com suas faces coincidindo com a malha discretizadora.

Os tomogramas horizontais do CP3 representaram uma espessura maior que a da placa de EPS utilizada (Figura 5.29). Esse efeito foi novamente causado pelo efeito parede já comentado. Apesar do tamanho ser maior que o real, os tomogramas da Figura 5.29 continuam representado corretamente o posicionamento do EPS dentro do CP3.

Nas Figuras 5.30 e 5.31 estão respectivamente apresentados os tomogramas verticais e horizontais das seções do corpo de prova CP4.

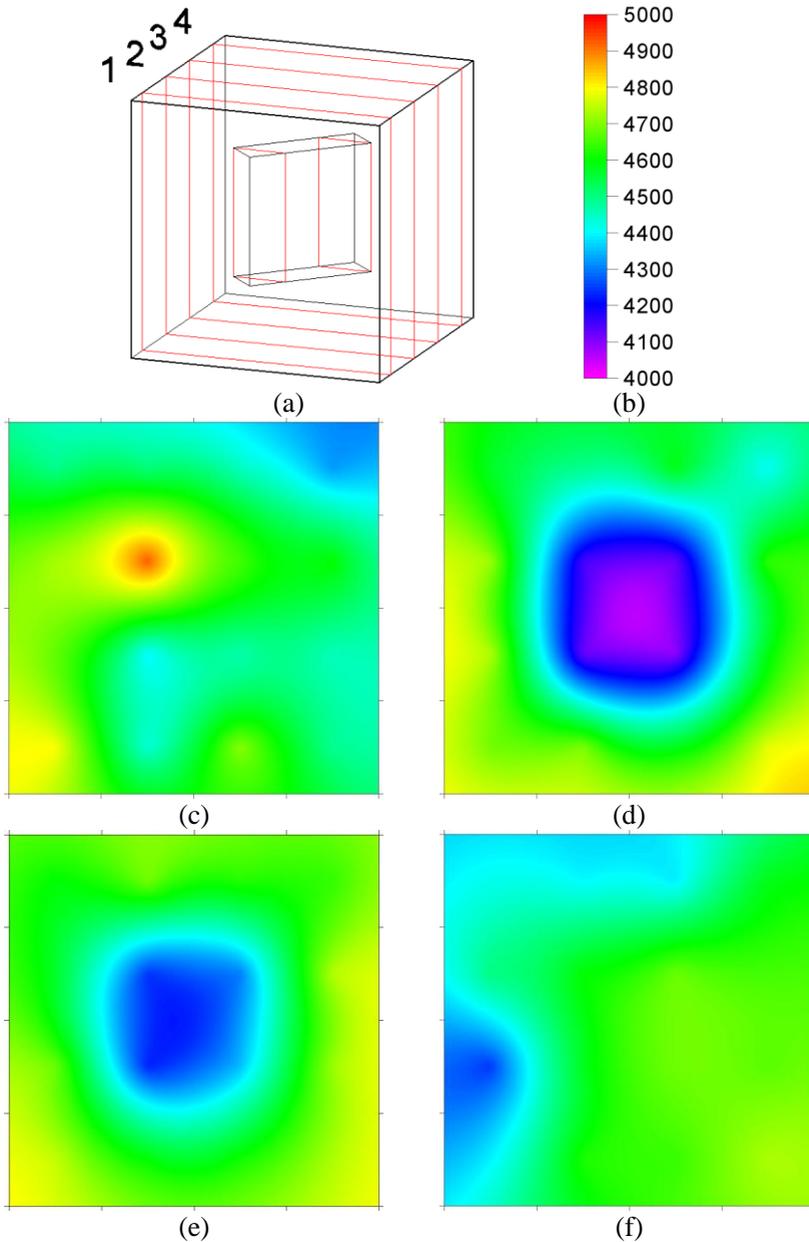


Figura 5.30 – Tomogramas verticais do CP4 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4

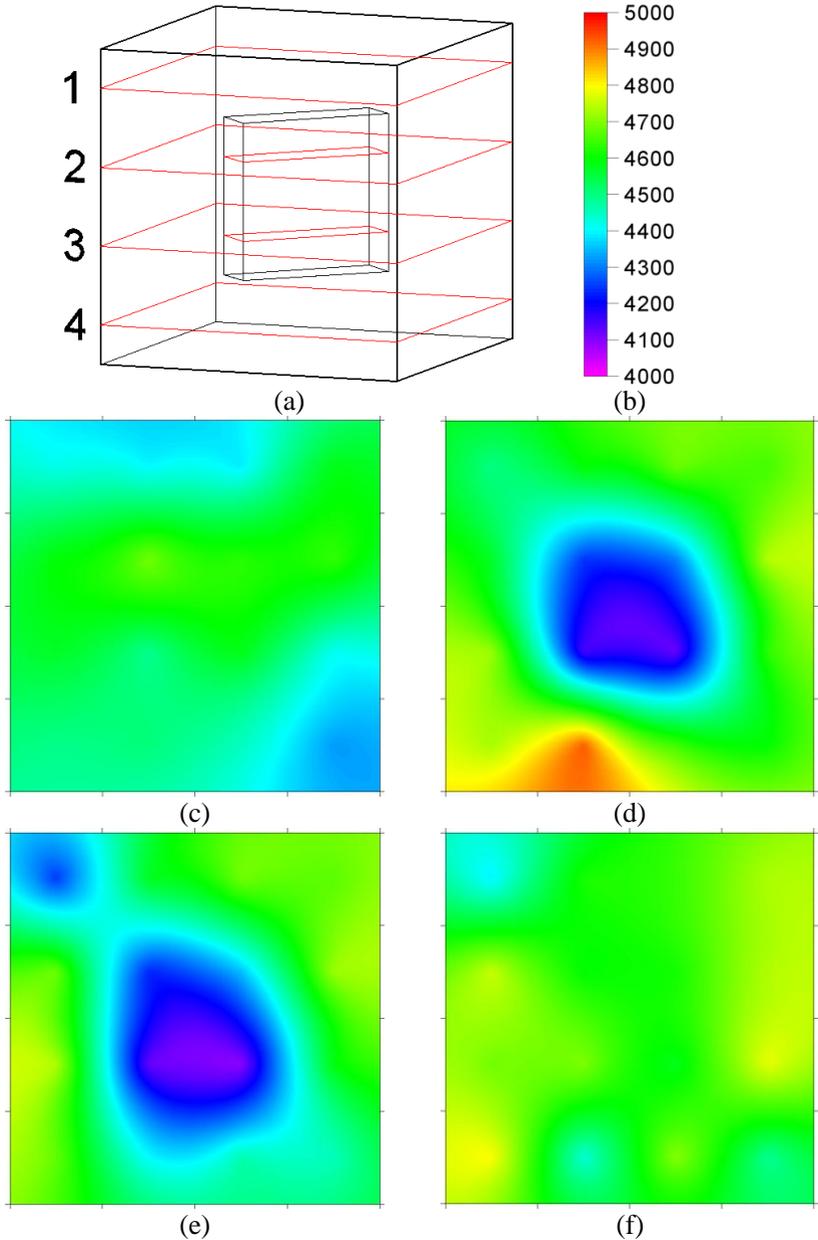


Figura 5.31 – Tomogramas horizontais do CP4 – (a) corpo de prova e localização das seções – (b) legenda em m/s – (c) tomograma 1 – (d) tomograma 2 – (e) tomograma 3 – (f) tomograma 4

Os tomogramas verticais do CP4 obtiveram também boa representação dos EPS concretados (Figura 5.30), com a diferença que, comparando-se com o tomograma do CP3, suas zonas azuis estão menores. Esse efeito foi causado pelo fato que o EPS do CP4 é inclinado em relação ao plano de seccional analisado.

Os tomogramas horizontais do CP4 (Figura 5.31) novamente ficaram com áreas azuis menores que os do CP3, pelo mesmo motivo da inclinação da placa de EPS. Estes tomogramas também não conseguiram representar a espessura da placa de EPS utilizada, criando regiões azuis perpendiculares à placa de EPS. Esse fato foi causado novamente pelo efeito parede já mencionado.

A dificuldade de mensurar a espessura do EPS nos ensaios com os transdutores de 54 kHz nos CP3 e CP4 também foi devido à malha de 5 cm utilizada, muito superior aos 3 cm de espessura da placa.

6 COMENTÁRIOS FINAIS

Nessa dissertação foram demonstradas as características e limitações do ensaio ultrassônico convencional para a detecção e identificação de não homogeneidades internas em elementos de concreto.

Com o intuito de melhorar tal capacidade de investigação, propõe-se a aplicação da técnica tomográfica utilizando as leituras ultrassônicas como medida física, ao invés dos raios X. Dessa forma, é possível utilizar todos os benefícios da tomografia, sem a necessidade de adquirir equipamentos especiais, apenas utilizando um computador, o programa tomográfico e o equipamento de ultrassom.

Para a implementação desse programa foi necessário o entendimento profundo da tomografia pelo Método de Expansão em Séries, bem como os métodos disponíveis para a resolução do sistema tomográfico. Após um estudo numérico, o método iterativo de Cimmino otimizado foi escolhido para resolver tal sistema.

Com isso, a arquitetura do programa foi projetada e efetuou-se a implementação do mesmo. Com o programa numericamente verificado, foram executados ensaios experimentais para gerar os tomogramas de 4 corpos de prova com inclusões de EPS conhecidas. Os ensaios bidimensionais e tridimensionais foram realizados com transdutores de 200 kHz e 54 kHz.

Quanto à análise dos tomogramas, foi demonstrado que se trata de um processo complexo, devendo ser executado somente por engenheiros experientes, cujos conhecimentos pertinentes devem estar consolidados.

Os tomogramas produzidos pelos ensaios com os transdutores de 54 kHz não representaram a realidade dos corpos de prova ensaiados. Após novas baterias de testes constatou-se que as leituras ultrassônicas são influenciadas pelo posicionamento dos transdutores durante o ensaio. A velocidade de propagação variava conforme o ângulo entre a linha normal ao transdutor e a linha entre os centros dos transdutores.

Entretanto, tal comportamento não foi verificado nos tomogramas produzidos pelos transdutores de 200 kHz. Estudos angulares também confirmaram a independência angular das leituras inclinadas com transdutores de 200 kHz. Se este efeito existe, ele não pôde ser detectado pelo tipo de ensaio executado.

Conclui-se, portanto, que o tamanho do transdutor possa influenciar os resultados de velocidade obtidos por leituras oblíquas, necessitando de um estudo mais detalhado.

Os tomogramas bidimensionais produzidos pelos transdutores de 200 kHz apresentaram uma boa representação das seções dos corpos de prova ensaiados. Os tomogramas do CP3 e CP4 foram os que apresentaram algumas deformações, pois sugerem uma forma oval ou circular para a não homogeneidade interna, quando, na realidade, o EPS utilizado tem espessura única. Este efeito foi denominado de efeito parede, comentado no item 5.2.3. Para impedir a existência de tal efeito, pode-se introduzir no processamento tomográfico, um algoritmo que permita calcular o **caminho da onda** mínimo que o pulso percorre dentro do objeto de concreto.

Os tomogramas tridimensionais produzidos pelos transdutores de 54 kHz, com leituras corrigidas, também exibiram uma boa representação das seções analisadas, apesar do efeito parede também estar presente. A tridimensionalidade permitiu a visualização do bloco como um todo, demonstrando uma grande potencialidade, ao preço que exige muitas leituras para sua concretização.

Quanto aos transdutores de 200 kHz e 54 kHz, comparações podem ser traçadas. Foi demonstrado que as leituras inclinadas, efetuadas pelos transdutores de 54 kHz, precisam ser corrigidas para representar melhor a seção em estudo. Enquanto tal correção não necessita ser aplicada nas leituras dos transdutores de 200 kHz.

Quanto aos tomogramas gerados por ambos os transdutores, a melhor comparação fica com o estudo bidimensional efetuado no CP1, onde o tomograma construído pelo transdutor de 54 kHz não detectou a presença do bloco de EPS, ao contrário do ocorrido com o transdutor de 200 kHz.

Essas características tornam os transdutores de 200 kHz preferenciais para o uso em leituras inclinadas, muito requisitadas no processo tomográfico. Essa pesquisa também serviu para demonstrar o grande potencial que a tomografia ultrassônica pode desenvolver para a avaliação não destrutiva de estruturas com problemas patológicos diversos. Espera-se que essa dissertação ajude a disseminar tal conhecimento nos meios acadêmicos e técnicos, haja vista que o autor desconhece pesquisa ou programa semelhante concebido nacionalmente.

Por fim, a pesquisa atingiu seu objetivo ao desenvolver o programa tomográfico, única peça que faltava para a utilização da tomografia ultrassônica em concreto.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há muitos estudos que podem ser desenvolvidos na área da tomografia ultrassônica em concreto, dentre os quais se destacam:

- estudo aprofundado do efeito que as leituras anguladas provocam nos tempos de propagação, analisando sua ligação com o tipo de transdutor utilizado, o ângulo de leitura e o tamanho do percurso do pulso no elemento de concreto analisado;
- uso de diferentes elementos internos para simular não homogeneidades, associados ou não com a presença de barras de aço;
- concepção da estrutura e implementação computacional do algoritmo que calcula o **caminho de onda** real que o pulso percorre dentro do objeto de concreto, o que proporciona grandes melhorias na qualidade dos tomogramas resultantes e elimina o efeito parede já comentado;
- desenvolvimento da estrutura e implementação computacional do algoritmo que calcula o grau de determinação do sistema tomográfico e que efetua a verificação das leituras executadas;
- criação de algoritmo que gera automaticamente os tomogramas com base em um processo de interpolação;
- desenvolvimento teórico necessário de mecanismo utilizado para a resolução aproximada de sistemas tomográficos indeterminados, com o uso de técnicas especiais;
- efetuar revisão bibliográfica sobre propagação de ondas mecânicas em meios não homogêneos;
- concepção de outro programa de computador capaz de simular numericamente ondas de tensão, utilizado para efetuar ensaios virtuais em elementos e fornecer os tempos de propagação dos pulsos ao programa tomográfico;
- estudo e implementação computacional da tomografia por atenuação das ondas ultrassônicas.

7 BIBLIOGRAFIA

AGGELIS, D. G. *et al.* Numerical simulation of elastic waves for visualization of defects. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 36, p. 1503-1512, 2011.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 597-02**: Standard test method for pulse velocity through concrete. West Conshohocken, 2003.

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

BENZI, M. Gianfranco Cimmino's contributions to numerical mathematics. Disponível em: < http://www.mathcs.emory.edu/~benzi/Web_papers/cimmino.pdf >. Acesso em: 12/5/2010. 2004.

BRAILE, P. Seismic wave demonstrations and animations. Disponível em: <<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm>>. Acesso em: 5/2/2011.

BUTTCHEVITZ, A. W. *et al.* Análise da influência da qualidade do adensamento na homogeneidade do concreto utilizando ensaio não destrutivo. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 2010. 1 CD-ROM.

CHUNG, H. W.; LAW, K. S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. **Concrete International**, Farmington Hills, v. 5, p. 42-49, 1983.

DEANS, S. R. **The Radon transform and some of its applications**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

EMANUELLI JUNIOR, A. C. *et al.* Emprego do ultrassom para detectar a presença de cabos de protensão em estruturas de concreto. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 2010. 1 CD-ROM.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FARIDANI, A. Introduction to the mathematics of computed tomography. **Mathematical Sciences Research Institute**, Berkeley, v. 47, p. 1-46, 2003.

FILLER, A. G. The history, development and impact of computed imaging in neurological diagnosis and neurosurgery. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/npre.2009.3267.5>>. Acesso em: 5/12/2010.

GALLEGO-JUAREZ, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducer. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, Madrid, v. 22, n. 10, p. 804-816, 1989.

GIACOVAZZO, C. *et al.* **Fundamentals of crystallography**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2002.

HAASE, A. (Ed.); LANDWEHR G. (Ed.); UMBACH. E. (Ed.). **Röntgen centennial: x-rays in natural and life sciences**. Singapore: World Scientific Publishing, 1997.

HALLIDAY, R.; RESNICK, R. **Fundamentos de física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1991. v. 2: Gravitação, ondas e termodinâmica.

HAMASSAKI, L. T. **Utilização do ultra-som em concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1961.

ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisas e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

_____. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

IUSEM, A. N.; PIERRO A. R. de. Fundamentos matemáticos da tomografia computadorizada: método de transformações. **Revista Matemática Universitária**, São Paulo, n. 11, p. 53-65, 1990a.

_____. Fundamentos matemáticos da tomografia computadorizada: método de expansão em séries. **Revista Matemática Universitária**, São Paulo, n. 12, p. 57-85, 1990b.

JACKSON, M. J.; TWEETON, D. R. **MIGRATION - Geophysical tomography using wavefront migration and fuzzy constraints**. Minneapolis: U.S. Bureau of Mines, 1994. Report Investigation 9497.

_____. **3DTOM - Three-dimensional geophysical**. Minneapolis: U.S. Bureau of Mines, 1996. Report Investigation 9617.

KEPLER, W. F.; BOND, L. J.; FRANGOPOL D. M. Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography - part I theory. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 14, p. 133-146, 2000a.

_____. Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography - part II application. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 14, p. 147-156, 2000b.

LORIGGIO, D. **Tópicos especiais - elaboração de programas para análise e projeto de estruturas**. Notas de Aula – Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MACHADO, M. D. **Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2. ed. West Conshohocken: Chemical Rubber Company Press, 2004.

MALIK, H. K.; SINGH, A. K. **Engineering physics**. New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2010.

MARTIN, J. *et al.* Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams. **NDT&E International**, Oxford, v. 31, p. 107-113, 2001.

MARTINS, R. de A. O nascimento de uma nova física. **Scientific American Brasil - Gênios da Ciência**, São Paulo, 13. ed., 2006.

MEHTA, N. **Textbook of engineering physics**. New Dalhi: PHI Learning Private Limited, 2009. v. 2.

MULDOON, R. *et al.* 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.

NDT - Nondestructive testing resource center community college ultrasonic testing. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/c_haracteristicspt.htm>. Acesso em: 20/1/2011.

PATELLA, D. Geophysical tomography in engineering geology: an overview. In: 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2001, Salvador. **Proceedings...** Salvador: Brazilian Geophysical Society, 2001.

PROCEQ - Ultrasonic transducers for materials testing. Disponível em: <<http://www.proceq.com>>. Acesso em: 12/1/2011.

REAL SOFTWARE - Real studio programming language. Disponível em: <<http://www.realsoftware.com>>. Acesso em: 25/11/2009.

RHEINHEIMER, V.; PINTO, R. C. de A.; PADARATZ, I. J. Análise da qualidade do concreto de um pilar da ponte Colombo Salles através do ensaio de ultra-som. In: 48° CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

RILEM. **NDT 1: Testing of concrete by the ultrasonic pulse method.** Paris, 1972.

RODRIGUES, F. P. M. Perícias e avaliações. Disponível em: <<http://www.peritos.eng.br>>. Acesso em: 15/1/2011.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. da R. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais.** 2. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1996.

SCHECHTER, R. S. *et al.* Real-Time Parallel Computation and Visualization of Ultrasonic Pulses in Solids. **Science Magazine**, Washington, v. 265, p. 1188-1192, 1994.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 10/1/2011.

SOARES JUNIOR, P. C.; PADARATZ, I. J.; PINTO, R. C. de A. Influência da presença de armadura na detecção de falhas internas de concretagem através do uso do ultra-som. In: 48° CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

STEINBRUCH, A.; WINTERLE, P. **Geometria analítica.** 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1987.

STURRUP V. R., VECCHIO F. J. e CARATIN H. Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength. **In Situ/Nondestructive Testing of Concrete – ACI SP-82**, Detroit, p. 201-228, 1984.

VENTURA, B. de O. *et al.* Detecção da presença de cabos de protensão em estruturas de concreto com o método não destrutivo do eco-impacto. In: 52° CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: IBRACON, 2010. 1 CD-ROM.

8 ANEXOS

8.1 ANEXO A – RESOLUÇÃO DE SISTEMA DE EQUAÇÕES POR MÍNIMOS QUADRADOS

Seja um sistema de equações posto conforme Equação 8.1, sua resolução por mínimos quadrados é dada pela dedução abaixo.

$$\underline{A}_{m,n} * \underline{x}_n = \underline{B}_m \quad \mathbf{8.1}$$

Multiplicado cada lado por $\left[\left(\underline{A}_{m,n}^T * \underline{A}_{m,n} \right)^{-1} \underline{A}_{m,n}^T \right]$, tem-se:

$$\left[\left(\underline{A}_{m,n}^T * \underline{A}_{m,n} \right)^{-1} \underline{A}_{m,n}^T \right] * \underline{A}_{m,n} * \underline{x}_n = \left[\left(\underline{A}_{m,n}^T * \underline{A}_{m,n} \right)^{-1} \underline{A}_{m,n}^T \right] * \underline{B}_m .$$

$$\text{Como } \left[\left(\underline{A}_{m,n}^T * \underline{A}_{m,n} \right)^{-1} \underline{A}_{m,n}^T \right] * \underline{A}_{m,n} = \underline{I}_{m,n} ,$$

$$\underline{x}_n = \left[\left(\underline{A}_{m,n}^T * \underline{A}_{m,n} \right)^{-1} \underline{A}_{m,n}^T \right] * \underline{B}_m . \quad \mathbf{8.2}$$

A Equação 8.2 resolve sistemas determinados e sobredeterminados, representados pelos casos (b), (c) e (d) da Figura 3.8. Porém a resolução de um sistema indeterminado (Figura 3.8-a) é impossível, pois a matriz $\left[\underline{A}_{m,n}^T * \underline{A}_{m,n} \right]$ é singular, i.e., não é invertível.

Uma maneira de “contornar” este problema é alterando o sistema de equações adicionando um parâmetro de suavização β , como é mostrado pela Equação 8.3 (PATELLA, 2001) (JACKSON *et al.*, 1994).

$$\underline{x}_n = \left[\left(\underline{A}_{m,n}^T * \underline{A}_{m,n} + \beta * \underline{I}_{m,n} \right)^{-1} \underline{A}_{m,n}^T \right] * \underline{B}_m \quad \mathbf{8.3}$$

Nesta fórmula β deve ter o menor valor positivo possível, de tal forma que não altere muito o sistema de equações e o mesmo seja invertível. Infelizmente essa alteração modifica um pouco a natureza do sistema de equações, gerando imprecisões.

8.2 ANEXO B – SISTEMA DE RESOLUÇÃO ITERATIVA GAUSS-JACOBI

Considerando o sistema de equações dado pela Equação 8.4.

$$\underline{A}_{n,n} * \underline{x}_n = \underline{B}_n \quad \mathbf{8.4}$$

Também representado pela Equação 8.5.

$$\begin{aligned} a_{1,1} * x_1 + a_{1,2} * x_2 + \dots + a_{1,n} * x_n &= b_1 \\ a_{2,1} * x_1 + a_{2,2} * x_2 + \dots + a_{2,n} * x_n &= b_2 \\ \vdots & \\ a_{n,1} * x_1 + a_{n,2} * x_2 + \dots + a_{n,n} * x_n &= b_n \end{aligned} \quad \mathbf{8.5}$$

Pode-se isolar x_i , conforme Equação 8.6.

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{(b_1 - a_{1,2} * x_2 - a_{1,3} * x_3 - \dots - a_{1,n} * x_n)}{a_{1,1}} \\ x_2 &= \frac{(b_2 - a_{2,1} * x_1 - a_{2,3} * x_3 - \dots - a_{2,n} * x_n)}{a_{2,2}} \\ &\vdots \\ x_n &= \frac{(b_n - a_{n,1} * x_1 - a_{n,2} * x_2 - \dots - a_{n,n-1} * x_{n-1})}{a_{n,n}} \end{aligned} \quad \mathbf{8.6}$$

As expressões acima podem, então, ser representadas por (RUGGIERO *et al.*, 1996):

$$\underline{x}_n = \underline{C}_{n,n} * \underline{x}_n + \underline{g}_n ,$$

onde:

$$\underline{x}_n = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} ,$$

$$\underline{C}_{n,n} = \begin{bmatrix} 0 & -a_{1,2}/a_{1,1} & -a_{1,3}/a_{1,1} & \cdots & -a_{1,n}/a_{1,1} \\ -a_{2,1}/a_{2,2} & 0 & -a_{2,3}/a_{2,2} & \cdots & -a_{2,n}/a_{2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n,1}/a_{n,n} & -a_{n,2}/a_{n,n} & -a_{n,3}/a_{n,n} & \cdots & 0 \end{bmatrix},$$

$$\underline{g}_n = \begin{bmatrix} b_1/a_{1,1} \\ b_2/a_{2,2} \\ \vdots \\ b_n/a_{n,n} \end{bmatrix}.$$

Na resolução do sistema, é necessário inicialmente estimar valores de \underline{x}_n para ser utilizado antes do primeiro passo iterativo, sendo nomeado então como $\underline{x}_n^{(0)}$. A fórmula iterativa para o cálculo da aproximação do passo k é dada pela Equação 8.7.

$$\underline{x}_n^{(k)} = \underline{C}_{n,n} * \underline{x}_n^{(k-1)} + \underline{g}_n \quad 8.7$$

O processo iterativo continua até que a precisão almejada seja alcançada.

A representação gráfica do processo iterativo de Gauss-Jacobi é dada na Figura 8.1, onde a ordem das equações no sistema de equações é dada pela sequência: reta **a** e **b**.

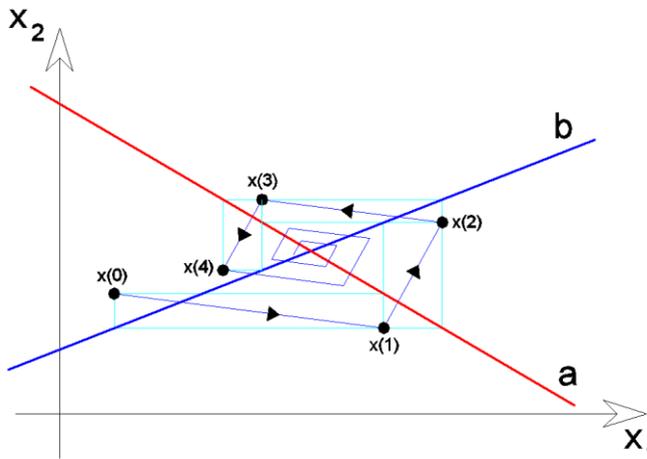


Figura 8.1 – Representação gráfica do processo iterativo de Gauss-Jacobi

8.3 ANEXO C – SISTEMA DE RESOLUÇÃO ITERATIVA GAUSS-SEIDEL

O processo de Gauss-Seidel é muito semelhante ao Gauss-Jacobi, onde o sistema de equações também é escrito sob a forma da Equação 8.8 (RUGGIERO *et al.*, 1996).

$$\underline{x}_n = \underline{C}_{n,n} * \underline{x}_n + \underline{g}_n \quad 8.8$$

Contudo a diferença encontra-se dentro do processo iterativo, onde na iteração k e cálculo de $x_j^{(k)}$, usam-se os valores de $x_1^{(k)}$, $x_2^{(k)}$, ..., $x_{j-1}^{(k)}$ já calculados na própria iteração k , e os restantes provenientes da iteração $k-1$, $x_{j+1}^{(k-1)}$, $x_{j+2}^{(k-1)}$, ..., $x_n^{(k-1)}$, conforme Equação 8.9.

$$x_j^{(k)} = \frac{\left(\begin{array}{l} b_j - a_{j,1} * x_1^{(k)} - a_{j,2} * x_2^{(k)} \dots - a_{j,j-1} * x_{j-1}^{(k)} \\ -a_{j,j+1} * x_{j+1}^{(k-1)} - a_{j,j+2} * x_{j+2}^{(k-1)} \dots - a_{j,n} * x_n^{(k-1)} \end{array} \right)}{a_{j,j}} \quad 8.9$$

Novamente, as iterações continuam até a precisão almejada ser obtida. Graficamente o processo iterativo de Gauss-Seidel é representado pela Figura 8.2, onde a ordem das equações no sistema de equações é dada pela sequência: reta **a** e **b**.

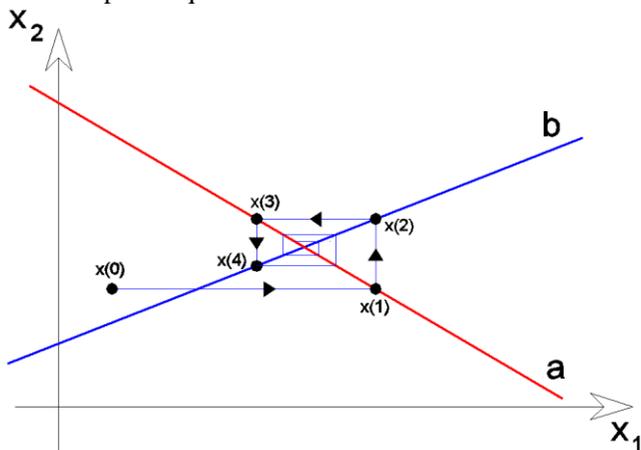


Figura 8.2 – Representação gráfica do processo iterativo de Gauss-Seidel