



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MODELAGEM COMPUTACIONAL EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA - PPGMC**

LAIO ANDRADE SACRAMENTO

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL TOMOGRÁFICA
PARA AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES NO CONCRETO ATRAVÉS DE
PULSO ULTRASSÔNICO**

**ILHÉUS - BA
2021**

LAIO ANDRADE SACRAMENTO

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL TOMOGRÁFICA
PARA AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES NO CONCRETO ATRAVÉS DE
PULSO ULTRASSÔNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Santa Cruz, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Linha de pesquisa: Modelagem matemática e computacional aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Dany Sanchez Dominguez.

Coorientador: Prof. Dr. José Renato de Castro Pessoa.

**ILHÉUS - BA
2021**

LAIO ANDRADE SACRAMENTO

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL
TOMOGRÁFICA PARA AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES NO
CONCRETO ATRAVÉS DE PULSO ULTRASSÔNICO**

PPGMC - UESC

Ilhéus – BA, 11/03/2021

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Joel Sanchez Dominguez

UERJ



Prof. Dr. Paulo Eduardo Ambrósio

UESC



Prof. Dr. Dany Sanchez Dominguez

UESC

(Orientador)

À vovô Nito (*in memoriam*) e a tio Zé Queiroz
(*in memoriam*), vocês adorariam ver onde
estamos chegando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às seguintes pessoas e instituições que proporcionaram o auxílio e suporte necessários para que esta pesquisa fosse realizada:

Aos meus pais e minha irmã por todo incentivo, amor e carinho dedicados à minha vida e à minha formação. Mesmo às vezes nem entendendo o que eu tanto ando estudando.

Ao professor Dany Sanchez Dominguez primeiramente por ter me aceitado como orientando. Por toda paciência, compreensão, motivação, acolhimento e confiança no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor José Renato de Castro Pessoa pela motivação e pelo companheirismo que desenvolvemos durante esses anos. Ainda pelo incentivo em continuar meus estudos no Mestrado e Doutorado assim por vir.

Aos amigos do programa, em especial Rafaela, Thiago, Igor e Antônio. Com vocês foi tudo mais leve.

À Suian, Mariane e Rafael pelas correções textuais, auxílio nos ensaios e corridas na avenida. Vocês são meu maior exemplo de que dividindo o que conhecemos e nos apoiando crescemos juntos.

À Andressa, Patrick, Nayre e Maria Rita por estarem sempre ao meu lado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia (PPGMC -UESC) pelo ambiente sempre propício ao crescimento do aluno. Em especial nas figuras de Francisco Bruno Souza Oliveira, Paulo Eduardo Ambrósio e Ellen Pitombo. Que seguraram a peteca mesmo em meio a uma pandemia.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo apoio financeiro por meio de uma bolsa de mestrado.

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL TOMOGRÁFICA PARA AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES NO CONCRETO ATRAVÉS DE PULSO ULTRASSÔNICO

RESUMO

A presença de patologias em estruturas de concreto é um grande problema para a engenharia civil, em particular quando estas não estão localizadas na superfície do objeto. Nessa vertente, técnicas de reconstrução tomográfica digitais tem sido um grande aliado no estudo da estrutura interna de materiais. Dessa forma, o presente trabalho objetiva desenvolver uma ferramenta computacional aliando técnicas tomográficas ao ensaio de propagação de pulso ultrassônico para identificar não homogeneidades no interior de estruturas de concreto. Para isso, apresenta-se o arcabouço matemático necessário para entendimento do problema tomográfico, um estudo dos sistemas de equações lineares desenvolvidos, e as etapas necessárias para implementação computacional. O algoritmo de reconstrução tomográfica foi implementado em MatLab. Para verificação do funcionamento do código desenvolvido, foram utilizados 9 corpos de prova simulados e três corpos de prova físicos de concreto. Para estudo da dependência de malha, utilizou-se malhas de 5cm x 5cm e 2.5cm x 2.5cm. Na composição dos tomogramas, três representações foram utilizadas: matrizes de cores; e contornos com 1 e 100 interpolações. O algoritmo proposto foi capaz de gerar tomogramas para sistemas lineares sobredeterminados bem condicionados e com alto grau de esparsidade. Foi possível de criar tomogramas representativos da estrutura interna dos elementos propostos. Os resultados foram melhor representados por contornos de 100 interpolações. A dependência de malha foi analisada e menores elementos de malha geram tomogramas mais detalhados. A tomografia ultrassônica em concreto tem grande potencial para ser utilizada na identificação de não homogeneidades em estruturas de concreto.

Palavras-chave: concreto, ensaios não destrutivos, velocidade de pulso ultrassônico, tomografia.

DEVELOPMENT OF TOMOGRAPHIC COMPUTATIONAL TOOL FOR DISCONTINUITIES ASSESSMENT IN CONCRETE THROUGH ULTRASONIC PULSE

ABSTRACT

The presence of pathologies in concrete structures is a major problem for civil engineering, in particular when they are not located on the object surface. In this regard, digital tomographic reconstruction techniques have proved to be a great ally for the study of the internal structure of materials. Thus, this work aims to develop a computational tool combining tomographic techniques with the ultrasonic pulse velocity test to identify non-homogeneities within concrete structures. Hence, the required mathematical background for understanding the tomographic problem is presented, as well as a study of the developed systems of linear equations, and the essential steps for computational implementation. The tomographic reconstruction algorithm was implemented in MatLab. To verify the effectiveness of the developed code, 9 simulated specimens, and three concrete specimens were used. To study the mesh dependency, meshes of 5cm x 5cm and 2.5cm x 2.5cm were used. To display the tomograms, three representations were applied: color matrices; and contours with 1 and 100 interpolations. The proposed algorithm was able to generate tomograms for well-conditioned overdetermined linear systems with a high degree of sparsity. It was possible to create tomograms representing the internal structure of the studied elements. The results were best characterized by contour lines with 100 interpolations. The mesh dependency was analyzed, and smaller mesh elements generated more detailed tomograms. Ultrasonic tomography in concrete has a great potential to be used to identify non-homogeneities in concrete structures.

Keywords: concrete, non-destructive assessment, ultrasonic pulse velocity, tomography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Componentes de uma onda.....	20
Figura 2 - Esquema da onda longitudinal.....	21
Figura 3 - Esquema da onda transversal.....	21
Figura 4 - Esquema da onda Rayleigh.....	22
Figura 5 - Esquema do equipamento utilizado no ensaio de propagação de pulso ultrassônico.....	24
Figura 6 - Esquema de funcionamento de um elemento piezoelétrico.....	24
Figura 7 - Efeito do arranjo molecular do cristal no deslocamento resultante, arranjo desordenado (esquerda) e arranjo ordenado (direita).....	25
Figura 8 - Esquema de transdutor convencional.....	26
Figura 9 - Ensaio de propagação de pulso ultrassônico em concreto.....	27
Figura 10 - Tipos de leitura conforme posição dos transdutores.....	28
Figura 11 - Hidratação do concreto X VPU para a) primeiras idades e b) até 91 dias.....	29
Figura 12 - Procedimento de aferição das medidas de VPU.....	32
Figura 13 - Resultado obtido por Reginato et al. (2017) para alguns pilares.....	32
Figura 14 - Ilustração do processo tomográfico em pilares de concreto.....	34
Figura 15 – Tomograma obtido para uma seção do pilar de concreto.....	34
Figura 16 – Corpos de prova utilizados no estudo.....	35
Figura 17 - Leituras realizadas no estudo. a) Arranjo um, b) arranjo dois, c) arranjo três, d) arranjo quatro, e) arranjo cinco.....	36
Figura 18 - Resultados obtidos para os arranjos 4 (a) e 5 (b), para transdutores de 54kHz (1) e 250 kHz (2).....	36
Figura 19 – Corpo de prova Bentonprisma 2.....	37
Figura 20 - Tomograma referente ao Betonprisma 2.....	38
Figura 21- Nós primários, secundários e conexões discretizadas.....	38
Figura 22 - Exemplo de corpo-de-prova utilizado por Perlin (2019).....	39
Figura 23 - Tomogramas obtidos para corpo-de-prova com bloco de EPS de 3cm x 10cm x 10cm. a) Método de rede, b) Método de pulso retilíneo.....	40
Figura 24. Esquema do problema físico que rege a tomografia.....	41
Figura 25 - Esquema do problema físico que rege a tomografia ultrassônica.....	42
Figura 26 - Representação de sistemas sobredeterminados. À esquerda um sistema consistente, e à direita um sistema inconsistente.....	45
Figura 27 - Pulso ultrassônico em elemento de concreto discretizado.....	45
Figura 28 - Diagrama do processo de implementação computacional.....	48
Figura 29 – Elemento linear e uma de suas seções internas.....	49
Figura 30– Discretização da seção do corpo em elementos de comprimento dx e altura dy	50
Figura 31– Domínio de estudo com elementos de malha enumerados.....	51
Figura 32– Posicionamento dos transdutores.....	51
Figura 33 a) Possíveis trechos de leitura em um elemento discretizado. b) exemplo de numeração de leituras em um elemento.....	53
Figura 34 – Pontos de interseção entre o percurso do pulso ultrassônico e a grade da malha.....	54
Figura 35 - Interseção entre retas verticais e horizontais.....	55
Figura 36 - Vetor de pontos de interseção calculado.....	56
Figura 37– Vetor interseção para uma leitura.....	57
Figura 38– Esquema de alocação dos trechos de leitura.....	57
Figura 39– Representação do vetor solução em mapa de cores.....	59
Figura 40 - Apresentação do vetor solução em mapa de contornos.....	60
Figura 41– Corpo-de-prova virtual base.....	61

Figura 42– Perspectiva do corpo de prova com descontinuidade e distribuição de velocidades de pulso em cada elemento para fatia central.....	62
Figura 43 – Fatia central de corpos de prova virtuais com descontinuidades de 5cm x 5cm x 5cm na seguinte ordem: centrada, canto superior direito, canto inferior esquerdo, diagonal principal e centrada rotacionada.....	62
Figura 44– Fatia central de corpos-de-prova virtuais com descontinuidades de 2.5cm x 2.5cm x 2.5cm na seguinte ordem: centrada, canto superior direito, canto inferior esquerdo e diagonal principal.....	63
Figura 45– Corpo-de-prova virtual discretizado em elementos de malha de 5cm x 5cm (esquerda) e 2.5cm x 2.5cm (direita).....	63
Figura 46– Formas de leitura simuladas para malha de 5cm x 5cm: horizontal (esquerda), vertical (centrada) e horizontal vertical (direita).	64
Figura 47– Elaboração do vetor leituras.....	65
Figura 48 - Corpo de prova de concreto com tubulação de esgotamento sanitário de PVC 10 cm	66
Figura 49 -Corpo de prova de concreto com tubulação de água fria de PVC de 5 cm	66
Figura 50 -Corpo de prova de concreto com bloco de EPS de 7,5cm x 7,5cm x 7,5cm.....	66
Figura 51 - a) Materiais utilizados; b) Equipamentos utilizados para mistura.....	67
Figura 52 - Ensaio de abatimento de tronco cone	68
Figura 53 - Formas dos corpos de prova com descontinuidades. a) Tubulação PVC 10 cm; b) Tubulação PVC 5 cm; c) Bloco EPS.....	68
Figura 54 - Moldagem e cura dos corpos de prova. a) corpos de prova frescos; b) exemplo de concretagem por camadas; c) corpos de prova em cura úmida	69
Figura 55 - Corpos de prova após cura. a) Tubulação PVC 10 cm; b) Tubulação PVC 5 cm; c) Bloco EPS.....	70
Figura 56 - Corpos de prova após tratamento superficial.....	71
Figura 57 - Discretização de malha nos CPs de concreto. a) Malha de 5cm x 5cm e seções. b) malha de 2.5cm x 2.5cm.....	72
Figura 58 - Arranjo para ensaio de propagação de pulso ultrassônico.....	72
Figura 59– Trajetórias de leitura discretizadas para malha de 5cm x 5cm no corpo de prova simulado. (a) leituras horizontais, (b) leituras verticais e (c) leituras compostas.....	74
Figura 60– Trajetórias de leitura discretizadas para malha de 2,5cm x 2,5cm no corpo de prova simulado. (a) leituras horizontais, (b) leituras verticais e (c) leituras compostas.....	74
Figura 61– Tomogramas para CP m50hv50ce. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.....	79
Figura 62– Tomogramas para CP m50hv50ie (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.....	79
Figura 63 – Tomogramas para CP m50hv50sd. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.....	80
Figura 64– Tomogramas para CP m50hv50dp. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.....	80
Figura 65– Tomogramas para CP m50hv50ced. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.....	81

Figura 66 – Tomogramas para CP m50hv25ce. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.....	81
Figura 67 – Tomogramas para CP m50hv25ie. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.....	82
Figura 68 – Tomogramas para CP m50hv25sd. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.....	82
Figura 69– Tomogramas para CP m50hv25dp. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.....	83
Figura 70 - Relação entre descontinuidade e trechos de leitura. a) trechos de leitura discretizado, b) tomograma representado.	84
Figura 71 – Tomogramas para CP m25hv50ce. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.....	85
Figura 72 – Tomogramas para CP m25hv50ie. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.....	85
Figura 73– Tomogramas para CP m25hv50sd. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.....	86
Figura 74 – Tomogramas para CP m25hv50dp. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.....	86
Figura 75 – Tomogramas para CP m25hv50ced. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.....	87
Figura 76 – Tomogramas para CP m25hv25ce. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.....	87
Figura 77 – Tomogramas para CP m25hv25ie. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.....	88
Figura 78 – Tomogramas para CP m25hv25sd. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.....	88
Figura 79 – Tomogramas para CP m25hv25dp. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.....	89
Figura 80 - Trajetórias de leitura discretizadas para malha de 5cm x 5cm no corpo de prova de concreto. (a) leituras horizontais, (b) leituras verticais e (c) leituras compostas.....	91
Figura 81 - Trajetórias de leitura discretizadas para malha de 2,5cm x 2,5cm no corpo de prova de concreto. (a) leituras horizontais, (b) leituras verticais e (c) leituras compostas.....	91
Figura 82 - Tomogramas resultantes para diferentes seções do corpo de prova de concreto com tubulação de PVC de 10cm. a) seção, b) tomograma para malha de 5cm x 5cm, e c) tomograma para malha de 2,5 x 2,5cm.....	93
Figura 83 - Tomogramas resultantes para diferentes seções do corpo de prova de concreto com tubo bloco de EPS de 7,5cm x 7,5cm x 7,5cm. a) seção, b) tomograma para malha de 5cm x 5cm, e c) tomograma para malha de 2,5 x 2,5cm.....	95
Figura 84 - Tomogramas resultantes para diferentes seções do corpo de prova de concreto com tubulação de água fria de 5 cm de diâmetro. a) seção, b) tomograma para malha de 5cm x 5cm, e c) tomograma para malha de 2,5 x 2,5cm.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de correção para o transdutor de 54 kHz	31
Tabela 2 - Traço de concreto utilizado na confecção de corpos de prova	67
Tabela 3- Ordem, condicionamento e esparsidade para cada matriz de distâncias	75
Tabela 4- Vetores tempo de percurso para malha de 5 cm x 5cm e leituras horizontais em μ s	76
Tabela 5- Vetores tempo de percurso para malha de 5 cm x 5cm e leituras verticais em μ s...	76
Tabela 6- Vetores tempo de percurso para malha de 5 cm x 5cm e leituras compostas em μ s	77
Tabela 7- Ordem, condicionamento e esparsidade para cada matriz de distâncias nos CPs de concreto	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 CONCRETO.....	17
2.2 ULTRASSOM NO CONCRETO.....	19
2.2.1 Propriedades das ondas mecânicas	19
2.2.2 Ensaio de propagação de pulso ultrassônico.....	23
2.2.3 Fatores que influenciam na velocidade de pulso	28
2.2.4 Aplicações do ultrassom na representação de estruturas internas de peças de concreto	31
2.3 TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA	40
2.3.1 Princípio físico da tomografia ultrassônica.....	41
2.3.2 Características do sistema de equações de tomografia ultrassônica.....	44
3 METODOLOGIA.....	47
3.1 DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL	48
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: ELABORAÇÃO DE DADOS SINTÉTICOS...	60
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: ELABORAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO.....	65
3.4 NOMENCLATURA DOS CORPOS DE PROVA	70
3.5 PROCEDIMENTO DE LEITURAS NOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO	71
4 RESULTADOS	73
4.1 MATRIZES DE DISTÂNCIA	73
4.1.1 Matrizes Obtidas.....	73
4.1.2 Esparsidade e Condicionamento.....	75
4.2 VETORES DE TEMPO SINTÉTICOS	76
4.3 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE TOMOGRAMAS.....	78
4.3.1 Malha de 5cm x 5cm	78
4.3.2 Malha de 2.5cm x 2.5cm	84
4.4 TOMOGRAMAS RESULTANTES EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ...	90
4.3.1 Matrizes Obtidas.....	90
4.3.2 Esparsidade e Condicionamento.....	91
4.3.2 Tomogramas obtidos em CPs de concreto	92
5 CONCLUSÕES.....	98

6. REFERÊNCIAS	100
APÊNDICE I – VETORES DE TEMPO SINTÉTICOS PARA MALHA DE 2,5cm x 2,5 cm	105

1 INTRODUÇÃO

Em 02 de setembro de 2018, o Museu Nacional do Brasil, vinculado a Universidade Federal do Rio de Janeiro, teve aproximadamente 75% de seu acervo afetado por um incêndio. Peças únicas foram avariadas com o fogo, levando a perdas de valor histórico inestimáveis (KELLNER, 2019).

Tecnologias digitais de reconstrução da estrutura interna dos artefatos danificados têm sido um grande aliado no processo de restauração e identificação das peças remanescentes. Com o auxílio da tomografia computadorizada por Raios X, foi possível reconstruir tridimensionalmente as estruturas internas preservadas da múmia de Sha-Amun-em-su. Ainda, o crânio de Luzia, fóssil humano mais antigo da América do Sul, tem sido remontado a partir do material que não foi perdido com o fogo, e Impressão 3D com base em tomogramas pré-existentes (MOTTA; DA SILVA, 2020).

Mesmo com aplicações tão recentes, a necessidade de reconhecer a estrutura interna de corpos sem afetar sua integridade é um problema que tem sido estudado desde o início de 1900 (DE PIERRO, 1990). Aliada aos avanços tecnológicos na computação, a tomografia computacional tornou a capacidade de observar estruturas internas de objetos uma realidade cada vez mais concreta (PERLIN, 2015).

Na engenharia civil, em particular, o interesse no estudo da integridade de estruturas de concreto é foco de inúmeras pesquisas (HAACH; RAMIREZ, 2016; PESSÔA et al., 2016; REGINATO et al., 2017). O concreto é um material compósito constituído por um meio aglomerante, água, agregados e aditivos. Este material é amplamente difundido na engenharia civil por conta de sua excelente resistência à água, trabalhabilidade e baixo custo (METHA; MONTEIRO, 2008).

Mesmo com os avanços no controle tecnológico, a presença de anomalias é tópico recorrente no debate sobre estruturas de concreto. Diferenças de homogeneidade, degradação com o tempo, exposição a ambientes nocivos, fissuração por carregamento, presença de vazios ou corpos estranhos são algumas das patologias que podem ser desenvolvidas nessas estruturas (METHA; MONTEIRO, 2008; PESSOA, 2011; SOUZA; RIPPER, 2009).

Nesse sentido, Evangelista (2002) pontua que ensaios não destrutivos podem ser utilizados para caracterização de propriedades e anomalias em estruturas de concreto sem afetar seu aspecto visual ou integridade. Em particular, o ensaio de propagação de pulso ultrassônico pode ser utilizado para estimativa da resistência à compressão através de curvas de correlação, e monitoramento da integridade interna das estruturas (LOPES, 2014; REGINATO et al., 2017).

Mesmo sendo capaz de avaliar as condições gerais de homogeneidade no concreto, o método de propagação de pulso ultrassônico sozinho não é capaz de localizar e dimensionar discontinuidades internas nas estruturas. Diante disso, aliar o ensaio tradicional de propagação de pulso ultrassônico a um algoritmo de reconstrução tomográfica é uma alternativa para a solução do problema (PERLIN, 2011).

A tomografia ultrassônica é um método de ensaio não destrutivo que alia um algoritmo tomográfico às leituras de ultrassom em diversas direções para reconstituir seções internas de corpos de concreto. O método de ensaio por tomografia ultrassônica tem sido aplicado na inspeção de estruturas de concreto para avaliação de sua integridade (CHOI, 2016; HAACH; RAMIREZ, 2016; PERLIN, 2015).

Nessa vertente, pesquisas têm sido constantemente direcionadas para o estudo, desenvolvimento e melhoria dos algoritmos tomográficos para inspeção por pulso ultrassônico. Implementação do algoritmo, avaliação de métodos de solução para o sistema de equações tomográfico, alternativas para alocação de dados, e solução para simplificações pré-estabelecidas são alguns dos tópicos de estudo (HAACH; RAMIREZ, 2016; PERLIN, 2015; PERLIN; PINTO, 2019).

Assim, o objetivo principal dessa pesquisa é desenvolver uma ferramenta computacional aliando técnicas tomográficas ao ensaio de propagação de pulso ultrassônico para identificar não homogeneidades internas em estruturas de concreto.

Nessa vertente, são objetivos específicos dessa pesquisa:

- Desenvolver corpos de prova simulados e realizar leituras sintéticas de velocidade de pulso para verificar o funcionamento do algoritmo proposto;
- Caracterizar os sistemas tomográficos desenvolvidos em termos de solução, assim como esparsidade e condicionalidade dos sistemas de equações associados;
- Verificar diferentes formas gráficas de apresentação do tomograma desenvolvido.

- Desenvolver corpos de prova de concreto com diferentes descontinuidades para validar o funcionamento do algoritmo proposto na elaboração de tomogramas em estruturas de concreto.
- Disponibilizar a ferramenta computacional desenvolvida baixo licença GNU-GPL em um repositório de códigos computacionais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar de haver uma vasta bibliografia acerca da aplicação da tomografia ultrassônica para inspeção de estruturas de concreto, trabalhos relacionados com a implementação do algoritmo de reconstrução tomográfica em si ainda são limitados. Detalhes dos problemas tomográficos, sejam eles relacionados à conceitualização do fenômeno físico envolvido, arcabouço matemático de implementação, ou características dos métodos de solução são exemplos de parâmetros pouco difundidos na literatura, e que em conjunto dificultam a replicabilidade dos algoritmos disponíveis.

Em termos de aplicação da tomografia ultrassônica em concreto pelo meio técnico, a primeira dificuldade encontrada pelo profissional responsável pela inspeção é o acesso às ferramentas de reconstrução em aplicações de código aberto. Durante a revisão, não foram encontrados algoritmos suficientemente detalhados para implementação.

Ciente disso, o presente trabalho se propõe a reunir as informações sobre o fenômeno físico e a base matemática envolvida no processo tomográfico, e implementar um algoritmo para tomografia ultrassônica que seja suficientemente detalhado, e de fácil reprodução. Dessa forma, entende-se a contribuição do trabalho tanto para o desenvolvimento do método em academia, quanto para a disseminação da tomografia ultrassônica no meio técnico.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é composto por cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e próximas etapas.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e o estado da arte em relação a tomografia ultrassônica. São estudados os conceitos gerais sobre o concreto como material, o comportamento de ondas mecânicas e o ensaio de propagação de pulso ultrassônico, a tomografia ultrassônica e seus fundamentos matemáticos. Ainda, são apresentados resultados

de pesquisas acerca da aplicação do ensaio de propagação de pulso ultrassônico e tomografia ultrassônica para inspeção em concreto.

No capítulo 3, é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho. Este capítulo se divide em cinco partes: 1 - implementação do algoritmo para elaboração de tomogramas a partir de leituras do ensaio de propagação de pulso ultrassônico; 2 – elaboração de corpos de prova sintéticos para verificação do algoritmo proposto; 3 - elaboração de corpos de prova de concreto com descontinuidades para validação do algoritmo proposto; 4 – nomenclatura dos corpos de prova; 5 – procedimento de leituras nos corpos de prova de concreto.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos neste trabalho. São exibidos os vetores de tempo de propagação do pulso referentes aos corpos de prova sintéticos, a avaliação dos sistemas lineares desenvolvidos, e os tomogramas obtidos pela solução dos sistemas. Ainda, são avaliados os resultados obtidos para os corpos de prova de concreto.

Por fim, o capítulo 5 é responsável por apresentar conclusões desta pesquisa e as propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão tratados os conceitos essenciais que fundamentam o trabalho desenvolvido. Inicia-se com um estudo sobre o concreto como material de construção, características de homogeneidade e patologias internas de interesse do trabalho. Em seguida, apresenta-se um estudo sobre ondas ultrassônicas e a aplicação dos ensaios de propagação de pulso ultrassônico no concreto. Por último, este capítulo é encerrado com um estudo acerca dos princípios da tomografia ultrassônica, e sua fundamentação matemática.

2.1 CONCRETO

A difusão e uso do concreto como material de construção no mundo pode ser explicada por três razões principais. A primeira se refere à sua excelente ação diante a água, diferente do aço e madeira. De fato, algumas das mais antigas aplicações do concreto são em estruturas de controle e armazenamento de água. A segunda está relacionada com a trabalhabilidade do concreto *in-situ* e sua capacidade de ser moldado em diferentes formatos no estado fresco. E por fim, o terceiro motivo é o baixo custo do material e a rápida disponibilidade de matéria-prima para aplicação (METHA; MONTEIRO, 2008).

O concreto pode ser definido como qualquer produto ou massa gerado a partir da utilização de um meio cimentante. A sua forma mais comum é constituída de cimento, água, agregados (gráudo e miúdo) e aditivos (NEVILLE; BROOKS, 2013). Entretanto, muitas pesquisas têm sido apresentadas com intuito de desenvolver concretos com os mais diversos tipos de materiais como forma de melhorar alguma de suas propriedades (DIAS, 2017; PRAKASH et al., 2019; SANTOS; MOREIRA; SILVA JUNIOR, 2020). No escopo deste trabalho, será apenas trabalhado o concreto simples.

O concreto simples é um material heterogêneo composto de duas fases: a pasta de cimento hidratada e os agregados. Dessa forma, suas características são regidas pelas propriedades das duas fases, bem como a interface entre elas. De acordo com Metha e Monteiro (2008), muitas das características do concreto não seguem a regra das misturas, um exemplo é

o rompimento elástico da pasta e dos agregados, enquanto o concreto final apresenta comportamento inelástico antes de romper.

Em relação aos componentes do concreto, o meio aglomerante é composto de cimento hidráulico e água. A reação de hidratação do cimento é predominantemente exotérmica e tem como produto principal a formação de Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H). Estes silicatos são estáveis em ambiente aquoso e promovem a característica aglomerante. Tal reação é responsável pelo endurecimento da pasta e ganho da resistência mecânica no produto final (ROMANO et al., 2018). A pasta de cimento constituinte do concreto compõe a parte mais homogênea desse material.

Os agregados do concreto são tratados como materiais de enchimento inertes por não entrarem em reações complexas com a água. Em geral, os agregados compreendem areia de sílica natural (agregado miúdo), pedregulho e pedra britada procedentes de jazidas naturais. Estes agregados derivam de rochas de vários tipos, e a maioria delas é composta de vários minerais. Para concretos simples, o agregado miúdo contém partículas que variam de $75\mu\text{m}$ a $4,75\text{mm}$, enquanto o agregado graúdo varia entre $4,75\text{mm}$ a 50mm (METHA; MONTEIRO, 2008).

Os agregados utilizados na produção do concreto compõem a parte mais heterogênea do material, chegando a compreender aproximadamente $\frac{3}{4}$ do seu volume. A heterogeneidade do material final pode ser explicada pelas propriedades mineralógicas dos agregados, diferentes granulometrias e, inclusive, diferentes concentrações no meio (METHA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Além da heterogeneidade natural do material, anomalias podem se apresentar como descontinuidades internas no concreto endurecido. Aqui entende-se anomalia interna como a presença de corpos estranhos no interior da estrutura de concreto, alocados propositalmente (como bainhas metálicas, dutos, elementos de fixação) ou oriundos de problemas de adensamento, lançamento ou execução (SOUZA; RIPPER, 2009).

Muitos estudos têm sido desenvolvidos acerca da identificação de anomalias internas em estruturas de concreto, em especial as não propositalmente devido ao seu alto risco de comprometimento da estabilidade da estrutura (HAACH; RAMIREZ, 2016; PINTO DA SILVA FILHO et al., 2011; REGINATO et al., 2017). Nessa vertente, a próxima seção trata dos fundamentos de aplicação das ondas ultrassônicas como alternativa para detecção de não homogeneidades em concreto.

2.2 ULTRASSOM NO CONCRETO

Os métodos acústicos são utilizados desde a antiguidade para determinação da integridade de materiais. Peças com defeitos produziam sons diferentes de peças íntegras, o que auxiliava povos antigos na inspeção de vidro, madeira, cerâmica e metal (SANTIN, 2003).

Esses métodos, embora úteis, garantiam apenas informações grosseiras e, em muitos casos, insuficientes sobre a integridade do material. O desenvolvimento de testes mais sofisticados só foi possível depois da descoberta do efeito piezoelétrico em 1880 por Pierre e Jacques Curie. Os irmãos descobriram que amostras de alguns cristais produziam corrente elétrica quando submetidos a uma pressão. Em 1881, Gabriel Lippmann confirmou a existência do efeito piezoelétrico reverso (UCHINO, 2010).

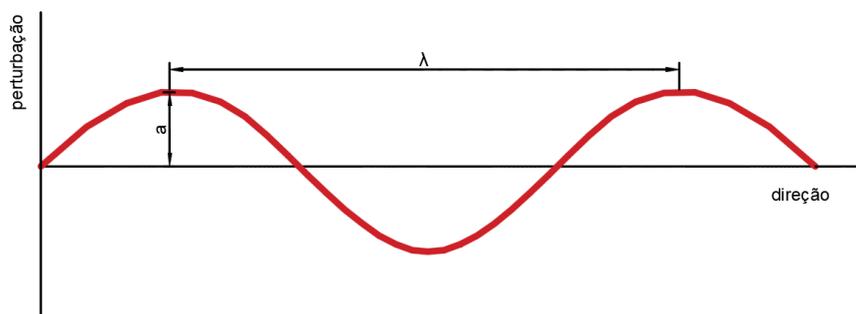
Em 1929, na Rússia, Sergei Sokolov demonstrou que cristais de quartzo podem emitir ondas vibracionais em materiais. Ele comprovou que ondas ultrassônicas podem ser utilizadas em alternativa aos raios X. Em 1942, D. O. Sproule desenvolveu o primeiro aparelho de ultrassom com resultados satisfatórios na inspeção em materiais forjados (DOMÍNGUEZ ORTEGA, 2013; SANTIN, 2003).

Com a Segunda Guerra Mundial, aceleraram-se as pesquisas acerca dos ensaios de propagação ultrassônica na inspeção de concreto para avaliação da integridade das estruturas. Na Inglaterra na década de 1950, desenvolveu-se o primeiro aparelho de ultrassom para inspeção em estruturas de concreto. A partir da década de 1960 o ensaio de ultrassom começou a sair dos laboratórios e ser efetivamente utilizado em campo. Desde então é um ensaio difundido e consolidado na área técnica para determinação de falhas em estruturas de concreto, com seus procedimentos de ensaio padronizados em inúmeros países (MALHOTRA; CARINO, 2004).

2.2.1 Propriedades das ondas mecânicas

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas, e consistem em perturbações nas partículas atômicas ou moleculares de uma substância em torno de sua posição de equilíbrio. Seu comportamento pode ser definido através de suas componentes: frequência (f), comprimento de onda (λ) e amplitude (a) (SANTIN, 2003). Um esquema de onda mecânica é ilustrado na Figura 1.

Figura 1- Componentes de uma onda



Fonte: Elaborada pelo autor.

A velocidade (V) de propagação de um pulso pode ser relacionada com a frequência e o comprimento de onda da forma

$$f = V/\lambda \quad (1)$$

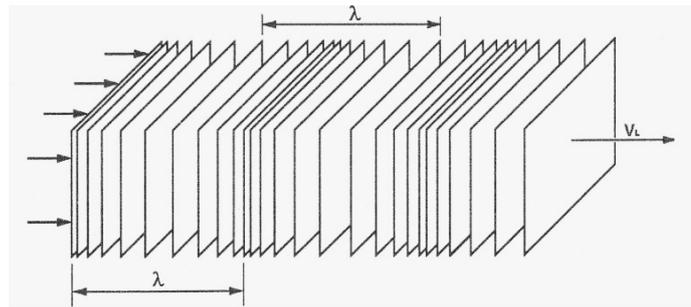
em que V é a velocidade de pulso ultrassônico.

A amplitude do movimento da onda diminui com o tempo devido à perda de energia. A velocidade e coeficiente de atenuação de uma onda são constantes e características das propriedades do meio.

Com base no modo que as partículas se deslocam, as ondas ultrassônicas podem ser classificadas em quatro tipos: ondas longitudinais, ondas transversais, ondas superficiais e ondas de Lamb. Apenas os três primeiros tipos de onda são utilizados para inspeção em concreto. A aplicação de ondas de Lamb se dá apenas para chapas muito finas (MALHOTRA; CARINO, 2004; SANTIN, 2003).

As ondas longitudinais, ondas de compressão ou ondas P, são caracterizadas pelo movimento das partículas do material na mesma direção do deslocamento da onda. Durante sua propagação são produzidas regiões de compressão e de tração no material. Um esquema de onda longitudinal pode ser observado na Figura 2 (METHA; MONTEIRO, 2008).

Figura 2 - Esquema da onda longitudinal



Fonte: Adaptado de Santin (2003).

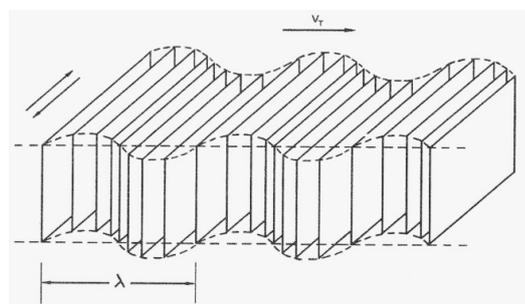
Para as ondas de compressão se propagando por um material homogêneo e isotrópico, a velocidade de propagação V_L pode ser descrita como

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

em que V_L é a velocidade de propagação da onda longitudinal, E é o módulo de elasticidade dinâmico do meio, ρ é a densidade do material e ν é o coeficiente de Poisson dinâmico do meio.

As ondas transversais, ondas de cisalhamento, ou ondas S, são caracterizadas pelo movimento das partículas na direção perpendicular ao deslocamento da onda. Durante sua propagação são produzidos esforços cortantes no material. Um esquema de onda transversal pode ser observado na Figura 3 - Esquema da onda transversal. (METHA; MONTEIRO, 2008).

Figura 3 - Esquema da onda transversal



Fonte: Adaptado de Santin (2003).

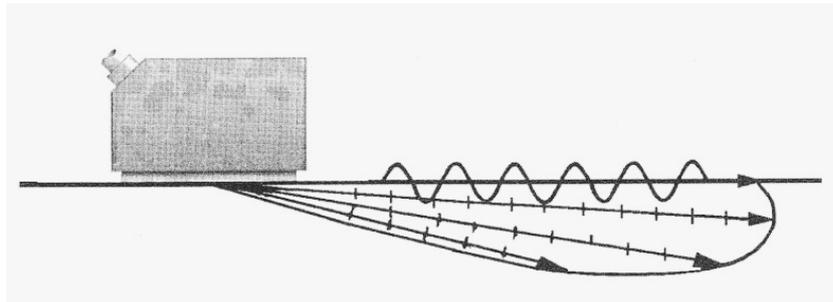
A velocidade de propagação de ondas transversais V_r são menores que as das ondas longitudinais, e ao se propagarem por um material homogêneo e isotrópico pode ser definida como

$$V_r = \frac{G}{\rho} \quad (3)$$

em que V_r é a velocidade de propagação da onda, G o módulo de elasticidade cisalhante.

As ondas superficiais, ou ondas Rayleigh são caracterizadas pelo movimento elíptico de suas partículas muito próximo à superfície com um plano paralelo à direção de propagação. Uma onda Rayleigh provoca apenas uma fina região de oscilação, com penetração na ordem de um comprimento de onda (MALHOTRA; CARINO, 2004). Um esquema de onda de Rayleigh pode ser observado na Figura 4 - Esquema da onda Rayleigh..

Figura 4 - Esquema da onda Rayleigh



Fonte: Adaptado de Santin (2003).

A relação entre as velocidades de propagação de ondas superficiais V_s e das ondas de cisalhamento V_C pode ser expressa como

$$\frac{V_C}{V_s} = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (4)$$

em que V_C é a velocidade de propagação da onda cisalhante, V_s é a velocidade de propagação da onda superficial.

2.2.2 Ensaio de propagação de pulso ultrassônico no concreto

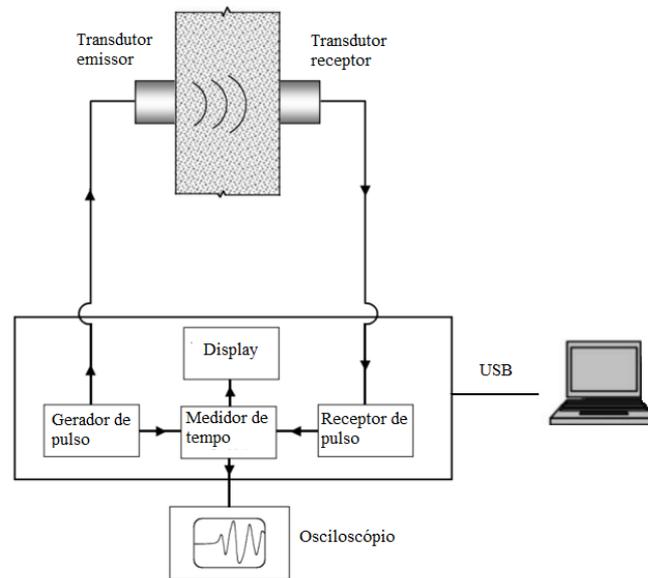
O ensaio de propagação de pulso ultrassônico no concreto consiste em criar uma onda de frequência ultrassônica em um ponto na superfície da estrutura de concreto. Essa onda então se propaga pelo meio até um segundo ponto e o tempo (t) de percurso é calculado. Conhecendo a distância (d) entre os pontos, a velocidade de pulso ultrassônico (VPU) pode ser calculada como

$$VPU = \frac{d}{t} \quad (5)$$

Por terem as maiores velocidades de propagação, as ondas longitudinais são as mais comuns para inspeção em concreto. Para a maioria das configurações de ensaio, equipamentos portáteis estão disponíveis para determinação do tempo de percurso do pulso ultrassônico em estruturas de concreto (MALHOTRA; CARINO, 2004).

De forma geral, o equipamento para o ensaio de propagação de pulso ultrassônico é composto por: um transdutor emissor, responsável por introduzir o pulso ultrassônico no concreto; um transdutor receptor, responsável por registrar a chegada da onda; um circuito gerador de pulso, responsável por gerar o pulso ultrassônico e armazenar o tempo inicial de percurso; um circuito receptor de pulso, responsável por armazenar as informações de chegada do pulso; um circuito de medida de tempo; e um display de tempo. Algumas versões mais avançadas do equipamento também contam com um osciloscópio e conexão USB com computadores (ASSEF et al., 2009; MALHOTRA; CARINO, 2004). Um esquema dos principais componentes de um equipamento de ensaio de propagação de pulso ultrassônico pode ser observado na Figura 5 - Esquema do equipamento de propagação de pulso.

Figura 5 - Esquema do equipamento utilizado no ensaio de propagação de pulso ultrassônico

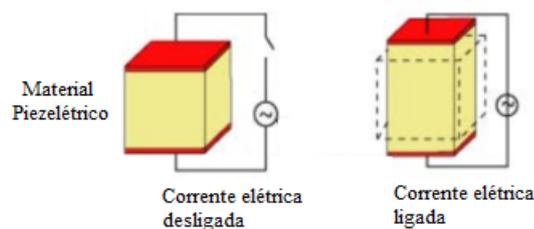


Fonte: Adaptado de Malhotra (2004).

A geração e recepção de onda no ensaio de propagação de pulso ultrassônico pode ser concebida de diferentes maneiras: efeito piezoelétrico, choques ou atritos mecânicos, excitação térmica, processos eletrostáticos, processos eletrodinâmicos, ou processos magnetostrictivos (SANTIN, 2003). O efeito piezoelétrico é o mais usual na geração de ondas e faz parte do escopo desse trabalho.

Ondas ultrassônicas geradas por efeito piezoelétrico são obtidas através da utilização de cristais especiais. Os cristais piezoelétricos geram corrente elétrica quando deformados mecanicamente. De forma inversa, uma corrente elétrica alternada gera vibrações no cristal, produzindo deformações mecânicas (UCHINO, 2010). O esquema de funcionamento de um elemento piezoelétrico pode ser observado na Figura 6 - Esquema de efeito piezoelétrico..

Figura 6 - Esquema de funcionamento de um elemento piezoelétrico

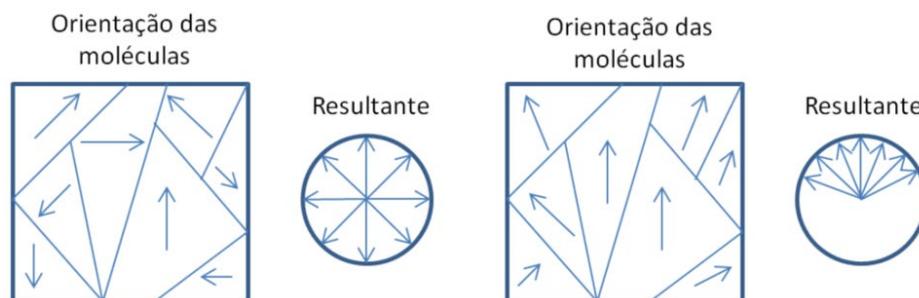


Fonte: Adaptado de Andreucci (2011).

O cristal mais comum utilizado na produção de ondas ultrassônicas é o cristal de quartzo (SiO_2), que ocorre de forma espontânea na natureza. As moléculas de dióxido de silício presentes nos cristais de quartzo naturais apresentam arranjo não ordenado. Quando aplicado um campo elétrico para alongar ou encurtar a estrutura do cristal, se as moléculas estiverem ordenadas em várias direções, as deformações também ocorrerão em múltiplas direções. Dessa forma, a superposição das deformações pode desencadear um efeito total nulo, não produzindo alterações de tamanho, e interferindo em sua capacidade piezelétrica (PERLIN, 2015; SANTIN, 2003).

A organização da estrutura molecular de cristais de quartzo em um arranjo melhor ordenado gera uma resultante global de deformações num sentido específico. Quanto mais alinhadas as moléculas no cristal, melhor será a deformação obtida no objeto. Para a construção de transdutores, deve-se cortar cristais o mais próximo possível da orientação pretendida (PERLIN, 2015). A Figura 7 exemplifica o fenômeno.

Figura 7 - Efeito do arranjo molecular do cristal no deslocamento resultante, arranjo desordenado (esquerda) e arranjo ordenado (direita)



Fonte: Adaptado de Perlin (2015).

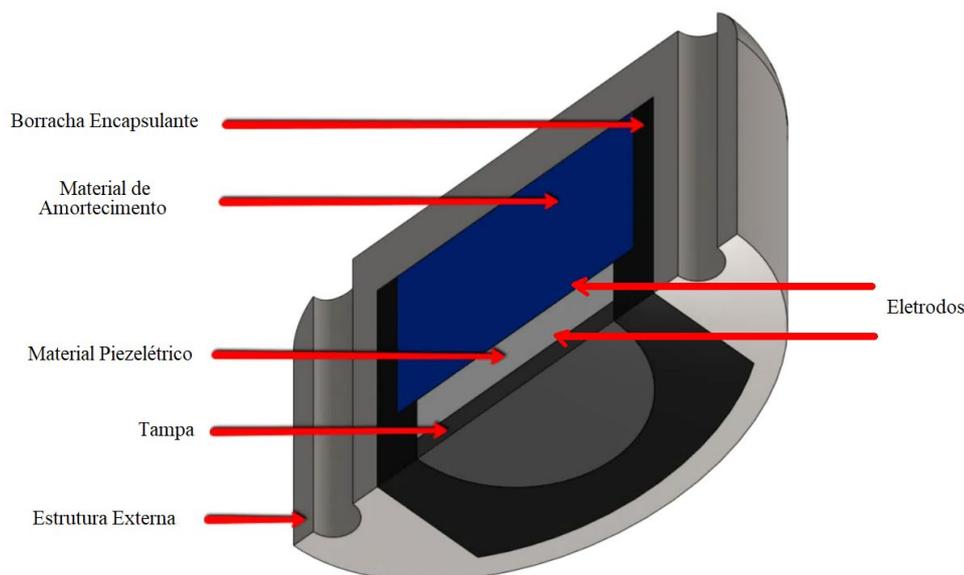
A propriedade que relaciona a reação do cristal frente ao pulso elétrico é a frequência fundamental de ressonância, que depende de sua geometria e material. A amplitude de vibração do cristal tem seu máximo quando a corrente alternada excitante tem frequência igual a sua frequência de ressonância. A frequência fundamental de ressonância pode ser calculada por

$$F_r = \frac{V_{som}}{2e} \quad (6)$$

em que F_r é a frequência fundamental de ressonância do cristal, V_{som} é a velocidade do som no cristal, e e é a espessura do cristal.

A espessura do material piezoelétrico deve ser ajustada para que a frequência de vibração do cristal seja a pretendida do transdutor. Ainda, a frequência dos sinais elétricos recebidos pelo transdutor deve ser a mesma do cristal para melhores resultados. A estrutura de um transdutor convencional pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de transdutor convencional



Fonte: Adaptado de Onscale (2020).

O cristal de quartzo é o material piezoelétrico mais utilizado devido sua disponibilidade e trabalhabilidade, mas diversos materiais com propriedades piezoelétricas podem ser utilizados na construção de transdutores, como o sulfato de lítio (Li_2SO_4), o titano-zirconato de chumbo (PZT) e os materiais cerâmicos polarizados (SANTIN, 2003).

O ensaio de propagação de pulso ultrassônico no Brasil é preconizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 8802:2019 Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (2019). A NBR preconiza que o ensaio deve ser realizado com transdutores de frequência nominal acima de 24 kHz.

Uma vez escolhidos os transdutores, estes devem ser calibrados de acordo com o fabricante. Os transdutores devem ser posicionados na superfície de leitura e a interface de contato deve ser preenchida com uma camada fina de material acoplante. O acoplante tem função de retirar o ar entre a superfície de leitura e o transdutor. A NBR 8802:2019 indica utilização de graxas de silicone ou mineral e vaselina como acoplantes em concretos de superfície lisa.

Em seguida, as dimensões do corpo a ser ensaiado devem ser aferidas. Finalmente, efetua-se a leitura do tempo necessário para o pulso ultrassônico percorrer a distância entre os transdutores. A Figura 9. mostra um ensaio sendo realizado em um corpo-de-prova de concreto.

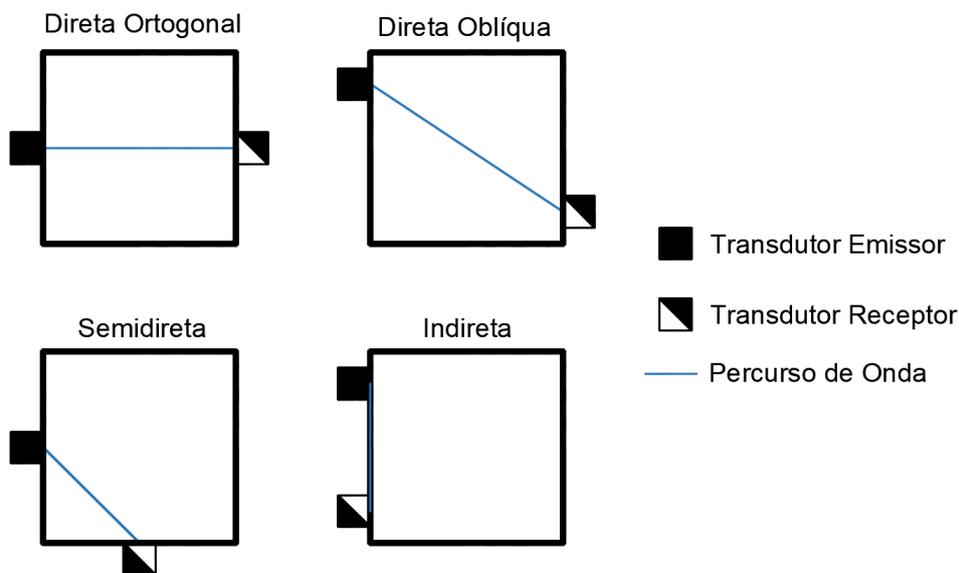
Figura 9 - Ensaio de propagação de pulso ultrassônico em concreto



Fonte: Acervo do autor.

A NBR 8802:2019 preconiza que três tipos principais de leitura diferentes podem ser realizados no ensaio de acordo com o posicionamento dos transdutores e faces disponíveis. São elas: leituras diretas (ortogonais e oblíquas), semidireta e indireta. Da Silva (2020) pontua que, quando possível, as leituras diretas devem ser preferíveis por aumentarem a captação da energia do pulso. Na Figura 10 se ilustra um esquema com os tipos de leitura possíveis.

Figura 10 - Tipos de leitura conforme posição dos transdutores



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.3 Fatores que influenciam na velocidade de pulso

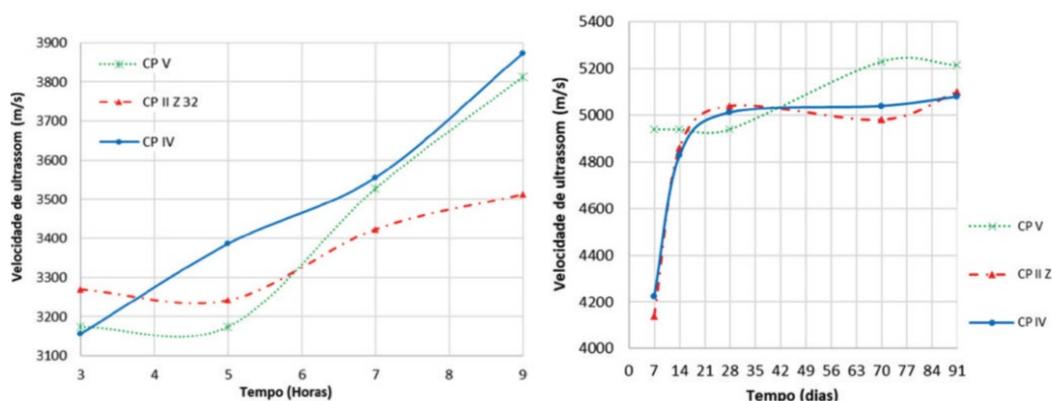
Muitas pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de entender como os diversos aspectos componentes do ensaio de propagação de pulso ultrassônico no concreto podem afetar a VPU aferida. Essa subseção é dedicada a apresentação de alguns desses fatores e sua influência no ensaio.

Em geral, a velocidade de pulso na pasta é menor que a dos agregados, então Lin (2007) pontua que a VPU é altamente influenciada pela quantidade de agregado graúdo presente na mistura. A velocidade de pulso do agregado graúdo será a mesma da rocha que lhe deu origem. O aumento da dimensão máxima do agregado (DMA) graúdo também influencia nos resultados do ensaio. É indicado que a frequência do transdutor utilizado seja ajustada para que o comprimento de onda seja maior que a DMA (MALHOTRA; CARINO, 2004; MOHAMMED; RAHMAN, 2016).

Godinho et al. (2020) pontuam que o tipo de cimento apresenta influência na VPU para concretos com mesma mistura, e que a VPU apresenta crescimento em leituras até 91 dias. Nesta pesquisa, os autores confeccionaram corpos-de-prova de concreto com cimentos do tipo CP V, CP II Z 32 e CP IV. A VPU do concreto no estado fresco foi aferida nas 9 primeiras horas. O concreto endurecido foi aferido diariamente até completos 91 dias de idade. O

resultado obtido aponta que o crescimento da VPU não acompanha proporcionalmente a taxa de hidratação do concreto.

Figura 11 - Hidratação do concreto X VPU para a) primeiras idades e b) até 91 dias



Fonte: (GODINHO et al., 2020)

Pela análise da Figura 11, pode se observar que para concretos nas primeiras idades, os elaborados com cimentos CP IV e CP V apresentam maiores taxas de crescimentos de VPU. Para idades superiores, acima de 42 dias, concretos compostos por cimento CP V apresentam maiores taxas de crescimento de VPU, enquanto os concretos com CP II Z32 e CP IV mantêm taxas similares de crescimento.

Lin et al. (2007) mostram que da mesma forma que o aumento do fator água/cimento diminui a resistência à compressão do concreto, a velocidade de pulso ultrassônico também cai, assumindo que não há outras mudanças na mistura.

No seu estudo, da Silva et al. (2013) analisaram blocos e vigas de concreto com diferentes proporções de mistura. Os autores aferiram a interferência da umidade superficial do elemento na VPU, e concluíram que a medida se aumentava a umidade superficial do elemento estudado, a velocidade de pulso também aumentava.

Godinho et al.(2020) estudaram a influência da saturação do concreto na VPU. Os autores confeccionaram corpos-de-prova de concreto em diferentes misturas, de dimensões cilíndricas de 10cm x 20 cm, e cúbicas de 25cm x 25cm x25cm. Chegou-se à conclusão de que o concreto saturado apresenta sempre velocidade de pulso ultrassônico maior que a do concreto seco, o que se explica pelo preenchimento dos vazios internos do concreto por água.

A velocidade de pulso ultrassônico no aço é 1.4 a 1.7 vezes maior que a do concreto. Assim, é de se esperar que a presença de armadura aumente a velocidade de pulso no concreto armado. Caso se deseje realizar o ensaio de propagação de pulso ultrassônico em estruturas de

concreto armado, deve-se sempre optar por leituras em regiões com pouca ou nenhuma presença de aço. Caso não seja possível contornar as barras, principalmente em estruturas fortemente armadas, fatores de correção devem ser aplicados na VPU aferida (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Em teoria, tanto o tamanho do percurso quanto a frequência do transdutor do ensaio não devem influenciar na velocidade de pulso. Entretanto, percursos muito pequenos (abaixo de 10cm) tendem a modificar a VPU por conta da natureza não homogênea do concreto. Ainda, percursos muito extensos devem ser evitados uma vez que o pulso pode não ter energia suficiente para atravessar do emissor ao receptor (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Em geral, o nível de carregamento no concreto não vai influenciar na sua VPU. Entretanto, caso a estrutura seja submetida a um nível de carregamento que leve a ocorrência de microfissuração no concreto, sua velocidade de pulso pode diminuir consideravelmente (MALHOTRA; CARINO, 2004).

As observações pontuadas por Malhotra (2004) são reiteradas por Kencanawati et al. (2018). Os autores ensaiaram vigas de concreto armado de seção 15cm x 10cm para concretos de 25 MPa, 35 MPa e 45 MPa. Carregamento foi aplicado às vigas, e as leituras de velocidade de pulso ultrassônico realizadas ao se atingir 0%, 25% e 50% do carregamento de ruptura. Em todos os casos estudados, a velocidade de pulso ultrassônico no concreto diminuiu com o aumento da fissuração nas vigas.

Durante a execução do ensaio de propagação de pulso ultrassônico, a superfície de contato entre a peça de concreto e o transdutor deve ser a melhor possível. A NBR 8802 (2019) preconiza que a superfície de concreto deve ser previamente tratada com lixa caso seja necessária regularização. Uma fina camada de gel acoplante deve sempre ser utilizada tanto para proteção do transdutor, quanto para melhoria da superfície de contato.

Ainda, o fator humano pode influenciar nos resultados obtidos, uma vez que a pressão de contato entre o transdutor e a estrutura é de inteira responsabilidade do operador. A não conformidade de algum, ou a combinação desses fatores deve poder gerar uma leitura de velocidade de pulso ultrassônico incorreta.

Os transdutores devem ser posicionados a uma distância mínima maior ou igual ao comprimento de onda utilizado pelo pulso em relação às bordas do elemento. O não cumprimento desse critério pode levar a efeitos de borda indesejáveis e interferências nas leituras (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Perlin (2015) notou em seus estudos que em leituras diretas ortogonais, conforme se aumenta o ângulo de leitura, a velocidade de pulso ultrassônico sofre ligeira modificação. O

autor utilizou uma parede de concreto com 100cm x 100cm x 20cm para estudos angulares com o transdutor de 54 kHz. Fixando um ponto referência de velocidade V_0 , modificou-se a posição do transdutor receptor a formar ângulos de 0° a 70° e para cada ângulo foi computado um valor V_i de VPU. Pela análise dos seus resultados, o autor percebeu que até ângulos de $46,69^\circ$ existe uma influência considerável nos resultados de VPU. Assim, Perlin desenvolveu a tabela de correlação entre o ângulo de leitura oblíqua e ortogonal que é descrita na Tabela 1.

Tabela 1 - 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

Fonte: Adaptado de Perlin (2015).

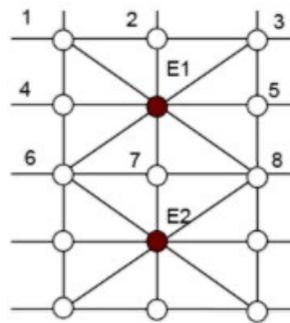
2.2.4 Aplicações do ultrassom na representação de estruturas internas de peças de concreto

Nesta subseção será apresentada uma revisão das aplicações do ensaio de propagação de pulso ultrassônico para identificação da estrutura interna de peças de concreto. Serão abordados trabalhos que utilizam tanto da aplicação tradicional do método quanto da tomografia ultrassônica para avaliação.

O método tradicional de inspeção por pulso ultrassônico consiste na determinação da velocidade de propagação de pulso ultrassônico entre pontos numa malha pré-estabelecida na estrutura de concreto. Este procedimento é utilizado por Reginato et al. (2017) para monitorar o estado de conservação de pilares de concreto.

A metodologia de ensaio segue o descrito na Figura 12. O transdutor emissor é locado no ponto E1 e as leituras são realizadas com os receptores locados em cada um dos pontos ao seu redor, num total de 8 leituras para cada posição do emissor. O transdutor emissor é movido para o ponto E2 e novas leituras são aferidas. O procedimento é realizado até completar o mapeamento do pilar. As leituras foram realizadas com transdutores de 54 kHz.

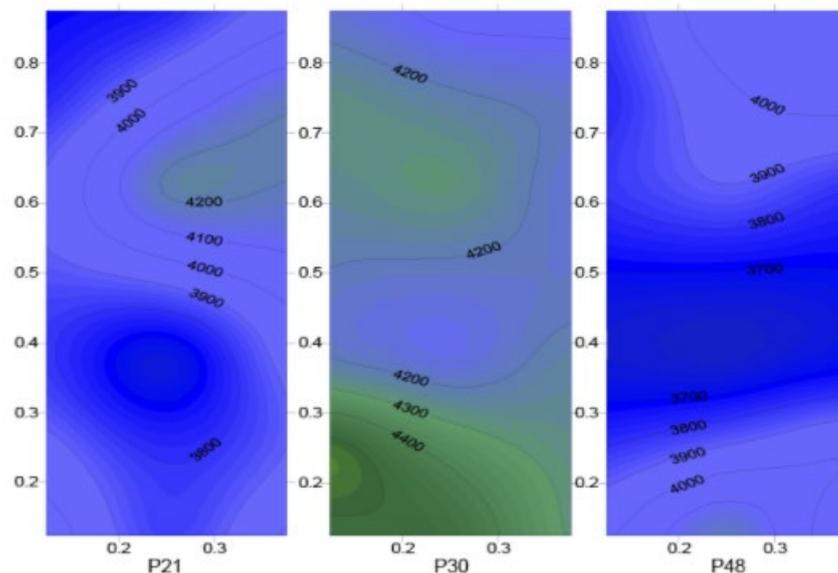
Figura 12 - Procedimento de aferição das medidas de VPU



Fonte: (REGINATO et al., 2017)

Uma vez aferidas as velocidades de pulso nos pilares, foram geradas imagens para visualização dos resultados (Figura 13). As imagens foram construídas através de um *software* de geração de curvas de nível, tendo como dados de entrada as velocidades de pulso ultrassônico aferidas e as dimensões do corpo estudado.

Figura 13 - Resultado obtido por Reginato et al. (2017) para alguns pilares



Fonte: (REGINATO et al., 2017)

Pela análise da Figura 13, pode-se notar que o pilar P30 é o que apresenta regiões com maiores velocidades de pulso, atingindo 4400m/s. Em algumas áreas do pilar P21 a velocidade de 4200m/s também é atingida, entretanto apenas numa pequena parte do domínio, o que indica possíveis falhas de concretagem. O pilar P48 apresenta velocidades menores em todo seu corpo

e uma faixa de fragilidade próxima ao centro. Em termos gerais, foi possível avaliar a homogeneidade do concreto no interior dos pilares.

Os autores evidenciam a potencialidade do ensaio de propagação de pulso ultrassônico para avaliação da homogeneidade de estruturas de concreto. Ademais, pontuam que o ensaio de VPU pode ser utilizado também para a avaliação da presença de corpos estranhos e vazios. Por fim, confirmam que o emprego do ensaio pode ser utilizado como indicador para monitorar o estado de conservação de estruturas de concreto.

Além do método tradicional de inspeção, a aplicação de procedimentos tomográficos apresenta-se como forma de abranger a atuação dos ensaios de propagação de pulso e qualidade dos resultados. Nessa vertente, Choi e Popovics (2015) constituem o grupo de pioneiros no estudo da aplicação de métodos de reconstrução tomográfica aliados ao ensaio de propagação de pulso ultrassônico para inspeção em concreto. Neste trabalho é apresentado um método para geração de tomogramas em elementos de concreto através de leituras de pulso ultrassônico.

O procedimento experimental contou com a elaboração de um pilar de concreto de 91,4cm x 71,1cm. Antes da concretagem, um prisma de EPS de 7,6cm x 7,6cm x 22,8 localizado no centro, e um prisma de concreto rompido de mesmas dimensões e localizado próximo a borda inferior, foram alocados no elemento para simular falhas internas. As leituras de tempo de propagação de pulso foram realizadas com transdutor de frequência nominal de 50 kHz. A malha de inspeção foi discretizada em elementos de 5 cm. O comprimento do trajeto percorrido pela onda também foi computado.

Em posse das trajetórias de leitura e dos tempos de percurso os autores aplicam o algoritmo de reconstrução algébrica (ART) para geração dos tomogramas. Nesse método, o tempo de percurso da onda ultrassônica no meio pode ser expresso como

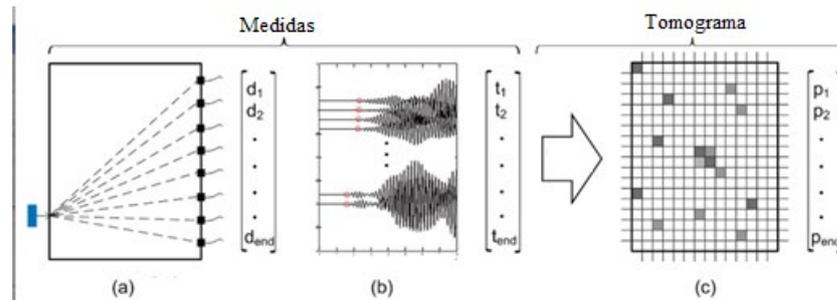
$$F_r = \frac{V_{som}}{2e} t_i = \sum_{j=1}^M p_j * d_{i,j} \quad (i = 1 \dots N), \quad (7)$$

em que $d_{i,j}$ é a matriz que armazena a distância percorrida pelo pulso em cada elemento da malha discretizada, p_j é o vetor de vagarosidades utilizado para construção do tomograma e t_i é o vetor que armazena os tempos de percurso lidos.

A solução do sistema descrito foi realizada através da aproximação do vetor de vagarosidades por *back-projection* utilizando a matriz transposta normalizada. O processo de

cálculo do vetor p_j é realizado de forma iterativa até a convergência. A Figura 14 ilustra o procedimento tomográfico.

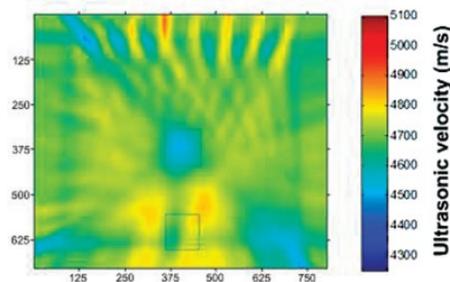
Figura 14 - Ilustração do processo tomográfico em pilares de concreto



Fonte: Adaptado de CHOI; POPOVICS, 2015.

O tomograma resultante obtido para uma seção pode ser observado na Figura 15. A figura mostra com precisão a localização do bloco de EPS centrado no elemento de concreto. Entretanto, a posição do prisma de concreto rompido não foi possível de identificar pelo método. A dificuldade de encontrar fissuras em concreto através do processo tomográfico se dá pela pequena influência da fissura na velocidade de propagação do pulso, quando comparado à presença do bloco de EPS.

Figura 15 – Tomograma obtido para uma seção do pilar de concreto



Fonte: Adptado de Choi (2015).

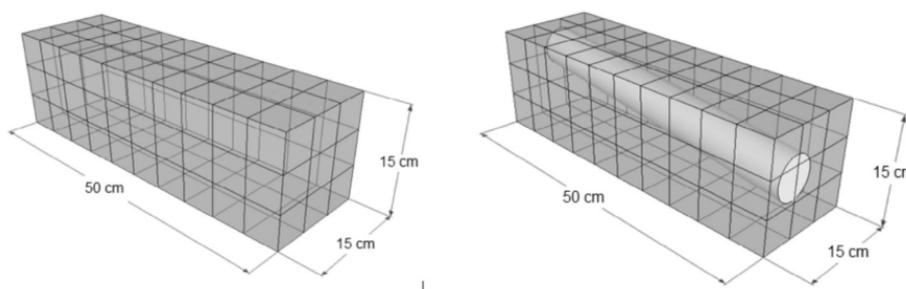
Os resultados demonstram que a metodologia proposta de reconstrução tomográfica aliada ao ensaio de propagação de pulso ultrassônico é uma alternativa para o estudo de seções internas em estruturas de concreto. Elementos com velocidade de pulso diferentes do concreto, como o EPS, foram localizados. Regiões de fissuração ainda apresentam difícil identificação.

Haach e Ramirez (2016) estudaram mutuamente, tanto o método de inspeção tradicional quanto o método tomográfico para avaliação da integridade de elementos de concreto. Os

autores propõem o comparativo entre a eficiência dos dois métodos para detecção de falhas em corpos de concreto.

Para isso, quatro prismas de concreto nas dimensões de 15cm x 15cm x 50cm foram moldados. Um cilindro de EPS de 6cm de diâmetro por 50cm de comprimento foi inserido nos blocos como forma de simular tubulações passando pelo concreto. A Figura 16 descreve os corpos-de-prova utilizados.

Figura 16 – Corpos de prova utilizados no estudo

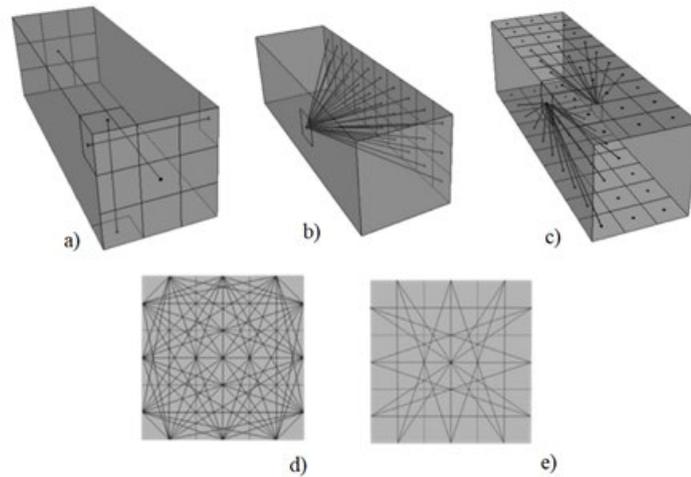


Fonte: (HAACH; RAMIREZ, 2016).

As leituras de ultrassom foram realizadas em cinco arranjos distintos. Nos três primeiros arranjos utilizou-se o método tradicional e nos dois últimos a reconstrução tomográfica. No arranjo 1, o método de leituras ortogonal foi realizado em cada uma das seis faces. No arranjo 2, leituras ortogonais e oblíquas foram realizadas. No arranjo 3, leituras semidiretas foram conduzidas. Nos arranjos 4 e 5, leituras foram realizadas em todas as seções do corpo. No arranjo 4, leituras semidiretas e diretas foram realizadas, enquanto no último caso, apenas as leituras diretas. A Figura 17 contém as formas de leitura avaliadas.

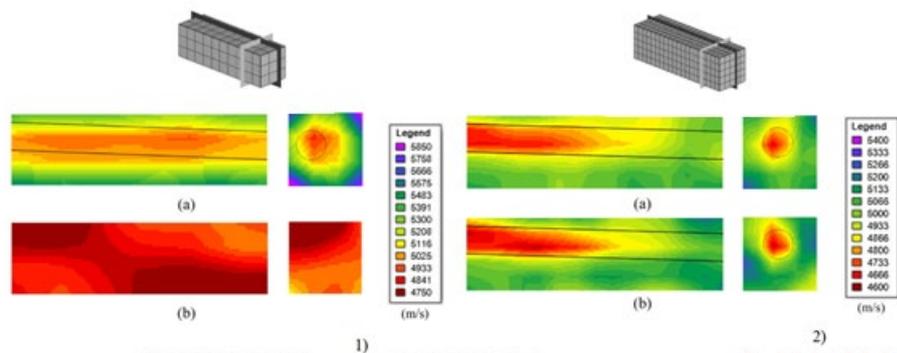
Os resultados obtidos para os métodos tradicionais de inspeção, expressos nos arranjos 1, 2 e 3 não foram capazes de identificar o cilindro de EPS em nenhuma das formas de leitura. Os resultados obtidos para os arranjos 4 e 5 realizados com transdutores de 54kHz e 250kHz estão contidos na Figura 18.

Figura 17 - Leituras realizadas no estudo. a) Arranjo um, b) arranjo dois, c) arranjo três, d) arranjo quatro, e) arranjo cinco



Fonte: Adaptado de Haach (2016).

Figura 18 - Resultados obtidos para os arranjos 4 (a) e 5 (b), para transdutores de 54kHz (1) e 250 kHz (2)



Fonte: Adaptado de Haach (2016).

Pela análise dos tomogramas percebe-se que para o transdutor de 54 kHz o arranjo 4 foi o que trouxe os melhores resultados, entretanto as imagens não são totalmente satisfatórias. A dimensão e localização do cilindro de EPS não se apresentam exatas. O arranjo 5 não foi capaz de trazer informações sobre a seção interna do material. Esse resultado é proveniente da combinação da menor quantidade de leituras associado ao transdutor de baixa frequência.

Em contrapartida o transdutor de 250 kHz trouxe melhores resultados, o que é explicado por sua maior frequência, que diminui seu comprimento de onda e melhora a detecção de discontinuidades. Os tomogramas foram capazes de identificar o cilindro de EPS em tamanho e localização. O arranjo 5 gerou tomogramas tão satisfatórios quanto o arranjo 4. A maior

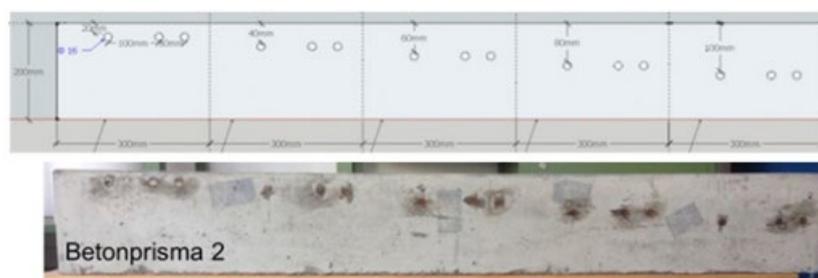
vantagem do arranjo 5 é a menor quantidade de leituras necessárias. Os autores lembram que a maior dificuldade enfrentada na utilização da tomografia ultrassônica é a quantidade de leituras necessárias para que se obtenha um bom tomograma.

Por fim, a tomografia ultrassônica obteve resultados mais convenientes que os métodos tradicionais de inspeção por ultrassom. A análise da quantidade de transdutores utilizadas mostra que nem sempre uma maior quantidade de leituras gera melhores tomogramas.

A tomografia ultrassônica também pode ser utilizada como alternativa aos métodos magnéticos para localização de armadura em elementos de concreto, como apresentado por Vonk e Taffe (2018). O objetivo do trabalho foi avaliar a aplicabilidade da tomografia ultrassônica na identificação de armaduras próximas a superfície de estruturas de concreto.

Foram utilizados quatro diferentes corpos-de-prova de concreto com barras de aço de diferentes diâmetros localizadas próximas a sua superfície. As leituras de pulso ultrassônico foram realizadas com transdutores de frequência nominal de 40 kHz. Um dos corpos-de-prova utilizado (Betonprisma 2 – barras de 16 mm) pode ser observado na Figura 19.

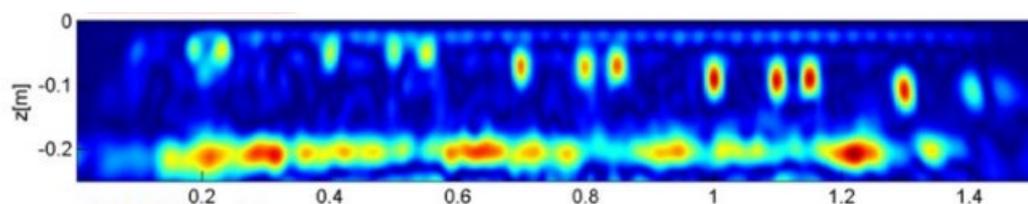
Figura 19 – Corpo de prova Betonprisma 2



Fonte: (VONK; TAFFE, 2018).

O tomograma obtido para o corpo-de-prova em questão pode ser observado na Figura 20. Percebe-se que a presença da maioria das barras pode ser identificada. Apenas a primeira barra da zona 1 e a última barra da zona 5 não foram representadas pelo tomograma. Os autores salientam que isso não indica problema de leituras ou aparelho, e a não detecção das barras pode ser explicada pelos efeitos de interferência de borda.

Figura 20 - Tomograma referente ao Betonprisma 2



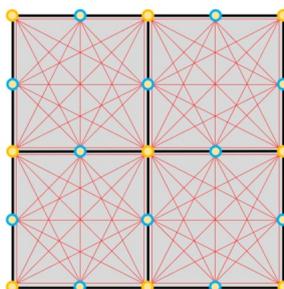
Fonte: (VONK; TAFFE, 2018)

Os resultados mostram que barras de aço de diâmetro superior a 16mm puderam ser detectadas no interior do concreto. A acurácia na localização estimada da barra de aço em ± 3 cm torna o método magnético mais atrativo. Entretanto, acerca da profundidade de detecção, o método ultrassônico pode ser utilizado no intervalo entre 5cm e 18cm. Tal intervalo é superior ao dos métodos magnéticos, com detecção de barras a no máximo 6 cm de profundidade. Os autores concluem que a avaliação da presença de barras de aço no concreto por tomogramas ultrassônicos é viável.

Em outro estudo, Perlin e Pinto (2019) pontuam que tomogramas desenvolvidos até então tem como limitação a consideração de que a trajetória do pulso ultrassônico se propaga como uma linha reta no interior de materiais homogêneos. Entretanto, sabe-se que ondas mecânicas tendem a desviar descontinuidades no interior do concreto.

O objetivo do estudo foi utilizar a técnica de traçado de raios, baseada na teoria de redes para considerar o trajeto não linear das ondas ultrassônicas no meio e avaliar como essa modificação afeta os tomogramas finais. Para isso, cria-se uma rede de nós interconectados de pulso ultrassônico. Os vértices dos elementos de malha são os nós principais. Nos centros dos vértices dos elementos, nós secundários são criados e conexões entres os nós de cada elemento são estabelecidas. A Figura 21 mostra a malha discretizada. O algoritmo de Dijkstra é utilizado para calcular o menor tempo necessário para um pulso ir do emissor ao receptor atravessando um meio.

Figura 21- Nós primários, secundários e conexões discretizadas

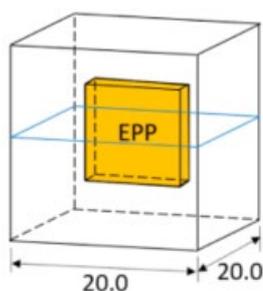


Fonte: Adaptado de Perlin (2019).

Uma vez discretizada a malha, a rede de nós é construída. O algoritmo de Dijkstra é executado, levando à trajetória de percurso mais rápida para cada pulso. Considerando que o modelo inicial é de um material homogêneo, o resultado será dado em linhas de propagação retas. Executa-se o algoritmo tomográfico para obtenção das vagarosidades em cada elemento. Então procede-se novamente o algoritmo de Dijkstra e o processo continua até a convergência.

No procedimento experimental foram utilizados dados de leituras de propagação de pulso ultrassônico para três corpos-de-prova. A Figura 22 mostra um corpo de prova de concreto de 20cm x 20cm x 20cm com incorporação de EPS de 3cm x 10cm x 10cm. As leituras de velocidade de pulso foram realizadas com transdutor de 250 kHz.

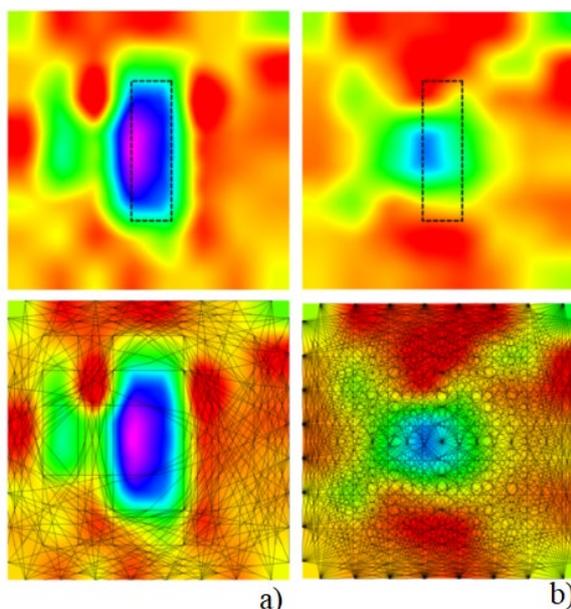
Figura 22 - Exemplo de corpo-de-prova utilizado por Perlin (2019)



Fonte: Adaptado de Perlin (2019)

Na Figura 23 estão apresentados os resultados para o tomograma de uma seção do corpo-de-prova em questão. Na Figura 23 (a) em cima é representado o tomograma no qual percebe-se que foi possível identificar a presença da descontinuidade, seu tamanho e localização no CP. Logo abaixo, podem ser vistos os caminhos de pulso calculados pelo algoritmo de Dijkstra. Em (b), os resultados obtidos pelo método tradicional de tomogramas com pulso retilíneo, com uma má representação do defeito simulado.

Figura 23 - Tomogramas obtidos para corpo-de-prova com bloco de EPS de 3cm x 10cm x 10cm. a) Método de rede, b) Método de pulso retilíneo



Fonte: Adaptado de Perlin (2019) .

Os autores concluem que a teoria de redes juntamente com o algoritmo de Dijkstra apresentam-se como um refino aos tomogramas tradicionais. A implementação dessa etapa adicional ao processo tomográfico é justificada quando tomogramas de melhor qualidade de representação são necessários para obter corretamente o tamanho e localização de falhas internas em estruturas de concreto.

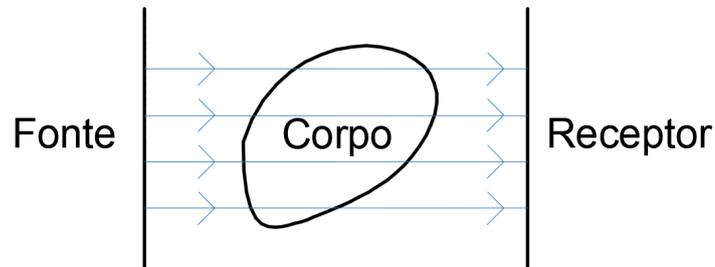
2.3 TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA

A tomografia nasceu pela necessidade do homem em descrever seções internas de corpos sem causar dano a sua integridade. Como exemplo, entender o que existe dentro do corpo vivo sem danificar os tecidos, ou reconstituir a estrutura de um material sem precisar destruí-lo. O problema acerca da reconstrução de imagens a partir de projeções de um corpo, apareceu em diversas áreas, e muitos anos se passaram até que se entendesse que o problema matemático era comum a todas elas (DE PIERRO, 1990).

O esquema do problema físico que rege a tomografia está contido na Figura 24. De forma simplificada o que é emitido pela fonte será aqui referenciado como um sinal, podendo este ser Raios X, ultrassom, ressonância magnética nuclear, entre outros. O sinal emitido percorre o corpo e é recebido no receptor. A diferença entre o sinal que sai da fonte e o que chega no

receptor fornece informações sobre o interior do corpo, por exemplo em termos de fator de atenuação.

Figura 24. Esquema do problema físico que rege a tomografia



Fonte: Adaptado de De Pierro (1990).

Considerando projeções em múltiplas direções diferentes é possível reconstruir as características internas de atenuação do material para cada região no interior do corpo. Esta é a base da tomografia, e considerando o corpo discretizado em elementos infinitesimais pode ser expressa matematicamente como uma integral de linha na forma

$$\Delta S = \int_L d_j * a_j \quad (8)$$

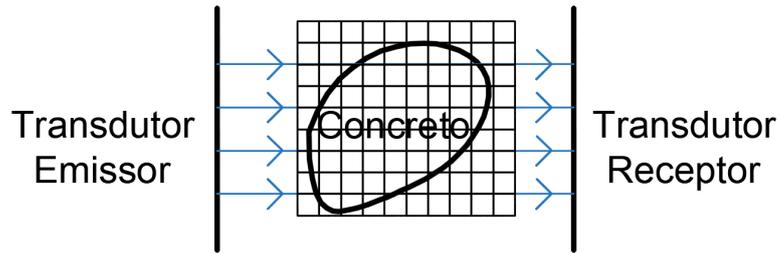
sendo ΔS a diferença entre o sinal emitido e recebido, d_j é a distância percorrida pelo feixe no elemento infinitesimal j , e a_j é a atenuação no elemento.

Logo, o problema tomográfico pode ser descrito como o cálculo das atenuações em cada elemento infinitesimal dentro do corpo, conhecidos os valores de todas as integrais de linha. A subseção a seguir trabalhará detalhes da fundamentação matemática para solução do problema da tomografia ultrassônica em concreto.

2.3.1 Princípio físico da tomografia ultrassônica em concreto.

Partindo do esquema geral do problema físico tomográfico da Figura 24, a tomografia ultrassônica para um elemento de concreto discretizado em elementos internos é representado na Figura 25.

Figura 25 - Esquema do problema físico que rege a tomografia ultrassônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na tomografia ultrassônica no concreto, a diferença entre o sinal emitido e recebido ΔS é justamente o tempo T necessário para o pulso ultrassônico ser emitido do transdutor emissor, atravessar o corpo de concreto e ser recebido no transdutor receptor. A propriedade de atenuação a_j é a resistência que o material tem em relação a velocidade de propagação da onda, e essa pode ser expressa como

$$p = \frac{1}{V} \quad (9)$$

em que p é conhecida como vagarosidade do pulso, e V é a velocidade do pulso ultrassônico.

Os elementos d_j , por sua vez, referem-se a geometria do corpo, e a geometria da malha de discretização deste em elementos menores. Dessa forma, a integral que descreve o tempo de percurso do pulso ultrassônico no concreto pode ser expressa na forma

$$T = \int_e^r p_j * dL_j \quad (10)$$

em que T é o tempo de percurso, p_j é a vagarosidade do pulso no elemento j , e dL_j é a distância percorrida no elemento j .

A integral acima pode ser numericamente aproximada para um somatório através de métodos de quadratura numérica. Para aproximação de $\int_a^b f(x)dx$, a ideia básica é selecionar um conjunto de nós $\{x_0, \dots, x_n\}$ para o intervalo $[a, b]$ (BURDEN; FAIRES, 2011). Então, considerando o polinômio interpolador de Lagrange uma aproximação da função $f(x)$ temos

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i)L_i(x) \quad (11)$$

Em que $L_i(x)$ representa o enésimo polinómio interpolador de Lagrange.

A integral definida no intervalo $[a, b]$ pode ser aproximada pela expressão,

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^b P_n(x)dx = \int_a^b f(x_i)L_i(x)dx = \sum_{i=0}^n a_i f(x_i) \quad (12)$$

em que

$$a_i = \int_a^b L_i(x)dx, \quad \text{para } i = 0, 1, \dots, n \quad (13)$$

assim, a fórmula da quadratura pode ser descrita como

$$\int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=0}^n a_i f(x_i) \quad (14)$$

Aplicando a fórmula de quadratura para o problema tomográfico apresentado, a integral que descreve o tempo de percurso do pulso ultrassônico pode ser aproximada para

$$T = \sum_{j=1}^n p_j * dL_j \quad (15)$$

A eq. (15), descreve o tempo de percurso para uma trajetória de pulso. Para cada leitura k de pulso, até as m leituras totais, a equação pode ser descrita como

$$T_k = \sum_{j=1}^n p_j * dL_{k,j} \quad \text{para } k = 1, \dots, m \quad (16)$$

A eq. (16) pode ser representada na forma matricial como

$$T_m = D_{m,n} * P_n \quad (17)$$

em que m é o número total de leituras de pulso realizadas, n é o número total de elementos discretizados no interior do corpo, D é a matriz de distâncias de ordem $m \times n$, P é o vetor de vagarosidades de ordem n , e T é o vetor de tempos de ordem m .

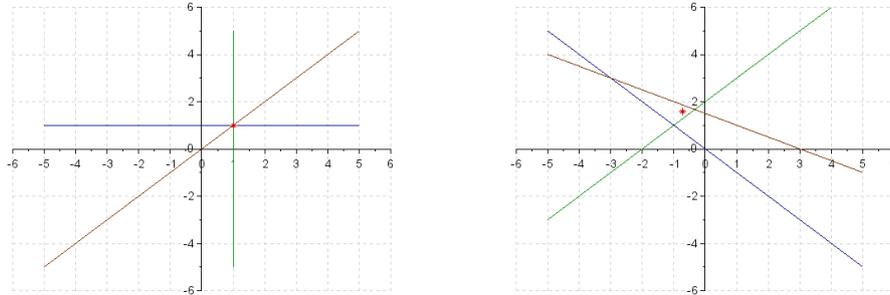
Percebe-se que o vetor T de tempo é obtido através das leituras do ensaio, e a matriz D é calculada através das características geométricas do corpo de concreto e a malha estabelecida. Então, o problema tomográfico é reduzido a resolução do sistema de equações lineares e algébricas descrito pela eq. (16) para determinação do vetor de vagarosidades P .

2.3.2 Características do sistema de equações de tomografia ultrassônica

Existe uma ampla gama de métodos numéricos simples que podem ser utilizados na resolução de sistemas de equações algébricas, de forma geral estes métodos oferecem resultados satisfatórios para sistemas bem condicionados com matrizes quadradas. A solução do sistema de equações do problema tomográfico proposto poderia ser facilmente obtida por métodos simples, entretanto o sistema de equações formado por leituras de ultrassom em concreto é normalmente não quadrado. Somado a isso, algumas das equações geradas pelas leituras de ultrassom podem ser linearmente dependentes, o que pode levar a singularidade do problema (PERLIN, 2011).

A maioria dos sistemas tomográficos gerados a partir de leituras de pulso ultrassônico em estruturas de concreto tem a característica de resultarem em sistemas sobredeterminados (PERLIN; PINTO, 2013). Os sistemas sobredeterminados são sistemas lineares em que o número de equações linearmente independentes é superior ao número de incógnitas. Esses sistemas podem ser divididos em dois grupos de acordo com seu resultado: consistente, caso o conjunto de leituras seja preciso o suficiente, resultando em um único resultado; ou inconsistentes, caso não exista solução adequada para todas as leituras. A Figura 26, mostra o comportamento de sistemas sobredeterminados.

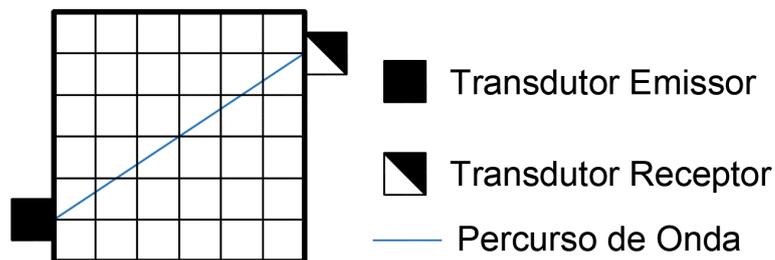
Figura 26 - Representação de sistemas sobredeterminados. À esquerda um sistema consistente, e à direita um sistema inconsistente



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além do comportamento sobredeterminado, o problema tomográfico apresentado tem uma outra peculiaridade em vias da matriz de distâncias $D_{m,n}$, a sua esparsidade. O índice de esparsidade indica a densidade de elementos nulos entre os coeficientes da matriz do sistema. Como pode ser observado na Figura 27, que descreve um pulso ultrassônico em um elemento de concreto, a trajetória do pulso percorre poucos elementos da malha em comparação com a quantidade total de elementos discretizados. Assim, a densidade de elementos nulos nas matrizes de distância acaba sendo alta. (STRÖHER; MENDES; ROMEIRO, 2017).

Figura 27 - Pulso ultrassônico em elemento de concreto discretizado



Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro fator que deve ser considerado no sistema em questão é a sua condicionalidade. Sistemas lineares mal condicionados são aqueles em que pequenas modificações em seus coeficientes resultam em grandes modificações na sua solução (WAGNER, 2015). Um estudo

deve ser realizado acerca de como pequenas modificações no vetor de tempos T_m afeta os tomogramas gerados.

Dessa forma, o método de solução do sistema tomográfico gerado deve levar em consideração as características apresentadas de ser sobredeterminado e esparsos. Além disso, a condicionalidade do problema deve ser avaliada.

3 METODOLOGIA

Este capítulo se divide em cinco seções: 1 - implementação do algoritmo para elaboração de tomogramas a partir de leituras do ensaio de propagação de pulso ultrassônico; 2 – elaboração de corpos de prova sintéticos para verificação do algoritmo proposto; 3 - elaboração de corpos de prova de concreto com descontinuidades para validação do algoritmo proposto; 4 – nomenclatura dos corpos de prova; e 5 – procedimento de leituras nos corpos de prova de concreto.

Pela complexidade do problema de reconstituição tomográfico e a quantidade de cálculos envolvidos, o desenvolvimento de um código computacional para solução é necessário. Este foi implementado em ambiente MatLab devido a seu tratamento amigável de vetores, matrizes e funções matemáticas, seguindo a fundamentação matemática contida na seção 2.3.

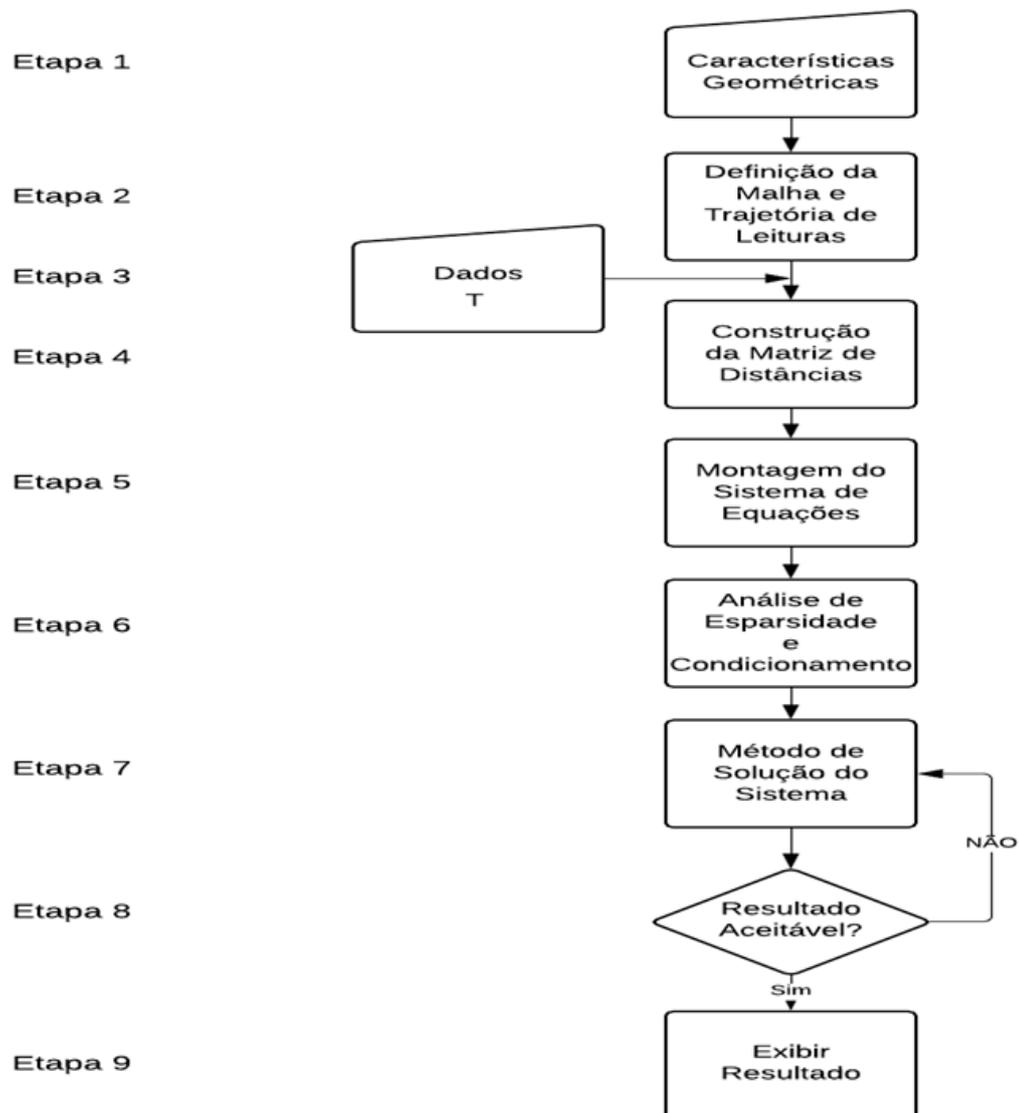
A elaboração de dados sintéticos de leituras de ultrassom para verificação do funcionamento do algoritmo desenvolvido mostra-se essencial. Com a sua utilização, erros relacionados ao ângulo de leitura, habilidade do operador, e condições superficiais da peça ensaiada podem ser minimizados ou excluídos nos cálculos. Assim, com a utilização de dados controlados de entrada para o vetor de tempo T_m , pode-se validar a eficiência do algoritmo em desenvolver tomogramas e avaliar suas limitações.

A elaboração de corpos de prova de concreto com diferentes descontinuidades e posterior ensaio de pulso ultrassônico se faz necessária para validação da capacidade do algoritmo em elaborar tomogramas de estruturas de concreto em condições reais.

3.1 DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para o desenvolvimento computacional, empregou-se a metodologia de cálculo descrita na seção 2.3. A Figura 28 ilustra os passos empregados na implementação. Utilizou-se como entrada de dados as características geométricas do problema para criação da matriz de distâncias $D_{m,n}$, e o vetor de leituras de tempo T_m que pode ser gerado para dados sintéticos, ou obtido pelos ensaios de ultrassom. A saída é o tomograma que representa as características internas da seção do objeto simulado.

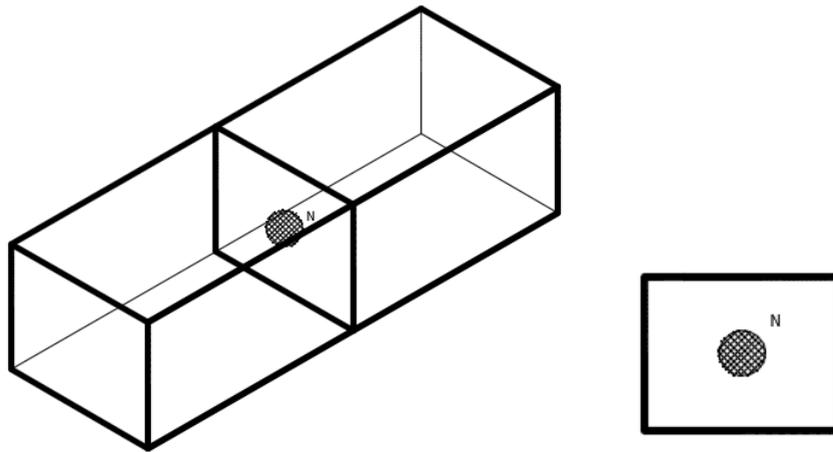
Figura 28 - Diagrama do processo de implementação computacional



Fonte: Elaborada pelo autor.

A etapa 1 refere-se a entrada de dados das características geométricas da seção estudada (altura e largura). Uma vez que a maioria das estruturas de concreto são compostas por elementos estruturais lineares ou superficiais de seção retangular, adotou-se que apenas seções retangulares podem ser utilizadas nessa versão do algoritmo. A Figura 29 mostra um exemplo de elemento linear e uma de suas seções internas.

Figura 29 – Elemento linear e uma de suas seções internas



Fonte: Elaborada pelo autor.

O processo tomográfico requer que o corpo estudado seja discretizado em elementos menores onde as vagarosidades serão computadas. Assim, a etapa 2 da Figura 28, refere-se à definição da malha de discretização do elemento estudado, o posicionamento dos transdutores e a definição das trajetórias de leitura.

Os elementos discretizados internamente no objeto seguem o padrão de identificação por linha e coluna, como na Figura 30. As dimensões dos elementos de discretização nos eixos x e y para caracterização do objeto são expressos por dx e dy , respectivamente. O número de elementos em cada seção do objeto é dado pelo tamanho total da seção dividido pelo tamanho do elemento no eixo, na forma

$$Ne_x = \frac{Lx}{dx} \quad (18)$$

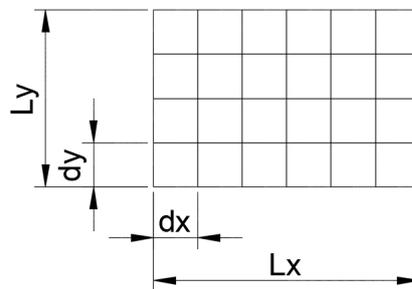
$$Ne_y = \frac{Ly}{dy} \quad (19)$$

Em que Ne_x é o número de elementos discretizados no eixo x , Ne_y é o número de elementos discretizados no eixo y , Lx é o comprimento do objeto no eixo x e Ly é o comprimento do objeto no eixo y .

Como tratam-se de elementos retangulares, a quantidade total de elementos da malha Ne é calculada como

$$Ne = Ne_x * Ne_y \quad (20)$$

Figura 30– Discretização da seção do corpo em elementos de comprimento dx e altura dy .

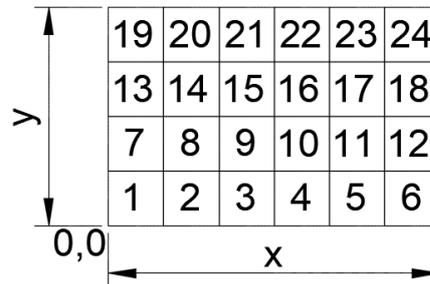


Fonte: Elaborada pelo autor.

A origem do sistema de coordenadas é então posicionada no vértice inferior esquerdo do objeto e os elementos internos são enumerados da esquerda para a direita, e de baixo para cima, em ordem ascendente. A ordem numérica de representação estabelecida é de suma importância, uma vez que ela será a responsável por identificar os elementos discretizados no vetor de vagarosidades S_n e na matriz de distâncias $D_{m,n}$.

Uma vez posicionada a origem de coordenadas e estabelecido o tamanho do corpo em relação aos eixos x e y , o domínio de estudo pode ser descrito como o quadrilátero formado pelos vértices $(0,0)$, $(0, Lx)$, (Lx, Ly) e $(0, Ly)$. A Figura 31 representa o domínio de estudo com a malha discretizada e os elementos devidamente enumerados.

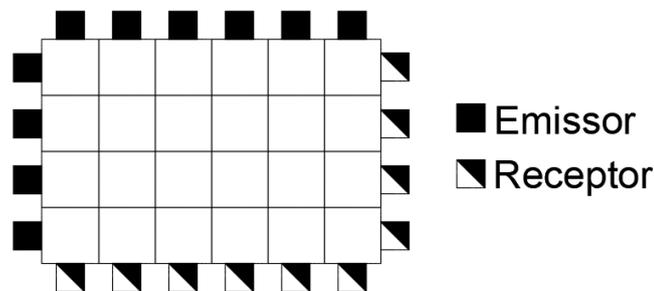
Figura 31– Domínio de estudo com elementos de malha enumerados



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os pontos de leitura são estabelecidos através do posicionamento dos transdutores no espaço. Os transdutores são então posicionados nos pontos médios dos elementos compreendidos nas bordas externas do objeto. Sua nomenclatura segue o padrão: número do transdutor (1, 2, ..., nt), função (emissor ou receptor), e deslocamento da leitura (horizontal ou vertical). Por exemplo, o transdutor 2eh é o segundo transdutor emissor nas leituras horizontais. Um modelo de alocação de transdutores pode ser visto na Figura 32.

Figura 32– Posicionamento dos transdutores



Fonte: Elaborada pelo autor.

As posições dos transdutores em cada uma das faces do corpo podem ser descritas como:

Transdutores posicionados nas arestas superior e inferior do corpo:

$$Pe_{y,x} = 0 \quad (21)$$

$$Pr_{y,x} = Ly \quad (22)$$

$$Pe_{x,x} = \frac{dx}{2} : dx : dx - \frac{dx}{2} = Pr_{x,x} \quad (23)$$

em que $Pe_{y,x}$ é a coordenada no eixo y para os transdutores receptores posicionados na face inferior do corpo ao se realizarem leituras no eixo x ; $Pr_{y,x}$ é a coordenada no eixo y para os transdutores emissores posicionados na face superior do corpo ao se realizarem leituras no eixo x ; $Pe_{x,x}$ e $Pr_{x,x}$ são vetores que armazenam respectivamente as posições dos transdutores emissores e receptores no eixo x ao se realizarem leituras no eixo x .

Transdutores posicionados nas arestas esquerda e direita do corpo:

$$Pe_{x,y} = 0 \quad (24)$$

$$Pr_{x,y} = Lx \quad (25)$$

$$Pe_{y,y} = \frac{dy}{2} : dy : Ly - \frac{dy}{2} = Pr_{y,y} \quad (26)$$

em que $Pe_{x,y}$ é a coordenada no eixo x para os transdutores emissores posicionados na face esquerda do corpo ao se realizarem leituras no eixo y ; $Pr_{x,y}$ é a coordenada no eixo x para os transdutores receptores posicionados na face direita do corpo ao se realizarem leituras no eixo y ; $Pe_{y,y}$ e $Pr_{y,y}$ são vetores que armazenam respectivamente as posições dos transdutores emissores e receptores no eixo y ao se realizarem leituras no eixo y .

A quantidade de transdutores alocados no corpo é a mesma que a quantidade de faces externas nos elementos de borda, e pode ser calculada como

$$N_{trans} = 2Ne_x + 2Ne_y = N_{teh} + N_{trh} + N_{tev} + N_{trv} \quad (27)$$

sendo N_{trans} o número total de transdutores utilizados, N_{teh} é o número de transdutores emissores que se deslocam na horizontal, N_{trh} é o número de transdutores receptores que se deslocam na horizontal, N_{tev} é o número de transdutores emissores que se deslocam na vertical e N_{trv} é o número de transdutores receptores que se deslocam na vertical. Como os corpos são retangulares e o tamanho da malha não varia ao longo de seu comprimento, $Ne_x = N_{teh} = N_{trh}$ e $Ne_y = N_{trv} = N_{tev}$. Definidas as posições e número dos transdutores, as suas coordenadas nos eixos x e y para cada transdutor são salvas no vetor de coordenadas.

Uma vez alocados os pontos de leitura na face do corpo, definem-se os pares de transdutores que irão compor uma leitura. Nessa versão do programa, apenas aferições diretas ortogonais ou oblíquas podem ser computadas. Dessa forma, as leituras serão realizadas apenas

com transdutores em faces opostas (esquerda e direita; superior e inferior). Para composição das trajetórias, um transdutor emissor envia um sinal que é captado por todos os transdutores receptores na face oposta. Dessa forma, a quantidade de leituras em faces opostas é obtida por

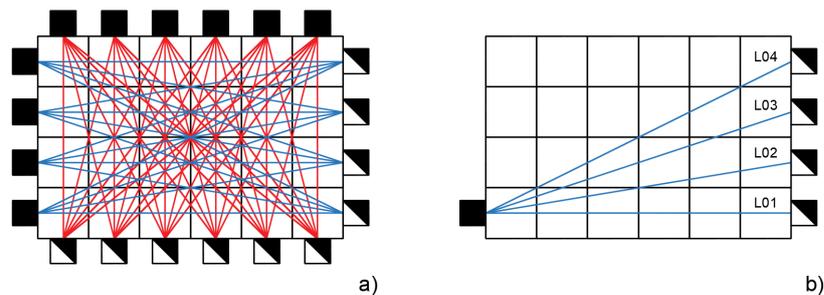
$$Nl_h = Ne_x^2 \quad (28)$$

$$Nl_v = Ne_y^2 \quad (29)$$

em que Nl_h é o número de leituras executadas através do eixo horizontal e Nl_v é o número de leituras executadas através do eixo vertical.

Para cada leitura estabelecida, as coordenadas x e y do emissor e receptor são salvas na matriz de leituras $M_{i,j}$, na forma [Número da leitura, posição x do emissor, posição y do emissor, posição x do receptor, posição y do receptor]. i é o número de linhas da matriz, que vai de 1 ao número total de leituras e j vai de 1 a 5, correspondendo com o número de valores armazenados em cada leitura. Na Figura 33 (a) pode ser observado um esquema com todas os possíveis trechos de leitura em um corpo discretizado. Em azul, as leituras horizontais e em vermelho as verticais. Na Figura 33 (b) existe um exemplo de numeração de leituras.

Figura 33 a) Possíveis trechos de leitura em um elemento discretizado. b) exemplo de numeração de leituras em um elemento



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em posse do número de trechos de leitura e das posições de seus transdutores, pode-se calcular o comprimento de cada trecho de leitura como a distância euclidiana entre os pontos.

$$d_i = \sqrt{((te_x - tr_x)^2 + (te_y - tr_y)^2)} \quad (30)$$

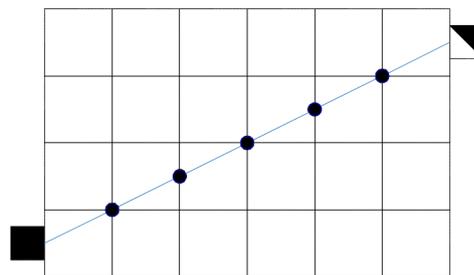
em que d_i é o vetor que armazena as distâncias para cada leitura; i é o índice do vetor, que vai de 1 ao número total de leituras; te_x e tr_x são as coordenadas no eixo x do transdutor emissor e transdutor receptor; e te_y e tr_y são as coordenadas no eixo y do transdutor emissor e transdutor receptor.

A entrada de dados componentes do vetor de tempo T_m é realizada na etapa 3 da Figura 28. Nessa fase do trabalho, a entrada de dados será feita através da utilização de dados sintéticos de leituras de pulso ultrassônico para verificação do funcionamento do algoritmo. A criação desses dados, critérios de aplicação e o que simulam, estão descritos na seção 3.2 Procedimento Experimental: Elaboração de dados Sintéticos. Também serão utilizados dados de leituras de pulso ultrassônico aferidos em CPs de concreto desenvolvidos com diferentes descontinuidades para validação da capacidade de geração de tomogramas em concreto.

Uma vez determinada a malha de leituras, as posições dos transdutores, os trechos de leituras e seus comprimentos, pode-se seguir para a etapa 4 da Figura 28, referente à construção da matriz de distâncias $D_{m,n}$.

Além de conhecer a informação sobre a posição dos transdutores e o comprimento do trecho, é necessário computar quanto da trajetória de leitura passa por cada um dos elementos no corpo. Para que possa ser obtido o tamanho do pulso que trafega em cada elemento da malha, é necessário que se obtenham os pontos de interseção entre a trajetória do pulso ultrassônico e a grade da malha, como mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Pontos de interseção entre o percurso do pulso ultrassônico e a grade da malha



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma alternativa para determinar esses pontos é calcular a interseção entre a reta que descreve a trajetória do pulso, e as retas que descrevem a grade de malha. As retas que compõem os trechos de leituras podem ser descritas como

$$y = \alpha * x + \beta \quad (31)$$

em que α e β são respectivamente os coeficientes angulares e lineares para cada reta leitura. Como já são sabidas as coordenadas nos eixos x e y dos transdutores para cada leitura, os coeficientes das retas que descrevem as leituras são calculados como

$$\alpha = (M_{i,3} - M_{i,5}) / Lx \quad (32)$$

$$\beta = M_{i,3} \quad (33)$$

As retas que descrevem a malha podem ser expressas na forma:

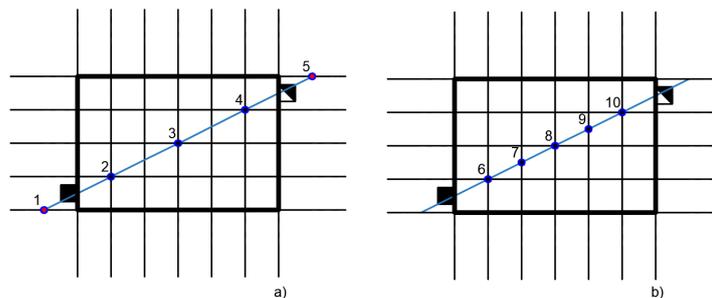
$$Gx_i = i * dx \quad i = 0,1 \dots, N_{ex} \quad (34)$$

$$Gy_i = i * dy \quad i = 0,1 \dots, N_{ey} \quad (35)$$

em que Gx e Gy são respectivamente vetores que armazenam as retas que descrevem a malha em x e y .

Uma vez obtidas as retas que descrevem a malha e a trajetória do pulso, deve-se obter os pontos de interseção entre eles. Uma forma de obter a interseção é a solução dos sistemas lineares formados entre as retas de malha e a reta de leitura. Dessa forma, calcula-se a interseção entre cada uma das retas verticais da malha e a trajetória do pulso e se armazena o resultado no vetor de interseção vertical $Inters_v$. Em seguida, calcula-se a interseção entre as retas horizontais da malha e a trajetória do pulso e armazena o resultado no vetor de interseção horizontal $Inters_h$. A interseção com as retas horizontais e verticais podem ser observadas na Figura 35.

Figura 35 - Interseção entre retas verticais e horizontais



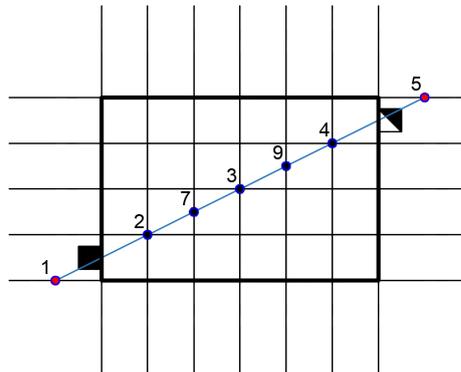
Fonte: Elaborada pelo autor.

O próximo passo é promover a união dos dois vetores de pontos de interseção calculados. Entretanto, pode-se notar que alguns pontos podem ser comuns a ambos vetores, e essa duplicidade é indesejada no vetor resultado da interseção. Assim, promove-se uma união dos conjuntos excluindo os pontos comuns entre os dois vetores. Dessa forma, o vetor com todos os pontos de interseção pode ser expresso como

$$Inters = Inters_v + Inters_h - (Inters_v \cup Inters_h) \quad (36)$$

Na Figura 36 pode-se observar os pontos que compõe o vetor interseção.

Figura 36 - Vetor de pontos de interseção calculado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Contudo, pela Figura 36, nota-se também que alguns pontos fora do domínio estabelecido estão armazenados no vetor e não são de interesse. Então, é necessário excluir esses pontos do vetor de interseção. Para isso, avalia-se para cada ponto se este está contido no domínio ou não, da forma

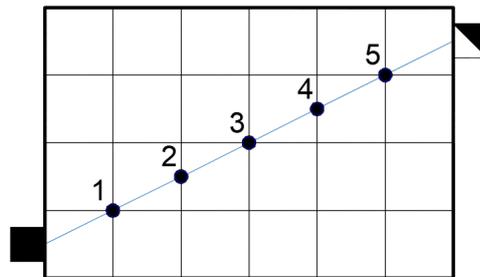
*Se ponto \subset domínio
mantém ponto no vetor*

*Senão
exclui ponto do vetor*

Feito isso, só resta organizar o vetor *Inters* em ordem crescente de pontos. Dessa forma, fixa-se o ponto referente ao emissor como base e ordena-se os outros pontos com base em sua distância cartesiana até o emissor, da menor para a maior distância. A Figura 37 mostra o vetor

final de interseção para uma leitura. A contribuição de cada trecho da malha na integridade da trajetória de pulso é justamente cada um dos elementos da matriz de distâncias $D_{m,n}$ para a trajetória analisada

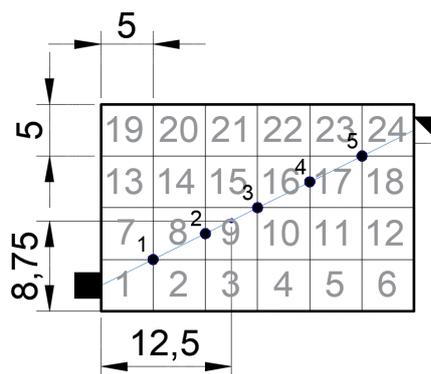
Figura 37– Vetor interseção para uma leitura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez obtidas todas as trajetórias de leitura, cada segmento do trecho deve ser referenciado ao elemento da malha que ele faz parte na matriz distâncias. Para isso, calcula-se o ponto médio do segmento ao transdutor emissor em cada elemento. Obtido o índice do elemento de malha que o segmento faz parte, seu comprimento é alocado na matriz de distâncias para o respectivo seguimento na leitura. Os demais termos não referenciados na linha devem ser preenchidos com zero. A Figura 38 exemplifica esse procedimento.

Figura 38– Esquema de alocação dos trechos de leitura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, a matriz distâncias final tem a forma $D_{m,n}$, em que m é o número de leituras realizadas e n é o número de elementos discretizados da malha. Para verificar se todos os valores armazenados para uma leitura na matriz $D_{m,n}$ estão corretos, a soma dos elementos

da linha da matriz tem que ser igual ao valor da distância entre emissor e receptor para a leitura, previamente calculado e armazenado no vetor d_i .

$$\sum_{i=1}^{i=Ne} D_{i,n} = d_i \quad (37)$$

Agora que já se conhece o vetor de tempos T_m e a matriz de distâncias $D_{m,n}$ já teve seus coeficientes calculados, o sistema de solução no problema tomográfico pode ser montado. A etapa 5 da Figura 28 é responsável por esse procedimento. O formato final do sistema se apresenta na forma.

$$T_m = D_{m,n} * S_n \quad (38)$$

em que T_m é o vetor de tempos de percurso para número m de leituras. $D_{m,n}$ é a matriz de distâncias com número m de leituras e n elementos de malha discretizados, S_n é o vetor de vagarosidades que contêm as incógnitas de nosso sistema.

Na etapa 6 da Figura 28, são realizadas as análises de esparsidade e condicionalidade na matriz do sistema obtida no passo anterior, como descrito na seção 2.3. É nessa etapa que se estuda a estrutura dos elementos do sistema de equações para escolha do melhor método para solução do sistema.

A implementação do cálculo da esparsidade do sistema é realizada dividindo a quantidade de elementos nulos na matriz de distâncias pela quantidade de elementos totais da matriz. O valor resultante da divisão é o coeficiente de esparsidade E_D da matriz.

A implementação do cálculo da condicionalidade da matriz de distâncias pode ser realizada através da função $cond(A)$ implementada em Matlab. A função tem como entrada a matriz de distâncias $D_{m,n}$ e como saída um número real. O valor resultante desse processo o coeficiente de condicionalidade C_D da matriz. Quanto mais próximo de 1 o resultado, melhor o condicionamento da matriz, quanto maior o valor obtido, mais próxima de uma matriz singular é a matriz de distâncias.

Agora conhecendo os componentes do sistema de equações e as características da matriz de distâncias, procede-se a etapa 7, a implementação de um método para solução do sistema. Nessa etapa do trabalho será utilizada a função $linsolve(A,B)$ do Matlab. A função tem como entrada a matriz de distâncias $D_{m,n}$ e o vetor de tempo T_m . A saída é o vetor de vagarosidades

S_n . A função $linsolve(A,B)$ trabalha com dois métodos de solução diferentes: 1 - Fatoração LU com pivotamento parcial se a matriz for quadrada; ou 2 - fatoração QR com pivotamento por coluna para outros casos.

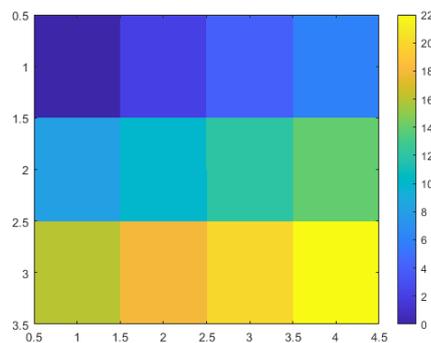
O resultado obtido é então avaliado na etapa 8. Esta etapa é iterativa, pois a depender dos resultados encontrados, torna-se necessário refazer a etapa 7 utilizando um novo método de solução do sistema.

Duas avaliações devem ser feitas para aferir a eficiência do método de solução. A primeira delas é verificar se efetivamente o método consegue solucionar o sistema de equações proposto. A segunda está relacionada aos métodos que efetivamente conseguem solucionar o sistema, e consiste em verificar se a precisão do resultado obtido está de acordo com a necessidade do usuário.

Por fim, a etapa 9 da Figura 28, consiste em exibir o vetor de vagarosidades para o usuário. Nessa etapa dois métodos serão utilizados e a capacidade visual de expressar o resultado de cada um será avaliado. Para ambos os métodos o vetor de vagarosidades S_n deverá ser reordenado em uma matriz $S_{a,b}^*$ em que a equivale ao número de elementos da malha no eixo x e b equivale ao número de elementos da malha no eixo y.

O primeiro método consiste em criar um mapa de cores a partir da matriz solução $S_{a,b}^*$. Cada elemento em $S_{a,b}^*$ especifica a cor de um pixel na imagem. Os índices das linhas e colunas determinam os centros dos pixels correspondentes. O resultado final é uma imagem de a por b pixels, onde a e b são a ordem da matriz de entrada. O Matlab conta com a função $imagesc(A)$ para elaboração de mapa de cores. A entrada da função é a matriz $S_{a,b}^*$ e a saída é o mapa de cores. Um exemplo pode ser observado na Figura 39.

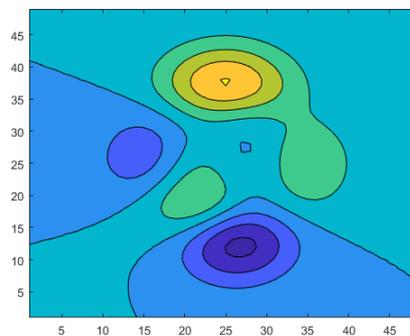
Figura 39– Representação do vetor solução em mapa de cores



Fonte: (MATHWORKS, 2020).

O segundo método consiste em criar um mapa de contorno contendo os coeficientes da matriz $S_{a,b}^*$, os valores armazenados na matriz serão utilizados como “altura” em um plano cartesiano x-y. O Matlab conta com a função *contourf* (A,X,Y) para elaboração de mapa de contorno. A entrada da função é a matriz $S_{a,b}^*$, os vetores de coordenadas dos transdutores $Pe_{x,x}$ e $Pe_{(y,y)}$ e a saída é o mapa de cores. Uma aplicação dos contornos para visualização dos resultados dos ensaios de propagação de pulso ultrassônico pode ser observada em Ribeiro et al. (2020). Um exemplo de mapa de contornos pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 - Apresentação do vetor solução em mapa de contornos



Fonte: (MATHWORKS, 2020).

Para verificação da viabilidade da utilização do método de contornos no desenvolvimento de tomogramas ultrassônicos em concreto, foram utilizados tomogramas gerados a partir de contornos com 1 e 100 graus de interpolação e avaliada a diferença de resolução entre eles.

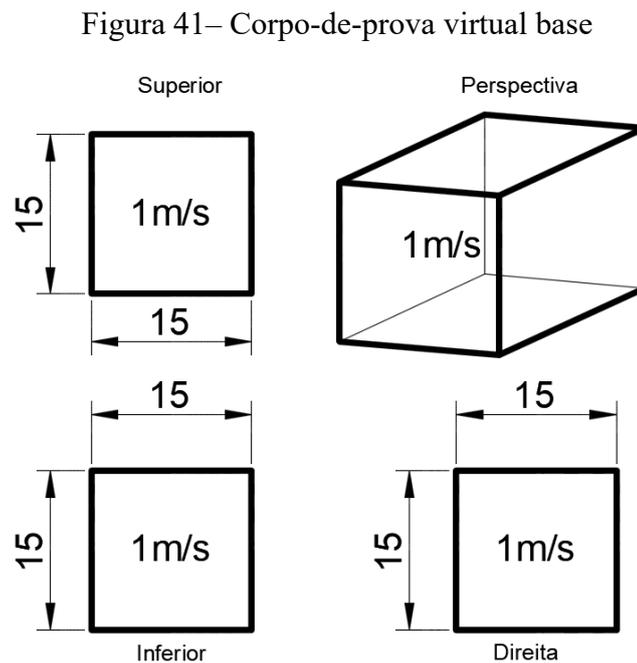
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: ELABORAÇÃO DE DADOS SINTÉTICOS

Para verificação da capacidade de elaboração de tomogramas do algoritmo proposto, optou-se pela construção de dados sintéticos de leituras de ultrassom em um corpo-de-prova.

Como descrito na seção 2.2.3, as leituras de velocidade de pulso ultrassônico em corpos-de-prova de concreto sofrem interferência de inúmeros fatores, tais como falta de acurácia do executor do ensaio, ângulo de leitura, má acoplagem dos transdutores, condições superficiais da peça ensaiada, entre outros. Assim, a opção por dados sintéticos se deu por garantir controle

nos resultados das leituras nessa etapa de testes de eficácia do algoritmo, com “leituras perfeitas” de pulso ultrassônico.

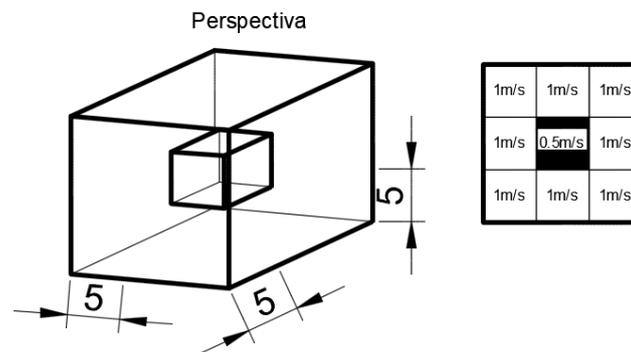
Foi elaborado um corpo-de-prova (CP) virtual de dimensões 15cm x 15cm x 15cm e a este atribuiu-se características de um material homogêneo fictício, ou seja, a velocidade de pulso ultrassônico não varia enquanto passando pelo mesmo material. A esse material atribuiu-se velocidade de pulso ultrassônico igual a 1m/s em todo o corpo. A Figura 41 exemplifica o domínio geométrico de um corpo-de-prova virtual base.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para avaliação da capacidade do algoritmo de detecção de descontinuidades internas no material e geração do tomograma, foram introduzidas no corpo descontinuidades cúbicas com dimensões de 5cm x 5cm x 5cm e de 2.5cm x 2.5cm x 2.5cm. Para garantir discrepância entre as velocidades de pulso da descontinuidade e do material base, atribuiu-se uma velocidade de pulso de metade da VPU do material base para a descontinuidade, ou seja, 0,5m/s. A distribuição de velocidades na seção intermediária de um CP estudado com descontinuidade interna centralizada de 5cm x 5cm x 5cm pode ser observada na Figura 42.

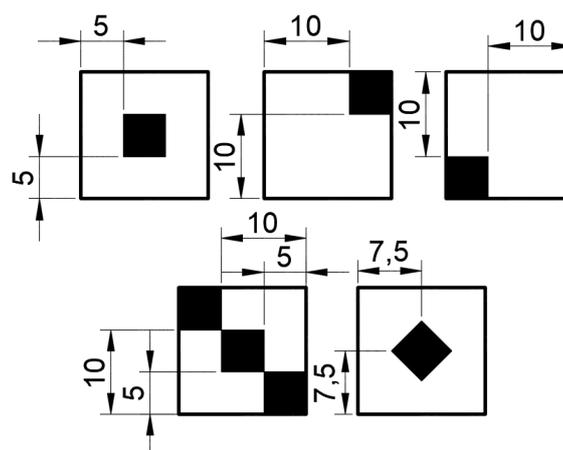
Figura 42– Perspectiva do corpo de prova com descontinuidade e distribuição de velocidades de pulso em cada elemento para fatia central



Fonte: Elaborada pelo autor.

As descontinuidades de 5cm x 5cm x 5cm foram locadas nos corpos-de-prova nas seguintes posições e quantidades: 1 CP com uma descontinuidade centrada; 1 CP com uma descontinuidade no canto superior direito; 1 CP com uma descontinuidade no canto inferior esquerdo; 1 CP com três descontinuidades compreendendo os elementos da diagonal principal; e 1 CP com descontinuidade centrada com inclinação de 45°. A Figura 43 mostra os CPs virtuais com descontinuidades de 5cm x 5cm x 5cm locadas utilizados nesse estudo.

Figura 43 – Fatia central de corpos de prova virtuais com descontinuidades de 5cm x 5cm x 5cm na seguinte ordem: centrada, canto superior direito, canto inferior esquerdo, diagonal principal e centrada rotacionada

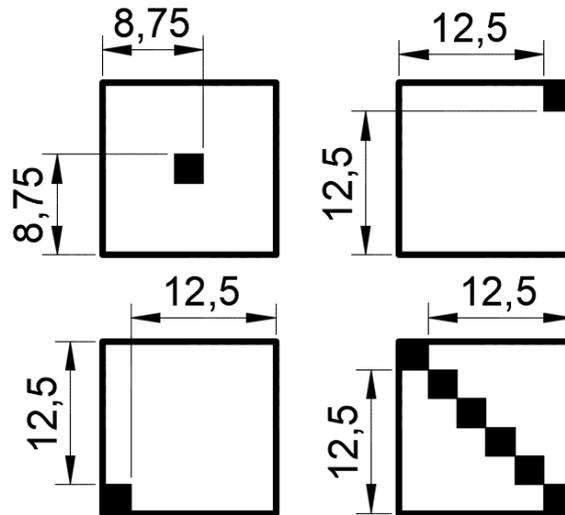


Fonte: Elaborada pelo autor.

As descontinuidades de 2.5cm x 2.5cm x 2.5cm também foram locadas nos corpos-de-prova nas seguintes posições e quantidades: 1 CP com uma descontinuidade centrada; 1 CP com uma descontinuidade no canto superior direito; 1 CP com uma descontinuidade no canto

inferior esquerdo; 1 CP com seis descontinuidades nos elementos da diagonal principal. A Figura 44 mostra os CPs virtuais com descontinuidades de 2.5cm x 2.5cm x 2.5cm localizadas utilizadas nesse estudo.

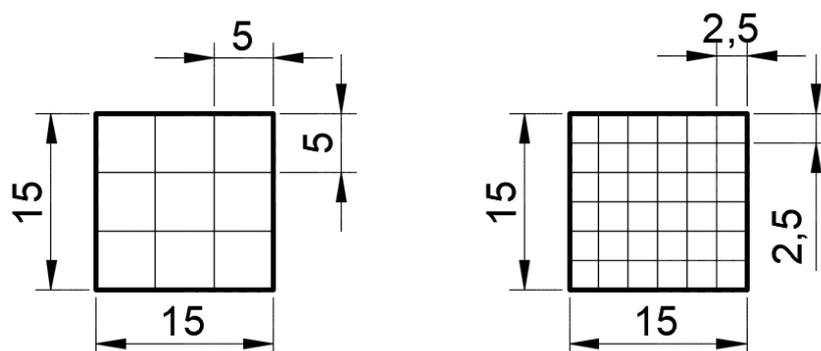
Figura 44– Fatia central de corpos-de-prova virtuais com descontinuidades de 2.5cm x 2.5cm x 2.5cm na seguinte ordem: centrada, canto superior direito, canto inferior esquerdo e diagonal principal



Fonte: Elaborada pelo autor

Para verificação da dependência de malha do algoritmo desenvolvido, duas malhas foram utilizadas. A primeira de 5cm x 5cm, acompanhando as dimensões das maiores descontinuidades simuladas, e a segunda malha com 2.5cm x 2.5cm. Na Figura 45 podem ser visualizadas as malhas utilizadas na verificação do algoritmo com dados sintéticos.

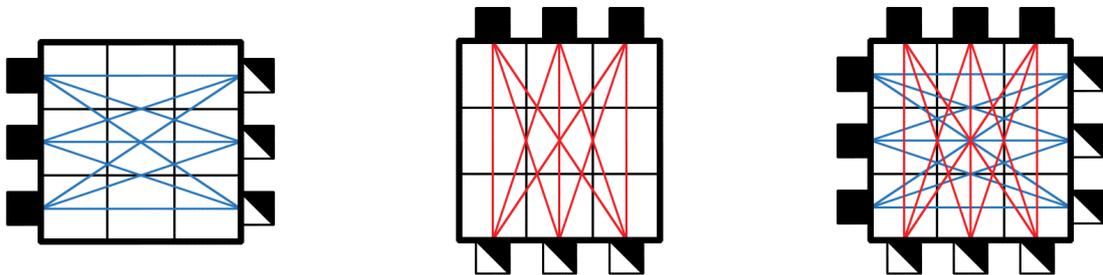
Figura 45– Corpo-de-prova virtual discretizado em elementos de malha de 5cm x 5cm (esquerda) e 2.5cm x 2.5cm (direita)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Também se avaliou a capacidade de geração de imagens tomográficas do algoritmo desenvolvido com base nas direções de leitura. Então, o vetor de tempos T_m foi composto por leituras simuladas na direção horizontal, na direção vertical e simultaneamente em ambas direções. A Figura 46 exemplifica as formas de leitura utilizadas para uma malha de 5cm x 5cm.

Figura 46– Formas de leitura simuladas para malha de 5cm x 5cm: horizontal (esquerda), vertical (centrada) e horizontal vertical (direita).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A elaboração dos vetores tempo foi realizada calculando, para cada leitura, os trechos componentes do percurso na malha discretizada, e ponderando por 1cm/s para segmentos no material base e 0,5cm/s para segmentos nas discontinuidades. Dessa forma, para cada leitura o tamanho do trecho percorrido é ponderado pelo tempo do pulso no trecho e armazenado na matriz $le_{Ne,m}$. O vetor leituras de tempo final é dado por

$$T_m = \sum_{i=1}^{i=Ne} le_{i,m} \quad (39)$$

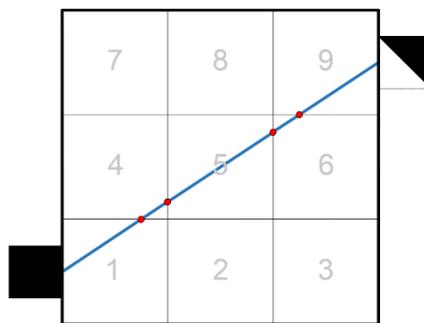
em que T_m é o vetor de leituras de tempo, Ne é o número total de elementos da malha e le é a matriz de elementos de leitura.

Por exemplo, para formação da terceira leitura numa malha de 9 elementos, como na Figura 47 o pulso atravessa os elementos 1, 4, 5, 6 e 9 com trechos de 4,51cm, 1,50cm, 6,00cm, 1,50cm e 4,51cm, respectivamente. Os elementos 1, 4, 6 e 9 estão contidos na região de material de base 1m/s, e o elemento 5, na região de 0,5m/s. Assim, o tempo de percurso final pode ser dado por

$$T_3 = (4,51 * 1 + 1,50 * 1 + 6,00 * 2 + 1,50 * 1 + 4,51 * 1) = 24,02 * 10^{-2} s \quad (40)$$

Esse procedimento foi realizado para os vetores leitura em cada uma das duas malhas, para as três diferentes formas de leitura, para cada um dos 9 CPs virtuais, num total de 54 vetores leituras para o teste do algoritmo.

Figura 47– Elaboração do vetor leituras



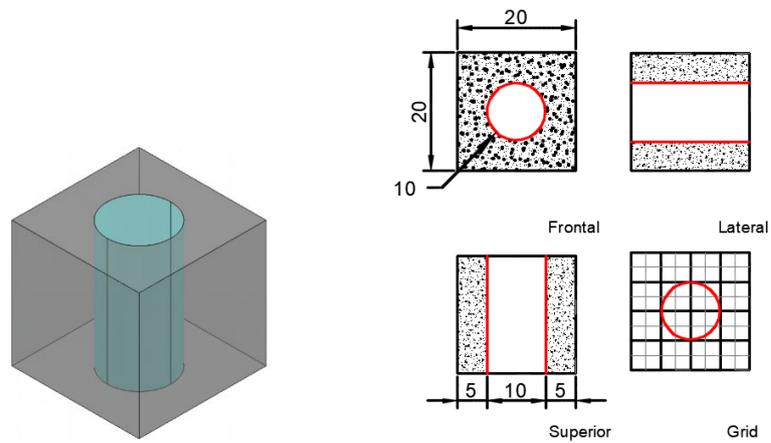
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL: ELABORAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Para validação da capacidade de elaboração de tomogramas em estruturas de concreto do algoritmo proposto, três corpos de prova de concreto cúbicos foram produzidos. Adotou-se dimensões de 20 cm de lado para otimização da elaboração de malha e do processo de leitura.

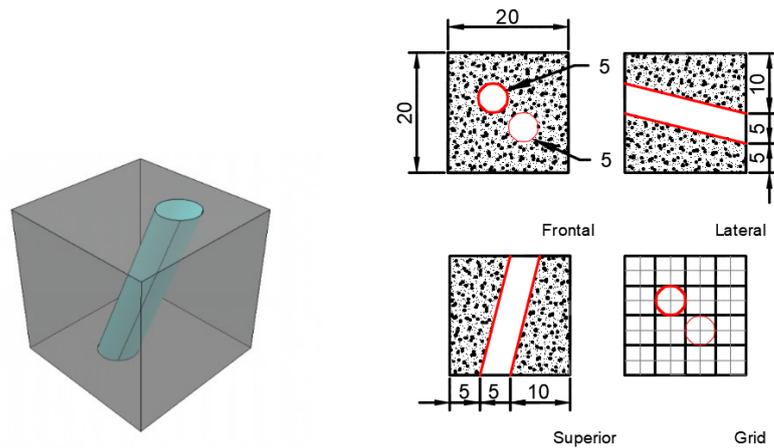
Dentro dos corpos de prova foram inseridas diferentes descontinuidades para simular situações distintas em estruturas de concreto: a) presença de tubulação de esgotamento sanitário - tubulação de esgotamento sanitário de PVC de 10 cm de diâmetro; b) presença de tubulação de água fria - tubulação de água fria de PVC de 5 cm de diâmetro c) presença de vazio ou corpo estranho em estrutura durante a concretagem - bloco de EPS de 7,5cm x 7,5cm x 7,5cm;. As figuras 48, 49 e 50 exibem os diferentes CPs.

Figura 48 - Corpo de prova de concreto com tubulação de esgotamento sanitário de PVC 10 cm



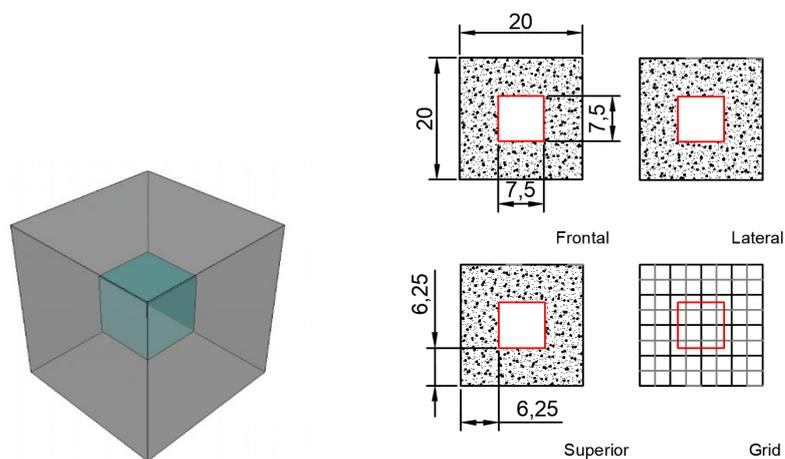
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 49 -Corpo de prova de concreto com tubulação de água fria de PVC de 5 cm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50 -Corpo de prova de concreto com bloco de EPS de 7,5cm x 7,5cm x 7,5cm



Fonte: Elaborada pelo autor.

O traço do concreto utilizado nessa pesquisa foi desenvolvido por LIMA (2020) e está contido na Tabela 2. O presente traço foi escolhido para garantir trabalhabilidade de abatimento entre 10 cm e 16 cm, para melhor preenchimento dos corpos de prova com descontinuidades. Utilizou-se cimento CP V - ARI, areia fina de fundo de rio, brita 1 e água proveniente da rede convencional da Universidade Estadual de Santa Cruz.

O processo de concretagem iniciou-se com a secagem dos agregados em estufa por 24 horas a 105°C para diminuição do teor de umidade nos insumos. Posteriormente pesou-se os materiais a serem utilizados. A água foi pesada apenas no momento da concretagem. Foi utilizada balança eletrônica no processo.

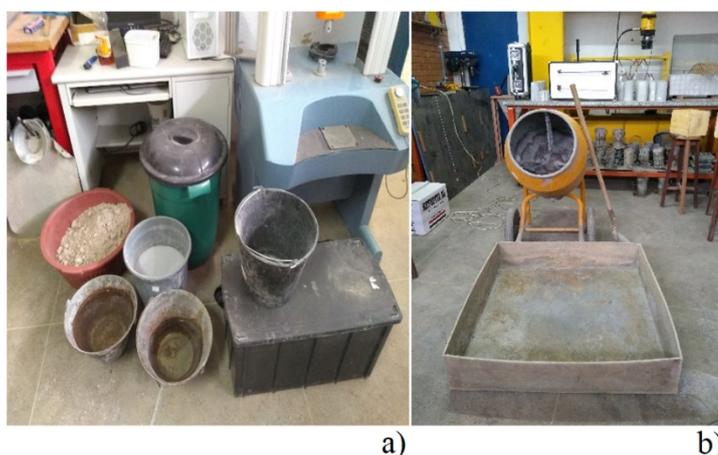
Tabela 2 - Traço de concreto utilizado na confecção de corpos de prova

Material	Consumo (Kg/m ³)
Cimento CP V -ARI	400
Areia	725
Brita	1056
Água	250

Fonte: Adaptado de Lima (2020).

A mistura dos constituintes foi realizada em betoneira no Laboratório de Ensaio Mecânicos e Resistências de Materiais (LEMER) - UESC. Para tal, foi utilizada a metodologia apresentada por PESSOA (2011): 1- a betoneira foi molhada; 2- colocou-se brita na betoneira com metade da água; 3- acrescentou-se o cimento a areia e o restante da água com a betoneira em movimento; 4- misturou-se até se obter concreto fresco. A Figura 51 ilustra os materiais utilizados e o equipamento de mistura.

Figura 51 - a) Materiais utilizados; b) Equipamentos utilizados para mistura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida à mistura, realizou-se o ensaio de abatimento de tronco cone de acordo com a ABNT NBR 16889:2020 para verificar se o concreto desenvolvido atende às especificações de trabalhabilidade estabelecidas. A Figura 52 ilustra o ensaio.

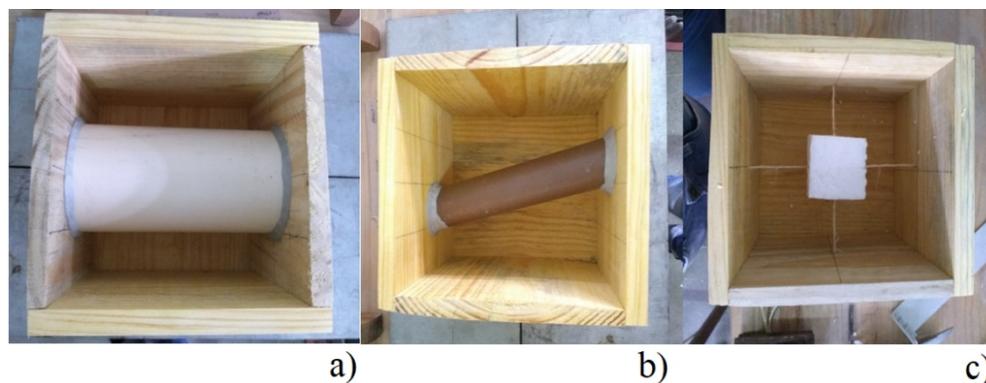
Figura 52 - Ensaio de abatimento de tronco cone



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após ensaio de abatimento de tronco cone e verificação da trabalhabilidade, os corpos de prova foram moldados em formas de madeira. Para garantia de uma boa superfície pós desforma, utilizou-se óleo desformante. A fixação das tubulações de PVC nas formas foi realizada através de resina poliepoxidica comercial. O bloco de EPS foi centrado e fixado através de fios tensionados. As formas preparadas estão ilustradas na Figura 53.

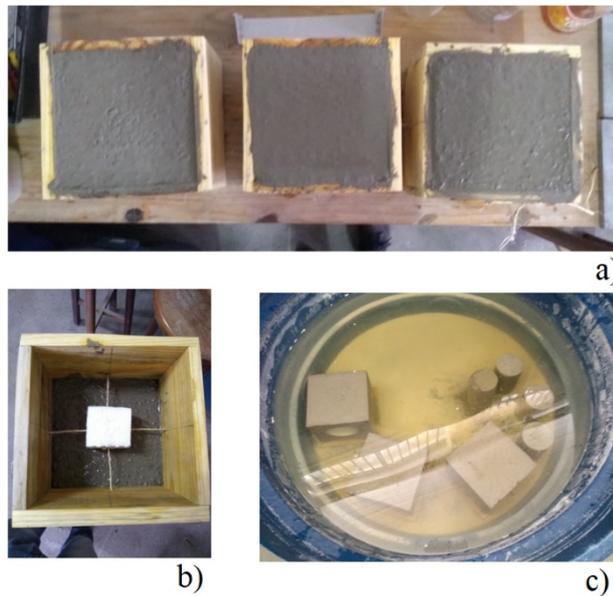
Figura 53 - Formas dos corpos de prova com discontinuidades. a) Tubulação PVC 10 cm; b) Tubulação PVC 5 cm; c) Bloco EPS



Fonte: Elaborada pelo autor.

A concretagem se deu em camadas para garantir homogeneidade no concreto constituinte e preenchimento da região em torno da descontinuidade. Para isso utilizou-se haste metálica de adensamento. Vibrador manual não foi utilizado devido ao risco de movimentação da descontinuidade. A desforma dos corpos de prova ocorreu passadas 24h e o processo de cura por imersão foi iniciado logo em seguida. Os corpos de prova foram mantidos em cura úmida por 28 dias. A Figura 54 ilustra o processo de concretagem, os corpos de prova frescos e a cura úmida.

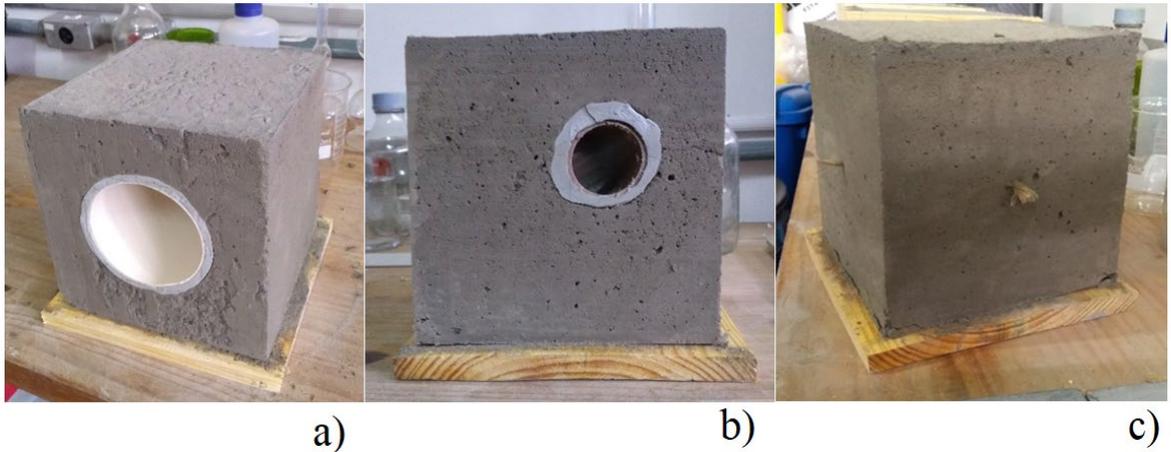
Figura 54 - Moldagem e cura dos corpos de prova. a) corpos de prova frescos; b) exemplo de concretagem por camadas; c) corpos de prova em cura úmida



Fonte: Elaborada pelo autor.

Decorridos os 28 dias de cura os corpos de prova foram retirados da imersão e armazenados na área de produção do LEMER-UDESC para realização dos ensaios de propagação de pulso ultrassônico. A Figura 55 contém os CPs após cura.

Figura 55 - Corpos de prova após cura. a) Tubulação PVC 10 cm; b) Tubulação PVC 5 cm; c) Bloco EPS



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 NOMENCLATURA DOS CORPOS DE PROVA

Para melhor entendimento, a seguinte nomenclatura foi atribuída para os CPs sintéticos desenvolvidos. Primeiro relacionou-se a propriedade de dimensão da malha, se era de 5cm x 5cm (m50), ou 2,5cm x 2,5cm (m25). Em seguida vem o tipo de leitura, podendo ser horizontal (h), vertical (v) ou composta (hv). Na ordem, a dimensão da descontinuidade, de 5cm x 5cm (50), ou 2,5cm x 2,5cm (25). E por fim, a localização da descontinuidade no corpo, sendo essa centrada (ce), canto inferior esquerdo (ie), superior direito (sd), diagonal principal (dp), ou centrada com inclinação (ced).

Como exemplo, o cp m50hv50ie refere-se a um corpo discretizado em malha de 5cm x 5cm, com leituras compostas realizadas e com uma descontinuidade de 5cm x 5cm no canto inferior esquerdo.

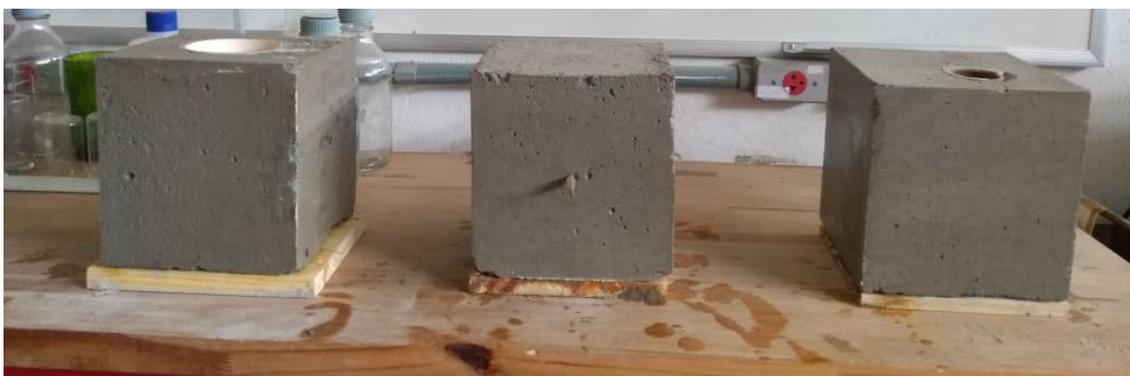
Em relação aos CPs de concreto, a nomenclatura estabelecida foi: primeiro a propriedade da malha, se era de 5cm x 5cm (m50), ou 2,5cm x 2,5cm (m25). Em seguida vem o tipo de leitura, podendo ser horizontal (h), vertical (v) ou composta (hv). E o tipo de descontinuidade, sendo tubulação de PVC de 10cm (T100), tubulação de PVC de 5cm (T50) e bloco EPS de 7,5cm x 7,5cm x 7,5cm (EPS).

Como exemplo, o cp m50hvT100 refere-se a um corpo de prova de concreto discretizado em malha de 5cm x 5cm, com leituras compostas realizadas e com presença de tubulação de PVC de 10cm.

3.5 PROCEDIMENTO DE LEITURAS NOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Uma vez curado o corpo de prova, procedeu-se à etapa de aquisição de dados de propagação de pulso ultrassônico para geração dos tomogramas. A primeira etapa nesse processo consistiu na regularização e preparo da superfície de leitura. Para isso, os corpos de prova foram lixados com lixa 80 e 220. Feito isso, a superfície foi limpa com pano úmido. Na Figura 56 podem ser observados os CPs tratados. Material acoplante inerte foi utilizado para melhor contato superficial entre o transdutor e o CP.

Figura 56 - Corpos de prova após tratamento superficial

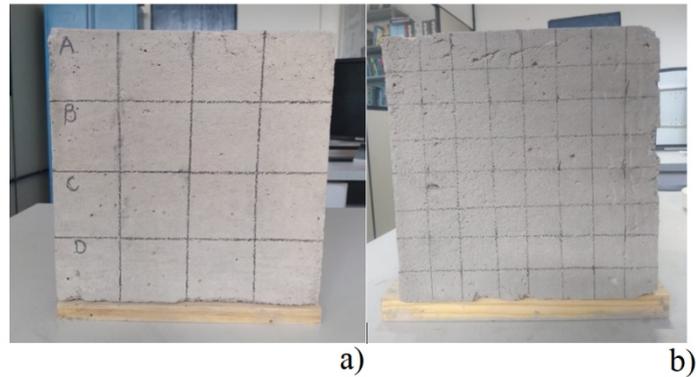


Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida as malhas de leitura de 5cm x 5cm e 2.5cm x 2.5cm foram marcadas nos corpos de prova. Na dimensão perpendicular à malha de leitura os corpos de prova foram divididos em trechos de 5cm identificados como seções A, B, C e D. A seção intermediária entre B e C foi nomeada MID e representa o centro dos CPs. A Figura 57 ilustra um corpo de prova com sua malha desenhada e as seções identificadas.

Em cada corpo de prova foram analisadas três seções internas distintas: seção A (plano central da seção), seção D (plano central da seção) e seção MID (plano central do CP). Para cada seção foram realizadas tanto leituras horizontais quanto verticais. Para minimizar erros em leituras individuais, essas foram computadas em triplicata, considerando a média aritmética como o resultado do ensaio. Para malha de 5cm x 5cm são necessárias 32 leituras por seção. Já para malha de 2.5cm x 2.5 cm são necessárias 128 leituras por seção. Dessa forma, para 3 seções em cada CP, sendo 3 CPs e realizando as leituras em triplicata, para execução do programa experimental foram realizadas 4320 leituras de velocidade de pulso ultrassônico.

Figura 57 - Discretização de malha nos CPs de concreto. a) Malha de 5cm x 5cm e seções. b) malha de 2.5cm x 2.5cm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os ensaios de propagação de pulso ultrassônico foram realizados no LEMER-UESC. Utilizou-se o aparelho PunditLab(+) da Proceq com transdutores de frequência nominal de 54KHz nos ensaios. A Figura 58 exemplifica o arranjo do aparato.

Figura 58 - Arranjo para ensaio de propagação de pulso ultrassônico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados dos ensaios foram utilizados como dados de entrada no algoritmo computacional desenvolvido. Os tomogramas foram gerados a partir das vagarosidades obtidas a partir dos ensaios de propagação de pulso ultrassônico, e da geometria dos corpos-de-prova ensaiados. As análises dos resultados foram então realizadas comparando-se os tomogramas obtidos com a geometria, localização e dimensões das descontinuidades prefixadas.

4 RESULTADOS

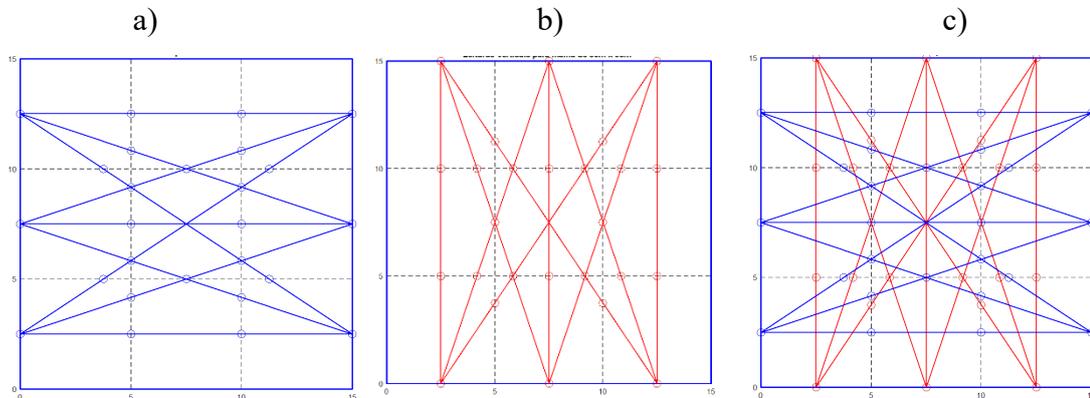
Este capítulo trata da apresentação dos resultados obtidos no trabalho e é dividido em duas etapas: 1- verificação da capacidade de funcionamento do algoritmo, onde serão apresentadas as propriedades de esparsidade e condicionamento das matrizes de distância, os vetores de tempo de percurso calculados, e os tomogramas obtidos para os CPs sintéticos com malhas de 5cm x 5cm e 2.5cm x 2.5cm. E 2- verificação da capacidade do algoritmo em representar seções internas de corpos de prova de concreto.

4.1 MATRIZES DE DISTÂNCIA

4.1.1 Matrizes Obtidas

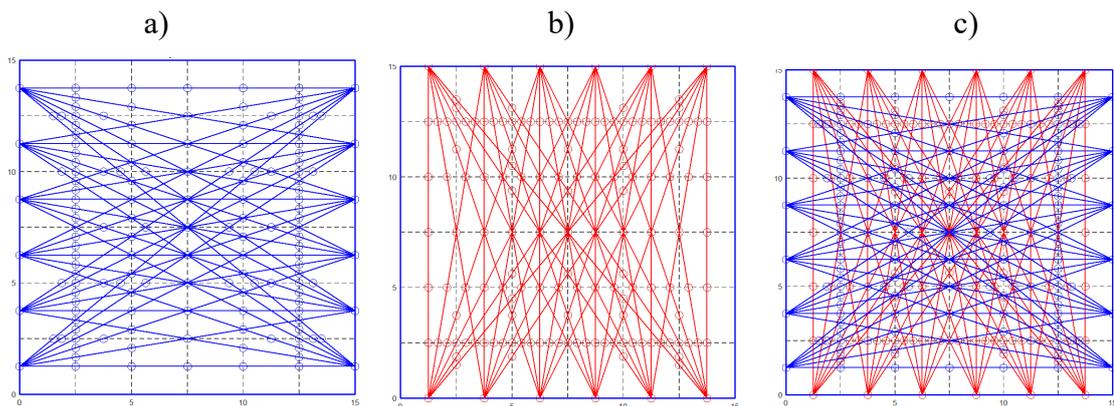
As matrizes de distância foram calculadas conforme descrito na seção 3.1. Como elas descrevem as características estritamente geométricas da trajetória do pulso de ultrassom na malha discretizada, dependendo apenas das dimensões do CP, as dimensões da malha, e dos pontos de leitura, 6 diferentes matrizes foram obtidas e podem ser utilizadas para o conjunto de leituras representativos dos CPs sintéticos. Na Figura 59, são exibidas as malhas e trajetórias de leitura discretizadas em segmentos utilizadas para confecção das matrizes de distância da malha de 5cm x 5cm. A Figura 59 (a) exhibe a configuração para leituras horizontais, na Figura 59 (b), a configuração para leituras verticais, e na Figura 59 (c) a configuração para leituras compostas. Analogamente as trajetórias e segmentos para cada elemento na malha de 2,5cm x 2,5 cm são oferecidas na Figura 60.

Figura 59 – Trajetórias de leitura discretizadas para malha de 5cm x 5cm no corpo de prova simulado. (a) leituras horizontais, (b) leituras verticais e (c) leituras compostas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 – Trajetórias de leitura discretizadas para malha de 2,5cm x 2,5cm no corpo de prova simulado. (a) leituras horizontais, (b) leituras verticais e (c) leituras compostas



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise da Figura 59 e Figura 60 apresenta-se como um ótimo artifício para verificação do funcionamento do algoritmo no cálculo das matrizes de distância. A partir dela pode-se observar se: 1- a malha de leitura foi devidamente discretizada; 2- as interseções entre as leituras e as linhas de grade foram devidamente estabelecidas; 3- existem trajetórias de leitura fora do domínio que estão sendo computadas na matriz; 4- se a locação dos trechos de leitura na matriz de distâncias está correta.

Percebe-se ainda que nas composições descritas nas Figura 59 (c) e Figura 60 (c), a densidade de trechos de leitura passando em cada elemento de malha é visivelmente maior que nas leituras horizontais e verticais apenas. O impacto das diferentes configurações de leitura no tomograma final será discutida nas próximas seções.

4.1.2 Esparsidade e Condicionamento

Foi realizada uma análise de esparsidade, condicionamento e ordem das matrizes de distância obtidas para cada uma das configurações de malha e leitura como forma de estudar o comportamento dos sistemas de equações. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 3.

Pela Tabela 3, nota-se que as matrizes de distância geradas a partir de leituras em uma direção são quadradas, o que, a princípio, nos fornece sistemas de equações lineares sem sobre-determinação. A sobre-determinação dos sistemas lineares é característica das matrizes geradas nas malhas 50x50hv e 25x25hv.

Tabela 3– Ordem, condicionamento e esparsidade para cada matriz de distâncias

Malha	Ordem	Condicionamento	Esparsidade (%)
50x50h	9X9	$2.61 \cdot 10^{16}$	56,79
50x50v	9X9	$1.67 \cdot 10^{16}$	56,79
50x50hv	18X9	3,2074	56,79
25x25h	36X36	$1.46 \cdot 10^{17}$	80,25
25x25v	36X36	$4.56 \cdot 10^{17}$	80,25
25x25hv	72X36	10,1328	80,25

Fonte: Elaborada pelo autor.

A diferença entre o condicionamento das matrizes também é evidenciada. As matrizes geradas a partir de leituras compostas apresentam número de condicionamento relativamente baixo, enquanto as demais matrizes associadas a leituras em uma direção apresentam número de condicionamento muito elevado. Altos números de condicionamento podem ser um indicativo de singularidade da matriz de distâncias, apresentando a necessidade de utilizar métodos de solução de sistemas de equações lineares mais robustos.

No que se refere a esparsidade, percebe-se que independente da malha, as matrizes associadas ao problema são esparsas. Esse número indica que para as malhas de 5cm x 5cm um pouco mais da metade (56,79%) dos coeficientes na matriz de distância são nulos, enquanto para malha a de 2,5cm x 2,5cm mais de três quartos (80,25%) dos elementos são nulos.

Dessa forma, nota-se a partir das características das matrizes de distância calculadas que o problema tomográfico em questão pode ser dividido em dois: 1 - sistemas sobre-determinados, bem condicionados com alto grau de esparsidade; e 2 - sistemas sem sobre-determinação, mal condicionados e também esparsos.

4.2 VETORES DE TEMPO SINTÉTICOS

Os vetores de tempo foram gerados de acordo com o disposto na Seção 3.2. Para cada leitura nas diferentes configurações de malhas, os vetores de tempo reportados nas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6. Para as colunas, os índices de 1 a 9 indicam o valor de velocidade de pulso para cada uma das leituras que compõem o vetor tempo.

Tabela 4- Vetores tempo de percurso para malha de 5 cm x 5cm e leituras horizontais em μs

Configuração	T								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m50h50ce	15,00	18,45	24,04	18,45	20,00	18,45	24,04	18,45	15,00
m50h50sd	15,00	15,81	22,54	15,81	15,00	21,08	18,03	15,81	20,00
m50h50ie	20,00	21,08	22,54	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
m50h50dp	20,00	18,45	24,04	23,72	20,00	18,45	33,05	23,72	20,00
m50h50ced	15,00	18,27	23,13	18,27	22,07	18,27	23,13	18,27	15,00
m50h25ce	15,00	15,81	21,07	15,81	17,50	15,81	21,07	15,81	15,00
m50h25sd	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
m50h25ie	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
m50h25dp	17,50	18,45	18,03	18,45	15,00	18,45	27,04	18,45	15,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5- Vetores tempo de percurso para malha de 5 cm x 5cm e leituras verticais em μs

Configuração	T								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m50v50ce	15,00	18,45	24,04	18,45	20,00	18,45	24,04	18,45	15,00
m50v50sd	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	22,54	21,08	20,00
m50v50ie	20,00	15,81	18,03	21,08	15,00	15,81	22,54	15,81	15,00
m50v50dp	20,00	23,72	33,05	18,45	20,00	23,72	24,04	18,45	20,00
m50v50ced	15,00	18,27	23,13	18,27	22,07	18,27	23,13	18,27	15,00
m50v25ce	15,00	15,81	21,03	15,81	17,50	15,81	21,03	15,81	15,00
m50v25sd	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
m50v25ie	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
m50v25dp	15,00	18,45	27,04	18,45	15,00	21,08	21,03	18,45	15,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

Percebe-se que para todas as leituras na malha de 5cm x 5cm, nas configurações onde as não homogeneidades têm 2,5cm x 2,5cm, e localizam-se nos cantos inferior esquerdo e superior direito, $_25sd$ e $_25ie$, os vetores resultantes são iguais. Além de serem iguais entre si, esses vetores também são iguais aos vetores de distância d_i , isso porque nessas configurações a descontinuidade tem tamanho tão pequeno e localização tão próximas as bordas que não influenciam em nenhuma leitura configurada.

Para a malha de 2,5cm x 2,5cm, em contra partida, as não homogeneidades nos cantos inferior esquerdo e superior direito influenciaram as leituras. Os vetores tempo desenvolvidos para malha de 2,5cm x 2,5cm estão apresentados no ANEXO I.

Tabela 6- Vetores tempo de percurso para malha de 5 cm x 5cm e leituras compostas em μs

Configuração	T								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m50hv50ce	15,00	18,45	24,04	18,45	20,00	18,45	24,04	18,45	15,00
	15,00	18,45	24,04	18,45	20,00	18,45	24,04	18,45	15,00
m50hv50sd	15,00	15,81	22,54	15,81	15,00	21,08	18,03	15,81	20,00
	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	22,54	21,08	20,00
m50hv50ie	20,00	21,08	22,54	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
	20,00	15,81	18,03	21,08	15,00	15,81	22,54	15,81	15,00
m50hv50dp	20,00	18,45	24,04	23,72	20,00	18,45	33,05	23,72	20,00
	20,00	23,72	33,05	18,45	20,00	23,72	24,04	18,45	20,00
m50hv50ced	15,00	18,27	23,13	18,27	22,07	18,27	23,13	18,27	15,00
	15,00	18,27	23,13	18,27	22,07	18,27	23,13	18,27	15,00
m50hv25ce	15,00	15,81	21,07	15,81	17,50	15,81	21,07	15,81	15,00
	15,00	15,81	21,03	15,81	17,50	15,81	21,03	15,81	15,00
m50hv25sd	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
m50hv25ie	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00	15,81	18,03	15,81	15,00
m50hv25dp	15,00	18,45	18,03	18,45	15,00	18,45	27,04	18,45	15,00
	15,00	18,45	27,04	18,45	15,00	18,45	18,03	18,45	15,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para ambas as configurações de malha, a verificação da integridade dos vetores de tempo de leitura foi realizada de forma manual, comparando-se o resultado obtido com a medida das distâncias nos croquis. Não foram encontradas divergências entre os vetores

gerados e a conferência manual, assim, os vetores desenvolvidos cumprem o papel de representar as leituras nos CPs simulados.

4.3 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE TOMOGRAMAS

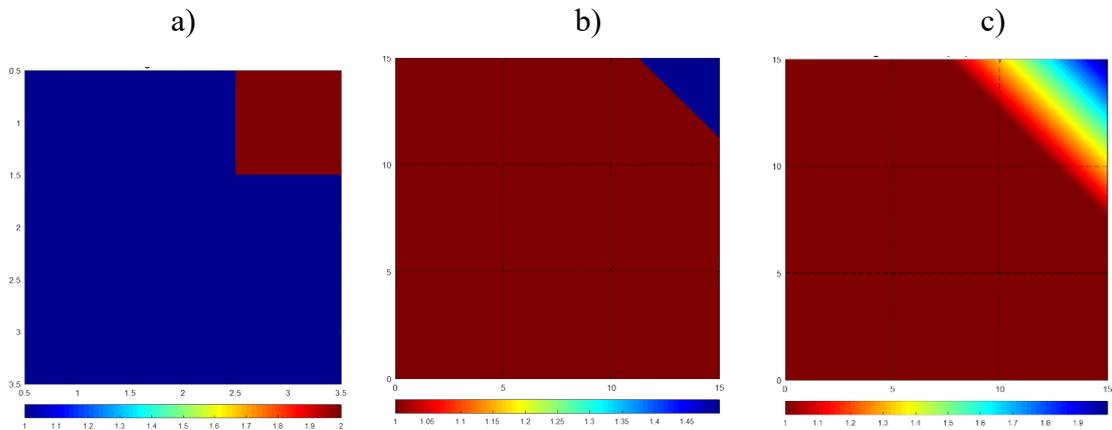
Nesta seção serão mostrados os tomogramas resultantes da combinação entre os vetores de tempo simulados para os CPs sintéticos e as matrizes de distancias calculadas pelo algoritmo. Por critérios de organização, a apresentação dos tomogramas é realizada separadamente inicialmente a malha de 5cm x 5cm, e em seguida a malha de 2,5cm e 2,5cm.

4.3.1 Malha de 5cm x 5cm

Para a malha de 5cm x 5cm, os sistemas gerados a partir das configurações de leitura horizontais ou verticais não puderam ser resolvidos com os métodos de solução propostos. Tal resultado é produto das propriedades do sistema desenvolvido, principalmente do condicionamento das matrizes de distância. Para solução de sistemas lineares tomográficos mal condicionados, Perlin (2015) indica os métodos de solução iterativos de Cimmino otimizado e Kaczmarz.

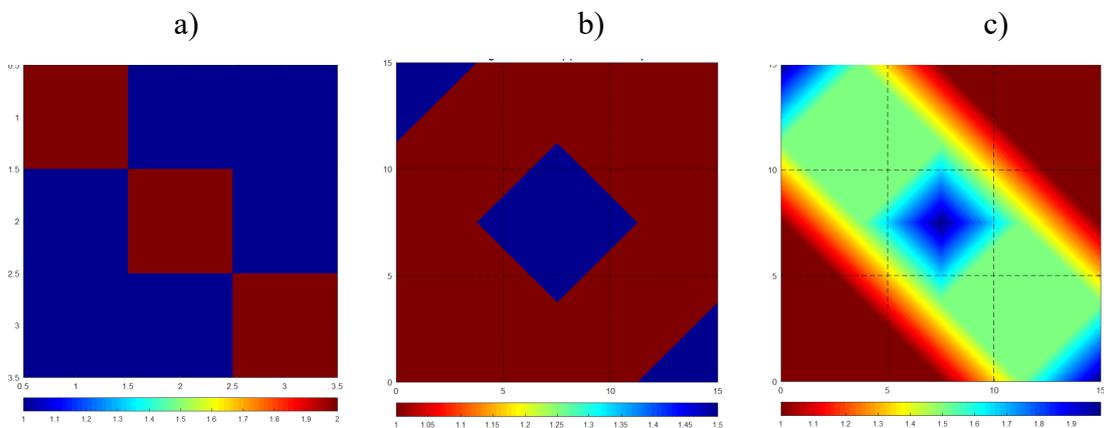
Os sistemas obtidos pelas configurações compostas, com matrizes bem condicionadas, puderam ser solucionados pelo método adotado. Os resultados obtidos para cada configuração são apresentados nas Figura 61, Figura 62, Figura 63, Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69. Em todas as figuras são apresentados em (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.

Figura 63 – Tomogramas para CP m50hv50sd. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos



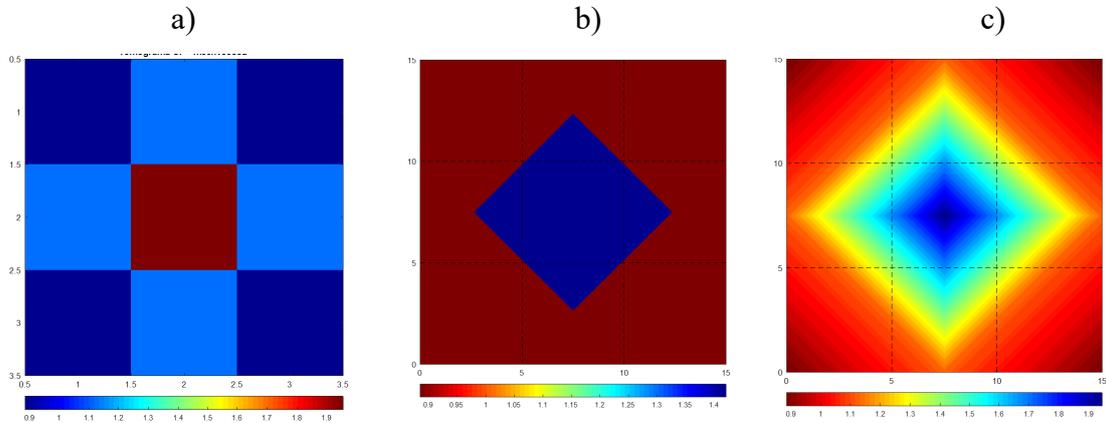
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 64– Tomogramas para CP m50hv50dp. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos



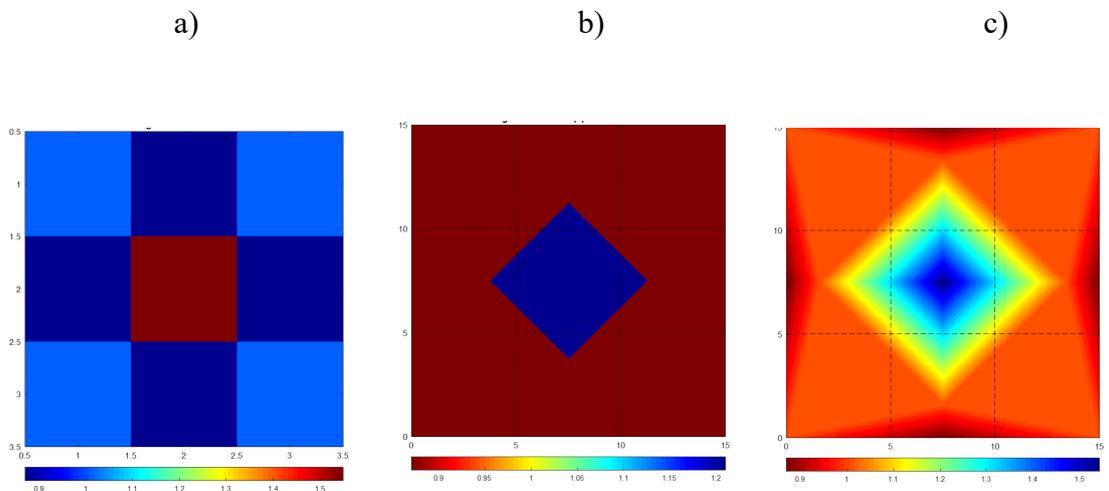
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 65– Tomogramas para CP m50hv50ced. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos



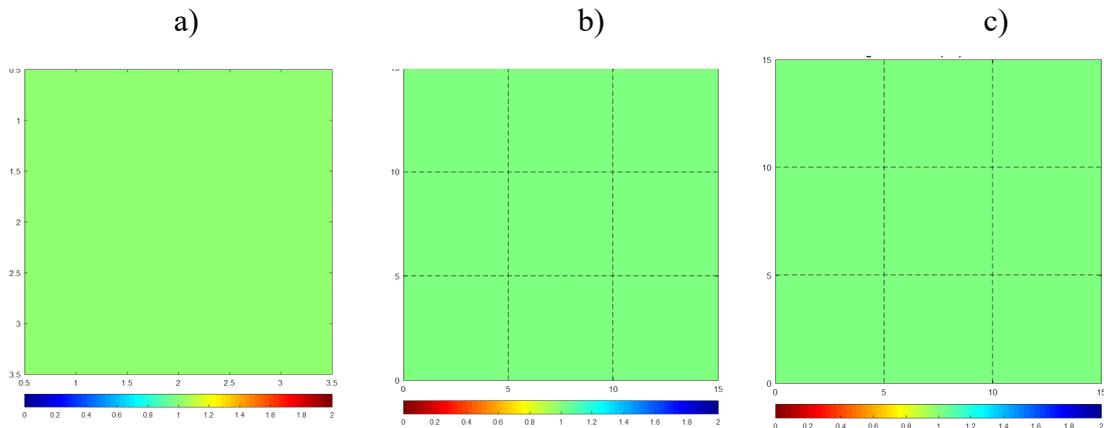
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 66 – Tomogramas para CP m50hv25ce. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos



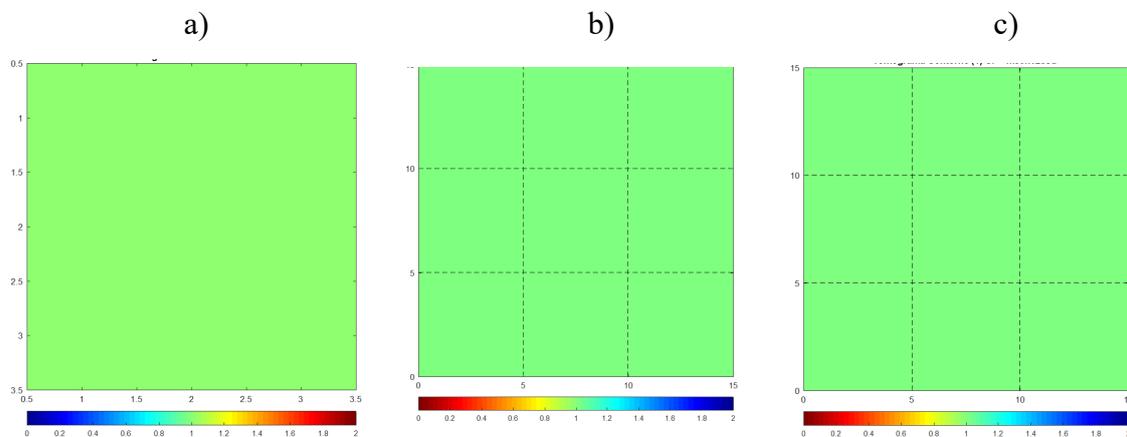
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 67 – Tomogramas para CP m50hv25ie. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos



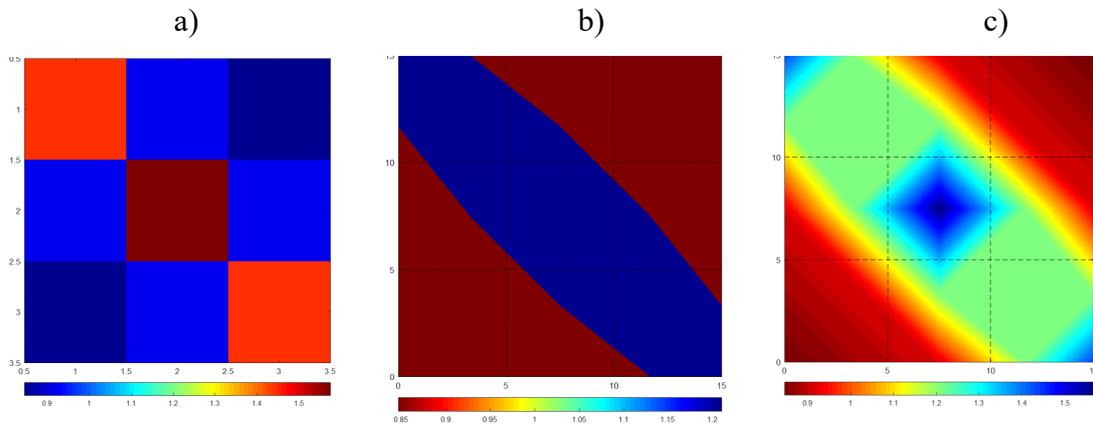
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 68 – Tomogramas para CP m50hv25sd. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 69– Tomogramas para CP m50hv25dp. (a) tomograma usando mapa de cores, (b) contorno com uma curva de interpolação entre os resultados obtidos e (c) contorno com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos



Fonte: Elaborado pelo autor.

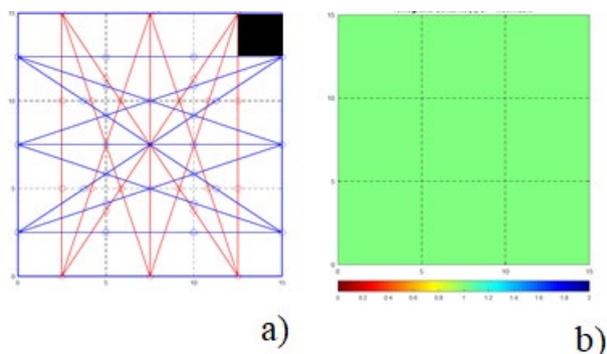
Pela análise das figuras, algumas considerações podem ser estabelecidas. Quando as discontinuidades se encontram totalmente dentro de um elemento de malha e preenchendo-o por completo, o método proposto é capaz de localizá-la com precisão, como exposto nas Figuras Figura 61, Figura 62, Figura 63 e Figura 64. Nesse caso, o método de representação por mapa de cores (a) é o que melhor se adequa para apresentação do resultado. Deve-se estudar o comportamento interno do comando que gera os contornos para entender o que leva a representação das discontinuidades de canto terem o formato diagonal apresentado.

No caso da discontinuidade de 5cm x 5cm centrada e com inclinação, Figura 65, o giro dado faz com que sua localização esteja parcialmente em diferentes elementos de malha. A representação por mapa de cores indica que algo está no centro e tem influência em elementos de malha adjacentes, entretanto o tomograma não fornece informações sobre as dimensões e formato da discontinuidade. A representação por contornos, por sua vez, é capaz tanto de localizar quanto de dar formato a discontinuidade neste caso.

Quando o tamanho da discontinuidade centrada é reduzida e se mantém o mesmo tamanho de malha, Figura 66, as três formas de representação são capazes de localizá-la, entretanto suas dimensões não são corretamente estabelecidas.

A situação piora quando se observam as Figura 67 e Figura 68, com discontinuidades de 2.5cm x 2.5cm localizadas no canto inferior esquerdo e canto superior direito do CP, nessas imagens nada pode ser observado acerca do interior do corpo. o fenômeno que gera essa situação é descrito na Figura 70.

Figura 70 - Relação entre descontinuidade e trechos de leitura. a) trechos de leitura discretizado, b) tomograma representado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A falta da representação da descontinuidade pelo tomograma final é explicado uma vez que nenhuma das leituras que compõem o vetor de tempos atravessa essa descontinuidade. Isso faz com que elas não tenham impacto no tomograma. Esse comportamento era esperado por conta da proximidade das bordas à descontinuidade e pelo tamanho da malha.

Em relação às descontinuidades de 2,5cm x 2,5cm alocadas na diagonal principal, o método de mapa de cores apresenta uma descontinuidade no centro do CP que afeta sua diagonal principal e entornos, porém novamente não exprime a natureza geométrica da seção interna. As representações por contornos descrevem melhor a presença de descontinuidades na diagonal principal, entretanto também falham ao dimensionar as descontinuidades estabelecidas.

A dificuldade de localização e dimensionamento de descontinuidades de tamanho inferior ao do elemento de malha já era esperado, espera-se que o problema seja amenizado ao se adotar malhas de tamanhos menores.

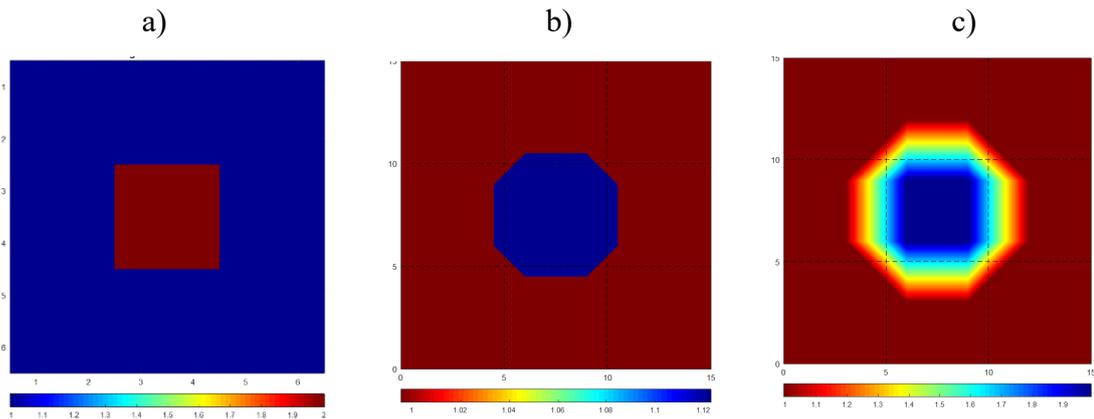
4.3.2 Malha de 2.5cm x 2.5cm

Como observado na malha de 5cm x 5cm, para a malha de 2,5cm x 2,5cm, os sistemas gerados a partir das configurações de leitura horizontais e verticais também não puderam ser resolvidos com os métodos de solução propostos. De forma análoga, o resultado é produto das propriedades do sistema desenvolvido, principalmente do condicionamento das matrizes de distância, e a proposta de solução segue a mesma indicação anterior.

Os sistemas obtidos pelas configurações compostas, com matrizes bem condicionadas, puderam ser solucionados pelo método adotado. Os resultados obtidos para cada configuração

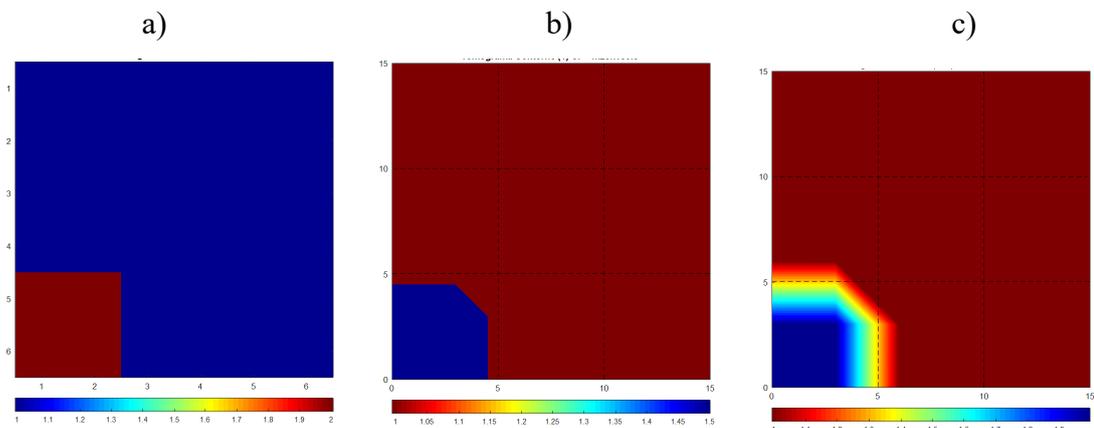
são apresentados nas Figura 71, Figura 72, Figura 73, Figura 74, Figura 75, Figura 76, Figura 77, Figura 78 e Figura 79. Em todas as figuras são apresentados em (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas.

Figura 71 – Tomogramas para CP m25hv50ce. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas



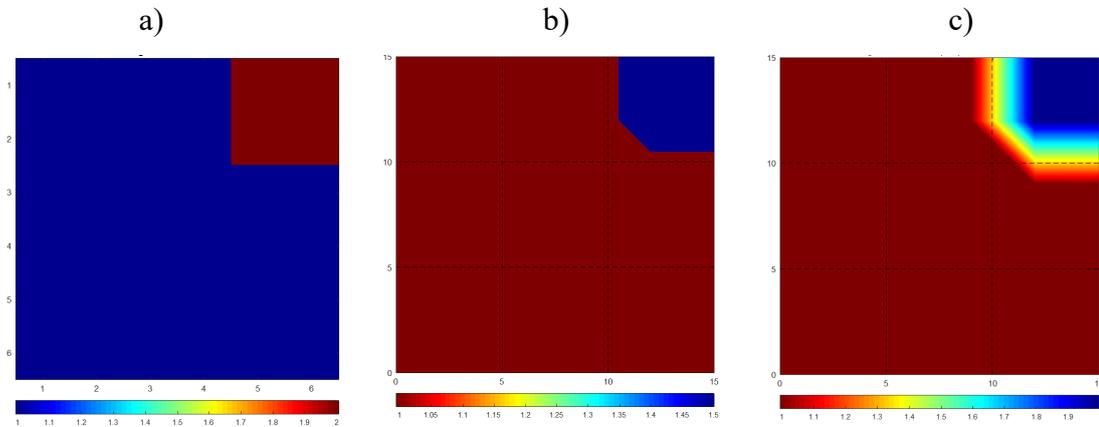
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 72 – Tomogramas para CP m25hv50ie. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas



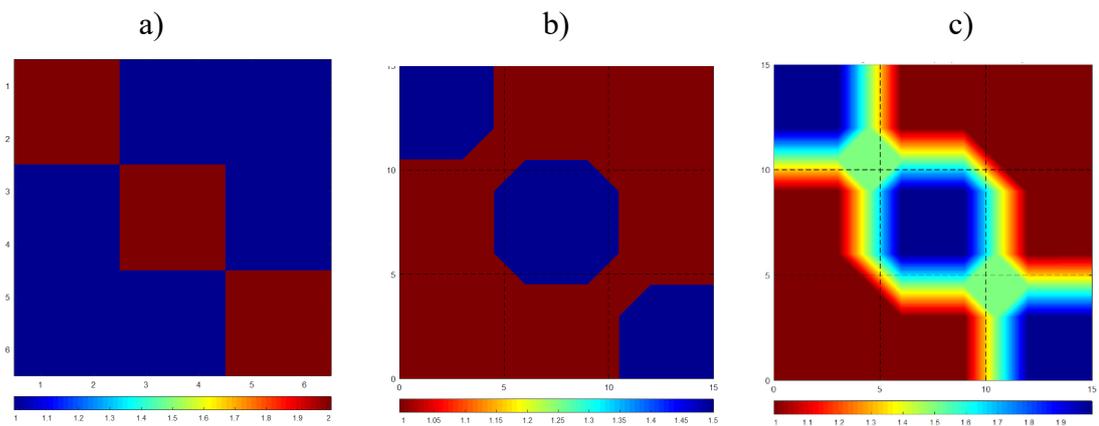
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 73– Tomogramas para CP m25hv50sd. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas



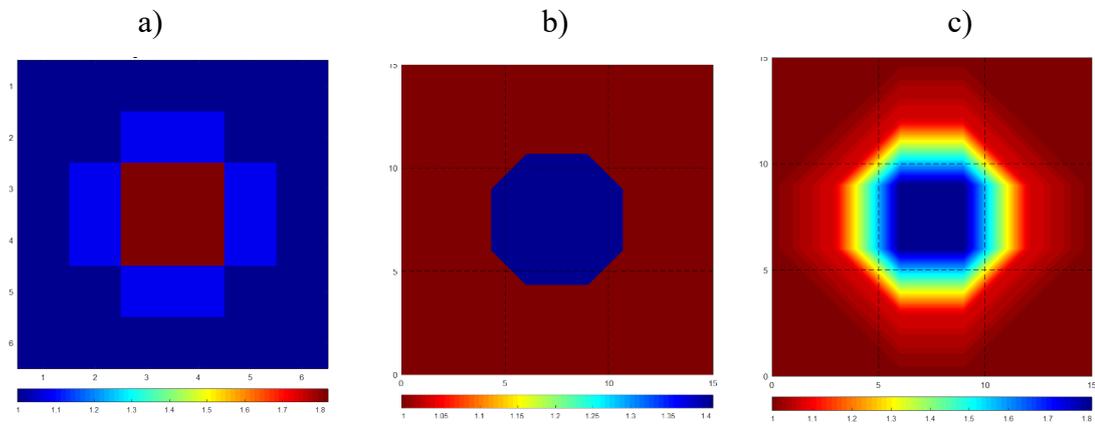
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 74 – Tomogramas para CP m25hv50dp. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas



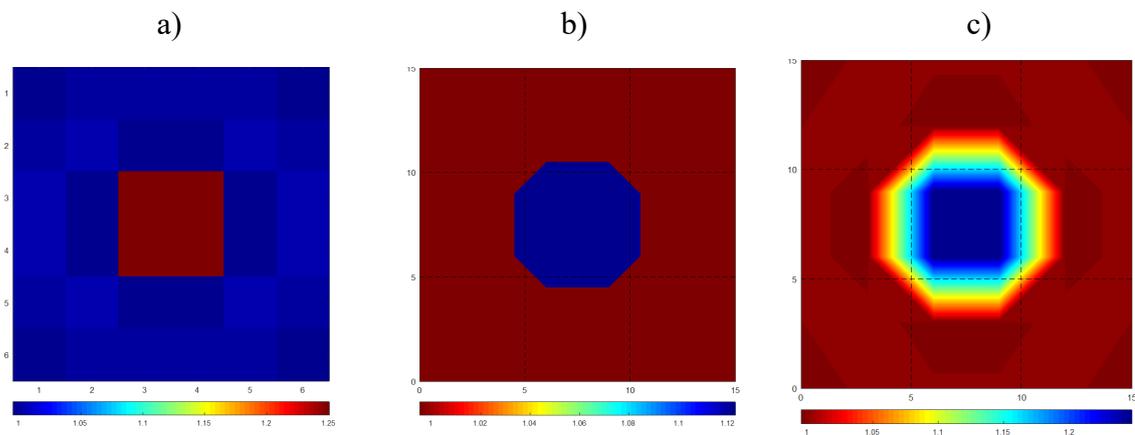
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 75 – Tomogramas para CP m25hv50ced. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas



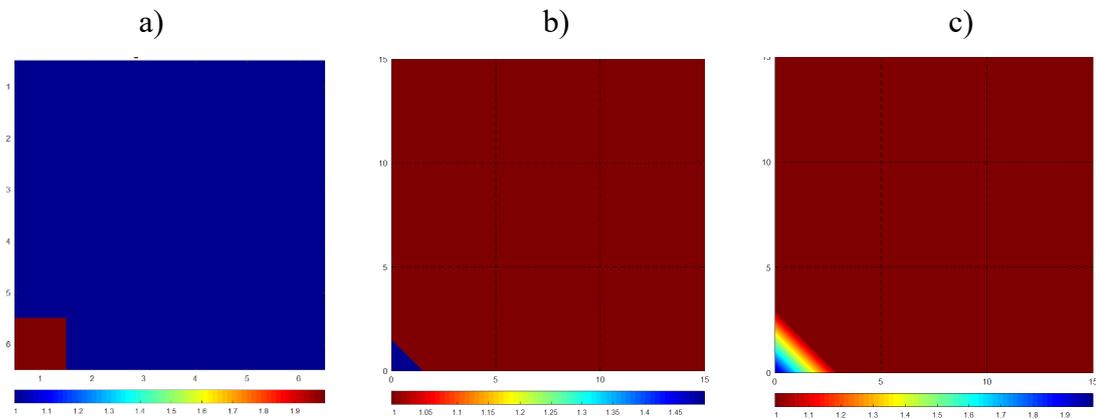
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 76 – Tomogramas para CP m25hv25ce. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas



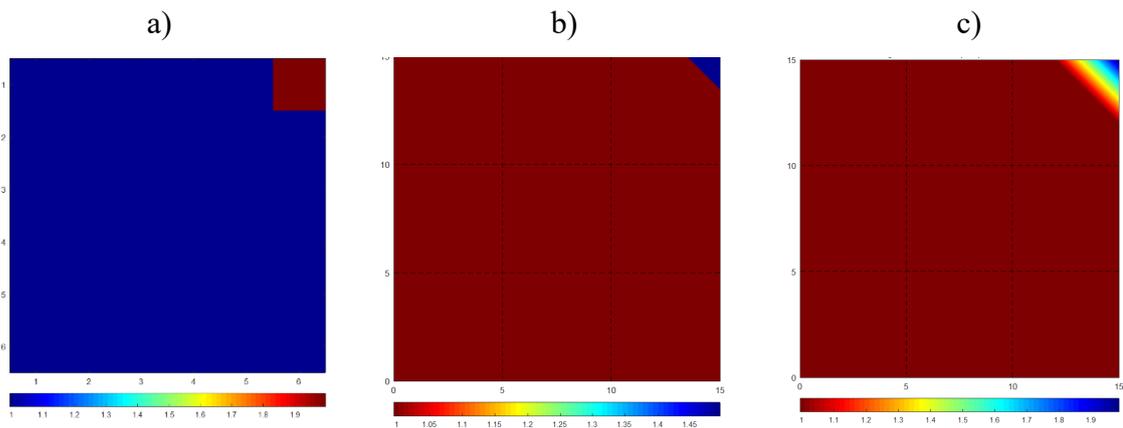
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 77 – Tomogramas para CP m25hv25ie. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas



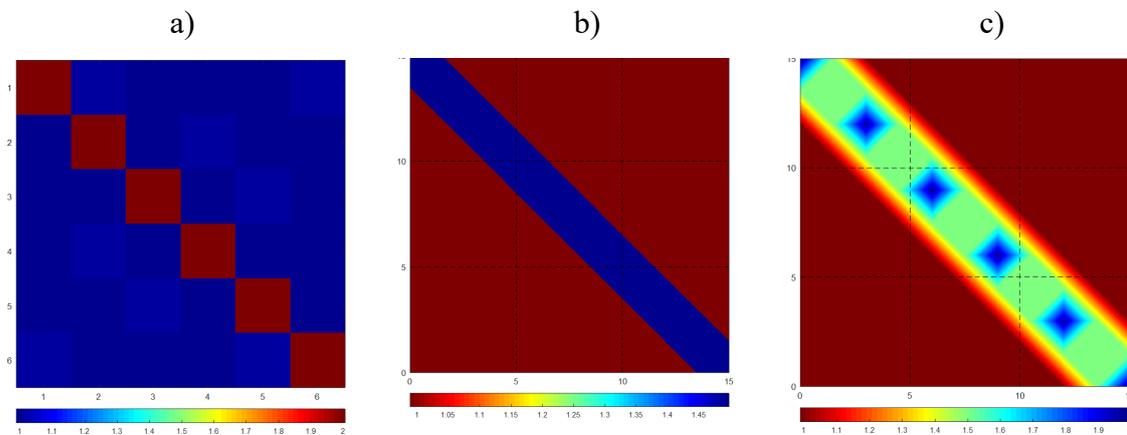
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 78 – Tomogramas para CP m25hv25sd. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 79 – Tomogramas para CP m25hv25dp. (a) tomograma mapa de cores, (b) contorno com uma curva e (c) contorno com 100 curvas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os corpos contendo as discontinuidades de 5cm x 5cm, os tomogramas por mapa de cores gerados com a malha de 2.5cm x 2.5cm, Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74, apresentaram mesma imagem final quando comparado aos tomogramas gerados com a malha de 5cm x 5cm com o mesmo método, Figura 61, Figura 62, Figura 63 e Figura 64. Entretanto, em relação à aplicação do método de contorno, observa-se que para a menor malha, os resultados se aproximam muito mais do esperado.

Na descontinuidade centrada agora já se consegue ter informações tanto sobre a localização quanto a sua geometria. Nos tomogramas de canto, que antes se apresentavam como diagonais, agora já se tem a definição dos limites das descontinuidades. Incrementos na resolução da imagem final também foram observados para os tomogramas de descontinuidades na diagonal principal e com descontinuidade centrada com inclinação. Entretanto, para a último, ainda não se obteve informação precisa sobre sua inclinação, a aplicação de menores malhas que interceptem suas arestas pode melhorar a resolução do tomograma.

O problema encontrado nos CPs de descontinuidades nos cantos *_25ie* e *_25sd*, Figura 77 e Figura 78, agora foram solucionados. Com a diminuição da malha, leituras começaram a interceptar a descontinuidade e o tomograma refletiu esse comportamento. Entretanto, tornou-se a ter o problema encontrado nas Figura 62 e Figura 63, quando a descontinuidade é do tamanho da malha e próximas as bordas, está é representada como diagonal no tomograma de contornos.

Para o tomograma de diagonal principal composta de descontinuidades de 2,5x2,5cm, Figura 79, percebe-se uma grande melhora em relação aos tomogramas gerados pela malha de

5cm x 5cm. Com a diminuição do tamanho da malha, até o tomograma de cores que antes não exprimia a natureza geométrica da seção interna já consegue detalhar o tamanho e a localização das descontinuidades.

Em todos tomogramas observados, a diminuição das dimensões da malha levou a uma melhor qualidade no resultado final, tanto em termos de localização quanto de dimensionamento das descontinuidades. Entretanto, para a aplicação de malhas cada vez menores, o usuário deve ter ciência do aumento gradativo na quantidade de leituras. Na situação em estudo, os tomogramas de malha 5cm x 5cm foram gerados através de 18 leituras, enquanto para diminuição do elemento de malha para 2,5cm por 2,5cm elevou-se o número de leituras a 72. Um elevado número de leituras leva a um tempo maior na execução dos ensaios de ultrassom necessários para gerar o tomograma.

4.4 TOMOGRAMAS RESULTANTES EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

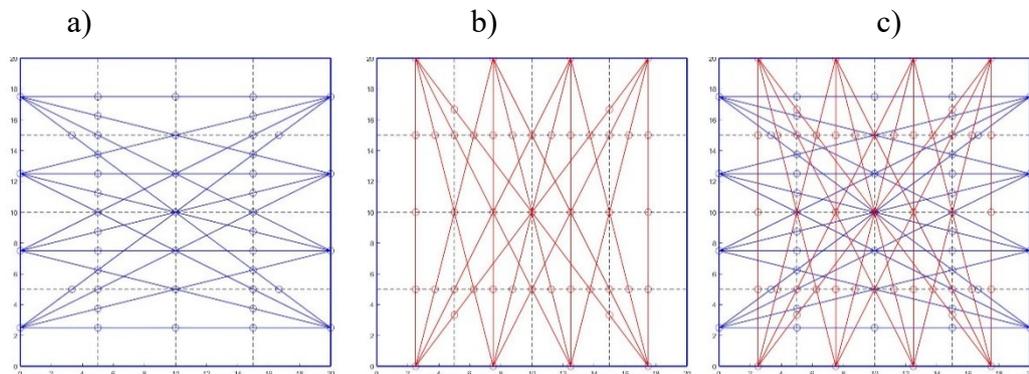
Nesta seção será analisada a capacidade do algoritmo proposto em desenvolver tomogramas a partir dos dados obtidos em ensaios de velocidade de pulso ultrassônico nos CPs de concreto. As considerações estabelecidas no desenvolvimento das seções 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 serão utilizadas.

Fazem parte do escopo dessa seção a apresentação das matrizes de distância obtidas, análise de esparsidade e condicionamento e os tomogramas resultantes. Como definido na seção 4.1 serão analisados apenas os sistemas sobredeterminados, bem condicionados com alto grau de esparsidade (leituras compostas). As representações tomográficas serão feitas a partir de contornos com 100 interpolações, uma vez que exibem de melhor forma os resultados de acordo com os resultados obtidos para CPs sintéticos e mostrados na seção 4.3.

4.3.1 Matrizes Obtidas

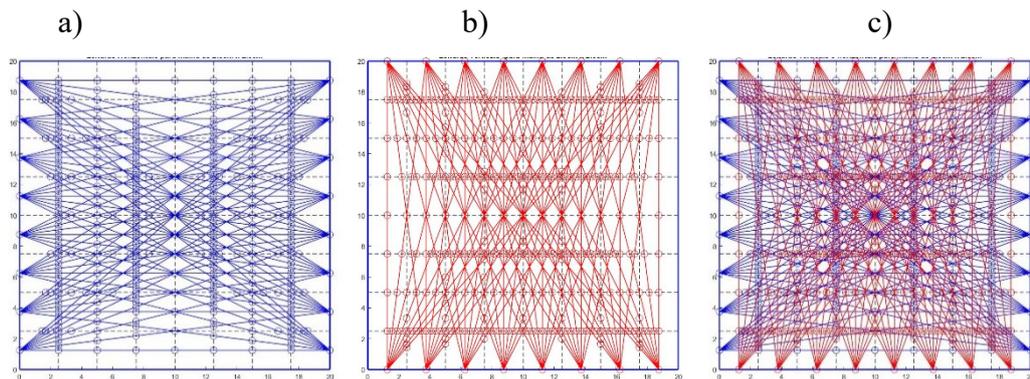
Em relação aos CPs de concreto, as matrizes de distância foram calculadas pelo mesmo procedimento utilizado para os CPs virtuais. As Figura 80 e Figura 81 exibem as malhas e trajetórias de leitura utilizadas nos corpos de prova de concreto.

Figura 80 - Trajetórias de leitura discretizadas para malha de 5cm x 5cm no corpo de prova de concreto. (a) leituras horizontais, (b) leituras verticais e (c) leituras compostas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 81 - Trajetórias de leitura discretizadas para malha de 2,5cm x 2,5cm no corpo de prova de concreto. (a) leituras horizontais, (b) leituras verticais e (c) leituras compostas



Fonte: Elaborada pelo autor.

A criação das matrizes de distância é um procedimento meramente geométrico, portanto, independe das propriedades do material. As considerações estabelecidas previamente para as matrizes de distância geradas a partir dos CPs simulados são válidas para os CPs de concreto. A maior diferença entre elas está na densidade de leituras, o que já era esperado visto o aumento dos elementos de malha.

4.3.2 Esparsidade e Condicionamento

Foi realizada uma análise de esparsidade, condicionamento e ordem das matrizes de distância obtidas para cada uma das configurações de malha e leitura como forma de estudar o

comportamento dos sistemas de equações. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7– Ordem, condicionamento e esparsidade para cada matriz de distâncias nos CPs de concreto

Malha	Ordem	Condicionamento	Esparsidade (%)
50x50hv	32x16	5,7585	73,44
2.5x2.5hv	128x64	12,8083	85,74

Fonte: Elaborada pelo autor.

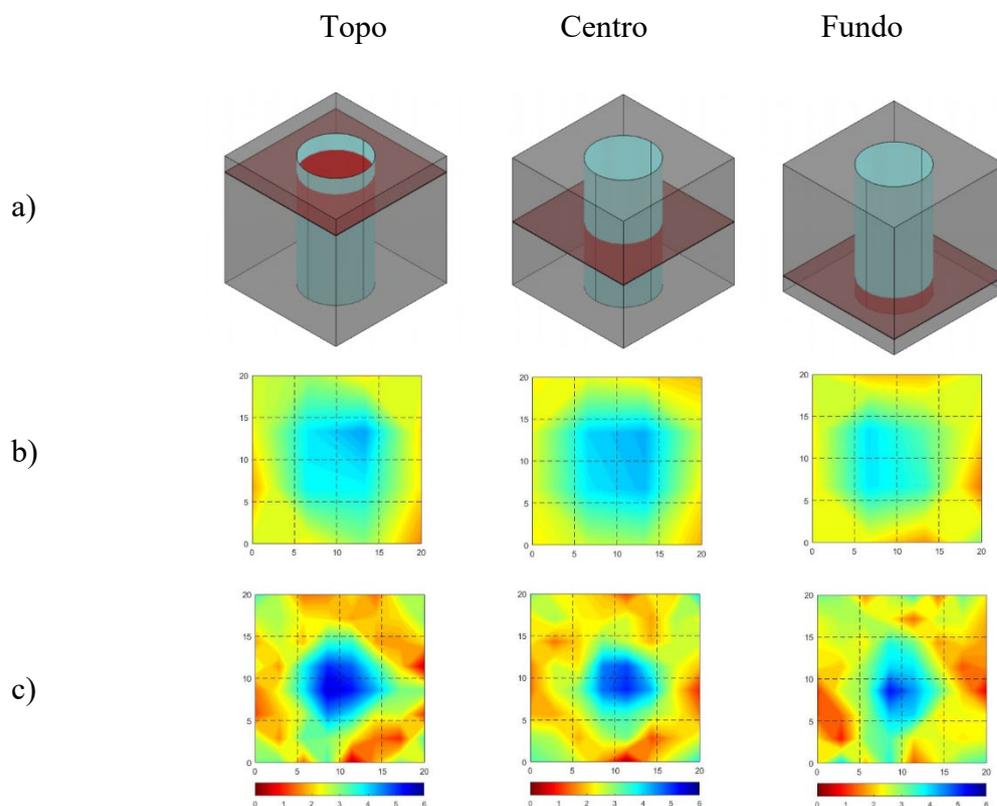
Pela análise da Tabela 7, nota-se que as matrizes de distância geradas a partir das leituras nos CPs de concreto fazem parte do grupo de sistemas lineares sobredeterminados bem condicionados e com alto grau de esparsidade. Como essas são as características do problema a ser solucionado pelo algoritmo proposto, pode-se então proceder para geração dos tomogramas.

4.3.2 Tomogramas obtidos em CPs de concreto

Como descrito por Perlin (2015), a análise dos tomogramas resultantes é um processo complexo e deve ser realizada por profissional de engenharia experiente com entendimento sobre as propriedades não homogêneas do concreto, bem como do comportamento da propagação de ondas em meio sólido não homogêneo. Nessa seção, serão exibidos os tomogramas resultantes para as seções dos CPs de concreto, sua análise e as considerações sobre os resultados obtidos. As figuras a seguir serão apresentadas na ordem: representação das seções do corpo de prova; tomogramas resultantes da malha de 5cm x 5cm; e tomogramas resultantes da malha de 2,5cm x 2,5cm.

Na Figura 82 estão representados os tomogramas resultantes para o corpo de prova de concreto com tubulação de esgoto de PVC de 10cm.

Figura 82 - Tomogramas resultantes para diferentes seções do corpo de prova de concreto com tubulação de PVC de 10cm. a) seção, b) tomograma para malha de 5cm x 5cm, e c) tomograma para malha de 2,5 x 2,5cm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em termos gerais, ao se analisar os tomogramas gerados a partir da malha de 5cm x 5cm da Figura 82, pode-se perceber a existência de uma descontinuidade (representada em azul) no interior do corpo de prova. Entretanto, suas dimensões não estão bem estabelecidas. Nos tomogramas gerados a partir da malha de leituras de 2,5cm x 2,5cm, percebe-se novamente a localização da descontinuidade no centro do corpo de prova. Há nesse caso uma melhor representação da natureza geométrica da seção com forma e tamanho mais próximos do real.

As variações de cor da superfície de concreto (indo de amarelo a vermelho) encontradas tanto nos tomogramas da Figura 82 quanto nas demais figuras por vir são perfeitamente aceitáveis. Tal representação é entendida por se tratar de tomogramas resultantes de leituras em corpos de prova reais, onde os materiais não são homogêneos e as leituras não são perfeitas.

Como descrito na seção 3.2, a qualidade das leituras de velocidade de pulso ultrassônico efetuadas em corpos de concreto sofre interferência de inúmeros fatores, tais como falta de

acurácia do executor do ensaio, ângulo de leitura, má acoplagem dos transdutores, condições superficiais da peça ensaiada, frequência nominal dos transdutores, entre outros.

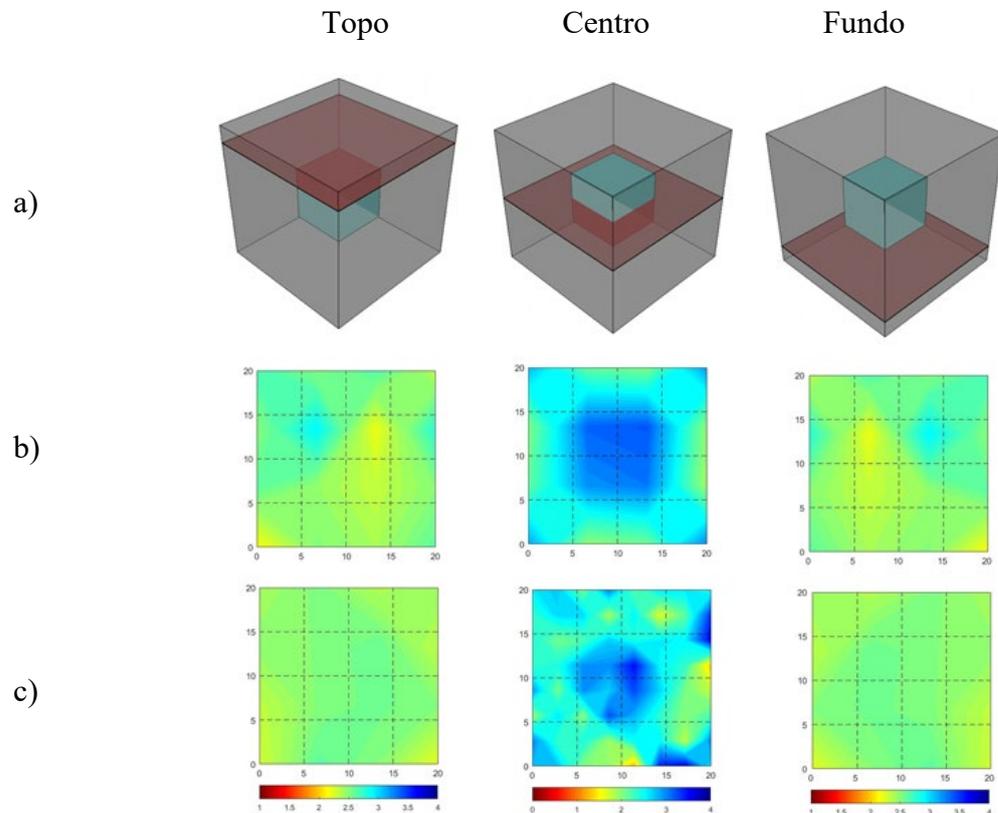
As interferências provenientes das condições das superfícies ensaiadas e o processo de acoplagem foram reduzidas pelo tratamento superficial descrito na seção 3.5 e pela utilização de material acoplante inerte. Os erros provenientes da acurácia do operador do ensaio também foram reduzidos pela execução em triplicata de cada leitura. Um estudo sobre a influência da frequência nominal dos transdutores nos resultados dos tomogramas finais não foi realizado por conta da indisponibilidade de transdutores em diferentes frequências, sendo assim uma sugestão para trabalhos futuros.

Por fim, para estudo da influência de ângulos de leitura nas velocidade resultantes de ensaios de propagação de pulso ultrassônico, Emanuelli Junior et al. (2010) recomendam que seja realizado um ensaio base para correção angular. Para os transdutores de 54 kHz, os autores recomendam a elaboração de uma pequena parede de concreto de dimensões mínimas de 100 cm x 100 cm x 20 cm. As velocidades de propagação devem ser calculadas e classificadas de acordo com seu ângulo de leitura. A relação entre leituras ortogonais e leituras diretas deve ser calculada e plotada num gráfico. A função matemática que melhor representar a os dados deve ser utilizada como fator de correção de dependência angular. Os autores sugerem que além de reduzir o impacto dos ângulos de leitura, a correção angular pode melhorar o resultado dos tomogramas finais.

Na Figura 83 estão representados os tomogramas resultantes para o corpo de prova de concreto com bloco de EPS de 7,5 cm x 7,5 cm x 7,5cm.

Os primeiros tomogramas analisados na Figura 83 são aqueles referentes à seção MID, ou seja, a seção que corta o bloco de EPS. Tanto a malha de 5cm x 5cm quando a malha de 2,5cm x 2,5cm foram capazes de localizar a descontinuidade, e mais uma vez as características de tamanho da seção na representação pela malha refinada estiveram mais próximas do real. A representação de regiões em azul próximos às extremidades podem ser justificadas pela interferência de borda nas leituras que ocorre nessa região.

Figura 83 - Tomogramas resultantes para diferentes seções do corpo de prova de concreto com tubo bloco de EPS de 7,5cm x 7,5cm x 7,5cm. a) seção, b) tomograma para malha de 5cm x 5cm, e c) tomograma para malha de 2,5 x 2,5cm

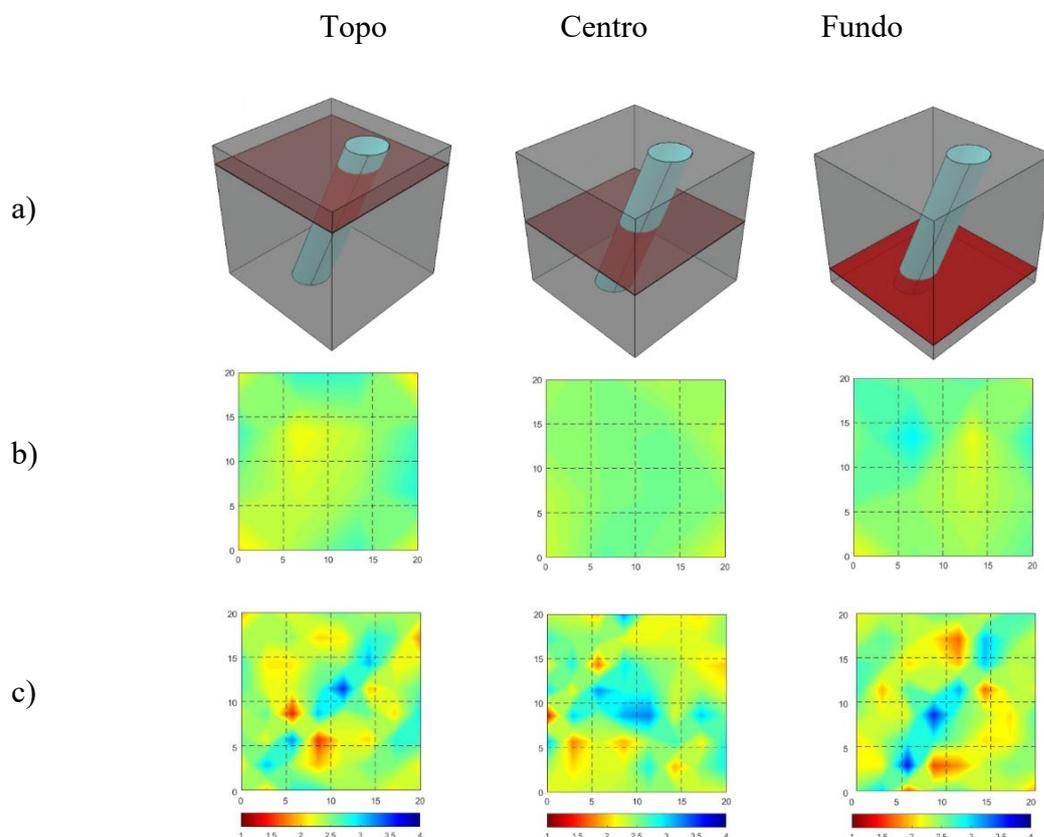


Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas seções A e D onde não existem discontinuidades, apenas concreto íntegro, os tomogramas resultantes para ambas as malhas foram representativos de seções de concreto. Cabe ao profissional responsável pela análise dos tomogramas estar atento que as diferenças de cores são resultado das características não homogêneas do material.

Na Figura 84 estão representados os tomogramas resultantes para o corpo de prova de concreto com tubulação de água fria de 5 cm.

Figura 84 - Tomogramas resultantes para diferentes seções do corpo de prova de concreto com tubulação de água fria de 5 cm de diâmetro. a) seção, b) tomograma para malha de 5cm x 5cm, e c) tomograma para malha de 2,5 x 2,5cm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os tomogramas resultantes da malha de 5cm x 5cm para todas as seções estudadas não foram capazes de representar a descontinuidade interna. A não representação da descontinuidade pelos tomogramas gerados a partir dessa malha pode ser explicada por dois fatores: 1- a frequência nominal do transdutor é muito baixa para representar a descontinuidade; 2- a malha é muito grande e poucos percursos de pulso atravessaram a descontinuidade, logo pouca informação alimentou o sistema.

Em relação à frequência nominal dos transdutores e sua influência nos tomogramas em concreto, Haach (2016) estudou a geração de tomogramas a partir de leituras provenientes de transdutores de 54kHz e 250kHz. O autor pontua que o transdutor de maior frequência traz melhores resultados uma vez que o pulso emitido tem menor comprimento de onda, característica que melhora a detecção de descontinuidades menores.

De forma análoga aos resultados obtidos para CPs sintéticos, a falta da representação da descontinuidade pelo tomograma final pode ser explicada uma vez que nenhuma das leituras

que compõem o vetor de tempos atravessa essa descontinuidade. Isso faz com que elas não tenham impacto no tomograma.

A redução do tamanho do elemento de malha gerou tomogramas com maior representatividade da descontinuidade. Na seção intermediária pode-se observar a existência de um elemento central com tamanho próximo ao da seção da tubulação de PVC. Nas demais seções, descontinuidades foram localizadas nos quadrantes esperados e com dimensões próximas às do tubo de PVC, entretanto nota-se a presença de elementos gerados por interferência de leituras que podem ser facilmente confundidos com descontinuidades. Dessa forma, no caso de descontinuidades com dimensões menores que 5cm, aconselha-se utilização de transdutores com frequência nominal mais alta, uma vez que o refinamento do tamanho de malha não solucionou o problema para o transdutor de 54kHz.

Pela análise das Figura 82, Figura 83 e Figura 84, percebe-se que malhas com menores quantidades de elementos podem ser úteis para análises preliminares da seção uma vez que essas demandam menores quantidades de leituras para sua execução. Malhas com maiores quantidades de elementos são recomendadas quando se precisa de tomogramas com melhor qualidade, principalmente no que toca as características geométricas da descontinuidade.

Ainda, pelo que foi discutido, salienta-se que independente da malha utilizada a análise de tomogramas gerados por ensaios ultrassom deve ser feita com cuidado. O profissional responsável deve estar ciente das limitações do método no que diz respeito ao tamanho de malha e frequência nominal do transdutor utilizado. O não respeito à essas características pode conduzir a conclusões equivocadas sobre a presença e natureza de descontinuidades em corpos de concreto principalmente quando estas tiverem dimensões reduzidas.

Por fim, vale salientar que foi mencionada durante essa pesquisa a falta de algoritmos suficientemente detalhados para implementação e utilização da tomografia ultrassônica pelo meio técnico. Este problema foi inclusive reconhecido como um dos motivos que corroboram para a não utilização do ensaio nas rotinas de avaliação de descontinuidades em estruturas, edificações e afins. Assim, como forma de mitigar o problema exposto seguindo a filosofia de software livre, a ferramenta computacional desenvolvida está disponível baixo licença GNU-GPL no repositório <https://github.com/dsdominguez/ultrassomtography.git>. No futuro próximo a ferramenta desenvolvida será registrada no Instituto Nacional da Propriedade Intelectual como Programa de Computador.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta computacional aliando técnicas tomográficas ao ensaio de propagação de pulso ultrassônico capaz de identificar não homogeneidades internas em estruturas de concreto.

A análise gráfica das matrizes de distâncias desenvolvidas mostrou-se de extrema valia para verificação do funcionamento do algoritmo proposto quanto: a discretização das malhas de leitura; a análise das interseções entre as trajetórias de leitura e linhas de malha; a presença de trajetórias de leitura dentro e fora do domínio de estudo; e a devida localização dos trechos de leitura nas matrizes de distância.

Percebeu-se que os sistemas tomográficos resultantes são divididos em dois grandes grupos: 1- sistemas sobredeterminados, bem condicionados com alto grau de esparsidade; e 2- sistemas sem sobredeterminação, mal condicionados e esparsos. Foi desenvolvida uma solução numérica satisfatória para os sistemas do grupo 1.

A criação de vetores de tempo sintéticos mostrou-se uma ótima ferramenta para verificação do funcionamento do algoritmo proposto. Pela análise dos tomogramas resultantes de vetores sintéticos percebeu-se que entre as representações tomográficas estudadas, a que obteve melhores descrições da natureza do problema foi a representação em contornos com 100 curvas de interpolação entre os resultados obtidos.

Ainda sobre vetores de tempo sintéticos, observou-se que descontinuidades muito pequenas, dependendo de sua localização, podem não ser atravessadas pelas leituras, o que leva a uma não representação no tomograma final. Tal problema pode ser solucionado com o refinamento da malha.

Os corpos de prova de concreto com diferentes descontinuidades desenvolvidos foram utilizados para validação do algoritmo na elaboração de tomogramas representativos em estruturas de concreto. Foram realizadas leituras de propagação de pulso ultrassônico compostas, o que gerou sistemas sobredeterminados, bem condicionados com alto grau de esparsidade.

Em termos gerais, foi possível desenvolver tomogramas representativos para os corpos de prova de concreto com tubulação de esgotamento sanitário de PVC de 10cm e blocos de EPS de 7,5cm x 7,5cm x 7,5cm. Salvo a seção intermediária com a malha de 2,5cm x 2,5cm, os resultados obtidos para o corpo de prova com tubulação de água fria de PVC de 5cm não foram capazes de representar a seção interna do corpo.

Em todos os casos, a análise de dependência de malha mostrou que menores dimensões dos elementos de discretização geram tomogramas com maior quantidade de informações acerca da localização de descontinuidades e suas características geométricas. Entretanto, isso se conduz a um elevado custo, em termos de necessitar mais ensaios de propagação de pulso ultrassônico. O refino indiscriminado da malha pode inviabilizar a aplicação da metodologia *in situ*.

A ferramenta computacional desenvolvida nesse trabalho está disponível para acesso pelo meio técnico no repositório de códigos GitHub como forma mitigar o problema da falta de suporte computacional para uso desta técnica. Tal iniciativa tem objetivo de incentivar a disseminação da tomografia ultrassônica em concreto.

Como sugestão para trabalhos futuros com a tomografia ultrassônica, indica-se a implementação dos métodos numéricos de Cimmino otimizado e Kaczmarz para verificação da viabilidade de solução de sistemas lineares mal condicionados e esparsos referentes às leituras verticais e horizontais (grupo 2). O que poderia reduzir consideravelmente o número de ensaios de ultrassom a serem realizados.

Indica-se a implementação do algoritmo para seções genéricas, não apenas seções retangulares, abrangendo assim uma maior gama de estruturas de concreto existentes.

Sugere-se também o desenvolvimento de um sistema automatizado de aquisição de dados no ensaio de ultrassom. Tal sistema pode tornar a execução de ensaios para malhas com grande número de elementos menos exaustiva.

Como pontuado por Haach (2016), sugere-se desenvolver estudo acerca da geração de tomogramas a partir de transdutores com diferentes frequências nominais e avaliar seu impacto nos tomogramas finais.

Além, recomenda-se realizar estudo da influência de ângulos de leitura nas velocidades resultantes de ensaios de propagação de pulso ultrassônico para transdutores de 54kHz e sua influência na representação tomográfica.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 2020.

ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultrassom**. São Paulo: Abendi, 2011.

ASSEF, Amauri A.; MAIA, Joaquim M.; GEWEHR, Pedro M.; GAMBÁ, Humberto R.; COSTA, Eduardo T.; BUTTON, Vera L. S. N. Sistema para geração, aquisição e processamento de sinais de ultra-som. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 145–155, 2009. DOI: 10.1590/S0103-17592009000200003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592009000200003&lng=pt&tlng=pt.

BURDEN, Richard L. ..; FAIRES, J. Douglas. **Numerical Analysis**. 9. ed. Boston: Brooks/Cole, 2011.

CERQUEIRA DA SILVA, Rodrigo Rogerio; GONÇALVES, Raquel; BERTOLDO, Cinthya. Classification and inspection of reinforced concrete elements for use in retaining walls using ultrasound tests. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 262, p. 120010, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820320158>.

CHOI, Hajin. **EVALUATION OF INTERNAL DAMAGE IN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS USING ULTRASONIC TOMOGRAPHY**. 2016. University of Illinois, [S. l.], 2016.

CHOI, Hajin; POPOVICS, John S. NDE application of ultrasonic tomography to a full-scale concrete structure. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, [S. l.], v. 62, n. 6, p. 1076–1085, 2015. DOI: 10.1109/TUFFC.2014.006962. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7119988/>.

DA SILVA, Turibio José; FERREIRA, Gercindo; DIAS, João Fernando. Influência de variáveis nos resultados de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado. **Ciência & Engenharia**, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 103–113, 2013. DOI: 10.14393/19834071.2013.21693. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/21693>.

DE PIERRO, Alvaro R. Fundamentos Matemáticos da Tomografia Computadorizada: Método de Transformação. **Matemática Universitária**, [S. l.], v. 11, p. 53–65, 1990.

DIAS, Leonardo Alves. **Concreto incorporado com EVA e fibras de piaçava: Uma alternativa sustentável na construção civil**. 2017. Universidade Estadual de Santa Cruz, [S. l.], 2017.

DOMÍNGUEZ ORTEGA, Javier. **SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN ULTRASONICA EN PIEZAS METÁLICAS PARA SU APLICACIÓN EN LA DETECCIÓN DE DEFECTOS**. 2013. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, [S. l.], 2013.

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

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2002.

GODINHO, J. P.; DE SOUZA JÚNIOR, T. F.; MEDEIROS, M. H. F.; SILVA, M. S. A. Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 222–247, 2020. DOI: 10.1590/s1983-41952020000200004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952020000200222&tlng=en.

HAACH, Vladimir G.; RAMIREZ, Fernando C. Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 119, p. 61–70, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.056. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816307814>.

KELLNER, Alexander W. A. A reconstrução do Museu Nacional: bom para o Rio, bom para o Brasil! **Ciência e Cultura**, [S. l.], v. 71, n. 3, p. 04–05, 2019. DOI: 10.21800/2317-66602019000300002. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252019000300002&tlng=pt.

KENCANAWATI, Ni Nyoman; AKMALUDDIN; ANSHARI, Buan; GAZI PAEDULLAH, Ahmad; SHIGEISHI, Mitsuhiro. The study of ultrasonic pulse velocity on plain and reinforced damaged concrete. **MATEC Web of Conferences**, [S. l.], v. 195, p. 02026, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201819502026. Disponível em: <https://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/201819502026>.

LIMA, Mariane Porto. **CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND POR MEIO DA VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO**. 2020. Universidade Estadual de Santa Cruz, [S. l.], 2020.

LIN, Y.; KUO, S. F.; HSIAO, C.; LAI, C. P. Investigation of pulse velocity-strength relationship of hardened concrete. **ACI materials journal**, [S. l.], v. 104, n. 4, p. 334–350, 2007.

LOPES, Sergio Weber. **Avaliação da homogeneidade e da resistência à compressão do concreto por meio de ensaios não destrutivos**. 2014. Universidade Federal de Viçosa, [S. l.], 2014.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive testing of concrete**. 2. ed. West Conshohocken: CRC Press, 2004.

MATHWORKS. **MathWorks**. 2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/>.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **CONCRETO: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008.

MOHAMMED, Tarek Uddin; RAHMAN, Md Nafiur. Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 125, p. 832–841, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.102. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816313654>.

MOTTA, Fernanda Miranda de Vasconcellos; DA SILVA, Ronaldo André Rodrigues. A adoção de tecnologias digitais na reconstrução do Patrimônio: relato da experiência do Museu Nacional, Brasil. **Pêriodicos UFPB**, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 16, 2020.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ONSCALE. **OnScale**. 2020. Disponível em: <https://onscale.com/>.

PERLIN, L. P.; PINTO, R. C. A. Tomografia ultrassônica em concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 246–269, 2013. DOI: 10.1590/S1983-41952013000200006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952013000200006&lng=pt&tlng=pt.

PERLIN, Lourenço Panosso. **Tomografia ultrassônica em concreto: Desenvolvimento de ferrament computacional**. 2011. Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2011.

PERLIN, Lourenço Panosso. **Tomografia ultrassônica em concreto e madeira: desenvolvimento de ferramenta computacional**. 2015. Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2015.

PERLIN, Lourenço Panosso; PINTO, Roberto Caldas de Andrade. Use of network theory to improve the ultrasonic tomography in concrete. **Ultrasonics**, [S. l.], v. 96, p. 185–195, 2019. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.01.007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X18302956>.

PESSOA, Jose Renato de Castro. **CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO ENDURECIDO UTILIZANDO SCÂNER DE MESA E MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA**. 2011. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, [S. l.], 2011.

PESSÔA, José Renato de Castro; DOMINGUEZ, Dany Sanchez; ASSIS, Joaquim Teixeira De; SANTANA, Marlesson Rodrigues Oliveira De; DIAS, Leonardo Alves. Análise volumétrica de porosidade do concreto através de microtomografia com Raio X e processamento de imagens. In: XV LATIN AMERICAN SEMINARY OF ANALYSIS BY X-RAY TECHNIQUES – SARX 2016 2016, Petrópolis. **Anais [...]**. Petrópolis p. 18–21.

PINTO DA SILVA FILHO, L. C.; LORENZI, A.; CAMPAGNOLO, J. L.; STRIEDER, A. J.; DE M. QUININO, U. C.; CAETANO, L. F. Estudos de caso sobre avaliação de estruturas de concreto através da utilização de ensaios não destrutivos. **Revista ALCONPAT**, [S. l.], v. 1, n. 3, p. 186–198, 2011. DOI: 10.21041/ra.v1i3.14. Disponível em: <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/14>.

PRAKASH, Ramaiah; THENMOZHI, Rajagopal; RAMAN, Sudharshan N.; SUBRAMANIAN, Chidambaram. Fibre reinforced concrete containing waste coconut shell aggregate, fly ash and polypropylene fibre. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, [S. l.], n. 94, p. 33–42, 2019. DOI: 10.17533/10.17533/udea.redin.20190403. Disponível em:

<https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/view/336618>.

REGINATO, Lucas Alexandre; LORENZI, Alexandre; LORENZI, Luciani Somensi; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto Da. Avaliação de Pilares de Concreto Armado através de Ensaio de Pulso Ultrassônico. **Revista de Engenharia Civil IMED**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 32, 2017. DOI: 10.18256/2358-6508/rec-imed.v4n1p32-47. Disponível em: <https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/1642>.

RIBEIRO, Y. A. M.; BOMFIM, D. S.; SACRAMENTO, L. A.; CASTRO, J. R. P.; DOMINGUEZ, D. S.; LIMA, M. P. IDENTIFICAÇÃO DE NÃO HOMOGENEIDADES EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ENDURECIDO ATRAVÉS DE PULSO ULTRASSÔNICO. In: >CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES 2020, **Anais [...]**. : Associação Brasileira de Patologia das Construções, 2020. p. 1329–1338. DOI: 10.4322/CBPAT.2020.130. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/CBPAT.2020.130>.

ROMANO, R. C. O.; BERNARDO, H. M.; MACIEL, M. H.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. Hydration of Portland cement with red mud as mineral addition. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [S. l.], v. 131, n. 3, p. 2477–2490, 2018. DOI: 10.1007/s10973-017-6794-2. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10973-017-6794-2>.

SANTIN, J. L. **Ultra-som: técnica e aplicação**. 2. ed. Curitiba: Artes gráficas e editora unificado., 2003.

SANTOS, Sâmara Ferreira Dos; MOREIRA, Luana de Almeida; SILVA JUNIOR, Ladir Antonio. Análise experimental da influência da cinza de casca de arroz sem queima controlada como adição mineral ao concreto. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. e51911586, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i1.1586. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/1586>.

SOUZA, Vicente Custódio De; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2009.

STRÖHER, Gylles Ricardo; MENDES, Thays Rolim; ROMEIRO, Neyva Maria Lopes. Avaliação do formato de armazenamento Compressed Sparse Row para resolução de sistemas de equações lineares esparsos. **Engevista**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 1095, 2017. DOI: 10.22409/engevista.v19i4.931. Disponível em: <http://periodicos.uff.br/engevista/article/view/9155>.

TÉCNICAS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**Rio de Janeiro, 2019.

UCHINO, K. The development of piezoelectric materials and the new perspective. In: **Advanced Piezoelectric Materials**. [s.l.] : Elsevier, 2010. p. 1–85. DOI: 10.1533/9781845699758.1. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845695347500017>.

VONK, Sarah; TAFFE, Alexander. Detection of near-surface reinforcement in concrete components with ultrasound. **MATEC Web of Conferences**, [S. l.], v. 199, p. 06007, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201819906007. Disponível em: <https://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/201819906007>.

WAGNER, Rafael Ramos. **Metodologia para identificação de sistemas mal condicionados com restrições maximizando a amplitude das perturbações**. 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2015.

APÊNDICE I – VETORES DE TEMPO SINTÉTICOS PARA MALHA DE 2,5cm X 2,5 cm

Tabela A1- Vetores tempo de percurso para malha de 2,5 cm x 2,5cm e leituras horizontais em μs

Configuração	T																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
m25hv50ce	15,00	15,21	15,81	19,57	23,29	26,03	15,21	15,00	17,74	21,08	22,36	23,29	15,81	17,74	20,00	20,28	21,08	19,57
	19,57	21,08	20,28	20,00	17,74	15,81	23,29	22,36	21,08	17,74	15,00	15,21	26,03	23,29	19,57	15,81	15,21	15,00
m25hv50sd	15,00	15,21	15,81	16,77	20,28	25,38	15,21	15,00	15,21	15,81	19,57	24,04	15,81	15,21	15,00	15,21	19,76	22,36
	16,77	15,81	15,21	15,00	20,28	21,08	18,03	16,77	15,81	15,21	20,00	20,28	19,53	18,03	16,77	17,13	20,28	20,00
m25hv50ie	20,00	20,28	21,08	22,36	24,04	25,38	20,28	20,00	20,28	19,76	19,57	20,28	17,13	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	19,53	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00
m25hv50dp	20,00	20,28	17,13	19,57	23,29	26,03	20,28	20,00	17,74	21,08	22,36	23,29	21,08	22,81	20,00	20,28	21,08	19,57
	25,16	25,03	20,28	20,00	17,74	17,13	31,55	27,95	25,03	22,81	20,00	20,28	37,75	31,55	25,16	21,08	20,28	20,00
m25hv50ced	15,00	15,42	16,38	19,54	22,66	24,97	15,42	15,43	17,72	20,47	21,84	22,66	16,38	17,72	19,53	19,80	20,47	19,54
	19,54	20,47	19,80	19,53	17,72	16,38	22,66	21,84	20,47	17,72	15,43	15,42	24,97	22,66	19,54	16,38	15,42	15,00
m25hv25ce	15,00	15,21	15,81	17,47	19,34	21,15	15,21	15,00	15,84	17,13	18,17	19,34	15,81	15,84	16,25	16,47	17,13	17,47
	17,47	17,13	16,47	16,25	15,84	15,81	19,34	18,17	17,13	15,84	15,00	15,21	21,15	19,34	17,47	15,81	15,21	15,00
m25hv25sd	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	21,48	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77	20,28	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	19,57
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	18,45	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00	17,74	19,53	18,03	16,77	15,81	15,21	17,50
m25hv25ie	17,50	17,74	18,45	19,57	20,28	21,48	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	19,53	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00
m25hv25dp	17,50	17,74	17,13	19,57	20,28	19,53	17,74	17,50	17,74	18,45	16,77	20,28	19,76	17,74	17,50	15,21	18,45	19,57
	22,36	19,76	20,28	17,50	17,74	17,13	26,29	22,36	19,76	17,74	17,50	17,74	35,15	26,29	22,36	19,76	17,74	17,50

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela A2- Vetores tempo de percurso para malha de 2,5 cm x 2,5cm e leituras verticais em μ s

Configuração	T																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
m25hv50ce	15,00	15,21	15,81	19,57	23,29	26,03	15,21	15,00	17,74	21,08	22,36	23,29	15,81	17,74	20,00	20,28	21,08	19,57
	19,57	21,08	20,28	20,00	17,74	15,81	23,29	22,36	21,08	17,74	15,00	15,21	26,03	23,29	19,57	15,81	15,21	15,00
m25hv50sd	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	19,53	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	17,13	20,28	19,57	19,76	20,28	20,00	20,28	25,38	24,04	22,36	21,08	20,28	20,00
m25hv50ie	20,00	20,28	17,13	16,77	18,03	19,53	20,28	20,00	15,21	15,81	16,77	18,03	21,08	20,28	15,00	15,21	15,81	16,77
	22,36	19,76	15,21	15,00	15,21	15,81	24,04	19,57	15,81	15,21	15,00	15,21	25,38	20,28	16,77	15,81	15,21	15,00
m25hv50dp	20,00	20,28	21,08	25,16	31,55	37,75	20,28	20,00	22,81	25,03	27,95	31,55	17,13	17,74	20,00	20,28	25,03	25,16
	19,57	21,08	20,28	20,00	22,81	21,08	23,29	22,36	21,08	17,74	20,00	20,28	26,03	23,29	19,57	17,13	20,28	20,00
m25hv50ced	15,00	15,42	16,38	19,54	22,66	24,97	15,42	15,43	17,72	20,47	21,84	22,66	16,38	17,72	19,53	19,80	20,47	19,54
	19,54	20,47	19,80	19,53	17,72	16,38	22,66	21,84	20,47	17,72	15,43	15,42	24,97	22,66	19,54	16,38	15,42	15,00
m25hv25ce	15,00	15,21	15,81	17,47	19,34	21,15	15,21	15,00	15,84	17,13	18,17	19,34	15,81	15,84	16,25	16,47	17,13	17,47
	17,47	17,13	16,47	16,25	15,84	15,81	19,34	18,17	17,13	15,84	15,00	15,21	21,15	19,34	17,47	15,81	15,21	15,00
m25hv25sd	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	19,53	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	21,48	20,28	19,57	18,45	17,74	17,50
m25hv25ie	17,50	15,21	15,81	16,77	18,03	19,53	17,74	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	18,45	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	19,57	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	20,28	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	21,48	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00
m25hv25dp	17,50	17,74	19,76	22,36	26,29	35,15	17,74	17,50	17,74	19,76	22,36	26,29	17,13	17,74	17,50	20,28	19,76	22,36
	19,57	18,45	15,21	17,50	17,74	19,76	20,28	16,77	18,45	17,74	17,50	17,74	19,53	20,28	19,57	17,13	17,74	17,50

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela A3- Vetores tempo de percurso para malha de 2,5 cm x 2,5cm e leituras compostas em μ s

Configuração	T																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
m25hv50ce	15,00	15,21	15,81	19,57	23,29	26,03	15,21	15,00	17,74	21,08	22,36	23,29	15,81	17,74	20,00	20,28	21,08	19,57
	19,57	21,08	20,28	20,00	17,74	15,81	23,29	22,36	21,08	17,74	15,00	15,21	26,03	23,29	19,57	15,81	15,21	15,00
	15,00	15,21	15,81	19,57	23,29	26,03	15,21	15,00	17,74	21,08	22,36	23,29	15,81	17,74	20,00	20,28	21,08	19,57
	19,57	21,08	20,28	20,00	17,74	15,81	23,29	22,36	21,08	17,74	15,00	15,21	26,03	23,29	19,57	15,81	15,21	15,00
m25hv50sd	15,00	15,21	15,81	16,77	20,28	25,38	15,21	15,00	15,21	15,81	19,57	24,04	15,81	15,21	15,00	15,21	19,76	22,36
	16,77	15,81	15,21	15,00	20,28	21,08	18,03	16,77	15,81	15,21	20,00	20,28	19,53	18,03	16,77	17,13	20,28	20,00
	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	19,53	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	17,13	20,28	19,57	19,76	20,28	20,00	20,28	25,38	24,04	22,36	21,08	20,28	20,00
m25hv50ie	20,00	20,28	21,08	22,36	24,04	25,38	20,28	20,00	20,28	19,76	19,57	20,28	17,13	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	19,53	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00
	20,00	20,28	17,13	16,77	18,03	19,53	20,28	20,00	15,21	15,81	16,77	18,03	21,08	20,28	15,00	15,21	15,81	16,77
	22,36	19,76	15,21	15,00	15,21	15,81	24,04	19,57	15,81	15,21	15,00	15,21	25,38	20,28	16,77	15,81	15,21	15,00
m25hv50dp	20,00	20,28	17,13	19,57	23,29	26,03	20,28	20,00	17,74	21,08	22,36	23,29	21,08	22,81	20,00	20,28	21,08	19,57
	25,16	25,03	20,28	20,00	17,74	17,13	31,55	27,95	25,03	22,81	20,00	20,28	37,75	31,55	25,16	21,08	20,28	20,00
	20,00	20,28	21,08	25,16	31,55	37,75	20,28	20,00	22,81	25,03	27,95	31,55	17,13	17,74	20,00	20,28	25,03	25,16
	19,57	21,08	20,28	20,00	22,81	21,08	23,29	22,36	21,08	17,74	20,00	20,28	26,03	23,29	19,57	17,13	20,28	20,00
m25hv50ced	15,00	15,42	16,38	19,54	22,66	24,97	15,42	15,43	17,72	20,47	21,84	22,66	16,38	17,72	19,53	19,80	20,47	19,54
	19,54	20,47	19,80	19,53	17,72	16,38	22,66	21,84	20,47	17,72	15,43	15,42	24,97	22,66	19,54	16,38	15,42	15,00
	15,00	15,42	16,38	19,54	22,66	24,97	15,42	15,43	17,72	20,47	21,84	22,66	16,38	17,72	19,53	19,80	20,47	19,54
	19,54	20,47	19,80	19,53	17,72	16,38	22,66	21,84	20,47	17,72	15,43	15,42	24,97	22,66	19,54	16,38	15,42	15,00
m25hv25ce	15,00	15,21	15,81	17,47	19,34	21,15	15,21	15,00	15,84	17,13	18,17	19,34	15,81	15,84	16,25	16,47	17,13	17,47
	17,47	17,13	16,47	16,25	15,84	15,81	19,34	18,17	17,13	15,84	15,00	15,21	21,15	19,34	17,47	15,81	15,21	15,00
	15,00	15,21	15,81	17,47	19,34	21,15	15,21	15,00	15,84	17,13	18,17	19,34	15,81	15,84	16,25	16,47	17,13	17,47
	17,47	17,13	16,47	16,25	15,84	15,81	19,34	18,17	17,13	15,84	15,00	15,21	21,15	19,34	17,47	15,81	15,21	15,00

Configuração	T																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
m25hv25sd	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	21,48	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77	20,28	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	19,57
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	18,45	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00	17,74	19,53	18,03	16,77	15,81	15,21	17,50
	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	19,53	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	21,48	20,28	19,57	18,45	17,74	17,50
m25hv25ie	17,50	17,74	18,45	19,57	20,28	21,48	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	19,53	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00
	17,50	15,21	15,81	16,77	18,03	19,53	17,74	15,00	15,21	15,81	16,77	18,03	18,45	15,21	15,00	15,21	15,81	16,77
	19,57	15,81	15,21	15,00	15,21	15,81	20,28	16,77	15,81	15,21	15,00	15,21	21,48	18,03	16,77	15,81	15,21	15,00
m25hv25dp	17,50	17,74	17,13	19,57	20,28	19,53	17,74	17,50	17,74	18,45	16,77	20,28	19,76	17,74	17,50	15,21	18,45	19,57
	22,36	19,76	20,28	17,50	17,74	17,13	26,29	22,36	19,76	17,74	17,50	17,74	35,15	26,29	22,36	19,76	17,74	17,50
	17,50	17,74	19,76	22,36	26,29	35,15	17,74	17,50	17,74	19,76	22,36	26,29	17,13	17,74	17,50	20,28	19,76	22,36
	19,57	18,45	15,21	17,50	17,74	19,76	20,28	16,77	18,45	17,74	17,50	17,74	19,53	20,28	19,57	17,13	17,74	17,50

Fonte: Elaborada pelo autor.