

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RODRIGO MARQUES PRAETZEL

**RECONSTRUÇÃO DE DEFEITOS 3D VIA TRATAMENTO DE
DADOS OBTIDOS POR *PHASED ARRAY***

Porto Alegre
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

RODRIGO MARQUES PRAETZEL

**RECONSTRUÇÃO DE DEFEITOS 3D VIA TRATAMENTO DE
DADOS OBTIDOS POR *PHASED ARRAY***

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

Porto Alegre
2017

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Praetzel, Rodrigo Marques

Reconstrução de Defeitos 3D via Tratamento de Dados Obtidos por
Phased Array / Rodrigo Marques Praetzel. – 2017.

67 f.:il.

Orientador: Thomas Gabriel Rosauo Clarke.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. *Phased Array*. 2. TFM. 3. Reconstrução 3D. 4. Ensaios Não Destrutivos. I. Clarke, Thomas Gabriel Rosauo, orient.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Prof. Telmo Roberto Strohaecker (*in memoriam*) por seu constante exemplo de liderança e referência profissional, demonstrados através de todo o seu conhecimento, apoio e confiança.

Agradeço também ao Prof. Thomas Clarke pela orientação e confiança.

Agradeço ao colega Ricardo Baiotto por toda a ajuda e paciência no início do trabalho.

Também registro minha gratidão aos amigos do LAMEF Bruna Camacho, Matheus Freitas e Mauro Moresco pela companhia diária.

Agradeço também aos colegas de laboratório Eduardo Groth, Conrado Carro e Marcelo Macedo que sempre se mostraram prestativos para qualquer ajuda necessária.

Agradeço aos engenheiros Douglas Andrade e Thais Farias pela ajuda, dedicação e confiança ao longo de todo o trabalho.

Também agradeço à Petrobras pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço aos meus amigos e familiares pela compreensão e ajuda sempre que foi preciso.

RESUMO

Componentes metálicos em operação podem estar sujeitos a diversas condições de operação deletérias. Visando avaliar os riscos de operação para evitar falhas, a análise de integridade estrutural é uma ferramenta amplamente aplicada e requer constante evolução. Por utilizar dados de ensaios não destrutivos, essa ferramenta requer cada vez mais precisão, para aprimorar seus resultados e reduzir ao máximo as falhas de componentes em operação. Por apresentar menor tempo de inspeção e maior probabilidade de detecção, o *Phased Array* surge como alternativa às técnicas convencionais de ultrassom. Dentre as técnicas de *Phased Array*, o *Total Focusing Method* (TFM) apresenta um dos resultados mais promissores, apresentando grande vantagem sobre técnicas convencionais de ultrassom e de *Phased Array* devido a sua melhor precisão e fácil interpretação dos resultados. Neste trabalho, o TFM foi aplicado em diversos blocos contendo descontinuidades usinadas, as quais simulam diferentes tipos de defeitos. O foco do TFM foi gerar blocos em três dimensões (3D) dos defeitos, facilitando a interpretação dos resultados, além da possibilidade da inserção desses blocos em softwares de análise de integridade estrutural, melhorando a precisão dos resultados. O TFM foi aplicado através do tratamento de dados de um sensor linear de *Phased Array*, com frequência de 5 MHz e com 64 elementos ativos. Nesse trabalho, foram desenvolvidas e aplicadas novas etapas no algoritmo do TFM para melhorar a precisão dos resultados, como a compensação da perda de energia e o *half-skip*. As etapas adicionais aplicadas ao algoritmo do TFM geraram bons resultados para entalhe e furos usinados nos blocos de aço carbono. Além dos blocos com defeitos usinados, foi realizada a inspeção de um bloco de aço inoxidável austenítico soldado. Para o bloco soldado, os resultados não foram satisfatórios, não sendo possível detectar defeitos existentes. Após a aplicação do TFM, foi simulado o deslocamento do sensor ao longo da peça, gerando diversas imagens 2D, as quais foram conectadas via isosuperfícies, gerando sólidos 3D dos defeitos presentes em cada bloco. Por fim, esses blocos foram exportados para um *software* CAD, apresentando excelente correspondência.

Palavras-chave: *Phased Array*, TFM, Reconstrução 3D, Ensaios Não Destrutivos.

ABSTRACT

Metallic components in operation can be submitted to several harming operation conditions. Aiming to evaluate the operational risks to avoid failure, the structural integrity analysis is a widely applied tool and requires constant evolution. As it uses non-destructive testing data, this tool requires increasingly precision, to enhance its results and reduce the majority of the operating components failures. Because of the shorter inspection time and greater probability of detection, Phased Array is an alternative to conventional ultrasonic techniques. Among the techniques of Phased Array, the Total Focusing Method (TFM) presents one of the most promising results, offering great advantage over conventional ultrasonic and Phased Array techniques due to its better precision and easy interpretation of results. In this work, the TFM was applied to many blocks, which contain machined discontinuities simulating several defects. The objective of applying the TFM was to generate three-dimensional (3D) blocks, turning the interpretation of the results easier and giving the possibility to insert these blocks into a structural integrity analysis software, enhancing the results precision. The TFM algorithm was applied through treatment of data from a 5 MHz linear Phased Array sensor with 64 active elements. In this work, it were developed and applied new steps in the TFM algorithm, as energy loss compensation and half-skip interaction, to improve its precision. The additional steps applied to the TFM algorithm achieved great results for notch and holes machined in carbon steel blocks. In addition to the blocks with machined defects, a welded austenitic stainless steel block was inspected. For the welded block, the results were not satisfactory and it was not possible to detect the present defects. After the application of the TFM, the displacement of the transducer along the block was simulated, generating several 2D images, which were connected via isosurfaces, generating 3D solids corresponding to the defects present in each block. To conclude, these blocks were exported to a CAD software, presenting excellent matching.

Keywords: Phased Array, TFM, 3D Reconstruction, Non-destructive Testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Dutos metálicos em ambiente agressivo. (SUBSEA WORLD NEWS, 2016)	16
Figura 2. Defeitos de laminação em componente metálico. (GOMERA et al., 2010)	17
Figura 3. Esquema representando a onda ultrassônica percorrendo distâncias diferentes para o fundo da peça (d_1) e uma descontinuidade no interior da mesma (d_2).....	19
Figura 4. Esquema representando as três possíveis interações entre feixe e descontinuidades. a) incidência direta; b) <i>half-skip</i> ; c) <i>full-skip</i>	19
Figura 5. Esquema representando resultados de <i>A-scan</i> para dois tipos de defeitos.....	20
Figura 6. Esquema representando resultados de <i>B-scan</i> para dois tipos de defeitos. À esquerda, em cinza, pode-se perceber o plano resultante da inspeção linear. À direita, o resultado simulando a seção transversal do bloco.....	21
Figura 7. Esquema representando resultados de <i>C-scan</i> para dois tipos de defeitos. À esquerda, em cinza, podem-se perceber os diversos planos resultantes da inspeção planar. À direita, o resultado simulando a vista superior do bloco, com a escala de cores aplicada aos defeitos de diferentes profundidades.	21
Figura 8. Sensores matriciais de <i>Phased Array</i> contendo 128, 64 e 16 elementos, respectivamente. ..	22
Figura 9. Esquema representando a formação do feixe sônico através da interferência das diversas ondas emitidas pelo transdutor. (traduzido de: KOMURA et al., 1985)	22
Figura 10. Esquema representando resultados de <i>S-scan</i> para dois tipos de defeitos. À esquerda, em cinza, é possível perceber os diversos ângulos utilizados na inspeção. À direita, o resultado dos dois defeitos, a diferentes profundidades, com a escala de cores aplicada.	23
Figura 11. Esquema representando os passos de transmissão e recepção do FMC.....	24
Figura 12. Esquema representando a influência do passo na resolução do TFM. a) imagem com maior passo e pior resolução; b) imagem com passo intermediário; c) imagem com menor passo e melhor resolução.	24
Figura 13. Esquema representando o caminho percorrido pelo feixe partindo do elemento transmissor T, passando pelo pixel P em análise, e retornando ao elemento receptor R.....	25
Figura 14. Esquema demonstrando a influência da quantidade de matrizes de TFM empilhadas na geração da imagem 3D.....	27
Figura 15. Equipamento de ultrassom utilizado para estimar a atenuação pela distância percorrida. ..	28
Figura 16. Equipamento de <i>Phased Array</i> utilizado para aquisição de dados, conectado ao computador via cabo USB.....	29
Figura 17. Esquema representando transdutor com 64 elementos lineares ativos, com largura elementar de 0,5 mm e espaçamento de 0,1 mm.	29
Figura 18. Esquema representando a disposição dos dados de inspeção, após pré-processamento, em uma matriz $n \times n$	30
Figura 19. Bloco padrão utilizado para estimar perda de energia pela abertura do feixe. Dimensões em milímetros.	32
Figura 20. Bloco padrão com dez furos passantes usinados, utilizado apenas para reconstrução 3D. Dimensões em milímetros.....	32
Figura 21. Bloco padrão com um entalhe usinado de 8 mm, utilizado apenas para reconstrução 3D. Dimensões em milímetros.....	32
Figura 22. Bloco padrão com seis furos de diferentes comprimentos alinhados, utilizado apenas para reconstrução 3D. Dimensões em milímetros.....	33
Figura 23. Bloco soldado, com cordão usinado, utilizado para reconstrução 3D de possíveis defeitos.	33
Figura 24. Fluxograma da metodologia utilizada, desde a inspeção até o resultado do TFM em duas dimensões.....	35
Figura 25. Esquema representando o deslocamento do sensor para aquisição de dados ao longo de todo o comprimento de um bloco padrão.....	37
Figura 26. a) Gráfico comparando os dados obtidos pelo ultrassom com o polinômio definido para compensação de energia. b) Análise residual do polinômio gerado.	40

Figura 27. Resultado do TFM aplicado ao bloco padrão semicilíndrico. Nota-se o gradiente de amplitude ao longo da superfície curva.....	41
Figura 28. a) Comparação entre ângulo do feixe e amplitude do sinal. b) Análise residual do polinômio gerado.....	42
Figura 29. Resultado obtido após aplicação da queda dos 6 dB. À esquerda, resultado com TFM sem compensação de energia. À direita, resultado após compensação de energia por abertura do feixe.....	43
Figura 30. Comparação entre abrangência do feixe para aplicação de TFM sem compensação de energia e com compensação de energia pela abertura do feixe.....	44
Figura 31. Resultado obtido após aplicação do TFM no bloco padrão com dez furos. À esquerda, resultado do TFM sem compensação de energia. À direita, resultado após compensação de energia..	44
Figura 32. Resultado obtido após aplicação do TFM no bloco padrão com entalhe. O resultado apresenta apenas uma pequena indicação a 17 mm de profundidade.	45
Figura 33. Resultado obtido após aplicação de TFM com compensação de energia e <i>half-skip</i> no bloco padrão com dez furos.	46
Figura 34. Medidas dos dez furos para TFM sem compensação nem <i>half-skip</i>	48
Figura 35. Medidas dos dez furos para TFM com compensação e sem <i>half-skip</i>	48
Figura 36. Medidas dos dez furos para TFM com compensação e com <i>half-skip</i>	48
Figura 37. Resultado obtido após aplicação de TFM com compensação de energia e <i>half-skip</i> no bloco padrão com entalhe.	49
Figura 38. Esquema comparando os resultados do TFM sem <i>half-skip</i> , com <i>half-skip</i> e tamanho real do defeito.....	50
Figura 39. Resultados gerados pelo algoritmo TFM com compensação de energia e <i>half-skip</i> no bloco padrão com seis furos. As medidas foram realizadas a diferentes comprimentos do bloco: a) 90 mm, b) 70 mm, c) 50 mm, d) 20 mm.	51
Figura 40. Comparação entre o tamanho real do defeito e os valores medidos de altura e largura a 20 mm de comprimento.	52
Figura 41. Comparação entre tamanho real e medidas do furo 1 para as diferentes posições de inspeção.....	53
Figura 42. Comparação entre tamanho real e medidas do furo 2 para as diferentes posições de inspeção.....	53
Figura 43. Comparação entre tamanho real e medidas do furo 3 para as diferentes posições de inspeção.....	54
Figura 44. Resultados de TFM para o bloco com solda. No canto inferior direito, há um esquema relacionando os resultados com as posições inspecionadas no bloco.	55
Figura 45. Cortes transversais realizados nas mesmas posições em que o TFM foi aplicado para esse bloco.....	56
Figura 46. Resultado obtido após a reconstrução dos defeitos do bloco padrão com dez furos.	58
Figura 47. Blocos 3D correspondentes aos defeitos carregados em <i>software</i> CAD.	58
Figura 48. Resultado obtido após a reconstrução do entalhe.	59
Figura 49. Bloco correspondente ao entalhe exportado para o CAD.	59
Figura 50. Resultado obtido após a reconstrução dos seis furos alinhados presentes no bloco padrão.	59
Figura 51. Sólidos correspondentes aos seis furos exportados para <i>software</i> CAD.....	60
Figura 52. Resultado da reconstrução 3D dos defeitos presentes no bloco soldado.	60
Figura 53. Sólidos correspondentes aos defeitos reais, encontrados no bloco soldado, exportados para <i>software</i> CAD.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FMC	<i>Full Matrix Capture</i>
TFM	<i>Total Focusing Method</i>
2D	Duas dimensões
END	Ensaio não destrutivo
3D	Três dimensões
<i>ToF</i>	<i>Time of Flight</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

t	Tempo de voo
d	Distância percorrida pelo feixe
V	Velocidade da onda
A	Amplitude do sinal
y	Fator de multiplicação para compensação de energia
θ	Ângulo entre o ponto em análise e o centro do feixe

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Integridade Estrutural	16
2.2	Ensaio Não Destrutivo	17
2.3	Ultrassom	18
2.4	<i>Phased Array</i>	22
2.5	<i>Total Focusing Method (TFM)</i>	24
2.6	Reconstrução em Três Dimensões.....	26
3	METODOLOGIA	28
3.1	Equipamentos	28
3.1.1	Ultrassom Convencional	28
3.1.2	<i>Phased Array</i>	28
3.2	<i>Softwares</i>	31
3.3	Corpos de Prova	31
3.4	Algoritmos.....	34
3.5	Etapas Adicionais	36
3.5.1	Perda de energia	36
3.5.2	<i>Half-skip</i>	37
3.6	Reconstrução 3D.....	37
3.7	Exportação para <i>Software CAD</i>	38
3.8	Corte Transversal.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Perda de Energia	39
4.2	Aplicação do <i>Half-Skip</i>	46
4.3	Corte Transversal.....	56
4.4	Blocos 3D.....	57
5	CONCLUSÕES	62
6	TRABALHOS FUTUROS.....	63

7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
----------	---	-----------

1 INTRODUÇÃO

Com estruturas e componentes metálicos sendo constantemente submetidos a condições extremas de operação - como pressões altas e cíclicas – e meios agressivos - como atmosferas corrosivas ou com temperaturas prejudiciais -, a inspeção vem se tornando uma etapa indispensável em diversas operações. As inspeções são realizadas com o propósito de localizar e dimensionar possíveis defeitos no material, para posterior determinação da integridade do componente.

Defeitos em materiais metálicos podem ser provenientes de processos de fabricação ou de esforços em operação e são concentradores de tensões. Essas tensões concentradas nos defeitos, quando somadas aos carregamentos de operação do componente, podem resultar em falha do componente. A fim de permitir uma avaliação mais correta da segurança de operação, o monitoramento dos componentes é realizado via ensaios não destrutivos (END), os quais são capazes de detectar, localizar e dimensionar os defeitos, sem causar nenhum dano às propriedades do componente.

Dentre os métodos de inspeção mais difundidos, as técnicas ultrassônicas se destacam por diversos motivos, como a simplicidade, boa probabilidade de detecção, boa confiabilidade e custo reduzido. Visando reduzir o tempo de inspeção do ultrassom, diversas pesquisas foram desenvolvidas nos últimos anos. Dentre os principais desenvolvimentos, destaca-se uma técnica, a qual utiliza um transdutor matricial formado por diversos elementos piezoelétricos, e é denominada *Phased Array*.

Os transdutores matriciais possibilitam realizar varreduras em diversos ângulos simultaneamente, reduzindo o tempo de inspeção. Apesar de apresentar maior probabilidade de detecção, menor tempo de inspeção e melhor precisão, os equipamentos de *Phased Array* ainda apresentam custo relativamente elevado, além de exigir mais treinamento do operador, tanto na operação, quanto na interpretação de resultados. Assim, surge a necessidade de desenvolver técnicas com resultados de interpretação mais simples, tornando a inspeção mais intuitiva.

Com o *Phased Array*, além da possibilidade de emissão em diversos ângulos simultaneamente e de foco em determinada profundidade da peça, também é possível utilizar o método de aquisição *Full Matrix Capture* (FMC). No FMC, um elemento é excitado de cada vez, enquanto o sensor inteiro recebe o eco. Essa sequência é repetida até que o último

sensor emita a onda e todos os elementos recebam o sinal. Como os resultados desta técnica podem ser muito complexos, pode-se facilitar a interpretação ao aplicar um algoritmo chamado *Total Focusing Method* (TFM).

O TFM consiste no tratamento dos dados da FMC, os quais são gerados em forma de matrizes. Com isso, é possível focar, artificial e simultaneamente, o feixe ultrassônico em diversos pontos da peça inspecionada. Com esse foco artificial, o resultado obtido é uma imagem em duas dimensões (2D), representando a seção transversal do componente na posição inspecionada, simplificando a interpretação dos resultados.

Com essa imagem em 2D, é possível determinar com precisão a morfologia, a dimensão e a localização dos defeitos encontrados. Se a inspeção for realizada diversas vezes ao longo de um eixo da peça, múltiplas matrizes de dados serão geradas. Ao tratar os dados presentes nestas matrizes, será possível gerar um sólido em três dimensões (3D) das descontinuidades presentes na peça. Esse sólido, quando exportado para um *software* de análise de integridade estrutural, aumenta a precisão dos cálculos, devido à maior precisão da técnica aplicada quando comparada aos métodos tradicionais de ultrassom.

Esse trabalho, desenvolvido como parte de um projeto junto à empresa Petrobras, tem como principais objetivos a simplificação dos resultados, junto com a melhora na detecção e no dimensionamento de descontinuidades, além da reconstrução 3D dos defeitos encontrados. Esses objetivos são visados através da aplicação do TFM em diversas posições de blocos com diferentes descontinuidades, como entalhes e furos de posições e tamanhos distintos. Outro objetivo específico deste trabalho é a exportação dos defeitos 3D para *softwares* CAD, os quais são compatíveis com *softwares* de análise de integridade estrutural, visando futuramente ser aplicado em inspeções de soldas de chapas e de tubos. Por fim, busca-se avaliar o tempo de processamento dos dados, para determinar a viabilidade de aplicação do TFM, além de formas de melhorar a resolução da técnica, através da aplicação de novas etapas para o algoritmo, como a consideração de outras formas de interação entre feixe e descontinuidades, além da compensação da perda de energia pela abertura do feixe e pela distância percorrida pelo som.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados brevemente os principais temas do trabalho, visando situar o leitor no contexto.

2.1 Integridade Estrutural

Estruturas e componentes metálicos são comumente utilizados em aplicações contendo carregamentos altos e cíclicos, temperaturas extremas ou atmosfera corrosiva, conforme apresentado na Figura 1. Essas condições de aplicação são consideradas agressivas e diminuem a vida remanescente das estruturas metálicas. (NANEKAR, KUMAR, JAYAKUMAR, 2015; ARAÚJO, FARIAS, OLIVEIRA, 2012)

As condições operacionais e ambientais, quando relacionadas com dados obtidos em monitoramentos, fornecem uma estimativa da situação de um sistema. A análise de integridade estrutural consiste em analisar e estimar esse tempo de operação remanescente. (TSURUTA, 2008)



Figura 1: Dutos metálicos em ambiente agressivo. (SUBSEA WORLD NEWS, 2016)

Outro fator deletério para os metais, podendo ser provenientes da própria operação ou, inclusive, de processos de fabricação, são os defeitos. Defeitos como trincas, falta de fusão, falta de penetração, porosidade de solda e mordedura, são descontinuidades que podem estar presentes no material, apresentando alta concentração de tensões associada. Essas descontinuidades podem ser oriundas de processos de operação ou de fabricação, como soldagem, forjamento e laminação, conforme exemplificado na Figura 2. Esses defeitos

resultam em elevados custos para manutenção e reparo. (NANEKAR, KUMAR, JAYAKUMAR, 2015; MAIO, 2011)

Defeitos, em conjunto às condições operacionais, podem levar o material a falhas catastróficas. (NANEKAR, KUMAR, JAYAKUMAR, 2015) Essas falhas acarretam em grandes perdas, incluindo grandes prejuízos financeiros, desastres ambientais e até mortes. Visando evitar essas perdas e poupar custos, cresce cada vez mais o interesse em melhorar a qualidade da manutenção e do reparo das estruturas. (MARTINS, 2008; ARAÚJO, FARIAS, OLIVEIRA, 2012; MAIO, 2011)



Figura 2. Defeitos de laminação em componente metálico. (GOMERA et al., 2010)

Devido a essa constante necessidade de conhecer a situação dos materiais, ensaios não destrutivos (END) são utilizados para detectar, localizar e dimensionar defeitos - tanto internos, quanto externos -, gerando dados ao longo da operação do sistema. (TSURUTA, 2008; KOUICHE, HASSANEIN, 2012)

2.2 Ensaios Não Destrutivos

Os ensaios não destrutivos se tornaram indispensáveis na indústria atual, pois se mostraram um meio efetivo para a avaliação da qualidade de produtos e da integridade de estruturas. Os END são aplicados com o intuito de avaliar e monitorar o estado de algum componente, sem comprometer a integridade do material em análise. (ARAÚJO, FARIAS, OLIVEIRA, 2012; GUAN et al., 2013; SANTOS, 2011)

Dentre os ensaios não destrutivos mais utilizados, estão a inspeção visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ensaios ultrassônicos, radiografia, correntes parasitas e emissões acústicas. (O'BRIEN, 1997)

Por apresentar sensibilidade relativamente alta a defeitos presentes no material, além de ser um ensaio com fácil operação e alta abrangência de aplicações, os ensaios ultrassônicos são métodos não destrutivos amplamente utilizados. (BRAGA, 2009)

2.3 Ultrassom

Os métodos ultrassônicos são amplamente aplicados há décadas, sendo utilizados principalmente para detectar defeitos em ambientes industriais. (EVERY, 2014) O ultrassom também é comumente aplicado para a medida de espessura de materiais, como dutos e chapas, a fim de detectar alterações causadas, por exemplo, pela corrosão. (WALL, WADSÖ, 2013) Além da aplicação desses métodos em estruturas industriais, a área médica também abrange ampla utilização de ultrassom, principalmente para a detecção de tumores e de problemas biliares. (AMORIM, 2014)

O teste ultrassônico consiste na emissão de uma onda elástica de alta frequência no material em análise, com frequência superior a 20 kHz. Para a inspeção de metais, as frequências mais utilizadas se situam na faixa entre 0,5 MHz e 25 MHz. (CAO et al., 2009; BRAGA, 2009) Essa onda é emitida através de um transdutor, também chamado de sensor, produzido de material piezoelétrico. Esse material gera um sinal mecânico ao ser excitado eletricamente, e emite um sinal elétrico ao ser excitado mecanicamente. Essa propriedade possibilita que o mesmo transdutor possa atuar como emissor e receptor do ultrassom. (BRAGA, 2009)

No ensaio ultrassônico convencional, o feixe sônico é emitido a partir do transdutor e percorre o material em questão até encontrar alguma interface refletora, podendo ser um defeito ou alguma extremidade da peça. Ao interagir com uma descontinuidade no interior da peça, a onda ultrassônica é detectada pelo mesmo transdutor emissor. (CERQUEIRA, 2009)

Como a distância percorrida pela onda é diferente para o fundo da peça ou para uma descontinuidade no interior da mesma, a onda levará tempos diferentes para retornar ao transdutor. Um esquema desta diferença entre as distâncias pode ser visto na Figura 3. Sabendo o tempo (t) percorrido entre a emissão e a recepção pelo mesmo transdutor, pode-se definir a distância (d) percorrida até o ponto refletor através da Equação 1. Essa equação relaciona esse tempo e essa distância com a velocidade (V) da onda no meio em análise. Para o aço, utiliza-se a velocidade de 5920 m/s. (BRAGA, 2009)

$$d = V \cdot t \quad (1)$$

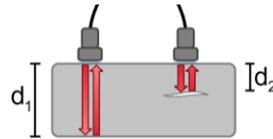


Figura 3. Esquema representando a onda ultrassônica percorrendo distâncias diferentes para o fundo da peça (d_1) e uma descontinuidade no interior da mesma (d_2).

As setas vermelhas na Figura 4 representam o feixe sônico sendo emitido pelo sensor, refletindo em uma descontinuidade e retornando ao sensor. Para duas descontinuidades em posições diferentes, existem duas distâncias distintas, as quais resultarão em dois tempos também diferentes, conforme Equação 1. Para aplicação da Equação 1, deve-se tomar cuidado, pois o tempo utilizado representa a ida da onda até a descontinuidade e a volta da onda para o sensor, ou seja, o dobro da distância real entre o sensor e a descontinuidade.

Com o defeito detectado, localiza-se o centro do mesmo, o qual é encontrado através do ponto de máxima amplitude do sinal. Com o centro localizado, desloca-se o transdutor para o lado, até que o sinal apresente valor de amplitude 6 db inferior ao sinal do centro do defeito, indicando o limite da descontinuidade. Este deslocamento é realizado para os dois lados da descontinuidade, possibilitando o dimensionamento do defeito. Tal técnica é conhecida como queda dos 6 dB. (ANDREUCCI, 2014)

Através do uso de sapatas de acrílico, o feixe do ultrassom pode ser emitido em ângulo. Com essa configuração, existem três possíveis interações do feixe com a descontinuidade: incidência direta, *half-skip* e *full-skip*. Na incidência direta, o feixe incide diretamente na descontinuidade e retorna para o transdutor. No *half-skip*, há uma reflexão no fundo da peça antes de o feixe refletir na descontinuidade e retornar ao sensor. No *full-skip* o feixe reflete no fundo da peça tanto antes quanto depois de atingir a descontinuidade. (ZHANG et al., 2010) A Figura 4 representa essas três possíveis interações entre o feixe e as descontinuidades.

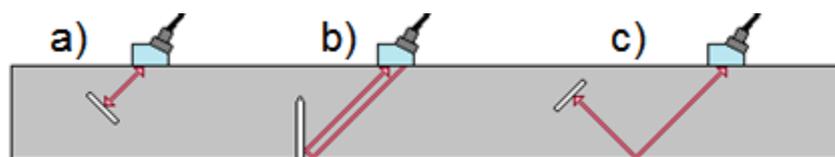


Figura 4. Esquema representando as três possíveis interações entre feixe e descontinuidades. a) incidência direta; b) *half-skip*; c) *full-skip*.

Como principais vantagens do ultrassom, pode-se citar a grande abrangência de aplicações, possibilitando inspecionar diversos tipos de materiais, além de sua simplicidade, sua alta sensibilidade a defeitos no interior do material, seu reduzido tempo de ensaio e a segurança para o operador. (CAO et al., 2009; LI et al., 2013)

As principais desvantagens deste tipo de ensaio incluem a alta dependência de acoplamento, perda de energia da onda por atenuação, a necessidade de operadores treinados para correta interpretação de resultados, a difícil aplicação em geometrias complexas e a dificuldade de detectar defeitos superficiais ou com orientações paralelas ao feixe sônico. (AMORIM, 2014; BRAGA, 2009)

A dificuldade de interpretação do resultado do ensaio ultrassônico se dá pela representação gráfica de seus resultados. A representação mais comum no método ultrassônico convencional é chamada de *A-scan*. O *A-scan* apresenta a amplitude do sinal (em dB, no eixo vertical) em função do tempo de voo (em μ s, no eixo horizontal), com os sinais de reflexões aparecendo no formato de picos. O eixo horizontal muitas vezes é transformado em distância, através da Equação 1, facilitando a localização da descontinuidade. (BRAGA, 2009; ALMEIDA, 2011) Um esquema apresentando os resultados do *A-scan* pode ser visto na Figura 5.

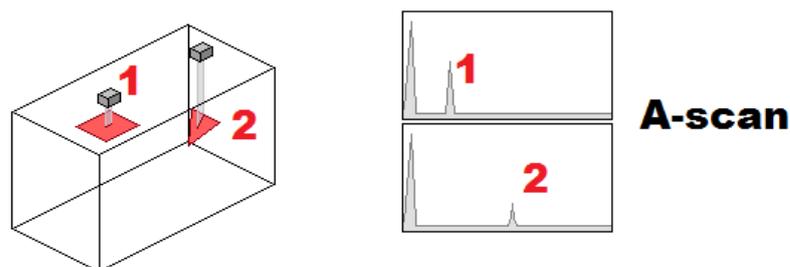


Figura 5. Esquema representando resultados de *A-scan* para dois tipos de defeitos.

Na Figura 5, O defeito 1 é perpendicular ao feixe, apresentando alto nível de reflexão, resultando em um pico maior que o defeito 2, o qual apresenta ângulo com o feixe. O pico do sinal em 1 aparece antes no eixo horizontal, por estar a uma distância menor do sensor.

O *A-scan* fornece informações em tempo real, apesar de não possibilitar a avaliação instantânea da geometria do refletor. Assim, foram desenvolvidos outros métodos de apresentar os resultados do ultrassom, visando facilitar a interpretação dos resultados, como o *B-scan* e o *C-scan*. (BRAGA, 2009)

O *B-scan* apresenta uma imagem simulando a vista lateral do bloco em análise, através de uma varredura linear. Nessa varredura, o equipamento registra a distância percorrida até o refletor para cada um dos pontos inspecionados, formando por fim uma representação da seção transversal do bloco. No eixo horizontal é apresentada a distância de varredura, geralmente apresentada em milímetros, enquanto o eixo vertical apresenta o tempo, em μs , até o refletor (também podendo ser transformado para distância até o refletor). (BRAGA, 2009; ALMEIDA, 2011) Um esquema representando o plano de inspeção e o resultado de um *B-scan* pode ser visto na Figura 6.

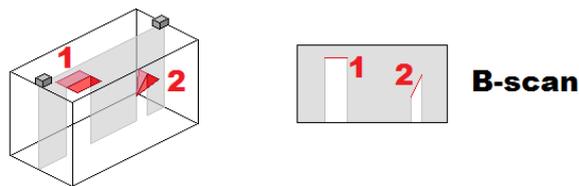


Figura 6. Esquema representando resultados de *B-scan* para dois tipos de defeitos. À esquerda, em cinza, pode-se perceber o plano resultante da inspeção linear. À direita, o resultado simulando a seção transversal do bloco.

O *C-scan* consiste na vista superior do bloco em análise, sendo gerado através de uma varredura planar ao longo de toda a superfície de acoplamento. O equipamento registra os locais onde a profundidade de reflexão foi diferente das demais, gerando uma escala de cores para apresentar diferentes profundidades. (BRAGA, 2009; ALMEIDA, 2011) Um esquema representando a varredura completa ao longo da superfície, além do resultado com escala de cores, pode ser visto na Figura 7.

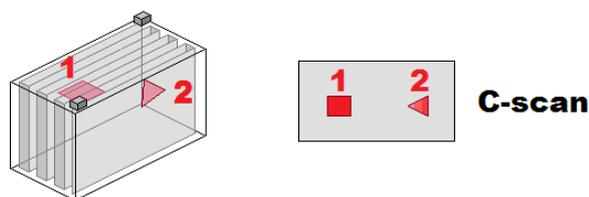


Figura 7. Esquema representando resultados de *C-scan* para dois tipos de defeitos. À esquerda, em cinza, podem-se perceber os diversos planos resultantes da inspeção planar. À direita, o resultado simulando a vista superior do bloco, com a escala de cores aplicada aos defeitos de diferentes profundidades.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias nas áreas da computação e da eletrônica, não foram só os resultados que tornaram os ensaios ultrassônicos mais simples. Os sensores utilizados nestes testes também sofreram grande evolução nos últimos anos, apresentando

rápido desenvolvimento. (CAO et al., 2009) Dentre os principais progressos nos métodos ultrassônicos, apresenta-se a técnica *Phased Array*, a qual faz uso de sensores matriciais.

2.4 *Phased Array*

O uso de sensores ultrassônicos matriciais tem aumentado drasticamente nos últimos anos, pois, além de apresentar grande sensibilidade na detecção de defeitos, garante cobertura de maiores regiões com seu feixe. Essas características possibilitam realizar múltiplas inspeções sem a necessidade de alterar o transdutor. (BULAVINOV et al., 2010; HOLMES et al., 2005) Exemplo de sensores matriciais de 128, 64 e 16 elementos, respectivamente, podem ser vistos na Figura 8.



Figura 8. Sensores matriciais de *Phased Array* contendo 128, 64 e 16 elementos, respectivamente.

Para atingir essa grande abrangência com o feixe e realizar múltiplas inspeções com o mesmo sensor, o transdutor é composto por diversos elementos, os quais podem ser excitados independentemente. Assim, gera-se um padrão de interferências de acordo com o atraso entre a excitação de cada elemento. Esses atrasos possibilitam a formação do feixe em diversas formas, de acordo com a necessidade do operador. A Figura 9 ilustra a formação do feixe, através da interferência construtiva, gerada pelos diferentes tempos de excitação dos elementos. (LI et al., 2013)

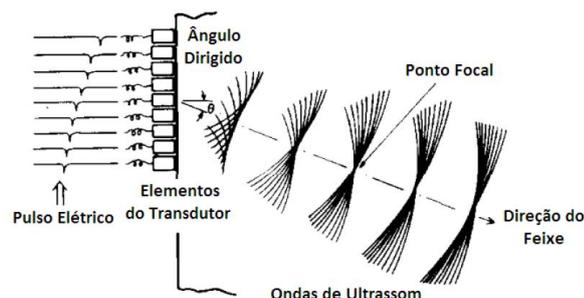


Figura 9. Esquema representando a formação do feixe sônico através da interferência das diversas ondas emitidas pelo transdutor. (traduzido de: KOMURA et al., 1985)

Dentre as possíveis formas de feixe, estão a varredura setorial, a emissão reta, a emissão em ângulo, a focalização em determinada espessura, dentre outras. Também é possível gerar novos padrões de feixe, através de uma combinação dessas formas, como focalização em determinada espessura com determinado ângulo, como representado na Figura 9. (AMORIM, 2014; KOMURA et al., 1985)

Com a possibilidade de utilizar diversos ângulos na mesma inspeção, surgiu um novo modo de apresentar resultados, chamado *S-scan*. Nesta representação, os eixos horizontal e vertical representam a distância, enquanto uma imagem em forma de leque esquemática a cobertura dos ângulos utilizados na varredura. Para indicação de descontinuidades, é utilizada uma escala de cores. Um esquema apresentando o *S-scan* pode ser visto na Figura 10. (CERQUEIRA, 2009)

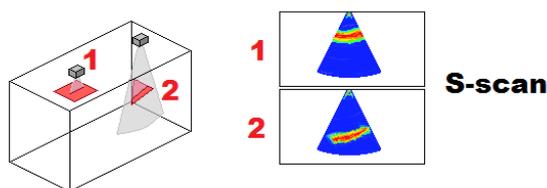


Figura 10. Esquema representando resultados de *S-scan* para dois tipos de defeitos. À esquerda, em cinza, é possível perceber os diversos ângulos utilizados na inspeção. À direita, o resultado dos dois defeitos, a diferentes profundidades, com a escala de cores aplicada.

Como vantagens da técnica *Phased Array* em relação ao método de ultrassom convencional, podem ser citados a redução no tempo de inspeção, abrangência de uma área maior com o feixe sônico, mais simples interpretação dos resultados, aplicação em peças de geometria mais complexa e maior probabilidade de detecção. (MATAREZI, 2009)

As principais desvantagens do *Phased Array*, em relação ao método convencional, são a necessidade de mais treinamento do inspetor e o maior custo dos equipamentos. Além dessas desvantagens, a técnica de *Phased Array* também é altamente dependente do acoplamento. (BENZECRY, 2014)

Visando facilitar a interpretação dos resultados e melhorar a precisão do dimensionamento das descontinuidades, a técnica de coleta *Full Matrix Capture* (FMC) foi desenvolvida. Para esse método, um elemento é ativado de cada vez, enquanto todos os elementos, inclusive o emissor, recebem o sinal emitido. (HOLMES et al., 2008; FAN et al., 2014) Em estudos realizados por Sutcliffe (2012), a influência do número de passos – ou seja, do número de

elementos ativos no sensor- foi analisada, mostrando que a resolução do resultado final tem grande dependência do número de elementos presentes no sensor. O esquema na Figura 11 representa os passos de excitação e recepção do FMC.

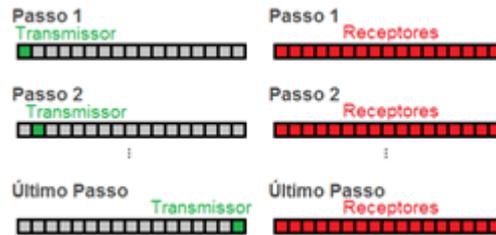


Figura 11. Esquema representando os passos de transmissão e recepção do FMC.

Com a aplicação do FMC, o resultado é adquirido na forma de matrizes. Para o tratamento dessas matrizes obtidas e posterior geração dos resultados desejados, é utilizada uma sequência de algoritmos chamada *Total Focusing Method* (TFM), a qual foca artificialmente todos os pontos da imagem gerada. (LI et al., 2013; WESTON et al., 2012)

2.5 Total Focusing Method (TFM)

O TFM é um método baseado no foco artificial em todos os pontos de uma imagem gerada após o tratamento dos dados obtidos através da técnica FMC. Para aplicar esse método, uma rotina de algoritmos é aplicada em um *software* de tratamento de dados. O primeiro passo para a aplicação do TFM é a definição da grade de pixels da imagem, delimitando a região da peça na qual o algoritmo será aplicado e determinando a resolução da imagem final. (SUTCLIFFE et al., 2012)

Essa grade define a quantidade de milímetros que cada pixel da imagem final representará. Quanto menor o passo escolhido, melhor será a resolução da imagem, porém o tempo de processamento será maior. A Figura 12 representa o TFM de uma mesma região, mas com três passos diferentes.

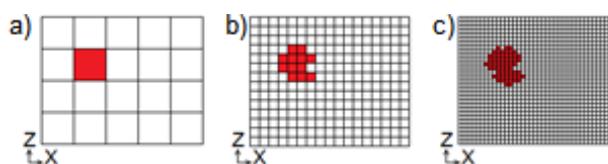


Figura 12. Esquema representando a influência do passo na resolução do TFM. a) imagem com maior passo e pior resolução; b) imagem com passo intermediário; c) imagem com menor passo e melhor resolução.

Com o espaçamento da grade definido, uma série de etapas é repetida para cada um dos pixels presentes na grade. Primeiramente, é calculado o tempo que a onda levaria para percorrer o percurso, partindo do elemento transmissor, passando pelo pixel em análise e retornando para o elemento receptor, conforme esquema apresentado na Figura 13. Esse tempo calculado é posteriormente relacionado com a amplitude do sinal *A-scan* obtido na captura do sinal via FMC. (HOLMES et al., 2005)

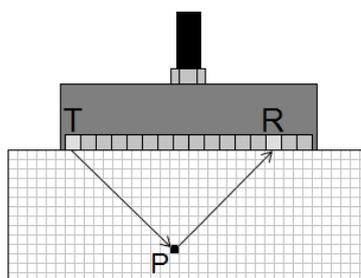


Figura 13. Esquema representando o caminho percorrido pelo feixe partindo do elemento transmissor T, passando pelo pixel P em análise, e retornando ao elemento receptor R.

O cálculo do tempo de voo é realizado para todos os possíveis pares transmissor-receptor, e seus valores de amplitudes nos *A-scan* correspondentes são todos somados, armazenando o valor final para o pixel em análise. Essas etapas são realizadas para todos os pixels da grade, obtendo uma matriz com os valores resultantes das somas das amplitudes para cada pixel. (HOLMES et al., 2008)

Por fim, uma escala de cores é aplicada baseada nos valores obtidos, gerando uma imagem 2D, a qual simula a seção transversal da peça na posição em que o sensor se encontra.

As principais vantagens da aplicação do TFM são as seguintes:

- alta precisão no dimensionamento, devido à boa resolução da técnica; (SUTCLIFFE et al., 2012)
- fácil interpretação dos resultados, por apresentar a imagem como uma seção transversal da peça através do foco artificial em toda a seção; (HOLMES et al., 2005)
- não é necessário fazer tratamento e interpretação dos dados em campo, possibilitando ao inspetor fazer apenas uma rápida aquisição de dados no local para posterior tratamento. (HOLMES et al., 2005)

Estudos realizados por outros autores já apresentaram bons resultados a partir da aplicação de TFM, com boa precisão de dimensionamento e fácil interpretação dos resultados. Podem ser citados como exemplos os trabalhos realizados por Sutcliffe (2012), Holmes (2008) e Fan (2014). Avanços na aplicação do TFM para materiais de difícil inspeção também já foram desenvolvidos, como o trabalho de Li (2012), no qual o TFM é aplicado a materiais compósitos.

Em compensação, o tempo de processamento pode ser bastante elevado dependendo da resolução definida, fazendo-se necessário o uso de computadores com alta capacidade de processamento. (SUTCLIFFE et al., 2012) Outras complicações de aplicação foram apresentadas por Zhang (2010), ao aplicar TFM com a etapa de *half-skip*, surgindo dificuldade de inspecionar a região posicionada abaixo do transdutor. O trabalho de Holmes (2005) também apresentou problemas ao tentar detectar um entalhe através da aplicação do TFM. Foi visto que apenas a difração na ponta da descontinuidade é detectada, podendo levar a erros de interpretação.

Com a aplicação do TFM em diferentes posições da peça, é possível gerar uma imagem tridimensional das descontinuidades presentes em seu interior. Para a geração dessa imagem 3D, é necessário aplicar mais uma série de algoritmos.

2.6 Reconstrução em Três Dimensões

A reconstrução tridimensional, através de uma série de seções transversais, se mostrou um problema recorrente nas últimas décadas. A principal motivação para o desenvolvimento da reconstrução está na área médica, em que a técnica é utilizada principalmente para visualizar os órgãos humanos. (BAREQUET, SHAPIRO, TAL, 2000)

Para a geração das imagens em três dimensões, a primeira etapa a ser realizada é o empilhamento das seções transversais, obtidas através do TFM em forma de matrizes. A resolução da imagem tridimensional depende da quantidade dessas matrizes empilhadas, conforme esquema apresentado na Figura 14.

Após o empilhamento das matrizes, é necessário definir um valor de amplitude limite, o qual definirá as fronteiras das descontinuidades. (KLEIN, SCHILLING, STRAßER, 2000) Esse valor de amplitude, chamado de amplitude de corte, é usado para que os blocos 3D sejam referentes apenas às descontinuidades presentes no interior da peça, excluindo do bloco final todas as regiões íntegras.

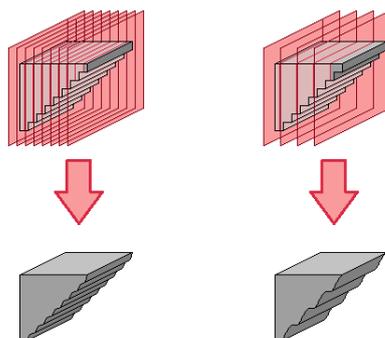


Figura 14. Esquema demonstrando a influência da quantidade de matrizes de TFM empilhadas na geração da imagem 3D.

Na parte superior da Figura 14, é representada a quantidade de matrizes empilhadas para geração do sólido, o qual está apresentado na parte inferior da imagem. À esquerda, oito matrizes foram utilizadas para a reconstrução do sólido, enquanto apenas quatro foram empilhadas para a formação do sólido apresentado à direita.

A amplitude de corte é utilizada para interligar as diversas matrizes que foram empilhadas. Para essa etapa, são selecionados todos os pontos que possuem o valor de amplitude igual ao valor de corte. Esses pontos corresponderão aos limites dos blocos 3D. (KLEIN, SCHILLING, STRAßER, 2000) Com isso, um algoritmo do próprio *software* Matlab gera isosuperfícies, unindo os pontos mais próximos, resultando em blocos 3D.

Esse algoritmo é baseado no mesmo princípio do algoritmo *marching cubes*, o qual gera superfícies, através de grades triangulares, entre os pontos selecionados. (KLEIN, SCHILLING, STRAßER, 2000) Para a geração dessas superfícies, o algoritmo compara os pontos selecionados com padrões pré-estabelecidos, a fim de determinar o triângulo com melhor correspondência para cada grupo de pontos, gerando como resultado o sólido 3D. (MEYERS, SKINNER, SLOAN, 1992)

Para a exportação dos sólidos, é necessário utilizar um algoritmo que converta os blocos 3D do Matlab para algum formato de arquivo que possa ser aberto em um *software* CAD. Os *softwares* CAD são escolhidos, pois são compatíveis com *softwares* para análise de integridade estrutural. Uma das principais vias de conversão do arquivo é a descrição dos sólidos através de faces e vértices. Para essa descrição, um algoritmo é utilizado para salvar os sólidos em diversas faces separadas, as quais são relacionadas com seus respectivos vértices. Assim, as faces estarão sempre na posição correta, independente do *software* em que o sólido for visualizado. (SVEN, 2008)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho, bem como as técnicas desenvolvidas e aplicadas para a obtenção dos resultados. É apresentada uma breve descrição e explicação de cada etapa do trabalho, junto com as ferramentas necessárias para executá-las.

3.1 Equipamentos

Nesta seção, são citados e descritos todos os equipamentos utilizados para coleta de dados do trabalho, bem como os acessórios que foram utilizados em conjunto.

3.1.1 Ultrassom Convencional

Visando estimar a atenuação do feixe sônico em relação à distância percorrida, foi utilizado o equipamento portátil de ultrassom convencional USN 60 da marca *General Electrics*, apresentado na Figura 15. Em conjunto com esse equipamento, foi empregado um sensor monocristal para emissão normal do feixe, com 5 MHz de frequência, também da marca *General Electrics*.



Figura 15. Equipamento de ultrassom utilizado para estimar a atenuação pela distância percorrida.

3.1.2 *Phased Array*

O equipamento utilizado para a estimativa da atenuação pela abertura do feixe e para a coleta de dados visando a reconstrução 3D foi um aparelho da marca M2M, modelo Multi-X, com capacidade para 128 elementos simultâneos. Esse equipamento é conectado a um

computador via cabo USB para a coleta de dados e visualização de resultados e pode ser visto na Figura 16.



Figura 16. Equipamento de *Phased Array* utilizado para aquisição de dados, conectado ao computador via cabo USB.

Junto a esse equipamento, foi utilizado um transdutor de 128 elementos lineares, com 5 MHz de frequência. Cada elemento possui 0,5 mm de largura, os quais estão espaçados entre si por 0,1 mm. Para esse trabalho, a coleta de dados foi realizada utilizando apenas os primeiros 64 elementos do sensor, a fim de reduzir o tempo de etapas posteriores, como o tratamento de dados. Um esquema do sensor com 64 elementos ativos pode ser visto na Figura 17.

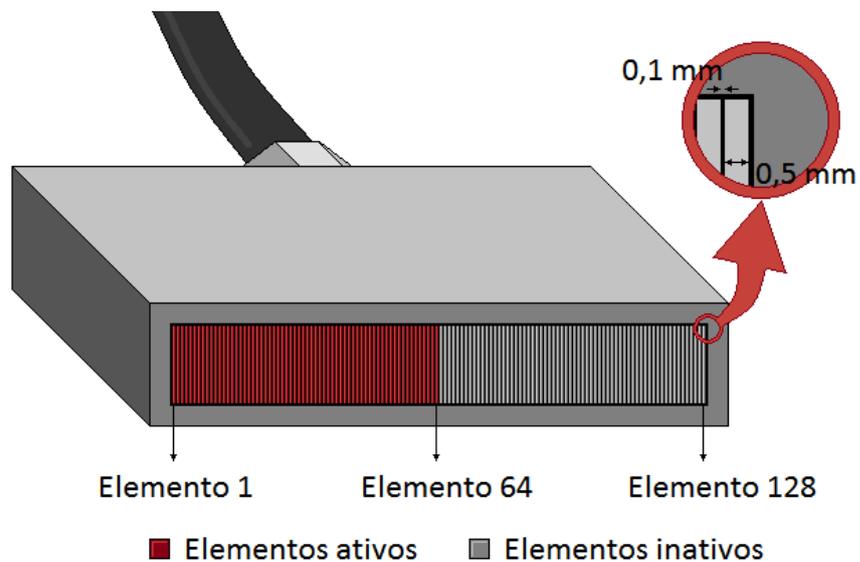


Figura 17. Esquema representando transdutor com 64 elementos lineares ativos, com largura elementar de 0,5 mm e espaçamento de 0,1 mm.

O método de inspeção utilizado foi o FMC. Esse método de inspeção gera dados em formato de matrizes, sendo uma matriz para cada posição inspecionada. Os dados da matriz são fornecidos através das amplitudes do sinal *A-scan* correspondente em uma janela de tempo pré-determinada. Como o intervalo de tempo que compreende o *A-scan* é definido pelo usuário, bem como a frequência de aquisição, sabe-se o espaçamento entre os pontos de amplitude fornecidos. Neste trabalho, utilizou-se uma frequência de aquisição igual a 25 MHz, o que significa que um ponto é fornecido a cada $0,04 \mu\text{s}$. A janela de tempo do *A-scan* foi pré-determinada para abranger $30 \mu\text{s}$. Assim, sabe-se que o *A-scan* é composto por 750 pontos separados por $0,04 \mu\text{s}$.

A janela de tempo foi determinada de modo com que o feixe sônico pudesse percorrer o dobro da espessura de qualquer bloco utilizado, para que o método *half-skip* pudesse ser aplicado. O valor da frequência de aquisição foi escolhido visando uma quantidade de pontos suficiente para fornecer uma boa resolução, sem que tornasse o processamento de dados muito lento. Para fins de comparação, uma frequência de aquisição com valor de 10 MHz forneceria apenas 300 pontos na janela de tempo determinada, resultando em um espaçamento de $0,10 \mu\text{s}$, piorando a resolução. De forma contrária, uma frequência de aquisição de 50 MHz forneceria 1500 pontos separados por $0,02 \mu\text{s}$, melhorando a resolução, entretanto o volume de dados tornaria o processo mais lento em etapas posteriores.

Após um pré-processamento dos dados, a matriz é constituída de 64 colunas por 64 linhas. A Figura 18 apresenta um esquema de uma matriz de resultados depois do pré-processamento para um sensor com n elementos.

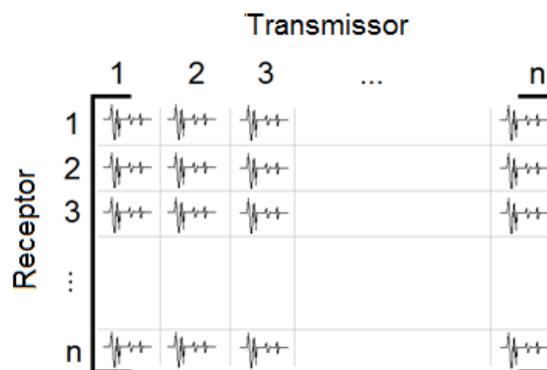


Figura 18. Esquema representando a disposição dos dados de inspeção, após pré-processamento, em uma matriz $n \times n$.

Percebe-se que cada coluna, após o pré-processamento, compreende o *A-scan* de um elemento transmissor, enquanto cada linha corresponde a um elemento receptor. Assim, os dados de todos os possíveis pares transmissor/receptor estão presentes na matriz de forma organizada, agilizando o posterior tratamento dos dados.

3.2 Softwares

Para a coleta dos dados de *Phased Array*, foi utilizado o *software* do próprio equipamento, chamado Multi2000. Neste *software* é possível determinar o método de inspeção, bem como os parâmetros utilizados e citados na seção anterior. Também é possível fazer a exportação dos dados na forma de matrizes, a qual foi igualmente explicitada anteriormente.

Após a coleta dessas matrizes, é necessário fazer o tratamento dos dados, por meio do desenvolvimento de diversos algoritmos, a fim de se obter os resultados desejados. Para essa etapa do trabalho, foi utilizado o *software* Matlab, o qual é específico para o tratamento de matrizes. Nele foram desenvolvidos alguns algoritmos, os quais aplicavam todas as etapas do TFM e, por fim, geravam os sólidos 3D como resultado final.

A etapa posterior do trabalho, a qual consiste na exportação dos sólidos 3D para outro *software*, requer um programa que seja compatível com *softwares* utilizados para a análise de integridade estrutural. Tendo em vista essa necessidade, o SolidWorks foi escolhido para a visualização dos sólidos 3D exportados.

3.3 Corpos de Prova

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados diversos corpos de prova. Para a estimativa da perda de espessura, foram inspecionados blocos de aço carbono com espessuras distintas. Ao todo foram utilizadas sete diferentes espessuras a fim de determinar a influência que a distância percorrida pelo feixe exerce na perda da energia retornada. Os blocos de menor e maior espessuras apresentam valores de 10 mm e 35 mm, respectivamente. Este valores foram escolhidos, pois são valores que compreendem as espessuras dos demais blocos utilizados ao longo deste trabalho.

Para a estimativa da atenuação pela abertura do feixe, foi utilizado um bloco semicilíndrico de aço carbono, com diâmetro de 174 mm, conforme Figura 19. Este bloco foi escolhido para esta função, pois a distância entre a superfície curva e o centro da superfície

plana é sempre a mesma, portanto qualquer diferença no sinal ao longo da superfície curva é resultante de uma atenuação por conta da abertura do feixe.

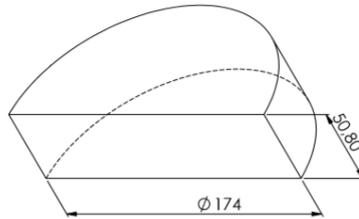


Figura 19. Bloco padrão utilizado para estimar perda de energia pela abertura do feixe. Dimensões em milímetros.

Alguns blocos foram utilizados exclusivamente para a reconstrução 3D. Esses blocos estão apresentados nas Figuras 20, 21, 22 e 23.

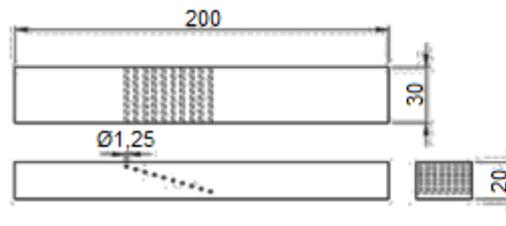


Figura 20. Bloco padrão com dez furos passantes usinados, utilizado apenas para reconstrução 3D. Dimensões em milímetros.

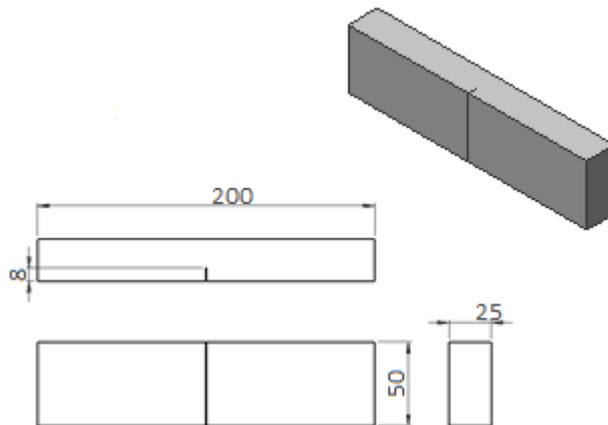


Figura 21. Bloco padrão com um entalhe usinado de 8 mm, utilizado apenas para reconstrução 3D. Dimensões em milímetros.

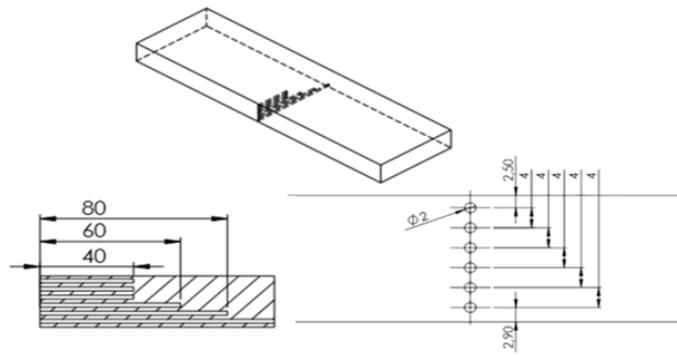


Figura 22. Bloco padrão com seis furos de diferentes comprimentos alinhados, utilizado apenas para reconstrução 3D. Dimensões em milímetros.

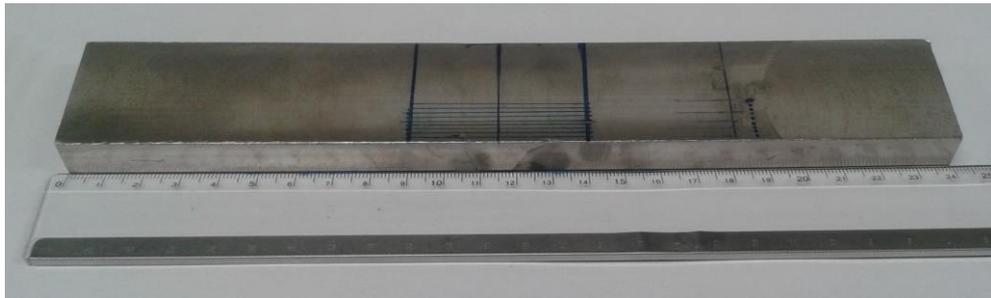


Figura 23. Bloco soldado, com cordão usinado, utilizado para reconstrução 3D de possíveis defeitos.

O bloco da Figura 20, confeccionado em aço carbono, possui espessura de 20 mm, com dez furos passantes de diâmetro igual a 1,25 mm. Este bloco foi utilizado, pois é desejado detectar um grande número de defeitos, a diferentes profundidades, simultaneamente. O bloco da Figura 21, também usinado em aço carbono, apresenta 25 mm de espessura, com um entalhe de 8 mm ao longo de toda a superfície inferior da peça. Este bloco foi escolhido, pois apresenta um defeito com grande dificuldade de detecção para técnicas com incidência normal, como o FMC. Para esses dois blocos, como as descontinuidades possuem a mesma geometria ao longo de toda a largura, foi realizada a coleta de dados apenas em um ponto da peça, de forma com que as descontinuidades ficassem próximas ao centro da imagem final. Após a aplicação do TFM, os resultados foram multiplicados para gerar diversas matrizes iguais, simulando o deslocamento do sensor ao longo da peça.

O bloco da Figura 22, também de aço carbono, apresenta espessura de 25,4 mm, com seis furos de 2 mm de diâmetro, alinhados verticalmente. Este tipo de bloco foi escolhido, pois apresenta defeitos sobrepostos, os quais podem ser difíceis de detectar. Três dos seis furos

possuem 40 mm de comprimento. Os outros três furos possuem comprimentos distintos: 60 mm, 80 mm e 100 mm, sendo esse último um furo passante. Para esse bloco, foram realizadas medidas em quatro diferentes pontos, todos com as descontinuidades centradas. A primeira coleta de dados foi realizada a 90 mm de comprimento, visualizando apenas um furo. A segunda medida foi feita em um comprimento de 70 mm, recebendo sinal de dois dos seis furos. A terceira posição a ser inspecionada foi a 50 mm de comprimento, com o sinal de três furos sendo recebido. Por fim, foi realizada uma coleta de dados de forma com que todos os furos pudessem ser captados, a 20 mm de comprimento.

O bloco da Figura 23 apresenta espessura de 14 mm, contendo uma solda no seu centro, com largura máxima do cordão de aproximadamente 22 mm na parte superior. Este bloco foi utilizado por questões de disponibilidade e é confeccionado em aço inoxidável austenítico, o qual apresenta dificuldades de inspeção muito maiores do que o aço carbono devido à alta atenuação do ultrassom. (COSTA, 2011) Para esse bloco, foram realizadas medidas em sete posições ao longo da largura da peça, com distância entre medidas de 1,5 mm, objetivando detectar algum possível defeito na solda. Para correto acoplamento do sensor, foi necessário retirar o cordão da solda através de usinagem. Este bloco foi utilizado, pois uma das principais aplicações do TFM tem como objetivo a inspeção de materiais soldados.

3.4 Algoritmos

O algoritmo desenvolvido no Matlab foi o TFM, visando gerar uma imagem em duas dimensões, a qual representa uma vista lateral do objeto em análise, com resolução equivalente a 0,1 mm por pixel para todas as imagens geradas. Essa precisão obtida com a aplicação do TFM é melhor do que a resolução de 0,59 mm alcançada pelo ultrassom convencional para mesma frequência e mesmo material. (BRAGA, 2009) Na Figura 24, o fluxograma simplifica as etapas realizadas neste trabalho, desde a coleta de dados na inspeção da peça, até a implementação dos algoritmos para a geração da imagem 2D.

Para o cálculo do tempo, o centro do sensor foi definido como a origem do plano da imagem. Com essa referência, foi possível calcular a distância entre qualquer elemento e qualquer ponto da imagem. Com isso, foram calculadas as distâncias entre o elemento emissor e o elemento receptor, com o feixe passando por cada ponto da imagem, como explicado anteriormente na Seção 2.5. Em seguida, foi utilizado o valor da velocidade longitudinal do som no aço, 5920 m/s, para determinar o ToF (do inglês, *Time of Flight*, ou tempo de voo) relativo a cada uma destas distâncias calculadas.

Esse tempo teórico foi posteriormente associado com a amplitude do sinal *A-scan* para o par transmissor/receptor correspondente, a fim de armazenar no pixel em questão a energia do sinal para aquela posição.

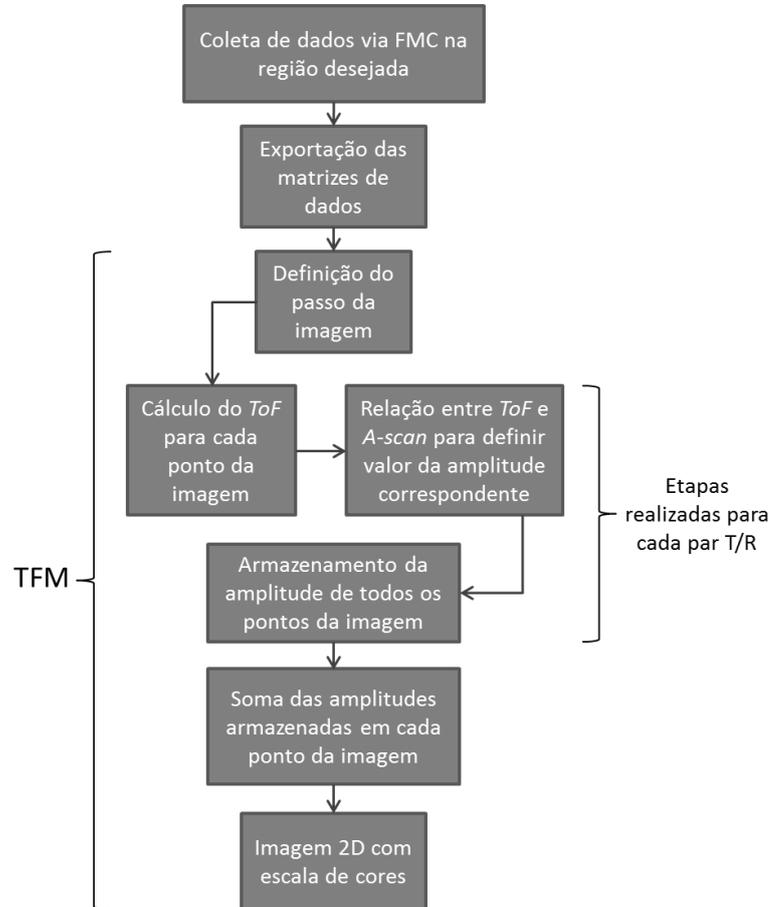


Figura 24. Fluxograma da metodologia utilizada, desde a inspeção até o resultado do TFM em duas dimensões.

Como supracitado, o *A-scan* é composto por 750 pontos separados entre si por $0,04 \mu\text{s}$. Sabendo isso, percebe-se que nem sempre o tempo calculado será exatamente correspondente a algum valor presente no *A-scan*, podendo ser um valor intermediário entre os pontos do *A-scan*. Para determinar a amplitude relativa a esses tempos intermediários, foram realizadas interpolações lineares.

Com os tempos calculados para todos os possíveis caminhos entre todos transmissores e receptores, os valores de amplitudes armazenados foram somados, resultando em apenas um valor para cada pixel. Com esse somatório, as amplitudes de discontinuidades são somadas, amplificando o valor do sinal, enquanto as amplitudes de ruídos acabam sendo anuladas, destacando os locais com discontinuidades.

Esses valores dos somatórios são utilizados para a geração da imagem final. Através da utilização de uma função presente no *software* Matlab, os diferentes valores são convertidos em diversas cores. Essa função gera uma escala de cores partindo do azul marinho para os menores valores, passando pelo azul claro, depois o verde, o amarelo e, por fim, o vermelho para os maiores valores de soma. Após a aplicação dessa escala de cores, a imagem 2D está pronta, representando a seção transversal da peça na região inspecionada.

3.5 Etapas Adicionais

Além dos algoritmos explicados na seção anterior, foram utilizadas etapas adicionais ao longo deste trabalho, a fim de melhorar a precisão dos algoritmos desenvolvidos e aplicados.

3.5.1 Perda de energia

Sabe-se que a intensidade do feixe sônico diminui com a distância percorrida. Sabe-se também que diferentes ângulos do feixe apresentam variações na intensidade do sinal. Esta diferença de energia, tanto em relação à distância percorrida quanto ao formato do feixe, pode resultar em resultados insuficientes, devido à baixa intensidade do sinal retornado ao sensor. Para avaliar a influência da atenuação e, conseqüentemente compensá-la e diminuir erros, foi estimada a perda de energia do feixe para os dois casos. A estimativa da atenuação do feixe em relação à distância percorrida foi o primeiro caso analisado. Para essa estimativa, foi utilizado o equipamento de ultrassom convencional junto do sensor de 5 MHz. Foram realizadas duas medidas para cada uma das oito diferentes espessuras. Uma das medidas foi realizada com ganho de 42 dB e a outra, com ganho de 48 dB. Esses dois valores de amplitude foram utilizados para que os sinais de todas as espessuras pudessem ser captados, sem a necessidade de alterar manualmente o ganho durante o ensaio, determinando a perda de energia apenas pela atenuação no material. As espessuras utilizadas foram de 10, 15, 20, 24, 25, 30 e 35 mm. Essas espessuras foram escolhidas por possuírem valores próximos aos valores de espessura dos blocos utilizados para a aplicação do TFM.

Para cada medida, foi registrada a amplitude do primeiro pico do sinal *A-scan*, o qual correspondente ao eco de fundo da peça. Com esses dados foi possível definir a perda de energia de acordo com a distância percorrida pelo feixe.

O segundo caso analisado foi a estimativa da atenuação da energia de acordo com a abertura do feixe. Para estimar essa perda, foi realizado o TFM no bloco padrão apresentado

na Figura 19, o qual consiste em metade de um cilindro. O sensor foi posicionado na face plana do bloco, a fim de detectar a variação de energia ao longo da superfície curva oposta ao sensor. Com o TFM aplicado, foi possível perceber o gradiente de amplitudes, conforme esperado, e relacionar essa variação com o ângulo do feixe. A aplicação das compensações visa melhorar principalmente o sinal proveniente de descontinuidades que não se situam abaixo do sensor.

3.5.2 *Half-skip*

Além das estimativas de perda de energia, também foi utilizada a técnica *half-skip*, a qual utiliza a reflexão da onda na superfície oposta ao sensor. Assim, além de detectar os sinais por incidência direta, também é possível detectar algumas descontinuidades ao utilizar a reflexão no fundo da peça, melhorando o resultado e aumentando a probabilidade de detecção. Considerar essa forma de interação entre feixe e descontinuidades é importante para a detecção completa de defeitos planares, como entalhes e trincas.

Para aplicação desta técnica, o TFM foi executado em uma região correspondente ao dobro da espessura da peça. A primeira metade da imagem corresponde ao TFM aplicado normalmente, enquanto a segunda metade corresponde ao sinal após a reflexão no fundo da peça, apresentando o sinal espelhado em relação ao TFM normal.

É necessário, portanto, rebater o sinal da segunda metade da imagem, resultando na mesma orientação que o TFM original. Após rebater a segunda metade, os resultados das duas metades são somados, resultando no sinal do TFM com *half-skip* aplicado.

3.6 Reconstrução 3D

Para a geração da imagem em três dimensões, é necessário que se faça a coleta de dados em diferentes pontos da peça, a fim de se obter informação da condição da peça ao longo de todo o comprimento desejado. A Figura 25 representa o deslocamento do sensor ao longo de um dos blocos padrão, visando obter informações do mesmo ao longo de todo seu comprimento.

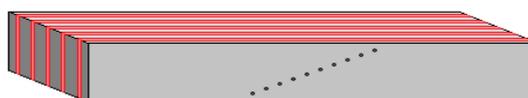


Figura 25. Esquema representando o deslocamento do sensor para aquisição de dados ao longo de todo o comprimento de um bloco padrão.

Na Figura 25, cada linha vermelha representa uma posição do sensor para a aquisição dos dados. Após o deslocamento do sensor e as coletas dos dados, é necessário aplicar o TFM para todas as posições, gerando diversas imagens 2D como resultado. Em seguida, é necessário fazer a união dos dados, visando a formação do sólido 3D.

A união dos dados das diferentes imagens é feita através de um algoritmo que seleciona isosuperfícies e gera ligações entre elas, formando sólidos em três dimensões. Para a aplicação desse algoritmo, foi utilizado um valor de corte correspondente à metade da amplitude máxima. Esse valor foi definido por ser convencionalmente utilizado em ensaios ultrassônicos, sendo também conhecido como “queda dos 6dB”, devido à unidade de medida de amplitude do ultrassom. Com a aplicação do corte de amplitude e a união das matrizes via isosuperfícies, o bloco em 3D é gerado no próprio *software* Matlab.

Como o algoritmo de reconstrução 3D se baseia em superfícies com mesmo valor de amplitude, foi feito um tratamento de todos os resultados de TFM para que os valores máximos de cada coleta de dados fossem correspondentes a um valor fixo de 50 unidades. Assim, os pontos com maior amplitude de cada coleta são unidos corretamente, evitando erros de reconstrução por diferentes condições de acoplamento do sensor.

3.7 Exportação para *Software* CAD

Depois do bloco 3D ser gerado no Matlab, é necessário exportá-lo para um *software* CAD, o qual é compatível com *softwares* de análise de integridade estrutural. Para essa exportação, outro algoritmo, desenvolvido por SVEN (2008), é utilizado. Nesta última etapa, o sólido é definido em faces e vértices, sendo convertido para um arquivo em formato .stl, o qual é compatível com *softwares* CAD.

Com o sólido exportado para o *software* CAD, basta utilizar algum *software* de análise de integridade estrutural para carregar o defeito 3D, aumentando a precisão de cálculo.

3.8 Corte Transversal

Para o bloco apresentado na Figura 23, foram realizados cortes transversais após a aplicação dos algoritmos e da exportação do bloco para *software* CAD. Esses cortes foram realizados apenas no bloco da Figura 23, pois não se tinha conhecimento dos defeitos presentes no seu interior. Como os outros blocos foram todos usinados, já existia informação

sobre geometria e tamanho dos defeitos presentes e não foi necessário realizar essa etapa para eles.

Para a análise dessas seções transversais, foi utilizada uma máquina de corte metalográfico. Os seccionamentos foram realizados com espaçamento de 1,5 mm, mesma distância utilizada na coleta de dados via FMC. Após cada corte, a superfície foi lixada e polida, até apresentar aspecto especular. Com o preparo da superfície, foram tiradas fotos das seções transversais, a fim de comparar com os resultados obtidos por TFM na mesma posição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados todos os resultados obtidos ao longo das etapas do trabalho explicitadas no capítulo anterior. Esses resultados serão avaliados e explicados detalhadamente ao longo de todo o capítulo.

4.1 Perda de Energia

A fim de estimar a perda de energia pela distância percorrida pelo feixe dentro do material, foi realizado um ensaio com ultrassom convencional para amostras com diferentes espessuras. Nesse ensaio, foram avaliados os valores das amplitudes dos sinais de cada espessura, para dois diferentes ganhos, conforme resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados do ensaio para estimar a perda de energia pela distância com ganhos de 42 dB e 48 dB.

Ganho: 42 dB		Ganho: 48 dB	
Distância Percorrida [mm]	Amplitude [dB]	Distância Percorrida [mm]	Amplitude [dB]
10	33	10	43
15	24	15	37
20	19	20	29
24	13	24	23
25	12	25	22
30	6	30	14
35	4	35	9

O ganho de 42 dB foi utilizado, pois o bloco com 35 mm de espessura apresentou amplitude muito baixa para valores menores de ganho, não podendo ser analisado. Já o ganho de 48 dB foi determinado de forma com que o sinal proveniente do bloco com 10 mm de

espessura não apresentasse amplitude maior que o limite da escala. Além disso, o ganho utilizado na coleta de dados via FMC utiliza um ganho intermediário a esses valores, de 45 dB. Esses resultados foram analisados comparando a amplitude do sinal com a distância percorrida pelo feixe, gerando duas curvas, uma para cada ganho.

Em seguida, foi definido um polinômio para compensar a perda de energia pela distância percorrida pelo feixe. O polinômio utilizado foi a média entre as duas curvas obtidas nos ensaios de ultrassom convencional, resultando na Equação 2.

$$A = 0,0132d^2 - 1,8856d + 55,765 \quad (2)$$

Para compensar a perda de energia do feixe pela distância percorrida, os valores das amplitudes originais dos ensaios posteriores serão todos corrigidos a partir do polinômio apresentado na Equação 2. Uma comparação entre o gráfico das curvas de dados coletados e o polinômio definido para a compensação pode ser vista na Figura 26, junto com a análise residual do polinômio gerado para compensação.

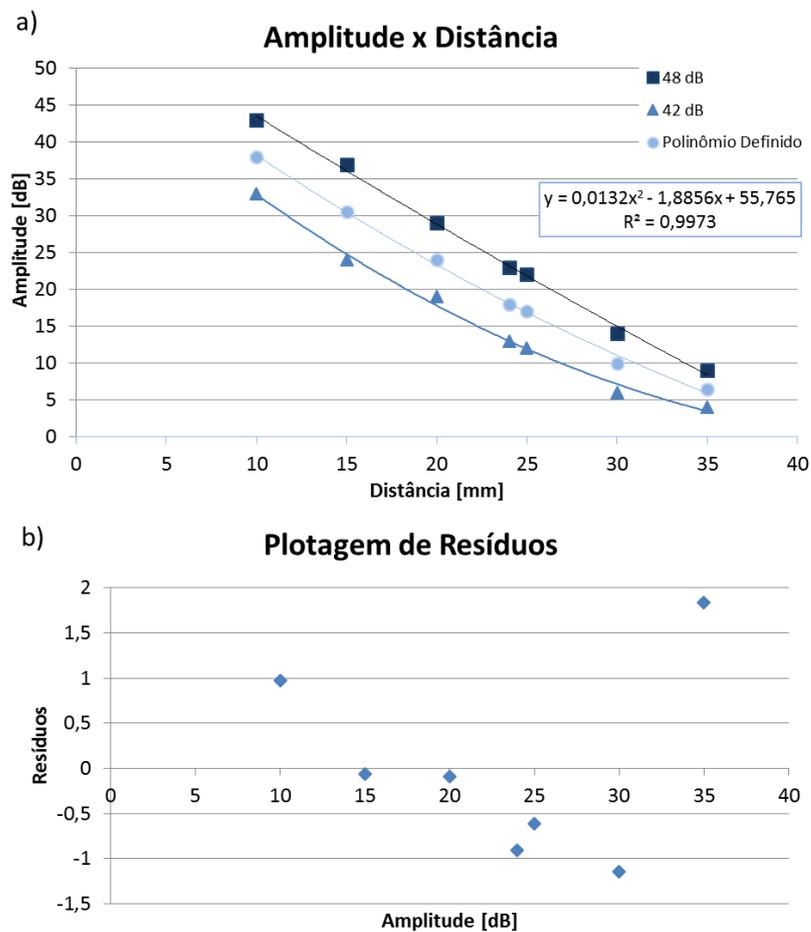


Figura 26. a) Gráfico comparando os dados obtidos pelo ultrassom com o polinômio definido para compensação de energia. b) Análise residual do polinômio gerado.

A equação presente no gráfico corresponde ao polinômio de segundo grau gerado a partir dos dados de ultrassom, onde A corresponde à amplitude do sinal e d , à distância percorrida pelo feixe. Observando a Figura 26, percebe-se que o polinômio definido para a compensação apresenta valores aproximados quando comparados com as curvas dos dados reais, mantendo o mesmo comportamento de redução da amplitude com o quadrado da distância. Também nota-se que a análise residual do polinômio não apresenta nenhuma tendência clara, confirmando a correspondência da equação gerada.

Além da estimativa da atenuação do feixe pela distância percorrida, foi estimada a perda de energia pela abertura do feixe. Para isso, foi aplicado o algoritmo TFM para o bloco apresentado na Figura 19. Aplicando o TFM, foi possível notar um gradiente de amplitudes ao longo de toda a superfície curva do bloco. O resultado desse TFM pode ser visto na Figura 27.

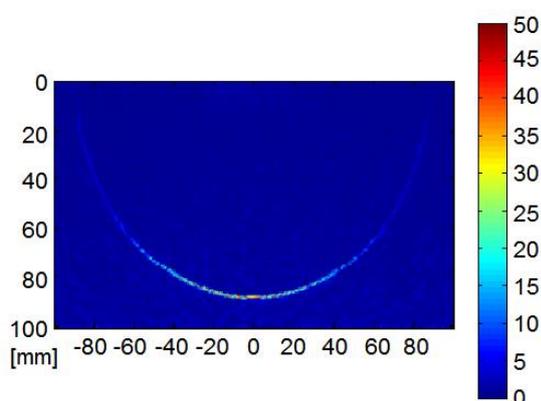


Figura 27. Resultado do TFM aplicado ao bloco padrão semicilíndrico. Nota-se o gradiente de amplitude ao longo da superfície curva.

Para todos os resultados de TFM apresentados, inclusive o da Figura 27, o sensor estará posicionado no topo da imagem, centralizado no ponto zero dos dois eixos, portanto não será explicitado nas demais imagens. Ao observar o resultado do TFM aplicado neste bloco, percebe-se uma variação na amplitude do sinal da superfície curva, apresentando maiores amplitudes para as regiões próximas ao centro do feixe. Essa variação pode ser vista pela diferença de cores ao longo de toda a superfície curva na imagem.

Sabendo que a geometria do bloco, quando visto nesta seção transversal, corresponde a meia circunferência, pode-se assumir que a amplitude deve ser semelhante em toda a superfície curva. Visando homogeneizar esses valores, as amplitudes ao longo de toda essa superfície foram analisadas e comparadas com o valor de amplitude da superfície no ângulo

zero. Esse ângulo zero corresponde a uma linha vertical no valor do eixo x igual a zero. O resultado dessa comparação, bem como a análise residual, podem ser vistos na Figura 28.

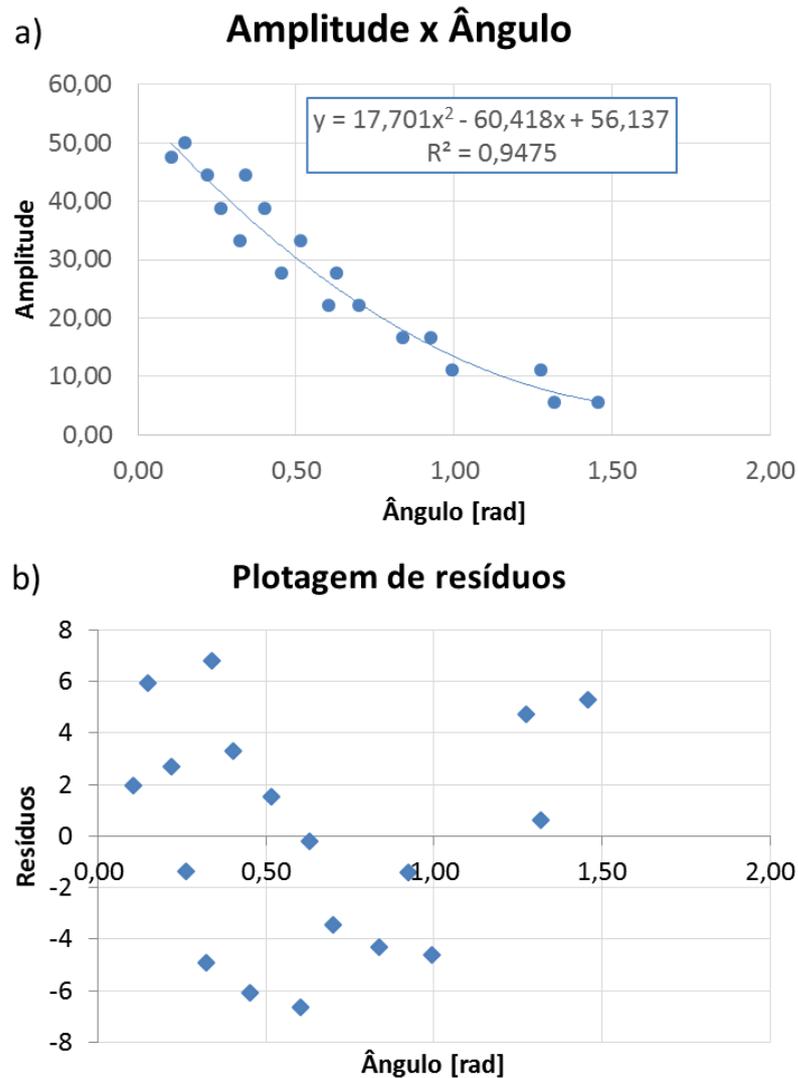


Figura 28. a) Comparação entre ângulo do feixe e amplitude do sinal. b) Análise residual do polinômio gerado.

Com a comparação entre o ângulo na superfície curva e a amplitude correspondente, apresentada na Figura 28, foi gerado um polinômio de segundo grau, apresentado na Equação 3, o qual foi utilizado para compensar a abertura. Pela Figura 28, é possível notar boa correspondência entre o polinômio gerado para compensação e os dados obtidos. Essa boa correlação é comprovada pela análise residual, a qual não apresenta nenhuma tendência clara.

$$y = 17,701\theta^2 - 60,418\theta + 56,137 \quad (3)$$

Na Equação 3, θ corresponde ao ângulo, em radianos, entre o ponto em questão e o centro do feixe, e y corresponde ao fator de correção o qual será utilizado para compensar a perda de energia pela abertura do feixe.

Após a estimativa da perda de energia pela abertura do feixe, foi realizado o TFM, aplicando a compensação da Equação 3 no mesmo bloco e, em seguida, foi utilizada uma amplitude de corte, com valor de -6 dB em relação ao valor máximo. Esse valor, como citado anteriormente, foi definido como o corte, pois se trata de um valor amplamente difundido para ensaios ultrassônicos. Esse corte de amplitude é utilizado para que qualquer ruído seja removido do bloco 3D que futuramente será reconstruído.

Os resultados dos TFM aplicados ao bloco padrão, antes e depois da aplicação da compensação de energia, podem ser vistos na Figura 29. Para a geração desta imagem, todos os valores de amplitude menores que o valor de corte foram definidos como zero, resultando no tom azul. Os valores acima do valor de corte foram mantidos, apresentando tonalidades entre amarelo e vermelho.

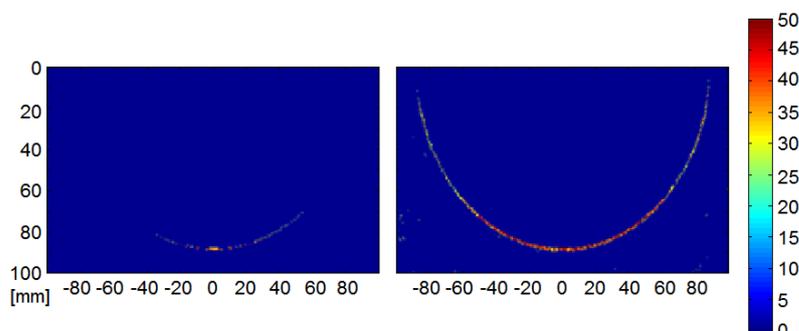


Figura 29. Resultado obtido após aplicação da queda dos 6 dB. À esquerda, resultado com TFM sem compensação de energia. À direita, resultado após compensação de energia por abertura do feixe.

Pode-se observar uma considerável melhora na detecção da superfície curva, quando aplicada a compensação. Percebe-se a amplitude homogênea compreendendo praticamente todo o corpo de prova. Para o TFM sem a compensação de energia, a superfície foi detectada de $-14,8^\circ$ a $25,9^\circ$, correspondendo a apenas 22,6% da superfície curva. Após a aplicação da compensação de energia pela abertura do feixe, a superfície curva foi detectada de $-78,8^\circ$ a $82,5^\circ$, correspondendo a 89,6% de toda a superfície curva. Uma comparação da abrangência dos ângulos entre os métodos aplicados pode ser vista na Figura 30, na qual também é apresentado o valor real da superfície, correspondente a 180° .

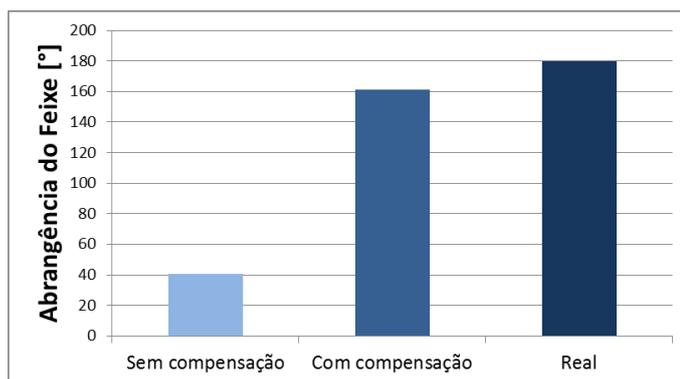


Figura 30. Comparação entre abrangência do feixe para aplicação de TFM sem compensação de energia e com compensação de energia pela abertura do feixe.

Com a compensação de energia estimada, tanto para a abertura do feixe, quanto para a distância percorrida, o TFM passou a ser aplicado nos demais blocos padrão, visando a reconstrução 3D das discontinuidades presentes no interior dos mesmos.

O mesmo procedimento de aplicação do TFM, sem e com a aplicação de energia, foi realizado no bloco da Figura 20. O resultado do TFM sem compensação pode ser visto à esquerda da imagem na Figura 31, enquanto o resultado da aplicação com compensação de energia está à direita da figura.

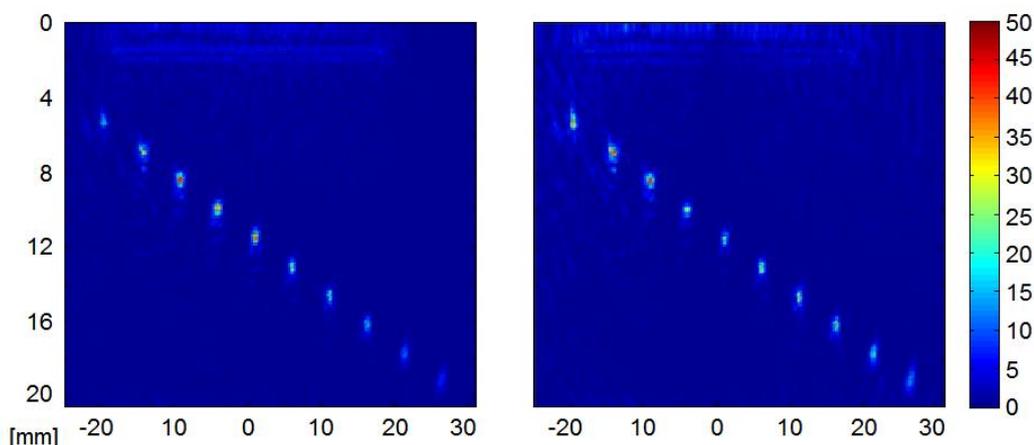


Figura 31. Resultado obtido após aplicação do TFM no bloco padrão com dez furos. À esquerda, resultado do TFM sem compensação de energia. À direita, resultado após compensação de energia.

Observando o resultado do TFM sem compensação, nota-se que foram detectados todos os dez furos presentes no bloco, embora o furo mais distante apresente amplitude muito baixa.

Há, entretanto, uma diferença na geometria e na amplitude dos sinais dos furos. É importante reparar que os furos mais próximos ao centro da peça foram os que apresentaram melhores resultados por estarem na região que recebe maior energia do feixe, enquanto os furos mais afastados apresentaram sinais mais fracos e disformes. Como os furos possuem mesmo diâmetro, espera-se que os sinais de todos os furos sejam semelhantes, tanto em formato, quanto em amplitude.

À direita da imagem, no resultado após a compensação de energia, nota-se que as descontinuidades mais próximas às bordas da imagem estão mais visíveis do que no caso anterior, mostrando os bons resultados obtidos com a compensação de energia.

Embora os resultados apresentados na Figura 31 estejam aceitáveis e coerentes, ainda há variação nas amplitudes dos furos, mesmo com a compensação de energia sendo aplicada. Visando melhorar a precisão da detecção das descontinuidades, optou-se por realizar posteriormente a etapa do *half-skip*.

Para o bloco com entalhe de 8 mm, apresentado na Figura 21, o TFM com compensação de energia apresentou resultados distantes do desejado, conforme apresentado na Figura 32.

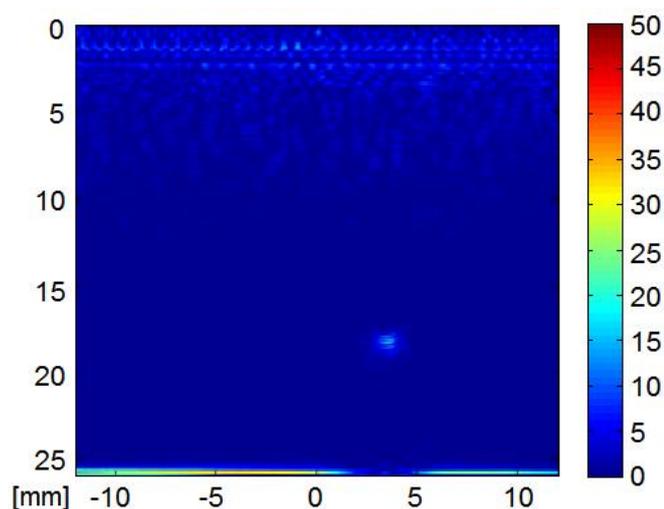


Figura 32. Resultado obtido após aplicação do TFM no bloco padrão com entalhe. O resultado apresenta apenas uma pequena indicação a 17 mm de profundidade.

Como pode ser visto na Figura 32, o TFM com compensação de energia aplicado ao bloco com entalhe não apresentou bons resultados. Foi detectado apenas um pequeno sinal, a 17 mm de profundidade, provavelmente resultante da difração do sinal na ponta do entalhe. Objetivando melhorar o resultado desse bloco e obter o sinal de todo o entalhe, a etapa de *half-skip* também foi aplicada a esse bloco.

4.2 Aplicação do *Half-Skip*

Como os resultados do TFM apenas com a compensação de energia ainda não estavam satisfatórios, foi aplicada a etapa considerando o *half-skip* nos blocos, utilizando a reflexão no fundo da peça para auxiliar na detecção de descontinuidades. A geração de cada imagem TFM durou em torno de 40 minutos, quando aplicado o *half-skip*, e aproximadamente 20 minutos para os resultados apresentados anteriormente, sem o *half-skip*.

O resultado do TFM com *half-skip* para o bloco dos dez furos pode ser visto na Figura 33.

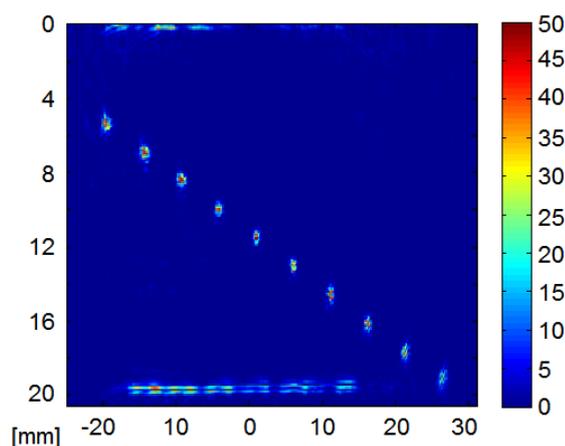


Figura 33. Resultado obtido após aplicação de TFM com compensação de energia e *half-skip* no bloco padrão com dez furos.

Percebe-se que o resultado do *half-skip* melhorou a detecção dos furos mais afastados do centro da imagem. Também é possível notar que a amplitude dos sinais apresentou menor flutuação, com valores mais próximos para todos os furos. Por fim, observa-se um sinal horizontal a 20 mm de profundidade, correspondente à superfície inferior do bloco.

Para o dimensionamento dos furos, foi aplicada a técnica da queda dos 6 dB, conforme explicado em seções anteriores. Os resultados dos dimensionamentos podem ser vistos na Tabela 2. Para identificação dos furos, eles foram nomeados de 1 a 10, sendo o furo 1 o mais próximo da superfície superior, enquanto o furo 10 é o furo mais próximo da superfície inferior da peça. Apesar de os defeitos serem furos circulares, os resultados apresentaram valores distintos de diâmetros quando medidos na horizontal e na vertical. Para melhor avaliar os resultados, os diâmetros foram medidos na vertical, cujos valores foram chamados de altura, e na horizontal, sendo esses valores denominados de largura.

Tabela 2. Resultados do dimensionamento dos dez furos para os três métodos de TFM aplicados.

Compensação de Energia	Sem		Com		Com		Real	
<i>Half-Skip</i>	Sem		Sem		Com			
Número do furo	Altura [mm]	Largura [mm]						
1	0,8	0,9	1	1,1	1,1	1,1	1,25	1,25
2	0,8	1,3	1	1,4	1	1,3		
3	0,8	1,3	0,8	1,3	0,9	1,3		
4	1	1,3	0,8	1,1	1	1		
5	1,1	1,1	0,8	1,1	1	1,1		
6	0,8	1,1	0,9	0,9	1,1	1		
7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,1	1,2		
8	0,7	0,9	1	0,9	0,9	1,1		
9	0,6	0,9	1	1,1	1	1,1		
10	0	0	0,6	0,7	0,9	0,9		

Analisando os dados dos dimensionamentos, nota-se que houve melhora tanto com a aplicação da compensação de energia, quanto com a técnica de *half-skip*. Percebe-se que o furo 10 só apresentou resultado aceitável com a aplicação das duas técnicas juntas, sendo que não pode ser dimensionado sem a aplicação das mesmas. Também é possível observar que os furos mais centrais apresentaram os resultados mais coerentes. Por fim, é importante ressaltar que, em todas as técnicas aplicadas, a medida da largura apresentou resultados mais próximos ao tamanho real do que a altura.

A fim de facilitar a comparação entre os resultados, foram gerados gráficos dos valores medidos para as três diferentes aplicações – TFM sem compensação nem *half-skip*, TFM apenas com compensação de energia e TFM com compensação de energia e *half-skip* –, junto com os valores reais dos defeitos. Esses gráficos podem ser vistos nas Figuras 34, 35 e 36, apresentando respectivamente os resultados do TFM sem compensação nem *half-skip*, TFM com compensação e sem *half-skip* e TFM com compensação e com *half-skip*.

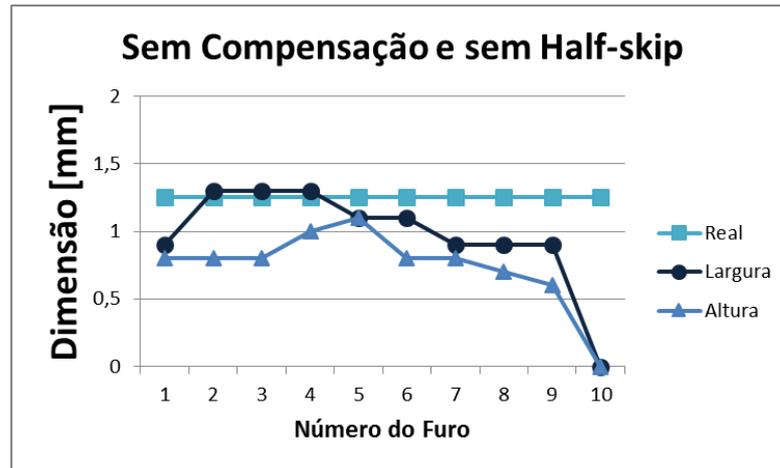


Figura 34. Medidas dos dez furos para TFM sem compensação nem *half-skip*.

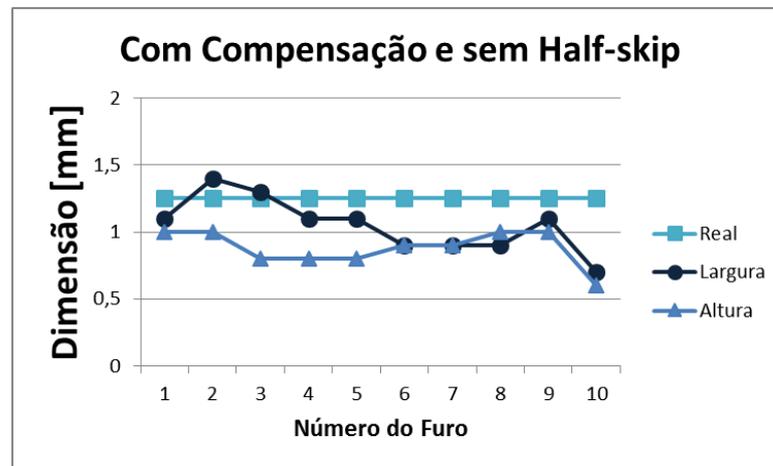


Figura 35. Medidas dos dez furos para TFM com compensação e sem *half-skip*.

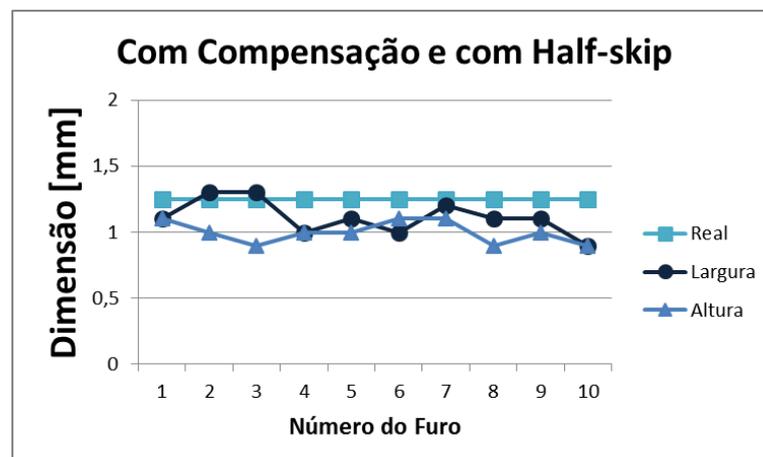


Figura 36. Medidas dos dez furos para TFM com compensação e com *half-skip*.

Analisando os resultados através dos gráficos, fica claro que os resultados se tornam mais homogêneos com a aplicação das duas técnicas, apresentando resultados com qualidade suficiente para a posterior geração dos blocos 3D.

O *half-skip* também foi aplicado para o bloco do entalhe de 8 mm, visando detectar todo o corpo da descontinuidade. O resultado do TFM com *half-skip* para esse bloco pode ser visto na Figura 37.

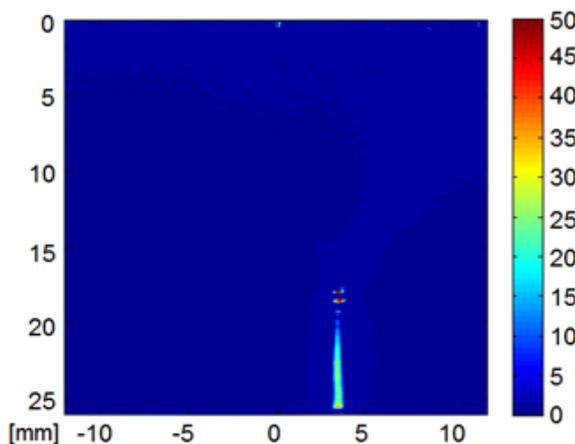


Figura 37. Resultado obtido após aplicação de TFM com compensação de energia e *half-skip* no bloco padrão com entalhe.

É possível observar todo o corpo do entalhe após a aplicação do TFM com *half-skip*. Esse fato já era esperado, pois o feixe, após refletir na lateral do entalhe, precisa de uma reflexão no fundo da peça para retornar ao sensor, só sendo detectado através do *half-skip*. Percebe-se que a altura do entalhe apresenta excelente correspondência, com valor aproximadamente igual a 8 mm, conforme dimensão real do defeito. O dimensionamento também apresenta uma excelente melhora com a aplicação do *half-skip*.

É importante ressaltar que, antes da aplicação do *half-skip*, o dimensionamento apontava um defeito com apenas 0,7 mm de comprimento, podendo causar erro de interpretação. Para facilitar a visualização do dimensionamento para o TFM com e sem *half-skip*, os resultados foram esquematizados, junto com o tamanho real do defeito, e estão apresentados na Figura 38.

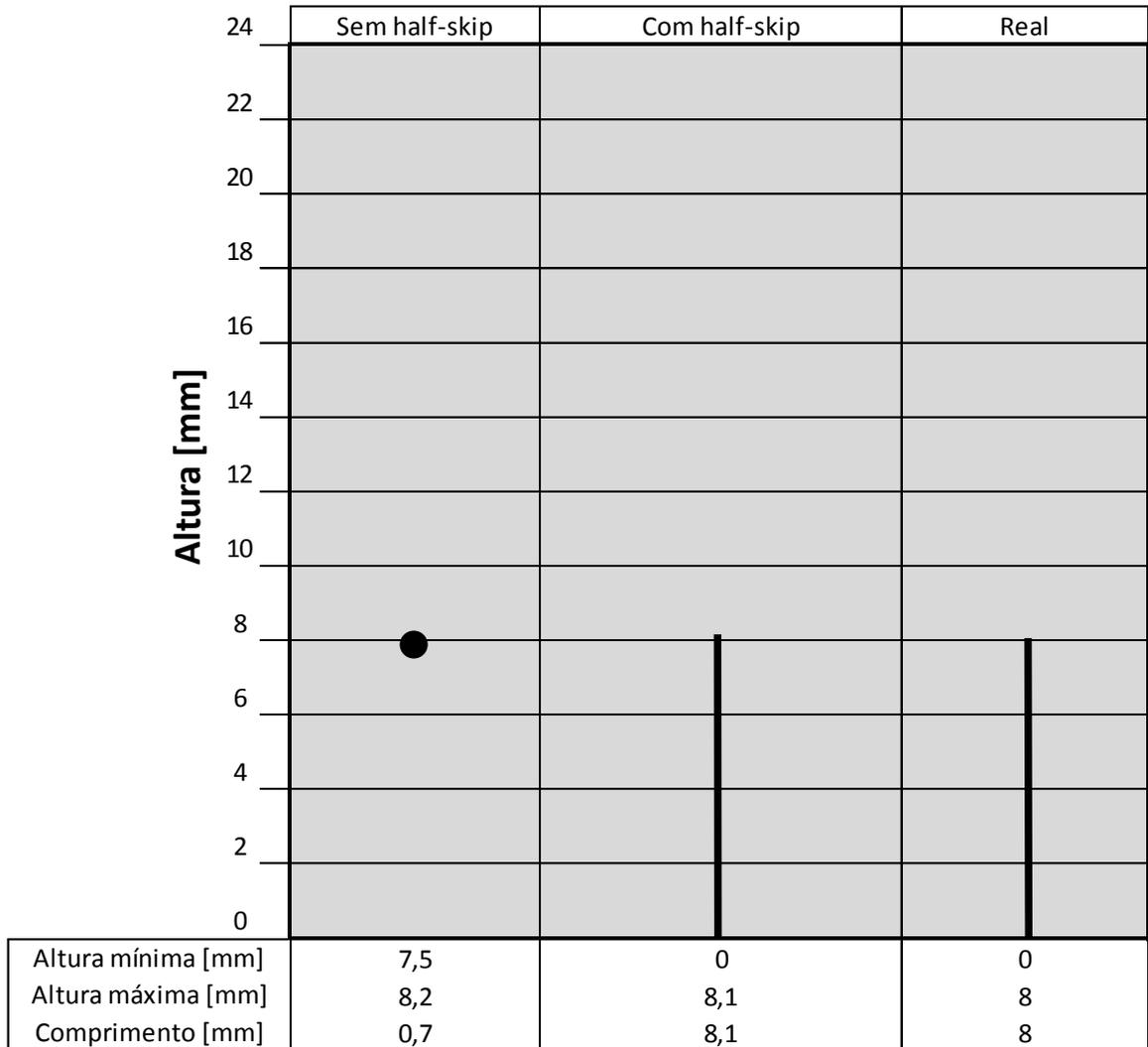


Figura 38. Esquema comparando os resultados do TFM sem *half-skip*, com *half-skip* e tamanho real do defeito.

É possível notar que, além de melhorar o dimensionamento do defeito, a aplicação do *half-skip* evita que haja erro de interpretação neste caso, pois o sinal apresentado sem a aplicação do mesmo sugere a presença de apenas um furo em vez de um entalhe. No esquema apresentado também é possível ver a excelente precisão do dimensionamento da técnica com *half-skip*.

Como a aplicação da compensação de energia apresentou melhores resultados junto com a técnica do *half-skip*, os outros blocos não foram analisados sem aplicação da compensação nem sem *half-skip*.

O bloco apresentado na Figura 22, o qual apresenta seis furos a diferentes profundidades, foi analisado em quatro diferentes regiões. Os resultados de TFM aplicados nas diferentes posições podem ser vistos na Figura 39.

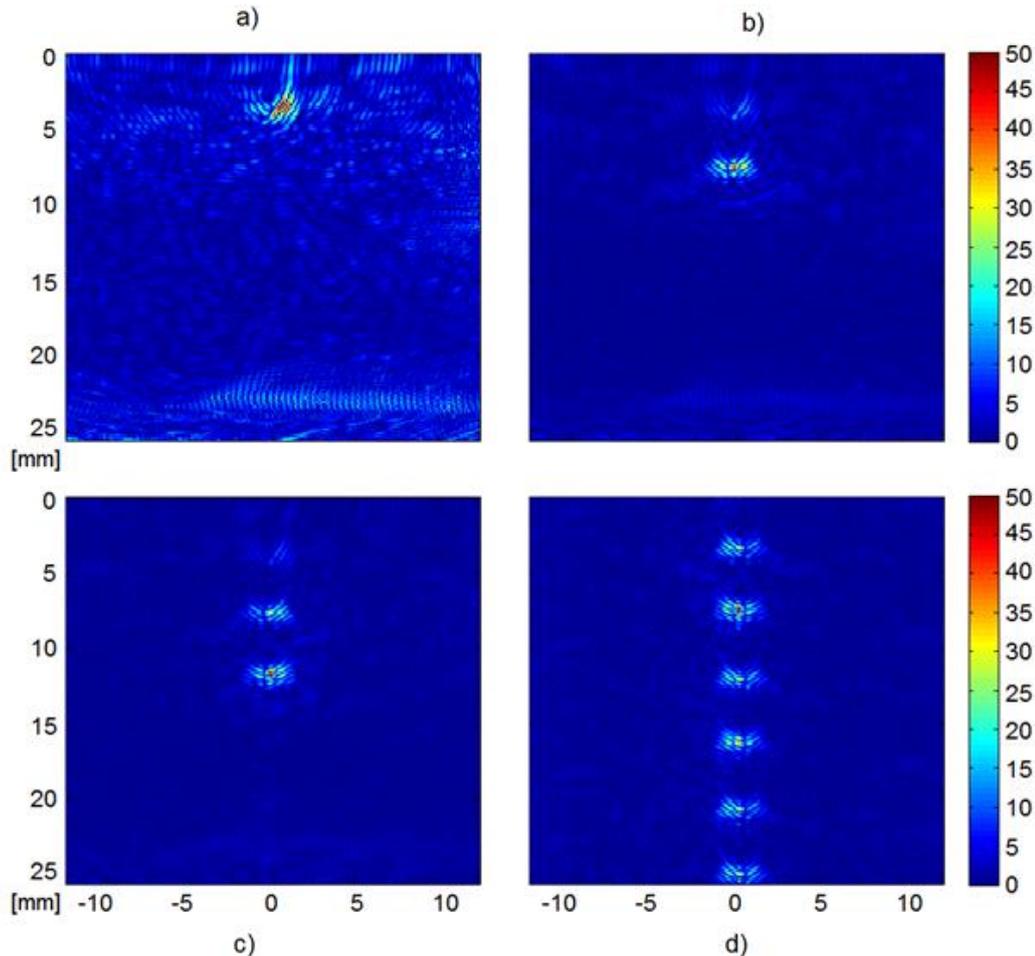


Figura 39. Resultados gerados pelo algoritmo TFM com compensação de energia e *half-skip* no bloco padrão com seis furos. As medidas foram realizadas a diferentes comprimentos do bloco: a) 90 mm, b) 70 mm, c) 50 mm, d) 20 mm.

Como os defeitos presentes neste bloco já eram conhecidos, esperava-se que os resultados detectassem, respectivamente, um, dois, três e seis furos. Os resultados apresentados na Figura 39.a e na Figura 39.d foram satisfatórios, apresentando os furos conforme esperado. A Figura 39.b detectou os dois furos, conforme esperado, porém o furo mais próximo da superfície não apresentou amplitude suficiente para um bom dimensionamento, resultando em uma medida discrepante da medida real. A Figura 39.c também apresentou problemas em relação ao furo mais próximo da superfície, causando maior diferença entre o valor medido e o valor real.

Os valores do dimensionamento para esse bloco podem ser vistos na Tabela 3. Para facilitar a compreensão, os furos foram nomeados de 1 a 6, sendo 1 o furo mais próximo da superfície, enquanto o 6 é o mais afastado. Da mesma forma que o bloco que apresentava dez furos, esse bloco com seis furos apresentou valores distintos de diâmetro quando medidos na horizontal e na vertical. Assim, a medida de diâmetro na horizontal foi chamada de largura, enquanto a medida do diâmetro na vertical foi chamada de altura.

Tabela 3. Resultados do dimensionamento dos seis furos para TFM com a aplicação da compensação e de *half-skip* para as quatro diferentes posições.

Posição	90 mm		70 mm		50 mm		20 mm		Real	
	Altura [mm]	Largura [mm]								
1	2,1	2,1	1,3	1,5	1,2	1,7	1,7	1,8	2	2
2	-	-	1,7	2,2	1,6	2,1	1,9	1,9	2	2
3	-	-	-	-	1,7	2,2	1,6	1,9	2	2
4	-	-	-	-	-	-	1,8	1,7	2	2
5	-	-	-	-	-	-	1,7	1,8	2	2
6	-	-	-	-	-	-	1,6	2	2	2

Como já havia sido observado na Figura 39, os piores resultados medidos foram apresentados para o furo 1 nas posições a 70 mm e 50 mm de comprimento do bloco. Os demais valores apresentaram boa correspondência com os valores reais.

Para as medidas realizadas a 20 mm de comprimento, foi gerado um gráfico comparando o tamanho real do defeito com os valores do dimensionamento, tanto da altura quanto da largura. Esse gráfico pode ser visto na Figura 40.

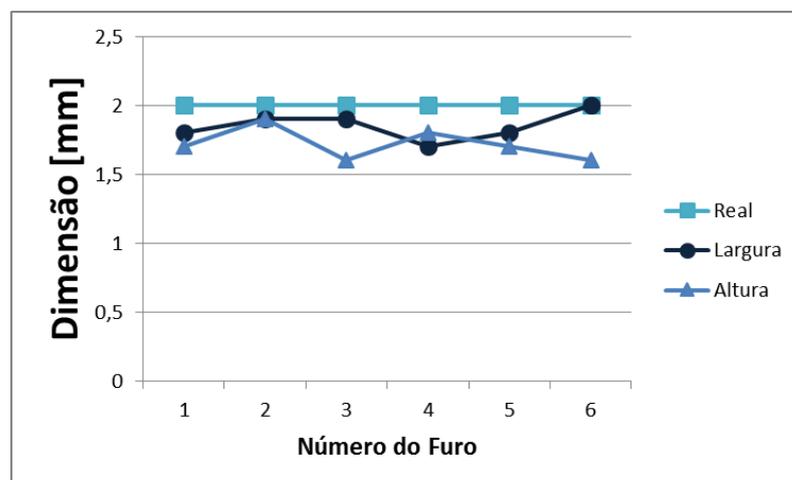


Figura 40. Comparação entre o tamanho real do defeito e os valores medidos de altura e largura a 20 mm de comprimento.

Pelo gráfico apresentado, observa-se a boa correspondência entre os valores medidos e o tamanho real dos defeitos. Também é possível perceber que apenas o furo 4 apresentou a largura com maior erro do que a altura.

Os furos 1, 2 e 3, presentes em mais de uma posição inspecionada, foram avaliados separadamente. Foi realizada uma comparação dos resultados para as diferentes posições medidas. A comparação entre as diferentes posições para o furo 1 pode ser vista na Figura 41.

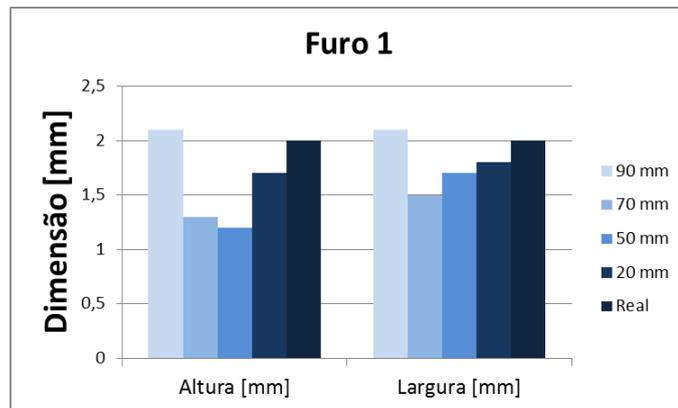


Figura 41. Comparação entre tamanho real e medidas do furo 1 para as diferentes posições de inspeção.

Percebe-se que, a 90 mm de comprimento, onde apenas o furo 1 era presente, a medida mostrou ótima precisão. O mesmo ocorreu a 20 mm de comprimento, onde os seis furos eram presentes, enquanto as posições de 70 e 50 mm apresentaram maior erro. Por fim, é possível reparar que a largura apresentou precisão igual ou superior à altura em todas as posições.

A mesma comparação, agora realizada para o furo 2, está apresentada na Figura 42.

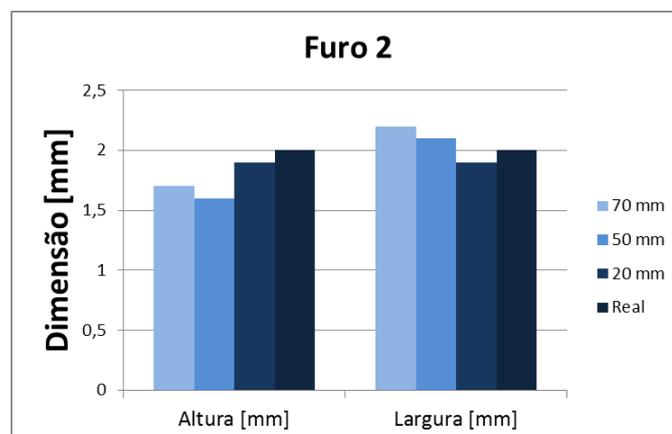


Figura 42. Comparação entre tamanho real e medidas do furo 2 para as diferentes posições de inspeção.

Para o furo 2, nota-se excelente precisão em todas as medidas, não apresentando erro maior que 0,5 mm em nenhuma medida. Novamente foi possível observar melhor precisão nas medidas de largura do que de altura.

Na Figura 43 está presente a mesma forma de comparação para o furo 3.

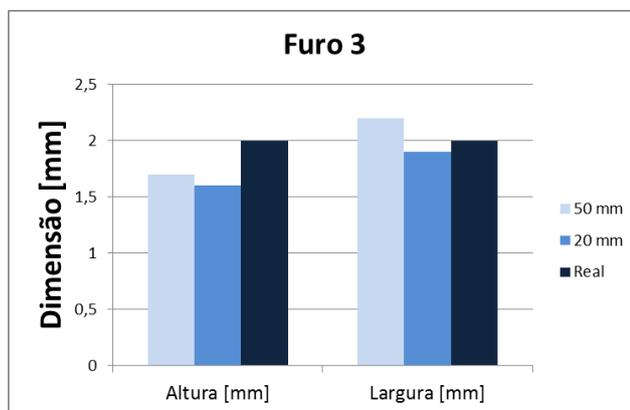


Figura 43. Comparação entre tamanho real e medidas do furo 3 para as diferentes posições de inspeção.

As medidas do furo 3 também se mostraram excelentes, especialmente para a largura, a qual apresentou novamente valores mais precisos que a altura. O dimensionamento do furo 3 também não apresentou erro superior a 0,5 mm em nenhuma medida.

O TFM com compensação de energia e com a aplicação da técnica *half-skip* também foi empregado no bloco com solda, visando detectar algum possível defeito no seu interior. Como não se tinha conhecimento sobre a situação do interior do material, foram feitas diversas medidas ao longo da solda. Os resultados da aplicação do TFM para essas posições podem ser vistos na Figura 44.

A figura, além de apresentar os resultados do TFM aplicado às sete posições do bloco com solda, também mostra um esquema no canto inferior direito. Esse esquema demonstra a correspondência entre as imagens e as posições inspecionadas. Cada linha vermelha desenhada no bloco corresponde a uma posição inspecionada via FMC, a qual foi posteriormente submetida ao TFM. Conforme explicitado na imagem, as dimensões dos resultados de TFM estão todas apresentadas em milímetros.

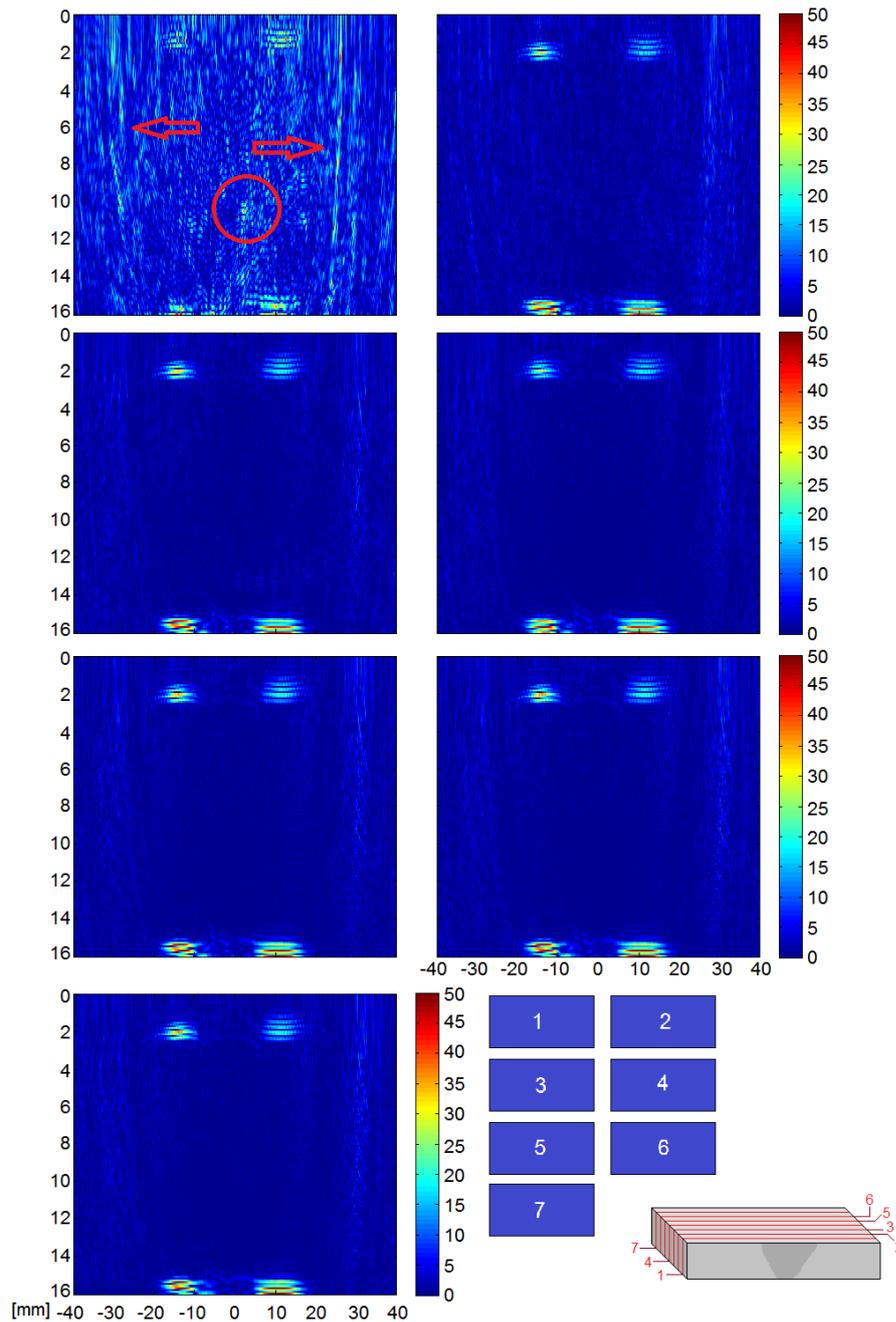


Figura 44. Resultados de TFM para o bloco com solda. No canto inferior direito, há um esquema relacionando os resultados com as posições inspecionadas no bloco.

Os resultados do TFM aplicado a esse bloco são semelhantes para seis das sete posições inspecionadas. A única posição que apresentou resultado diferente, e que detectou um defeito na solda, foi a posição 1. É possível notar uma pequena indicação a aproximadamente 11 mm de profundidade, praticamente centrada no valor zero do eixo x. Esse sinal, circulado na Figura 44, provavelmente corresponde a um vazio na solda, possivelmente causado por falta de fusão, e aparenta ter em torno de 1 mm de altura e 1 mm de largura. Também foram

detectados dois sinais, indicados pelas setas na Figura 44, os quais indicam a presença de algum defeito planar.

4.3 Corte Transversal

A fim de verificar se houve algum defeito sem detecção no bloco com solda, foram realizados cortes ao longo da solda. Em seguida, a superfície de corte foi preparada, através de lixamento e polimento, visando apresentar a situação do material naquela seção transversal. Assim, é possível comparar os resultados obtidos via TFM com as imagens obtidas através das verdadeiras seções transversais do bloco.

Os cortes transversais do bloco com a solda estão apresentados na Figura 45. Para facilitar a comparação entre o resultado obtido por TFM e as seções transversais reais do bloco, os cortes da Figura 45 estão dispostos na mesma ordem que os resultados do TFM apresentados na Figura 44.



Figura 45. Cortes transversais realizados nas mesmas posições em que o TFM foi aplicado para esse bloco.

Observando os cortes transversais, é possível notar a presença de defeitos nas quatro primeiras posições, circulado na Figura 45. Na primeira posição, onde a aplicação do TFM mostrou um defeito de aproximadamente 1 mm de altura e 1 mm de largura, há um vazio de

1,2 mm de largura e 0,5 mm de altura. Há, também, uma pequena trinca ao lado do defeito, indicada pela seta vermelha, a qual foi parcialmente detectada pelo TFM.

Nas posições 2, 3 e 4, o mesmo defeito detectado anteriormente está presente, sendo alterada apenas a sua posição em relação à espessura da amostra. Nessas posições, porém, a aplicação do TFM não detectou o defeito. Esse problema pode ter ocorrido devido ao aço utilizado. Como se trata de um aço inoxidável austenítico, a atenuação do feixe é muito maior do que no aço carbono. Assim, a compensação utilizada para a perda de energia pode não ter sido suficiente neste caso, especialmente se for levado em conta que o TFM trabalha com sinais de baixa amplitude.

Na região 3, além do defeito já citado, há ainda um outro defeito, com dimensões similares e a um valor de espessura levemente menor. Como esse defeito foi visualizado apenas no corte da posição 3, é provável que se trate de um defeito com pouco comprimento, e por isso não aparece nos demais cortes. Tendo em vista o curto comprimento do defeito, é possível que a posição do sensor e a posição do corte tenham sido levemente diferentes, causando a não detecção do defeito pela inspeção por erro de posicionamento do sensor. Para as posições 5, 6 e 7, não foram encontrados defeitos após a realização dos cortes transversais, assim como havia ocorrido com os resultados do TFM nas mesmas posições. Outra possível causa para a dificuldade de detecção dos defeitos no aço inoxidável, como explicado anteriormente, é a maior atenuação do sinal neste tipo de material, fazendo com que a compensação da perda de energia calculada seja insuficiente para este bloco.

Com os resultados obtidos para todos os blocos, foi possível fazer a reconstrução 3D dos defeitos encontrados e, posteriormente, foi realizada a exportação dos defeitos para um *software* CAD.

4.4 Blocos 3D

As imagens geradas através da aplicação do TFM, com compensação de energia e *half-skip*, em cada bloco foram empilhadas e, em seguida, foi aplicado um algoritmo que seleciona isosuperfícies. Assim, foram gerados, no próprio Matlab, os blocos 3D dos defeitos presentes em cada corpo de prova analisado. O resultado da reconstrução 3D do bloco com dez furos pode ser visto na Figura 46.

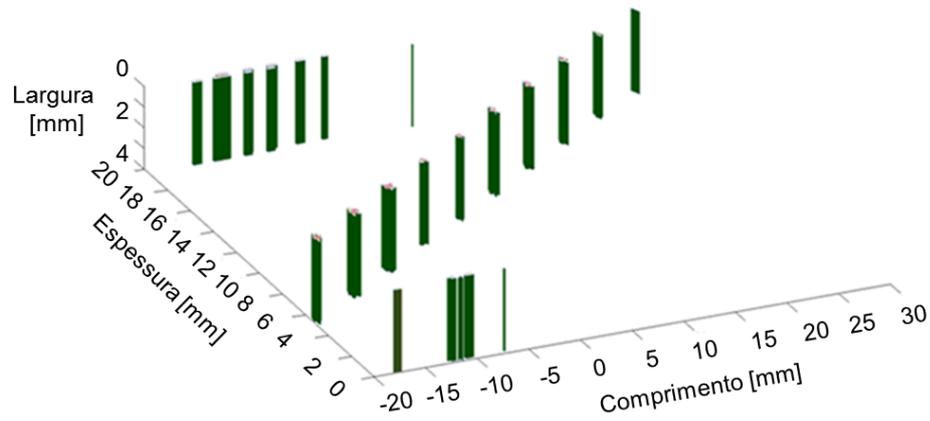


Figura 46. Resultado obtido após a reconstrução dos defeitos do bloco padrão com dez furos.

É possível perceber os blocos correspondentes aos dez furos, além de sinais provenientes das superfícies superior e inferior, respectivamente a 0 mm e a 20 mm de profundidade.

Esses blocos correspondentes aos defeitos foram exportados para um *software* CAD, resultando na Figura 47.

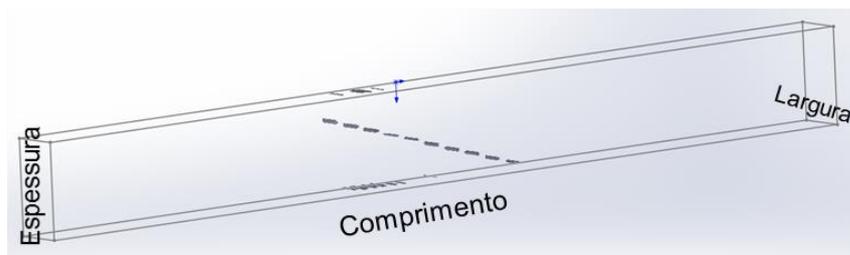


Figura 47. Blocos 3D correspondentes aos defeitos carregados em *software* CAD.

Na exportação para o CAD, é possível notar que há excelente correspondência entre o resultado obtido e a real geometria do bloco.

A reconstrução 3D do entalhe presente no bloco da Figura 21 está apresentada na Figura 48.

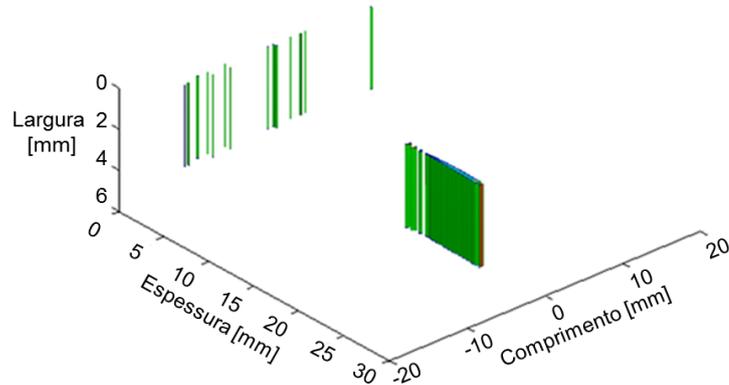


Figura 48. Resultado obtido após a reconstrução do entalhe.

Neste bloco padrão, além do entalhe, também é possível perceber alguns sinais na superfície superior, onde o sensor está acoplado. A exportação do entalhe reconstruído para o CAD pode ser vista na Figura 49.

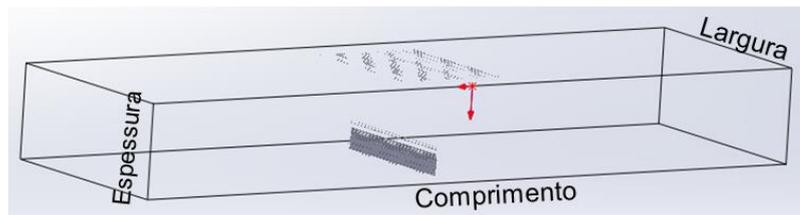


Figura 49. Bloco correspondente ao entalhe exportado para o CAD.

Assim como o bloco com dez furos, o bloco com entalhe também apresentou excelente correspondência entre os resultados obtidos e a verdadeira geometria dos defeitos presentes.

Para o bloco com seis furos alinhados, o resultado da reconstrução 3D no próprio Matlab está apresentado na Figura 50.

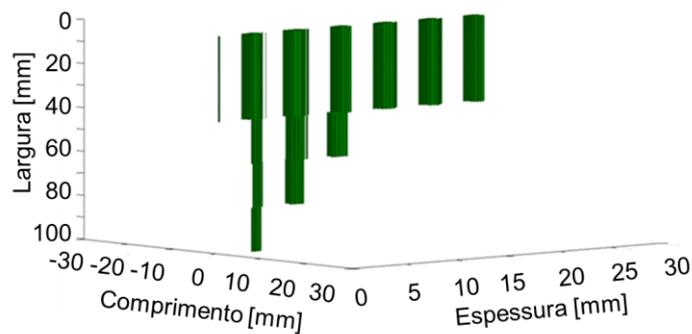


Figura 50. Resultado obtido após a reconstrução dos seis furos alinhados presentes no bloco padrão.

Pode-se observar a diferença na dimensão dos furos para diferentes posições de profundidade medidas. Também é possível notar um pequeno sinal, correspondente à superfície de acoplamento do sensor, acima dos furos.

O resultado da exportação dos blocos 3D correspondentes aos seis furos para o *software* CAD pode ser visto na Figura 51.

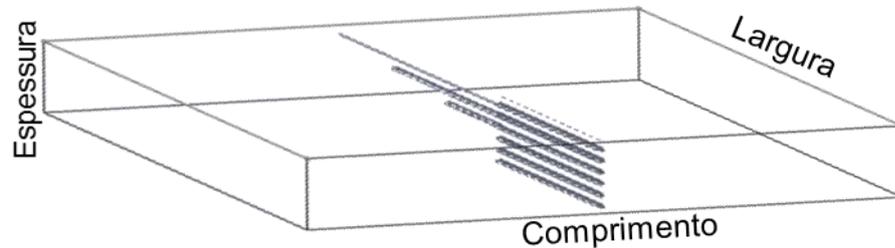


Figura 51. Sólidos correspondentes aos seis furos exportados para *software* CAD.

Os sólidos correspondentes aos seis furos, bem como os defeitos dos blocos anteriores, apresentam excelente correspondência com a geometria real, depois da exportação para o *software* CAD.

Por fim, foi realizada a reconstrução 3D dos defeitos presentes no bloco soldado. O resultado dessa reconstrução está apresentado na Figura 52.

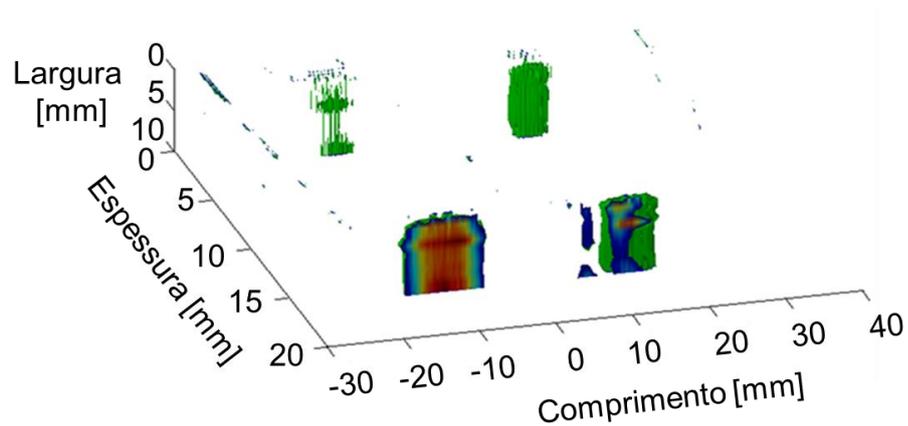


Figura 52. Resultado da reconstrução 3D dos defeitos presentes no bloco soldado.

O resultado do bloco soldado apresenta sinais nas duas superfícies, superior e inferior, o sinal de um dos vazios presentes no bloco e algumas faixas do sinal correspondente à trinca encontrada. Esse vazio foi detectado a aproximadamente 11 mm de profundidade, apenas na primeira posição inspecionada, correspondente à profundidade igual a zero nessa imagem.

A exportação destes defeitos para o *software* CAD apresentou o resultado da Figura 53.

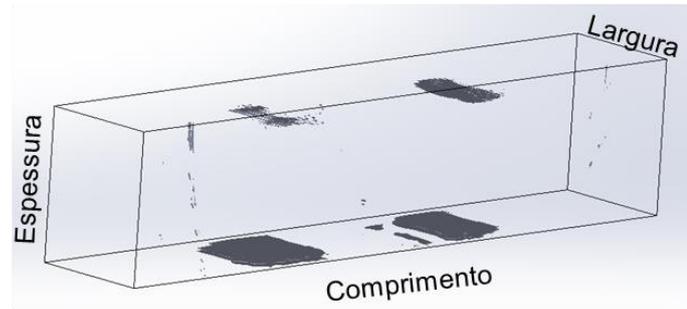


Figura 53. Sólidos correspondentes aos defeitos reais, encontrados no bloco soldado, exportados para *software* CAD.

Na exportação para o *software* CAD, é possível perceber que há boa correspondência entre o bloco e os sinais encontrados, embora os defeitos presentes não tenham sido detectados em sua maioria.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pela aplicação do TFM se mostraram bastante intuitivos, representando com boa precisão a geometria dos defeitos presentes nos blocos inspecionados. Os blocos 3D reconstruídos também facilitaram a interpretação dos resultados, apresentando boa correspondência com os defeitos presentes.

O cálculo da estimativa de atenuação do som apresentou ótimos resultados após as compensações de perda de energia, tanto para a distância percorrida quanto para a abertura do feixe. Para a compensação da energia pela abertura do feixe, houve um aumento da detecção de 67% da superfície curva.

A aplicação do *half-skip* melhorou os resultados, principalmente de defeitos planares. No caso do entalhe, o erro antes da aplicação era de 7,3 mm de comprimento, sendo alterado para 0,1 mm após a aplicação.

Para defeitos volumétricos, como os furos, os valores medidos na direção da largura do defeito foram mais precisos do que os medidos na direção da altura.

Os defeitos usinados em aço carbono apresentaram excelentes resultados de TFM, bem como da reconstrução 3D e da exportação. Todos os blocos apresentaram excelente correspondência, com erros menores que 0,5 mm para todos os casos, sendo melhor que a resolução teórica do ultrassom convencional.

Os defeitos reais, presentes no bloco soldado, encontrados através de cortes transversais, não apresentaram bons resultados. Dos dois vazios presentes, um foi parcialmente detectado, enquanto o outro não foi detectado. A trinca presente também foi parcialmente detectada.

O tempo de processamento para o TFM, de 20 a 40 minutos, ainda é muito longo, sendo necessárias melhorias neste parâmetro para que a técnica seja viável.

6 TRABALHOS FUTUROS

São sugeridos, para trabalhos futuros, alguns pontos de melhorias para a aplicação do TFM.

Como um dos principais pontos necessários para melhorar, o tempo de processamento deve ser reduzido ao máximo. Para isso, é sugerido um processamento através do uso de placas de vídeo, tornando o processo muito mais rápido. Com o tempo reduzido, será possível realizar o TFM com mais elementos ativos, melhorando a precisão das medidas, além da possibilidade de tornar o passo entre os pontos cada vez menor, tornando a imagem mais precisa.

Também é sugerido que sejam realizados testes de inspeção em diversos pontos nos blocos padrão, gerando o sólido 3D de uma inspeção completa. Assim, será possível detectar e estimar o erro de operação, como deslocamento indesejado e erro de posicionamento do sensor.

A estimativa de perda de energia para diferentes materiais é outro ponto a se desenvolver, tendo em vista que o aço inoxidável austenítico não apresentou bons resultados.

Sugere-se também que se façam mais testes com defeitos reais, de diversas geometrias e orientações, a fim de tornar as medidas mais precisas.

Visando a melhora na probabilidade de detecção dos defeitos, é sugerido que se automatize o posicionamento do sensor, sendo possível realizar a inspeção com deslocamentos menores e mais precisos do que atualmente.

Por fim, a automatização do dimensionamento dos defeitos é um dos principais pontos a melhorar.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, P. D. **Inspeção por Ultrassom de Juntas Adesivas de Tubulações em Material Compósito**. UFRJ. Rio de Janeiro, 2011.
- [2] AMORIM, J. B. P. **Sistema de Inspeção de Ultra-sons por Phased Array para Materiais Compósitos Aplicados à Indústria Aeronáutica**. Dissertação. Portugal, 2014.
- [3] ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultrassom**. ABENDI. São Paulo, 2014.
- [4] ARAÚJO, M. S. S., FARIAS, C. T. T., OLIVEIRA, A. S. A. Detecção e Classificação de Defeitos em Chapas de Aço Carbono Utilizando Ondas Ultrassônicas Guiadas de Lamb e Redes Neurais Artificiais. **VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação (CONNEPI)**. Tocantins, 2012.
- [5] BAREQUET, G. et al. Multilevel Sensitive Reconstruction of Polyhedral Surfaces From Parallel Slices. **The Visual Computer**, Vol. 16, p. 116-133. Israel, 2000.
- [6] BENZECRY, F. S. **Sistema Robótico para Inspeção Offshore das Linhas Principais de Risers de Perfuração**. UFRJ. Rio de Janeiro, 2014.
- [7] BRAGA, R.M. **Medição da Camada de Óxidos em Tubos de Superaquecedores de Caldeiras Aquatubulares por Ultrassom**. Tese. PPGEM:UFRGS. 2009.
- [8] BULAVINOV, A. et al. Industrial Application of Real-Time 3D Imaging by Sampling Phased Array. **10th European conference and exhibition on non-destructive testing (10thECNDT)**, 2010.
- [9] CAO, Z. et al. Research on 3D Reconstruction for Automated Ultrasonic Inspection System. **International Conference on Mechatronics and Automation**. China, 2009.
- [10] CERQUEIRA, A. **Avaliação da Técnica de Ultrassom Phased Array na Inspeção de Juntas Soldadas Dissimilares e Cladeada com Diferentes Espessuras de Amanteigamento**. Dissertação. PPGEM:UFRGS. 2009.
- [11] COSTA, A. C. **Ensaio por ultrassom com as técnicas convencional A – Scan e Phased Array em juntas soldadas dissimilares de aços carbono e aço inoxidável austenítico**. Dissertação. UFMG. 2011
- [12] EVERY, A. G. The Importance of Ultrasonics in Nondestructive Testing and Evaluation. **Ultrasonics**, Vol. 54, p.1717-1718, 2014.

[13] FAN, C. et al. Multi-Frequency Time-Reversal-Based Imaging for Ultrasonic Nondestructive Evaluation Using Full Matrix Capture. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, Vol. 61, p.2067-2074, 2014.

[14] GOMERA, V. P. et al. Use of AE Method for Detection of Steel Lamination in the Industrial Pressure Vessel. **J. Acoustic Emission**, Vol. 28, p.234-245. Russia, 2010.

[15] GUAN, X. et al. Probabilistic Modeling and Sizing of Embedded Flaws in Ultrasonic Non-Destructive Inspections for Fatigue Damage Prognostics and Structural Integrity Assessment. **NDT&E International**, Vol. 61, p. 1-9. USA, 2014.

[16] HOLMES, C. et al. Post-Processing of the Full Matrix of Ultrasonic Transmit-Receive Array Data for Non-Destructive Evaluation. **NDT&E International**, Vol.38, p. 701-711. Reino Unido, 2005

[17] HOLMES, C. et al. Advanced Post-Processing for Scanned Ultrasonic Arrays: Application to Defect Detection and Classification in Non-Destructive Evaluation. **Ultrasonics**, Vol. 48, p. 636-642. Reino Unido, 2008.

[18] KLEIN, R. et al. **Reconstruction and Simplification of Surfaces from Contours**. Universitat Tubingen, Alemanha, 2000.

[19] KOMURA, I. et al. Improved ultrasonic testing by Phased Array technique and its application. **Nuclear Engineering and Design**, Vol. 87, p.185-191, 1985.

[20] KOUCHE, A. E., HASSANEIN, H. S. Ultrasonic Non-Destructive Testing (NDT) Using Wireless Sensor Networks. **Procedia Computer Science**, Vol. 10, p. 136-143. Canadá, 2012.

[21] LI, C. et al. Imaging Composite Material Using Ultrasonic Arrays. **NDT&E International**, Vol.53, p. 8-17. Reino Unido, 2013.

[22] MAIO, C. E. B. **Técnicas para Monitoramento de Integridade Estrutural Usando Sensores e Atuadores Piezoelétricos**. Dissertação. Departamento de Engenharia Mecânica:EESC-SP. São Carlos, 2011.

[23] MARTINS, C. O. D. **Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de Risers Flexíveis através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensões**. Tese. PPGEM:UFRGS. 2008.

[24] MATAREZI, J. C. **Aplicação do Ensaio de Eddy Current Phased Array em Componentes Aeroespaciais.** Dissertação. Departamento de Engenharia Mecânica:Universidade de Taubaté. 2009.

[25] MEYERS, D., SKINNER, S., SLOAN, K. Surfaces from Contours. **ACM Transactions on Graphics**, Vol. 11, p.228-258. Estados Unidos, 1992.

[26] MULTIFLUX. **Ensaio Não Destrutivo - Ultra Som.** Disponível em: http://www.multiflux.com.br/us_servicos.asp. Acesso em: 25 mai. 2016.

[27] NANEKAR, P., KUMAR, A., JAYAKUMAR, T. Characterization of Planar Flaws by Synthetic Focusing of Sound Beam Using Linear Arrays. **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation**, Vol. 3, p.9-14. Índia, 2015.

[28] NDTTESTER. **Ultrasonic Probe.** Disponível em: <http://turkish.ndttester.com/supplier-109787-ultrasonic-probe>. Acesso em: 25 mai. 2016.

[29] O'Brien, R. L. **Jefferson's Welding Encyclopedia.** 18ª Edição ed. Miami: American Welding Society. 1997.

[30] SANTOS, C. E. O. **Análise de Blocos Estruturais de Concreto Utilizando a Técnica da Ultrassonografia.** Dissertação. Belo Horizonte, 2011.

[31] SUBSEA WORLD NEWS. **Baosteel Yantai Delivers Subsea Steel Pipes for Bohai Oilfield.** Disponível em: <http://subseaworldnews.com/2014/04/01/baosteel-yantai-delivers-subsea-steel-pipes-for-bohai-oilfield/>. Acesso em: 13 jul. 2016.

[32] SUTCLIFFE et al. Real-time Full Matrix Capture for Ultrasonic Non-destructive Testing with Acceleration of Post-processing through Graphic Hardware. **NDT&E International**, Vol. 51, p.16-23. Reino Unido, 2012.

[33] SVEN. **Stlwrite, "Mathworks".** Disponível em: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20922-stlwrite-filename--varargin->. Acesso em: 26 jan. 2016.

[34] TSURUTA, K. M. **Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujeitos a Impactos Empregando a Técnica da Impedância Eletromecânica.** Dissertação. Minas Gerais, 2008.

[35] WALL, H., WADSÖ, L. Corrosion Rate Measurements in Steel Sheet Pile Walls in A Marine Environment. **Marine Structures**, Vol. 33, p. 21-32. Suécia, 2013.

[36] WESTON, M. et al. Time Efficient Auto-focusing Algorithms for Ultrasonic Inspection of Dual-layered Media Using Full Matrix Capture. **NDT&E International**, Vol. 47, p.43-50. Reino Unido, 2012

[37] ZHANG, J. et al. Defect Detection Using Ultrasonic Arrays: The Multi-mode Total Focusing Method. **NDT&E International**, Vol. 43. p.123-133. Reino Unido, 2010.