



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E
SISTEMAS

Bruno Silva Marció

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DA TÉCNICA DE VIBRO-ACUSTOGRAFIA PARA A
AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE TRECHOS DE DUTOS METÁLICOS
UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS**

Florianópolis
2020

Bruno Silva Marció

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DA TÉCNICA DE VIBRO-ACUSTOGRAFIA PARA A
AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE TRECHOS DE DUTOS METÁLICOS
UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.
Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr. Eng.
Coorientador: Prof. Antonio Adilton Oliveira Carneiro, Dr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra

Marció, Bruno Silva

Análise de viabilidade da técnica de vibro-acustografia para a avaliação da integridade de trechos de dutos metálicos utilizados na indústria de petróleo e gás / Bruno Silva Marció ; orientador, Rodolfo César Costa Flesch, coorientador, Antonio Adilton Oliveira Carneiro, 2020.
126 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Avaliação da integridade. 3. Ensaios não destrutivos. 4. Vibro acustografia. 5. Dutos metálicos. I. Flesch, Rodolfo César Costa. II. Carneiro, Antonio Adilton Oliveira. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. IV. Título.

Bruno Silva Marció

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DA TÉCNICA DE VIBRO-ACUSTOGRAFIA PARA A
AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE TRECHOS DE DUTOS METÁLICOS
UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Glauber Jose Ferreira Tomaz da Silva, Dr.
Universidade Federal de Alagoas

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nestor Roqueiro, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.

Prof. Werner Kraus Junior, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e
Sistemas

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr. Eng.
Orientador

Florianópolis, dezembro de 2020.

Este trabalho é dedicado a todos que me apoiaram durante o seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

À toda minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio e carinho nos momentos que mais precisei.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Automação e Sistemas (PPGEAS) e ao Laboratório de Instrumentação (LIN) por tornar possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Rodolfo César Costa Flesch, pelos ensinamentos e confiança para integrar seu grupo de trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Antonio Adilton Oliveira Carneiro, pelo auxílio científico e por ter disponibilizado a estrutura do Grupo de Inovação em Instrumentação Médica e Ultrassom (GIIMUS) da Universidade de São Paulo (USP), e ao colega Guilherme Braz, pelo suporte para a realização dos experimentos.

Ao colega Daniel Habor, pela oportunidade e pelo auxílio para a realização dos experimentos nos laboratórios do Instituto Helmholtz da RWTH Aachen University.

Aos meus amigos do Labmetro/LIAE, em especial ao Artur e ao Bernardo, pelos momentos de descontração e suporte durante o doutorado.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma maneira com este trabalho.

RESUMO

A garantia da integridade estrutural na indústria de petróleo e gás é fundamental para assegurar a confiabilidade operacional e tipicamente é atingida com o uso de ensaios não destrutivos. No caso específico de dutos, a avaliação da integridade de sua superfície interna é normalmente realizada por meio da técnica de ultrassom pulso-eco, cujo desempenho pode ser prejudicado quando a superfície do objeto avaliado possui irregularidades, como em casos de dutos com corrosão. Dentro desse contexto, este trabalho de doutorado apresenta os resultados de uma análise de viabilidade da técnica de ultrassom de vibro-acustografia para avaliação da integridade de trechos de dutos metálicos utilizados na indústria de petróleo e gás, comparando seus resultados com os da tradicional técnica de ultrassom pulso-eco. Com esse propósito, foi verificada a capacidade das referidas técnicas de ultrassom por meio de avaliações qualitativas e quantitativas de descontinuidades com características geométricas bem definidas, as quais foram usinadas na superfície interna de uma peça metálica. Os resultados alcançados na análise qualitativa mostram que, a partir das imagens geradas por ambas as técnicas, foi possível detectar todas as descontinuidades presentes na superfície interna da peça metálica. Quanto à análise quantitativa, os diâmetros das cavidades presentes nas imagens produzidas pelas técnicas de vibro-acustografia e pulso-eco foram definidos e, posteriormente, comparados aos seus respectivos valores medidos por um micrômetro. Analisando os desvios calculados, pode-se afirmar que a vibro-acustografia apresentou um desempenho satisfatório para a caracterização desse tipo de descontinuidade, obtendo erros em torno de 0,18 mm quando cavidades do tipo passante foram avaliadas. Além disso, o emprego de ferramentas de fusão de imagens possibilitou combinar os dados de ambas as técnicas de ultrassom, na tentativa de agregar as suas contribuições e superar as limitações apresentadas. A partir de uma das abordagens de fusão utilizadas neste trabalho, foi possível obter erros com pelo menos a metade da magnitude dos observados para as técnicas pulso-eco e de vibro-acustografia tomadas de forma isolada, proporcionando resultados promissores para o aprimoramento da avaliação da integridade de dutos metálicos.

Palavras-chave: Avaliação da integridade, Ensaios não destrutivos, Ultrassom, Dutos metálicos na indústria de petróleo e gás, Vibro-acustografia.

ABSTRACT

The assurance of the structural integrity in the oil and gas industry is an essential measure to ensure operational reliability, which can be achieved by using nondestructive tests. Although the pulse-echo ultrasonic technique is commonly applied for the assessment of pipeline integrity, its performance can be affected by the surface conditions of the structure under inspection. Within this context, this work presents the results of a feasibility analysis of the vibroacoustography technique for the inspection of sections of metal pipelines by comparing its performance with the one of conventional pulse-echo technique. With this purpose, the performances of both techniques were evaluated by means of a quality assessment and a quantitative analysis of discontinuities with known geometry, which were artificially inserted on a metal specimen surface. The results obtained in the quality assessment show that vibroacoustography and pulse-echo techniques were able to detect all discontinuities on the specimen surface. Regarding the quantitative analysis, the diameters of the cavities presented in the vibroacoustography and pulse-echo images were first defined and then compared to the conventional true values of the discontinuity dimensions. It is shown that vibroacoustography presented a satisfactory performance for the characterization of this type of discontinuity, obtaining errors of about 0.2 mm when through hole cavities were evaluated. In addition, the use of image fusion tools for merging pulse-echo and vibroacoustography data have shown promising results to the improvement of metal pipelines integrity evaluation. Applying one of the fusion approaches used in this work, it was possible to obtain an error with at least half the magnitude observed for pulse-echo and vibroacoustography techniques when considered in isolation.

Keywords: Integrity evaluation, Nondestructive tests, Ultrasound, Metal pipelines in oil and gas industry, Vibroacoustography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corrosão interna em um duto	21
Figura 2 - Amassamento em um duto.....	21
Figura 3 - Trinca em um cordão de solda.....	22
Figura 4 - Inspeção manual do duto através do método de ultrassom.....	24
Figura 5 - Inspeção automática do duto através do método de ultrassom.....	25
Figura 6 - Princípio de funcionamento do PIG magnético.....	26
Figura 7 - Princípio de funcionamento do PIG de ultrassom	27
Figura 8 - Representação de um típico PIG de ultrassom	27
Figura 9 - Tipos de representação para técnica PE.....	28
Figura 10 - Feixes de ultrassom gerados em diferentes direções por transdutores <i>phased-array</i>	29
Figura 11 - Princípio de funcionamento da técnica VA	31
Figura 12 - Pressão acústica resultante no plano focal.....	33
Figura 13 - Ensaios realizados em três diapasões com a técnica VA.....	35
Figura 14 - Imagem de um espectrograma acústico	36
Figura 15 - Procedimento adotado para geração da imagem.....	37
Figura 16 - Perfil lateral da função PSF obtida	38
Figura 17 - Perfil da função PSF obtida nos experimentos	39
Figura 18 - Processo de fusão de duas imagens	39
Figura 19 - Etapas para fusão de imagens em nível de pixels.....	40
Figura 20 - Fusão booleana envolvendo as regras “OU” e “E”.....	42
Figura 21 - Imagens da superfície interna e externa do corpo de prova.....	45
Figura 22 - Desenho técnico do corpo de prova (dimensões em milímetros).....	46
Figura 23 - Corte transversal A com dimensões de vincos e rebaiços incrementais (dimensões em milímetros)	46
Figura 24 - Corte transversal B com dimensões de vincos e rebaiços incrementais (dimensões em milímetros).....	47
Figura 25 - Corpo de prova confeccionado	47
Figura 26 - Visão geral da bancada de ensaios da técnica PE.....	49
Figura 27 - Visão com mais detalhes da parte mecânica da bancada de ensaios da técnica PE	49

Figura 28 - Sistema de coordenadas para movimentação do transdutor de ultrassom nos ensaios com a técnica PE.....	50
Figura 29 - Deslocamento do transdutor ao longo do eixo y	51
Figura 30 - Deslocamento do transdutor ao longo do eixo x	51
Figura 31 - Deslocamento do transdutor ao longo do eixo z	51
Figura 32 - Visão geral da bancada de ensaios da técnica VA.....	54
Figura 33 - Visão detalhada da parte interna do tanque	54
Figura 34 - Padrão de varredura para os ensaios com a técnica VA	55
Figura 35 - Incompatibilidade entre as dimensões do transdutor de ultrassom em relação ao formato do corpo de prova nos ensaios com a técnica PE	57
Figura 36 - Regiões inspecionadas do corpo de prova	58
Figura 37 - Informações extraídas de um sinal obtido pelo ensaio de ultrassom com a técnica PE	59
Figura 38 - Dimensões das regiões inspecionadas: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4.....	60
Figura 39 - Representações tridimensionais das regiões inspecionadas usando a técnica PE: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4.....	61
Figura 40 - Representações tridimensionais das regiões inspecionadas usando a técnica PE em diferente perspectiva: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4	61
Figura 41 - Dimensões da região R5	63
Figura 42 - Representações tridimensionais da região R5 geradas pela técnica PE: (a) parte esquerda; (b) parte direita.....	63
Figura 43 - Dimensões da região R6	64
Figura 44 - Representação tridimensional da região R6 gerada pela técnica PE	65
Figura 45 - Representação tridimensional da região R6 gerada pela técnica PE em diferente perspectiva.....	65
Figura 46 - Dimensões da região R7	66
Figura 47 - Representação tridimensional da região R7 gerada pela técnica PE	66
Figura 48 - Representação tridimensional da região R7 gerada pela técnica PE em diferente perspectiva.....	67
Figura 49 - Dimensões da região R8	67
Figura 50 - Representação tridimensional da região R8 gerada pela técnica PE	68
Figura 51 - Representação tridimensional da região R8 gerada pela técnica PE em diferente perspectiva.....	68
Figura 52 - Análise qualitativa para região R1: (a) modelo projetado; (b) PE.....	69

Figura 53 - Partes ausentes nas representações tridimensionais geradas pela técnica PE: (a) região R2; (b) região R3	70
Figura 54 - Representação da região R7 gerada pela técnica PE com os pontos espúrios em destaque	70
Figura 55 - Diferentes vistas da região R7 gerada pela técnica PE com a posição dos pontos selecionados: (a) visão tridimensional; (b) visão plano (y, z); (c) visão plano (x, z)	71
Figura 56 - Sinais no tempo, envelope e máximo pico obtidos nos ensaios com a técnica PE para os dois pontos da representação tridimensional: (a) na superfície interna da peça; (b) na parte espelhada	72
Figura 57 - Ensaios com a técnica PE que resultaram nos dois pontos avaliados: (a) na superfície interna; (b) no interior da peça metálica	73
Figura 58 - Sinal medido pelo hidrofone nos ensaios com a técnica VA e a janela do tipo retangular utilizada	75
Figura 59 - Sinais acústicos com e sem janelamento do tipo Hanning	76
Figura 60 - Representações bidimensionais das regiões inspecionadas usando a técnica VA: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4.....	77
Figura 61 - Imagem bidimensional da região R5 gerada pela técnica VA.....	78
Figura 62 - Representação bidimensional da região R6 gerada pela técnica VA.....	78
Figura 63 - Representação bidimensional da região R7 gerada pela técnica VA.....	79
Figura 64 - Imagem bidimensional da região R8 gerada pela técnica VA.....	80
Figura 65 - Análise qualitativa da região R1: (a) CAD; (b) VA	81
Figura 66 - Análise qualitativa da região R5: (a) CAD; (b) VA	82
Figura 67 - Pontos de cor mais clara na representação da região R7 gerada pela técnica VA.	83
Figura 68 - Imagem da região R7 com valores da escala de cinza alterada	83
Figura 69 - Passos para o processamento das imagens geradas pelas técnicas PE e VA.....	84
Figura 70 - Conversão realizada para a região R4: (a) representação tridimensional gerada pela técnica PE; (b) imagem 2D correspondente	84
Figura 71 - Imagem da região R4 gerada pela técnica VA: (a) representação no domínio do espaço; (b) representação no domínio da frequência	86
Figura 72 - Filtro <i>notch</i> implementado para a imagem da região R4 gerada pela técnica VA	86

Figura 73 - Imagem da região R4 gerada pela técnica VA após a filtragem com o filtro <i>notch</i> : (a) representação no domínio do espaço; (b) representação no domínio da frequência	87
Figura 74 - Filtro passa-alta gaussiano implementado	87
Figura 75 - Imagem da região R4 gerada pela técnica VA após o procedimento de filtragem FNPA	88
Figura 76 - Procedimento de decomposição por meio da transformada <i>wavelet</i> para um ou dois níveis	89
Figura 77 - Imagem da região R1 gerada pela técnica VA: (a) imagem original; (b) subimagens produzidas após os procedimentos de decomposição.....	89
Figura 78 - Imagem da região R1 gerada pela técnica VA após o procedimento de filtragem FWAV	90
Figura 79 - Comparação de imagens da região R2 da técnica PE: (a) imagem original; (b) imagem filtrada.....	90
Figura 80 - Resultados obtidos após o processamento das imagens:(a) PE: R1; (b) VA- FNPA: R1; (c) PE: R2; (d) VA-FNPA: R2; (e) PE: R3; (f) VA-FNPA: R3; (g) PE: R4; (h) VA-FNPA: R4.....	92
Figura 81 - Resultados obtidos após o processamento das imagens:(a) VA-FWAV: R1; (b) VA-FWAV: R2; (c) VA-FWAV: R3; (d) VA-FWAV: R4.....	93
Figura 82 - Desvios calculados para cada técnica e região avaliada	94
Figura 83 - Processo de fusão das imagens geradas pelas técnicas PE e VA.....	96
Figura 84 - Procedimento de alinhamento espacial de uma imagem da região R2 gerada pela técnica VA	97
Figura 85 - Imagens geradas da região R4 após o uso de regras de fusão e da ferramenta PCA: (a) fusão com a regra MAX; (b) fusão com a regra MIN; (c) fusão com a regra MED; (d) fusão com a regra OU; (e) fusão com a ferramenta PCA	98
Figura 86 - Comparação entre imagens da região R1: (a) após o processo de fusão; (b) a respectiva imagem segmentada	99
Figura 87 - Abordagens de fusão de imagens adotadas: (a) fusão algébrica; (b) fusão booleana; (c) fusão PCA.....	100
Figura 88 - Valores dos erros calculados: (a) para cada abordagem de fusão; (b) para cada tipo de orifício da peça; (c) para cada região avaliada	101
Figura 89 - Análise de variância comparando as regiões: (a) R1 e R2; (b) R1 e R3; (c) R1 e R4; (d) R2 e R3; (e) R2 e R4; (f) R3 e R4.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaio não Destrutivos e Inspeção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	Instituto Americano de Petróleo (do inglês <i>American Petroleum Institute</i>)
ASNT	Sociedade Americana para Ensaio não Destrutivos (do inglês <i>American Society for Nondestructive Testing</i>)
END	Ensaio não destrutivo
FA	Abordagem de fusão algébrica
FB	Abordagem de fusão booleana
FFT	Transformada de Fourier (do inglês <i>fast Fourier transform</i>)
FPCA	Abordagem de fusão PCA
FWHM	Largura à meia altura (do inglês <i>full width at half maximum</i>)
MAX	Regra de fusão máximo
MED	Regra de fusão média
MFL	Fuga de fluxo magnético (do inglês <i>magnetic flux leakage</i>)
MIN	Regra de fusão mínimo
PCA	Análise por componentes principais (do inglês <i>principal component analysis</i>)
PIGs	Medidores de inspeção de dutos (do inglês <i>pipeline inspection gauges</i>)
PSF	Função de espalhamento de ponto (do inglês <i>point spread function</i>)
2D-FFT	Transformada rápida de Fourier de duas dimensões (do inglês <i>two-dimensional fast Fourier transform</i>)
2D-FWT	Transformada rápida <i>wavelet</i> de duas dimensões (do inglês <i>two-dimensional fast wavelet transform</i>)
VA	Vibro-acustografia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1	AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE DUTOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS	20
2.1.1	Técnicas de inspeção externa em dutos	24
2.1.2	Técnicas de inspeção interna em dutos.....	25
2.1.2.1	<i>PIG magnético.....</i>	25
2.1.2.2	<i>PIG de ultrassom.....</i>	26
2.1.3	Limitações apresentadas pela técnica de ultrassom PE para inspeção de dutos.....	28
2.2	VIBRO-ACUSTOGRAFIA.....	30
2.2.1	Força de radiação acústica.....	32
2.2.2	Pressão acústica emitida por um corpo de prova	34
2.2.3	Formação da imagem pela técnica VA	36
2.3	MÉTODOS DE FUSÃO DE IMAGENS PARA AS TÉCNICAS PE E VA.....	39
2.3.1	Fusão algébrica	41
2.3.2	Fusão booleana.....	42
2.3.3	PCA.....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	CORPO DE PROVA	45
3.2	BANCADA DE ENSAIOS PARA A TÉCNICA PE.....	47
3.3	BANCADA DE ENSAIOS PARA A TÉCNICA VA.....	52

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A TÉCNICA PE	57
4.1.1	Regiões R1, R2, R3 e R4.....	59
4.1.2	Região R5.....	62
4.1.3	Região R6.....	64
4.1.4	Região R7.....	65
4.1.5	Região R8.....	67
4.1.6	Conclusões referentes à análise qualitativa das representações tridimensionais geradas pela técnica PE	68
4.2	ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A TÉCNICA VA	74
4.2.1	Regiões R1, R2, R3 e R4.....	76
4.2.2	Região R5.....	77
4.2.3	Região R6.....	78
4.2.4	Região R7.....	79
4.2.5	Região R8.....	79
4.2.6	Conclusões referentes à análise qualitativa das imagens geradas pela técnica VA	80
4.3	ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS PELAS TÉCNICAS PE E VA.....	84
5	FUSÃO DAS IMAGENS GERADAS PELAS TÉCNICAS PE E VA.....	96
5.1	PROCESSO DE FUSÃO DE IMAGENS	96
5.2	ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	101
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105
6.1	CONCLUSÕES	105
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108
6.3	TRABALHOS PUBLICADOS	109

REFERÊNCIAS	110
APÊNDICE A – MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	118
A.1 Métodos de ensaios não destrutivos	118
A.1.1 Método por radiografia.....	118
A.1.2 Método por ultrassom	119
A.1.3 Método por partículas magnéticas	120
A.1.4 Método por líquidos penetrantes.....	121
A.1.5 Método por emissão acústica	122
A.2 Seleção de um método de END	123

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

A indústria de petróleo e gás natural possui um papel central no cenário econômico mundial, em razão da produção de insumos de difícil substituição na matriz energética de grande parte dos países. A título de exemplo, derivados do petróleo, como gasolina, diesel ou querosene, são utilizados como combustíveis para os principais meios de transporte, atividade essa indispensável para que qualquer cadeia produtiva possa funcionar de maneira adequada (FAHIM et al., 2010; INKPEN et al., 2011).

No que concerne ao Brasil, a matriz energética apresenta o petróleo e o gás natural como duas das principais fontes de energia utilizadas, de acordo com dados publicados pelo Ministério de Minas e Energia (2020). Conforme as informações apresentadas nesse documento, é possível observar a importância de ambas, por representarem, em conjunto, praticamente 50% da oferta de energia primária.

Durante a operação de uma refinaria ou de uma plataforma de petróleo, os equipamentos que integram a produção de insumos, como vasos de pressão, caldeiras ou dutos, tendem a ser submetidos a processos de degradação ao longo do tempo, especialmente quando as condições operacionais e a agressividade do meio não estão de acordo com as especificações de projeto. Dentro desse contexto, processos como corrosão, fadiga ou cavitação têm a capacidade de degradar a parede de um equipamento em operação, o que pode comprometer a integridade do mesmo, e, conseqüentemente, gerar uma falha estrutural (SPEIGHT, 2014; LIU et al., 2019; XIAO et al., 2020).

Em relação à confiabilidade operacional de uma indústria como a de petróleo e gás, verifica-se que a garantia da integridade estrutural é de importância ímpar, em razão da degradação à qual são submetidos os equipamentos que a integram durante sua vida útil. Com o objetivo de reduzir a ocorrência de acidentes e de catástrofes ambientais, além de elevar a eficiência da planta industrial, avaliações de integridade estrutural são realizadas periodicamente. Além disso, são necessários diferentes testes de avaliação da integridade para que dutos e vasos de pressão possam ser empregados na indústria de petróleo e gás. Por meio dos resultados obtidos, é possível estabelecer meios de controlar a degradação estrutural do empreendimento e, deste modo, garantir sua confiabilidade (DHILLON, 2016; ANP, 2020).

Dentro desse contexto, ensaios não destrutivos (END) podem ser utilizados com o intuito de identificar discontinuidades e monitorar a deterioração de materiais ou

componentes, sem alterar ou danificar os mesmos (HELLIER, 2001). Na indústria de petróleo e gás, os END são largamente empregados para a avaliação da integridade de vasos de pressão, caldeiras ou dutos (DEIGHTON, 2016; NYKYFORCHYN et al., 2019).

Estudos publicados na literatura científica mostram que, dentre os métodos de END atualmente empregados para avaliação da integridade de dutos metálicos, o método por ultrassom baseado na técnica pulso-eco (PE) apresenta-se como um dos mais difundidos para esse fim (FREIRE, 2009; XIE et al., 2018). Por meio da referida técnica, é possível identificar a presença de descontinuidades existentes, bem como definir a espessura da parede de tais estruturas. Contudo, determinadas limitações podem prejudicar o desempenho da inspeção no que se refere à avaliação da integridade, devido, especialmente, à sensibilidade da técnica PE em relação à presença de irregularidades na superfície da parede de dutos, uma vez que podem ocorrer problemas na interpretação dos dados medidos se o feixe de ultrassom não tiver uma incidência quase perpendicular na região que se deseja inspecionar. Como as descontinuidades podem possuir diferentes formatos, não é possível garantir que a perpendicularidade seja assegurada (FREIRE, 2009; MIAO et al., 2017).

Frente a esse cenário, observa-se uma oportunidade para analisar novas técnicas de ultrassom que busquem aprimorar a avaliação da integridade de dutos metálicos, em vista de superar as limitações inerentes à técnica PE. Com esse objetivo, trabalhos publicados na literatura científica destacam o emprego da técnica de vibro-acustografia (VA), por demonstrar um grande potencial como uma ferramenta de ensaios não destrutivos e por possuir baixa sensibilidade ao ângulo de incidência da onda de ultrassom emitida em direção à superfície do corpo de prova, em oposição à técnica PE (FATEMI et al., 1999; MITRI et al., 2007; KAMIMURA, 2011). Mitri et al. (2009) publicaram um estudo que demonstrou o desempenho da técnica VA para geração de imagens de uma placa constituída de material compósito, cuja superfície apresentava duas descontinuidades com formatos circulares. Por meio dos resultados alcançados pelos autores, foi possível identificar as descontinuidades presentes no objeto avaliado. Em um estudo prévio, Mitri et al. (2006) empregaram a técnica VA com o propósito de caracterizar a rugosidade superficial de um corpo de prova, o qual era feito de acrílico. A partir da imagem gerada pela VA, variações de 20 μm de altura existentes na superfície do objeto puderam ser identificadas. Além disso, a referida técnica possui diversos exemplos de aplicação na área médica, como, por exemplo, para avaliação de tecidos mamários (FATEMI et al., 2002), da próstata (ALIZAD et al., 2008) e da estrutura óssea (GHAVAMI et al., 2019).

Embora a literatura apresente estudos que utilizam VA na área de ensaios não destrutivos, grande parte deles fazem uma análise da integridade de objetos feitos de material não-metálico, como cerâmica ou acrílico. Com base nos fundamentos dessa técnica de ultrassom e nos resultados já alcançados por outros trabalhos, justifica-se a avaliação experimental da VA no que concerne à avaliação da integridade de estruturas feitas de material metálico.

Outro ponto pouco explorado na literatura é o uso de ferramentas de fusão de imagens para combinar as informações produzidas pelas técnicas de ultrassom PE e VA, visando aprimorar a avaliação da integridade de estruturas metálicas, frente ao desempenho de ambas as técnicas quando utilizadas individualmente para esse fim. Como os sistemas de medição das técnicas PE e VA são similares, existe a possibilidade de realizar testes de modo simultâneo em uma estrutura experimental única. Desse modo, dados referentes ao objeto em teste podem ser obtidos por meio de dois métodos de medição totalmente independentes, sem que o tempo de inspeção tenha um aumento significativo. A partir do emprego de métodos de fusão de imagens, pretende-se ampliar as contribuições alcançadas por essas técnicas na área de ensaios não destrutivos, bem como minimizar as suas limitações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho de doutorado é avaliar experimentalmente a viabilidade de emprego da técnica VA para avaliação da integridade de trechos de dutos metálicos com características típicas dos utilizados na indústria de petróleo e gás, comparando seus resultados com os da tradicional técnica de ultrassom PE. Com isso, objetiva-se verificar as capacidades de detecção e caracterização de defeitos dessas duas técnicas de ultrassom por meio de avaliações qualitativas e quantitativas de descontinuidades com características geométricas bem definidas, as quais foram usinadas na superfície interna de um corpo de prova que reproduz uma seção de um duto.

1.2.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral traçado neste trabalho de doutorado, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- utilizar o feixe de ultrassom focalizado e a detecção dos sinais refletidos para identificar e caracterizar as descontinuidades presentes no corpo de prova por meio da técnica PE;
- usar a força de radiação acústica focalizada e a detecção dos sinais acústicos de baixa frequência para identificar e caracterizar as descontinuidades presentes no corpo de prova por meio da técnica VA;
- avaliar e empregar técnicas de processamento digital de sinais e de imagens para condicionamento dos sinais medidos e para avaliar qualitativa e quantitativamente as imagens geradas pelas técnicas PE e VA;
- desenvolver um protocolo para a análise dos dados de PE e VA de forma automática, estabelecendo uma clara comparação entre os seus desempenhos;
- aplicar métodos de fusão de imagens para aprimorar a detecção e caracterização das descontinuidades presentes no corpo de prova.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em seis capítulos e seus principais tópicos estão descritos na sequência.

No capítulo 2, são abordados conceitos relacionados à avaliação da integridade de dutos, como: as causas de descontinuidades e as consequências decorrentes disso; os princípios de funcionamento de técnicas de inspeção interna e externa; e as limitações da técnica de ultrassom PE. Além disso, os princípios teóricos acerca da técnica VA são apresentados. Por fim, uma descrição sobre os métodos de fusão de imagens é realizada.

O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos empregados neste trabalho. Ele descreve, primeiramente, as características da peça padrão confeccionada para este trabalho de doutorado, a qual reproduz uma seção de um duto empregado na indústria de petróleo e gás. Ademais, um detalhamento sobre o sistema de medição utilizado e dos procedimentos adotados para os ensaios com a técnica PE é apresentado. Por último, a especificação da instrumentação e a bancada de ensaios da técnica VA e dos procedimentos adotados durante as medições são descritas.

O capítulo 4 apresenta os resultados das análises qualitativa e quantitativa referentes aos ensaios realizados no corpo de prova com as técnicas PE e VA.

Já o capítulo 5 descreve os resultados obtidos com o emprego de métodos de fusão das imagens geradas pelas técnicas PE e VA, com o intuito de aprimorar a identificação e caracterização das descontinuidades presentes na peça metálica.

O capítulo 6 apresenta as conclusões em relação aos objetivos traçados e aos resultados alcançados, como também são feitas sugestões para a continuidade do trabalho. Além disso, os artigos desenvolvidos dentro do escopo desta tese de doutorado são descritos.

Por último, o apêndice APÊNDICE A – MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS descreve os principais métodos de END para aplicações em geral, bem como os fatores técnicos e econômicos para a seleção de um método adequado de END.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo aborda os conceitos teóricos pertinentes para este trabalho de doutorado. A seção 2.1 apresenta temas relacionados à avaliação da integridade de dutos, como as principais causas de descontinuidades nesse tipo de estrutura e as consequências decorrentes disso, as características e princípios de funcionamento de técnicas de inspeção interna e externa e as limitações da técnica de ultrassom PE para a avaliação da integridade. Em seguida, a seção 2.2 descreve os princípios teóricos acerca da técnica VA. Por fim, os métodos de fusão de imagens empregados neste trabalho são apresentados na seção 2.3.

2.1 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE DUTOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

No momento atual, o transporte e a distribuição de derivados do petróleo no Brasil ocorrem por meio de uma malha de aproximadamente catorze mil quilômetros de dutos, interligando regiões produtoras, unidades de refino e consumidores. A preferência por esse tipo de transporte, ao invés do sistema rodoviário e ferroviário, possibilita ganhos de caráter financeiro e de segurança devido principalmente aos procedimentos simplificados de carga e descarga, reduzida necessidade de armazenamento e menor número de mão-de-obra para operação (BENEDET, 2013; VICTORETTE, 2014).

Entretanto, o emprego de dutos para transporte de derivados do petróleo está sujeito a avarias, sobretudo pela degradação das paredes dos mesmos ao longo do tempo, o que pode acarretar sérias consequências como a interrupção das operações antes do tempo de vida útil previsto ou até prejuízos ambientais ou humanos. As principais causas de descontinuidades que podem levar a ruptura ou prejudicar o desempenho de dutos são corrosão interna e externa, ação de forças externas e processos falhos de fabricação da estrutura (FREIRE, 2009; MELO, 2012).

A corrosão interna ou externa ocorre devido ao desgaste das paredes de um duto, em consequência da interação com agentes orgânicos, químicos e eletroquímicos, resultando em descontinuidades como perda de espessura, trincas ou pites. A figura 1 ilustra a presença de corrosão interna em um duto.

Figura 1 - Corrosão interna em um duto



Fonte: Piping Engineering (2020).

A ação de forças externas inclui tanto eventos naturais, como terremotos, enchentes ou furacões, quanto atividades humanas – impacto causado por máquinas de escavações, por exemplo. Essas ações podem ser consideradas prejudiciais por afetarem o escoamento do insumo e fragilizarem as paredes do duto. A figura 2 apresenta o exemplo de um duto com a parede deformada, devido ao choque com uma escavadeira.

Figura 2 - Amassamento em um duto

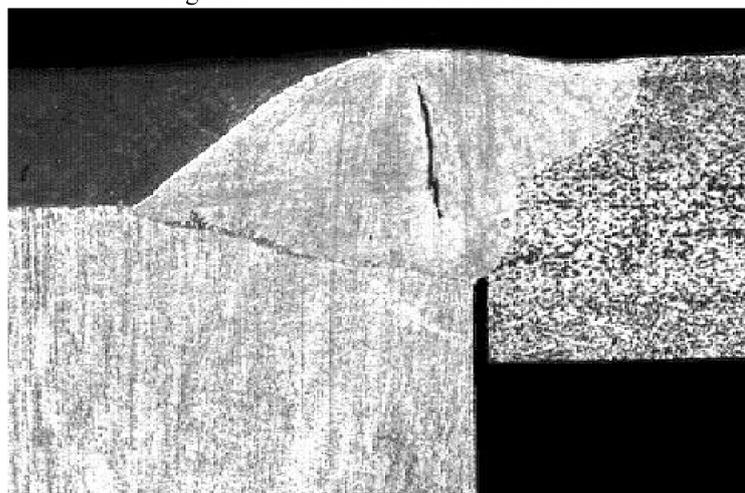


Fonte: Russel NDE Systems (2020).

Por último, os processos de fabricação são frequentemente responsáveis por incorporar discontinuidades em dutos, que por incompetência ou ausência de adequado controle da qualidade, não são detectados e reparados durante sua produção. Entre essas etapas de fabricação, o processo de soldagem se destaca na geração de diferentes tipos de

descontinuidades em dutos, como fusão incompleta e trincas, tornando tais áreas suscetíveis a rupturas (BURGESS, 1989; BUSCHINELLI, 2007). O exemplo de uma trinca formada no centro de uma região soldada é ilustrado na figura 3.

Figura 3 - Trinca em um cordão de solda



Fonte: Marques et al. (2011).

A literatura apresenta diferentes trabalhos que discutem o impacto e as consequências dos processos de corrosão, da ação de forças externas e de processos falhos de fabricação de dutos na indústria de petróleo e gás. Papavinasam (2013) descreve, por exemplo, os prejuízos causados pela corrosão e os investimentos feitos por esse setor para atenuar a ação de tal processo de degradação. Em trabalho publicado por Bersani et al. (2010), verificou-se que, na Europa e nos Estados Unidos entre os anos de 1971 e 1996, o processo de corrosão foi a causa que resultou em uma falha ou em um acidente em mais de 30% dos casos, no que se refere ao transporte de insumos de petróleo por dutos. Okoh et al. (2013) apresentam um estudo sobre como a falta de manutenção e inspeção influenciaram alguns dos maiores acidentes na história da indústria de petróleo e gás. Segundo os autores, o acidente ocorrido em maio de 2004 na empresa Stockline Plastics, localizada na cidade de Glasgow (Escócia), está diretamente relacionado à degradação por corrosão de um duto que transportava gás liquefeito. As explosões ocorridas após o vazamento de gás levaram nove pessoas à morte além de ferirem outras quarenta. Em trabalho publicado por Wang et al. (2014), os autores analisaram as causas de 1095 acidentes, ocorridos entre os anos de 1990 e 2009 nos Estados Unidos, em dutos transportadores de gás natural. O estudo mostrou que, dentre os casos investigados, 42% foram incidentes de vazamentos, os quais estão relacionados diretamente a ação de forças externas e a processos falhos de fabricação do duto, e 33% foram ocorrências de rupturas, cujas causas estão ligadas ao processo de corrosão do componente, bem como a ação de forças

externas e a processos falhos de fabricação. Os casos restantes foram computados como falhas do sistema/componente, os quais estão relacionados a processos falhos de fabricação do duto e de outras causas secundárias, como funcionamento inadequado de válvulas ou de compressores.

Com o objetivo de garantir desempenho satisfatório no transporte de insumos e evitar a ocorrência de acidentes durante a operação, os dutos são periodicamente inspecionados para identificar possíveis discontinuidades existentes. O Instituto Americano de Petróleo (API, do inglês *American Petroleum Institute*), por meio do código API 570 (API, 2012), estabelece critérios que classificam as tubulações da indústria de petróleo e gás e, baseado nessa categorização, define os intervalos de inspeção. No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é responsável por determinar em quais momentos as inspeções devem ocorrer, conforme listado abaixo:

- avaliação da matéria-prima empregada na confecção do duto;
- avaliação da região soldada, após o respectivo processo de produção, com o intuito de integrar os segmentos formadores da estrutura;
- avaliação da integridade do duto durante sua operação.

Dentro desse contexto, ensaios não destrutivos se destacam na garantia da integridade estrutural de instalações da indústria de petróleo e gás, como dutos ou vasos de pressão, pois fornecem um meio de identificar discontinuidades durante a avaliação dos equipamentos. END podem ser definidos como

um processo de avaliação das propriedades físicas e mecânicas de um objeto em teste, sem alterar ou danificar o mesmo, a fim de determinar a presença ou não de discontinuidades. Além disso, os ensaios não destrutivos podem ser realizados com a finalidade de determinar outras características do corpo de prova, tais como tamanho, dimensão e características da estrutura (HELLIER, 2001, p. 21).

Uma descrição mais detalhada do princípio de funcionamento dos principais métodos de END pode ser encontrada no Apêndice A desta tese.

Atualmente, diferentes soluções que utilizam métodos de END estão disponíveis no mercado para a avaliação da integridade de dutos, bem como tem-se observado investimento crescente em pesquisa para o desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas de inspeção (MELO, 2012). Dentre as principais ferramentas existentes, verifica-se que a avaliação da integridade do duto pode ser realizada por meio da inspeção externa ou interna da superfície da estrutura.

2.1.1 Técnicas de inspeção externa em dutos

No que concerne à inspeção externa em dutos, as soluções disponíveis empregam principalmente END baseados em métodos de ultrassom, partículas magnéticas e radiografia, bem como apresentam opções para avaliação tanto manual quanto automática do componente (FREIRE, 2009). Em relação ao primeiro caso, normalmente o operador da inspeção posiciona o transdutor na área desejada e, por meio de um método de END, avalia a presença ou não de discontinuidades (GEREMIA, 2012). Na figura 4 é ilustrada a inspeção manual da superfície externa de um duto com emprego do método de ultrassom.

Figura 4 - Inspeção manual do duto através do método de ultrassom



Fonte: Olympus (2020).

No caso da inspeção automática, os transdutores empregados são posicionados na região desejada sem o intermédio do operador. Como o sistema pode ser controlado remotamente, é possível avaliar um determinado duto em áreas de difícil acesso, além de a operação remota reduzir a probabilidade que o operador sofra algum tipo de acidente durante a inspeção (BARROSO, 2011).

A figura 5 apresenta o exemplo de um sistema de inspeção externa em dutos, ao qual transdutores de ultrassom foram acoplados. A movimentação do sistema e o posicionamento dos transdutores são feitos por meio de motores de passo e o acoplamento acústico é garantido com auxílio de ejetores de água. Em vista dessas características, esse sistema é capaz de realizar inspeções em toda a superfície do duto de forma autônoma.

Figura 5 - Inspeção automática do duto através do método de ultrassom



Fonte: Barroso (2011).

2.1.2 Técnicas de inspeção interna em dutos

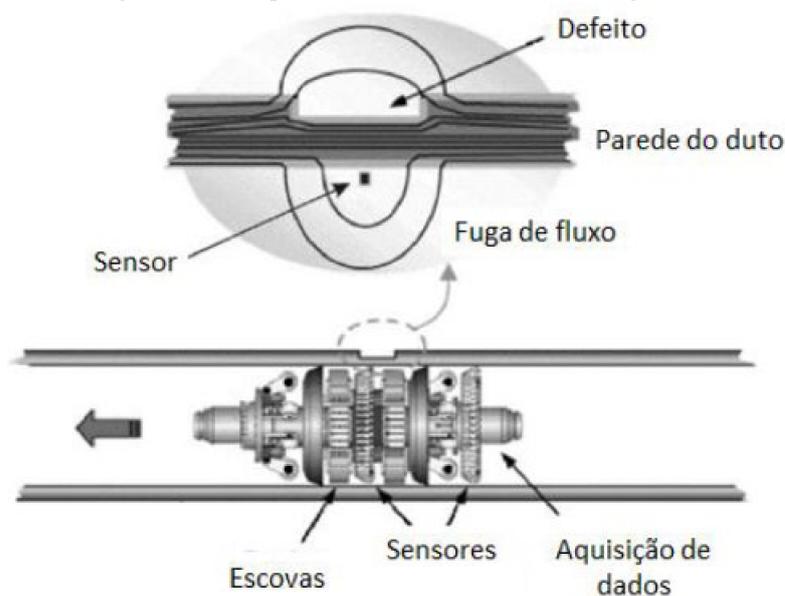
Dentre os métodos de inspeção da superfície interna do duto, o mais utilizado para avaliação da integridade e garantia da continuidade operacional é o emprego das sondas de inspeção de dutos (PIGs, do inglês *pipeline inspection gauges*), ferramentas altamente especializadas para identificação de descontinuidades internas. Os PIGs são dispositivos que se movem pelo interior do duto, impulsionados pela própria vazão do fluido transportado, e possuem a capacidade de avaliar as condições internas do duto analisado, como espessura, geometria, sinais de corrosão, vazamentos, entre outros (FREIRE, 2009; MELO, 2012).

A inspeção por meio dos PIGs pode ser realizada por diferentes princípios de medição, sendo que os mais difundidos nessa área são os PIGs magnéticos e de ultrassom (FREIRE, 2009). Uma breve descrição desses dois dispositivos é apresentada a seguir.

2.1.2.1 PIG magnético

O PIG magnético, também conhecido como PIG MFL (do inglês *magnetic flux leakage*), se destaca por ser uma das ferramentas mais tradicionais para inspeção de dutos. Seu princípio de funcionamento está baseado na detecção de fuga do fluxo magnético, situação essa gerada pela presença de irregularidades ou perda de material na parede do duto avaliado, conforme pode ser visto na figura 6 (BUSCHINELLI, 2007; MELO, 2012).

Figura 6 - Princípio de funcionamento do PIG magnético



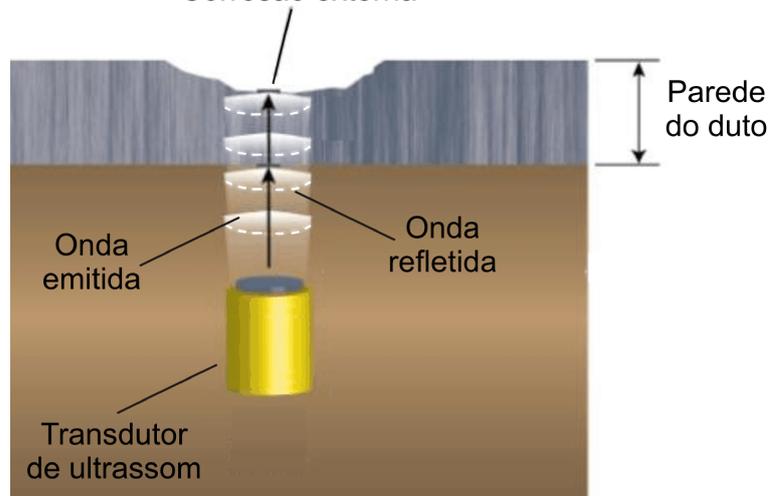
Fonte: Victorette (2014).

Apesar de o PIG magnético detectar a descontinuidade existente, o mesmo não é capaz de caracterizar de maneira detalhada a forma e as dimensões das avarias. Além disso, esse dispositivo apresenta uma redução em sua capacidade de detecção com o aumento da espessura da parede do duto (FREIRE, 2009; VICTORETTE, 2014).

2.1.2.2 PIG de ultrassom

O PIG de ultrassom foi desenvolvido com o intuito de superar a principal limitação do PIG magnético, a incapacidade de detalhar características como a forma e a dimensão das descontinuidades existentes em dutos. Seu princípio de funcionamento (Figura 7) está baseado na técnica PE, a qual utiliza um transdutor de ultrassom para emissão de ondas acústicas. Por meio dos ecos na superfície interna e externa da parede do duto, o transdutor – atuando nesse momento como receptor – converte as ondas acústicas refletidas em sinais elétricos, permitindo, então, quantificar a espessura do duto avaliado ou identificar a existência de descontinuidades (BUSCHINELLI, 2007; FREIRE, 2009).

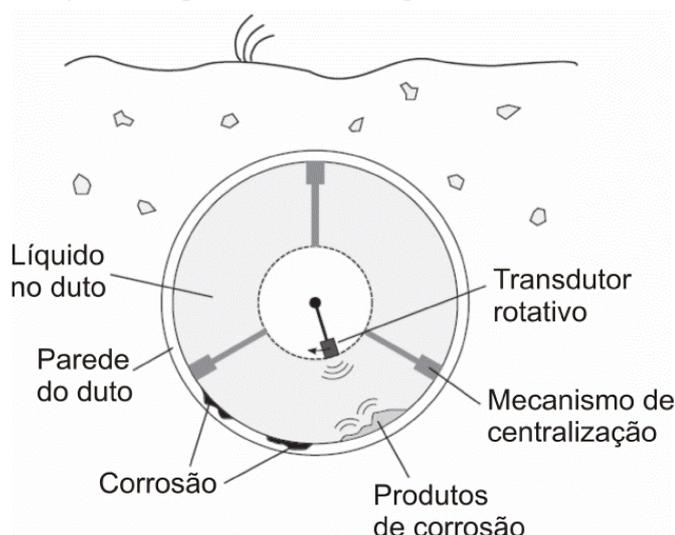
Figura 7 - Princípio de funcionamento do PIG de ultrassom
Corrosão externa



Fonte: adaptado de Barbian et al. (2011).

Na figura 8 é apresentada uma representação de um típico PIG de ultrassom empregado para inspeção de dutos. Neste caso, o transdutor de ultrassom realiza um movimento rotacional em torno do eixo do duto, enquanto o PIG se desloca axialmente ao longo do mesmo (SKJELVAREID et al., 2013).

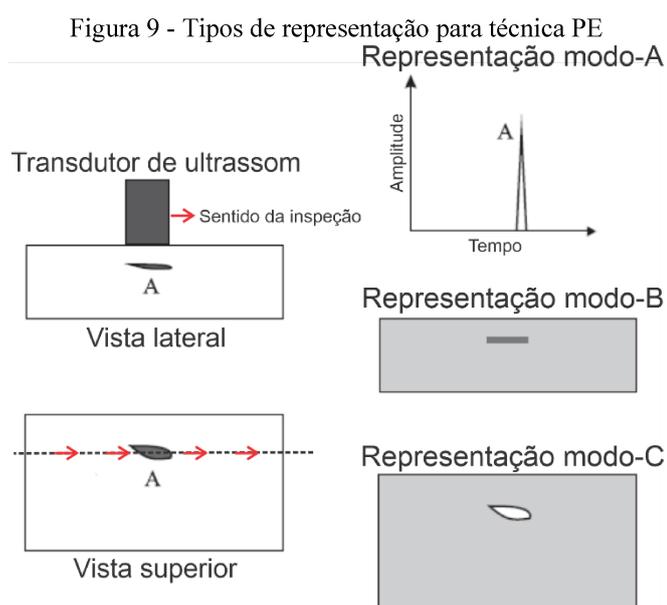
Figura 8 - Representação de um típico PIG de ultrassom



Fonte: adaptado de Skjelvareid et al. (2013).

Para a interpretação do sinal elétrico gerado pelo transdutor, pelo menos três tipos de representação podem ser empregados: modo-A, modo-B e modo-C (LEO et al., 2012). O primeiro tipo apresenta a amplitude do sinal elétrico convertido pelo transdutor de ultrassom em um gráfico no domínio do tempo, abrindo a possibilidade de quantificar a espessura do objeto ou a presença de discontinuidades por meio dos pulsos representados pelos ecos. Já o

modo-B permite a formação de uma imagem bidimensional, por meio do corte transversal do objeto avaliado, na qual a amplitude da onda de ultrassom refletida é relacionada com a intensidade do brilho de cada pixel. Por último, a imagem em modo-C é formada por um plano perpendicular à direção de propagação das ondas de ultrassom, em uma determinada profundidade do objeto avaliado (JINBO, 2007; ABNT, 2012; IYER et al., 2012). Os três tipos de representação do sinal de ultrassom são apresentados na figura 9.



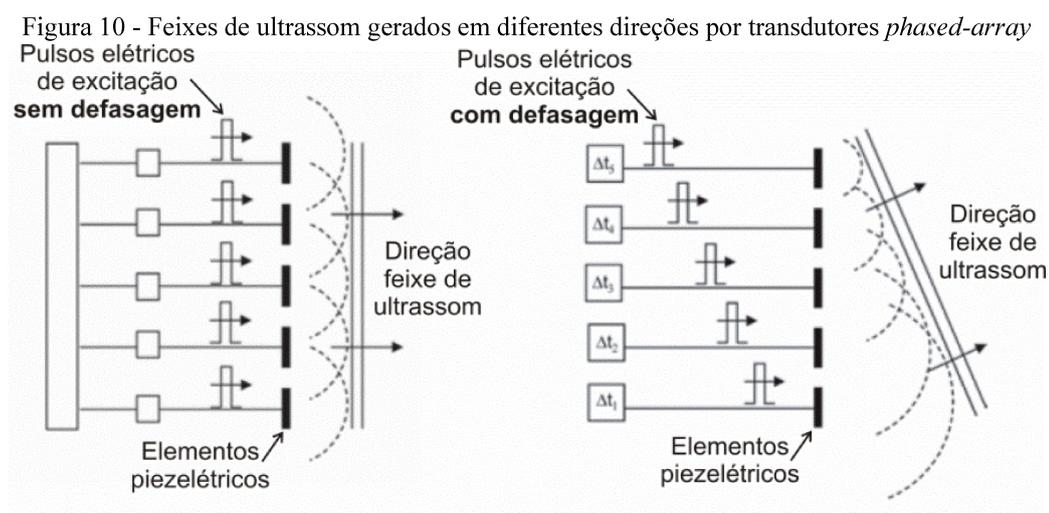
Fonte: adaptado de Liu et al. (2013).

2.1.3 Limitações apresentadas pela técnica de ultrassom PE para inspeção de dutos

Apesar de seu emprego generalizado para inspeção interna e externa de dutos, a técnica de ultrassom PE pode ter seu desempenho prejudicado de modo considerável em razão das condições do objeto avaliado, sobretudo pela condição da superfície da parede do mesmo. A técnica se mostra sensível a irregularidades presentes, como em casos de dutos com corrosão, pois a onda de ultrassom emitida pelo transdutor não incidirá perpendicularmente à superfície, ocorrendo dispersão da energia sonora. Desse modo, a onda de ultrassom refletida que alcança o transdutor poderá ter uma intensidade reduzida a tal ponto que dificultará a detecção da descontinuidade existente, visto que a formação da imagem na técnica PE é baseada no tempo de propagação da onda refletida para o transdutor. Além disso, em alguns casos, ondas de ultrassom podem alcançar o transdutor após múltiplas reflexões, o que pode ocasionar erros de medição (FREIRE, 2009; MITRI et al., 2009). Por isso, a busca por novas técnicas de ultrassom que aprimorem a avaliação da integridade de dutos – superando as

limitações inerentes à técnica PE – se mostra de grande interesse para a indústria de petróleo e gás.

Diferentes trabalhos na literatura científica destacam o emprego da técnica *phased-array*, a qual possui o mesmo princípio de funcionamento da técnica PE, porém utiliza um transdutor de ultrassom composto por diversos elementos piezelétricos dispostos em uma mesma estrutura. Por meio dessa técnica, é possível excitar individualmente cada um desses elementos, o que pode ser feito de forma simultânea ou com um tempo de defasagem entre os mesmos. O modo como os elementos piezelétricos são excitados determinará o tipo de feixe que será gerado e a direção de propagação do sinal de ultrassom, conforme pode ser visto na figura 10 (HUANG et al., 2004; CAMINERO et al., 2019). Outro atributo do *phased-array* se refere à organização dos elementos piezelétricos na estrutura do transdutor, os quais podem ser agrupados em um arranjo linear, circular – empregado principalmente para inspeção de dutos – ou em outras formas mais complexas (LIU et al., 2013). A figura 10 ilustra um transdutor com cinco elementos piezelétricos em um arranjo linear.



Fonte: adaptado de Schmerr (2015).

A vantagem de empregar a referida técnica está na capacidade de realizar múltiplas inspeções em diversos ângulos de incidência do feixe de ultrassom, sem a necessidade de reposicionar o transdutor, o que acarreta uma maior rapidez nos ensaios realizados, bem como eleva a probabilidade de detectar determinados tipos de discontinuidades que dificilmente seriam identificadas pela técnica PE, como trincas longitudinais (MOLES et al, 2005; CERQUEIRA, 2009).

Em estudo descrito por Hugger et al. (2009), comparou-se um sistema de ultrassom convencional e *phased-array* para inspeção de dutos utilizados no transporte de gás natural. Os resultados alcançados mostraram que o sistema *phased-array* apresentou um melhor desempenho quanto à detecção das trincas presentes no duto avaliado. Bohlouli et al. (2012) empregaram a técnica de ultrassom *phased-array* para obter imagens de regiões soldadas em dutos de polietileno. Por meio de um método de processamento digital de imagens, baseado em inteligência artificial e transformada *wavelet*, os autores obtiveram êxito na identificação de descontinuidades na área inspecionada. Cerqueira (2009) apresentou um sistema de inspeção com a técnica *phased-array* para juntas soldadas circunferenciais de tubulações cladeadas. Mediante o emprego de tal sistema, foi possível detectar e dimensionar descontinuidades presentes nas regiões avaliadas.

Mesmo apresentando um melhor desempenho na identificação de descontinuidades presentes em dutos, deve-se lembrar que o princípio de funcionamento da técnica *phased-array* se baseia no princípio do PE. Em vista disso, buscaram-se técnicas de ultrassom que não dependessem da orientação do feixe de ultrassom em relação à superfície do corpo de prova.

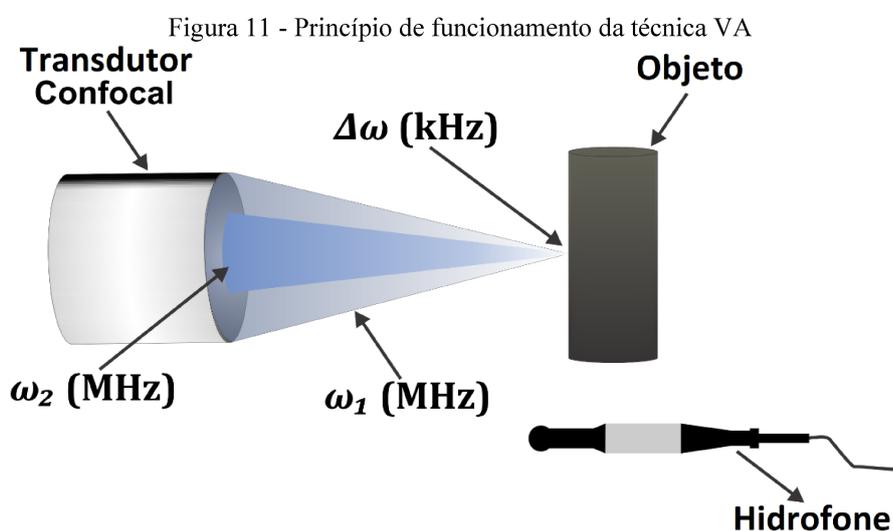
Uma técnica de ultrassom que não depende da orientação do feixe de ultrassom em relação à superfície do corpo de prova e que tem se destacado em diferentes áreas de aplicação é a VA. Essa técnica difere do PE pelo modo como o objeto em teste responde a uma força de radiação acústica para a formação da sua imagem. No caso da técnica VA, a incidência do feixe de ultrassom não necessariamente precisa ser perpendicular à superfície a ser inspecionada (FATEMI et al., 1999). Os pontos relevantes dessa técnica para o presente trabalho são apresentados na seção 2.2.

2.2 VIBRO-ACUSTOGRAFIA

Segundo Fatemi e Greenleaf (1999), VA é uma técnica de imagem que utiliza uma força localizada de radiação ultrassônica modulada em quilohertz, cuja origem pode ser obtida pela interação de dois feixes de ultrassom focalizados em uma mesma região, com frequências ligeiramente diferentes na ordem de megahertz. Em resposta a essa força de radiação modulada, a região do objeto irradiado produz um campo acústico característico de suas propriedades e estruturas mecânicas. Os sinais emitidos por esse campo são detectados por meio de um hidrofone dedicado e, posteriormente, gera-se uma imagem dessa região do objeto. Recentemente, Baggio et al. (2017) mostraram que quando feixes de ultrassom

emitidos pelo transdutor confocal interagem de modo não-linear no meio de propagação, fenômenos acústicos são produzidos. De acordo com os autores, esses fenômenos também contribuem para a geração dos sinais na frequência de modulação (na faixa de quilohertz) e, conseqüentemente, para a formação da imagem por meio da técnica VA.

Na figura 11 é apresentado o princípio de funcionamento da técnica VA, conforme trabalho de Fatemi et al. (1999). Um transdutor confocal¹ pode ser utilizado como o elemento responsável por emitir os dois feixes de ultrassom, com frequências ω_1 e ω_2 na faixa de megahertz, resultando na formação da força acústica com frequência de modulação $\Delta\omega$ na ordem de quilohertz. Essa força pode ser aplicada em pontos preestabelecidos de um objeto em teste e os sinais acústicos resultantes dessa interação medidos por meio do hidrofone.



Fonte: adaptado de Baggio (2011).

Ao contrário da técnica de ultrassom PE, VA possui menor sensibilidade ao ângulo de incidência da onda ultrassônica emitida em direção à superfície do objeto avaliado. Isso decorre da forma como o objeto responde à excitação imposta – ondas de baixa frequência que se propagam em todas as direções – e pelo emprego de um transdutor omnidirecional para a medição dos sinais emitidos pelo campo acústico, geralmente um hidrofone (MITRI et al., 2007; KAMIMURA, 2013).

Em trabalho realizado por Mitri et al. (2009a), os autores apresentaram um estudo comparativo entre as técnicas PE e VA com o objetivo de analisar as capacidades das respectivas técnicas em gerar imagens de sementes empregadas em braquiterapia², alterando

¹ O transdutor confocal é um dispositivo formado por dois elementos cerâmicos de mesmo foco.

² A braquiterapia é um tratamento médico comumente utilizado em pacientes com câncer de próstata e que vem ganhando espaço no tratamento de outros tipos de tumores. Essa técnica emprega sementes

a orientação do eixo da semente em relação ao feixe incidente de ultrassom. Os resultados alcançados nesse trabalho mostraram que VA foi capaz de gerar imagens das sementes em qualquer orientação. Entretanto, o desempenho da técnica PE foi prejudicado quando o eixo da semente não estava perpendicular ao feixe incidente de ultrassom, corroborando a afirmação feita no parágrafo anterior.

As seções 2.2.1 e 2.2.2 apresentam os conceitos teóricos relacionados à força de radiação e da subsequente pressão acústica emitida por um corpo de prova, respectivamente. Na seção 2.2.3, a base teórica acerca do processo de formação da imagem pela técnica VA é descrita.

2.2.1 Força de radiação acústica

A técnica VA geralmente emprega um transdutor confocal semiesférico constituído por dois elementos cerâmicos: um disco na parte central e um anel externo. Por meio dessa configuração de montagem do transdutor, é possível obter uma imagem de melhor resolução espacial, cujo volume será limitado pela região de interação entre os dois feixes de ultrassom gerados pelo transdutor confocal (vide seção 2.2.3) (FATEMI et al., 1999).

A força de radiação acústica é normalmente gerada quando há uma alteração na densidade de energia de um campo acústico incidente. Dessa forma, no momento que feixes de ultrassom incidem em um corpo de prova que possui impedância acústica diferente do meio onde esse se localiza, fenômenos de absorção, espalhamento ou de reflexão irão ocorrer, o que levará, conseqüentemente, à formação de uma força. No caso da VA, a combinação de ondas de ultrassom irá gerar uma força de radiação acústica dinâmica, a qual estará diretamente relacionada com a frequência de modulação escolhida (FATEMI et al., 1999; CHEN et al., 2004).

O vetor força de radiação acústica (F) pode ser definido por meio da relação entre a média temporal da densidade de energia da onda incidente ($\langle E \rangle$) e a área projetada do objeto (S), conforme apresentado na equação (1).

$$F = d_r S \langle E \rangle \quad (1)$$

sendo,

d_r vetor coeficiente de arrasto, que representa as propriedades de absorção, espalhamento e reflexão do objeto.

constituídas de material radioativo e encapsuladas em invólucro de titânio, as quais são implantadas diretamente na região afetada pela doença (TRINDADE et al., 2012).

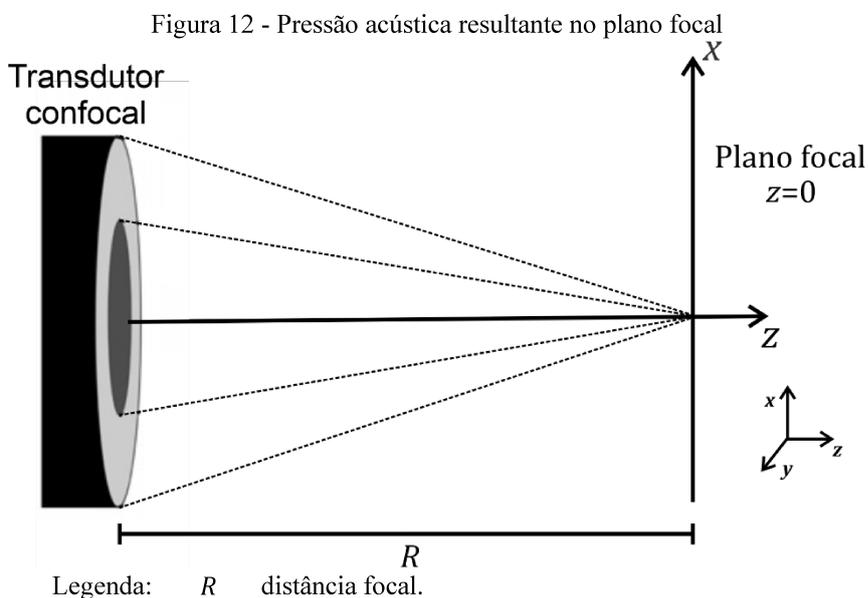
Ao considerar ondas incidentes planas, a densidade de energia (E) pode ser determinada por meio da equação (2).

$$E = \frac{p^2(t)}{\rho c^2} \quad (2)$$

sendo,

$p(t)$ pressão total incidente no tempo t ;
 ρ densidade do meio de propagação;
 c velocidade de propagação da onda no meio.

Tal como descrito anteriormente, os elementos formadores do transdutor de ultrassom empregado na VA geram dois feixes de frequências ligeiramente diferentes e da ordem de megahertz, $\omega_1 = \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}$ e $\omega_2 = \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}$, sendo $\Delta\omega$ da ordem de quilohertz e ω_0 a frequência central da onda emitida. Assumindo que os feixes de ultrassom se propagam ao longo do eixo z de um sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) , conforme pode ser visto na figura 12, a pressão acústica resultante, em um ponto espacial (x, y) no plano focal do transdutor ($z = 0$), pode ser definida por meio da equação (3) (FATEMI et al., 1999; CHEN et al., 2004).



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2011).

$$p(t) = p_1(r) \cos(\omega_1 t + \phi_1(r)) + p_2(r) \cos(\omega_2 t + \phi_2(r)) \quad (3)$$

sendo,

ϕ_1 e ϕ_2 funções de fase dos sinais com frequências ω_1 e ω_2 ;
 p_1 e p_2 amplitude dos feixes de ultrassom;
 r distância para o transdutor no plano xy .

Calculando a média temporal de $p^2(t)$ em um intervalo de tempo T , o qual deve ser muito maior que o período das ondas de ultrassom $\left(\frac{2\pi}{\omega_0}\right)$ e muito menor que o período de modulação $\left(\frac{4\pi}{\Delta\omega}\right)$, é possível obter a equação abaixo.

$$\langle p^2(t) \rangle_T = \frac{p_1^2(r) + p_2^2(r)}{2} + p_1(r)p_2(r) \cos(\Delta\omega t + \phi_1(r) - \phi_2(r)) \quad (4)$$

A componente dinâmica da força de radiação acústica (F_d) gerada na região focal pode ser definida por meio da equação (5) (FATEMI et al., 1999; CHEN et al., 2004).

$$F_{\Delta\omega}(t) = \frac{d_r S}{\rho c^2} \left\{ \frac{p_1^2(r) + p_2^2(r)}{2} + p_1(r)p_2(r) \cos[\Delta\omega t + (\phi_2(r) - \phi_1(r))] \right\} \quad (5)$$

2.2.2 Pressão acústica emitida por um corpo de prova

No momento que um corpo de prova é submetido a uma força de radiação modulada, um campo acústico é gerado, em virtude da interação entre os feixes de ultrassom e a região do corpo de prova, e está diretamente relacionado com o formato, tamanho e propriedades mecânicas do objeto. Por meio de um hidrofone, os sinais provenientes desse campo podem ser detectados e medidos (FATEMI et al., 1999).

Para definir uma equação que represente a pressão acústica emitida em resposta à força de radiação, é preciso considerar dois parâmetros importantes: a admitância acústica ($Q_{\Delta\omega}$) e a função de transferência do meio ($H_{\Delta\omega}$). O primeiro representa a relação entre a força de radiação acústica aplicada e a consequente movimentação do corpo de prova, determinando qual o volume do meio é deslocado por unidade de tempo devido à resposta do objeto na frequência $\Delta\omega$. A admitância acústica possui uma relação inversamente proporcional com a impedância mecânica do alvo e descreve como é a resposta mecânica do objeto no domínio da frequência (ALIZAD et al., 2004). Por sua vez, a função de transferência do meio na frequência $\Delta\omega$ ($H_{\Delta\omega}$) representa o efeito do meio de propagação no campo acústico gerado em virtude da movimentação do corpo de prova (FATEMI et al., 1999).

No trabalho de Fatemi et al. (1999), a pressão acústica emitida por um corpo de prova com o formato de um pistão cilíndrico, em função da pressão acústica incidente (p_{ω_0}), foi determinada (equação (6)). A elaboração dessa abordagem teórica não considerou as interações não-lineares entre os feixes de ultrassom incidentes e o objeto alvo (BAGGIO, 2011).

$$p_{\Delta\omega}(t) = H_{\Delta\omega} Q_{\Delta\omega} p_{\omega_0}^2 S d_r . \quad (6)$$

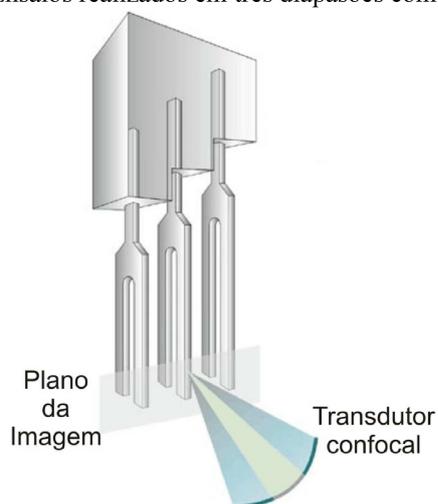
Além da equação (6), a pressão acústica emitida por um corpo de prova de mesmo formato também pode ser definida em termos da força de radiação incidente ($F_{\Delta\omega}$), conforme apresentado em (7) (FATEMI et al., 1999).

$$p_{\Delta\omega}(t) = \rho c^2 H_{\Delta\omega} Q_{\Delta\omega} F_{\Delta\omega}(t) \quad (7)$$

As equações (6) e (7) indicam que a pressão acústica gerada em resposta à força de radiação tem uma relação direta com as propriedades mecânicas do objeto e do meio de propagação, as quais são representadas pelos parâmetros $Q_{\Delta\omega}$ e $H_{\Delta\omega}$, respectivamente. O potencial da técnica VA para aplicações na área de ensaios não destrutivos, como a caracterização das propriedades mecânicas de materiais ou a identificação de discontinuidades em corpos de prova, é demonstrado quando a resposta do objeto no domínio da frequência é analisada. Como a pressão $p_{\Delta\omega}$ pode ser obtida medindo os sinais do campo acústico gerado e o termo $H_{\Delta\omega}$ é normalmente conhecido, o parâmetro $Q_{\Delta\omega}$ pode ser calculado usando uma das relações definidas nas equações (6) e (7) (FATEMI et al., 1999; ALIZAD et al., 2004).

Um exemplo de aplicação da técnica VA para a caracterização de propriedades mecânicas é o estudo publicado por Fatemi et al. (1998). Os autores realizaram ensaios com a técnica VA para avaliar a resposta de três diapásões de diferentes frequências de ressonância, conforme pode ser visto na figura 13. Um espectrograma acústico colorido foi gerado alterando a frequência de modulação em um intervalo que englobasse as frequências de ressonância de todos os diapásões.

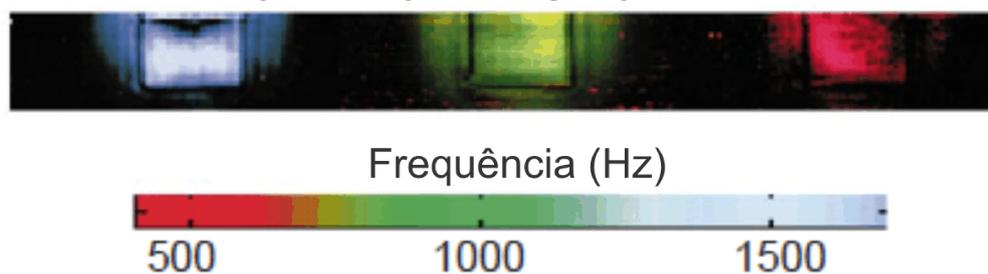
Figura 13 - Ensaios realizados em três diapásões com a técnica VA



Fonte: Adaptado de Fatemi et al. (1998).

A partir do espectrograma acústico gerado (Figura 14), foi possível identificar o formato dos objetos avaliados e a frequência de ressonância de cada diapasão, cujo valor foi associado a uma escala de cores. Os resultados obtidos mostraram que VA foi capaz de distinguir os três diapasões por meio de suas frequências de ressonância, embora esses objetos fossem constituídos de mesmo material.

Figura 14 - Imagem de um espectrograma acústico

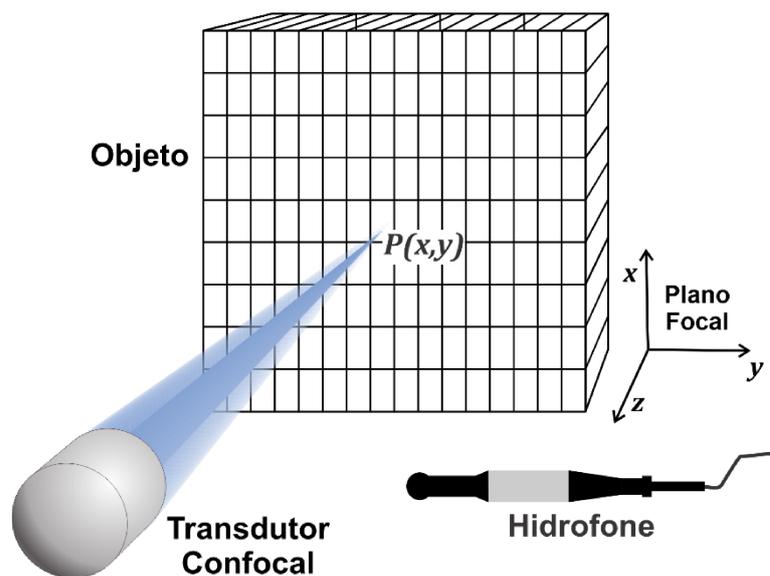


Fonte: Adaptado de Fatemi et al. (1998).

2.2.3 Formação da imagem pela técnica VA

A imagem gerada pela técnica VA está relacionada, principalmente, com as características mecânicas do objeto avaliado quando o mesmo é submetido a uma força de radiação na frequência de modulação selecionada. Para produzir essa imagem do corpo de prova, os dados digitais provenientes do sinal de saída do hidrofone são processados com o intuito de extrair determinadas características. Na maioria dos casos, a intensidade de cada pixel da imagem é definida pelos valores de magnitude ou de fase do sinal elétrico adquirido pelo sistema de aquisição de dados (FATEMI et al., 1999; MITRI et al., 2007). Com o objetivo de associar o respectivo atributo extraído à intensidade de um pixel, o corpo de prova é posicionado e deslocado no plano focal (x, y) do transdutor de ultrassom e a dimensão de cada pixel é estabelecida em função da resolução espacial da imagem, a qual é detalhada no parágrafo abaixo. Em vista disso, é possível relacionar cada ponto $P(x, y)$ do plano, o qual representa a posição do foco do transdutor naquele determinado instante, com o pixel da imagem. O procedimento é finalizado no momento que o foco do transdutor alcançar todos os pontos $P(x, y)$ do plano (FATEMI et al., 1999). A figura 15 ilustra o procedimento descrito acima para a geração da imagem usando a técnica VA.

Figura 15 - Procedimento adotado para geração da imagem



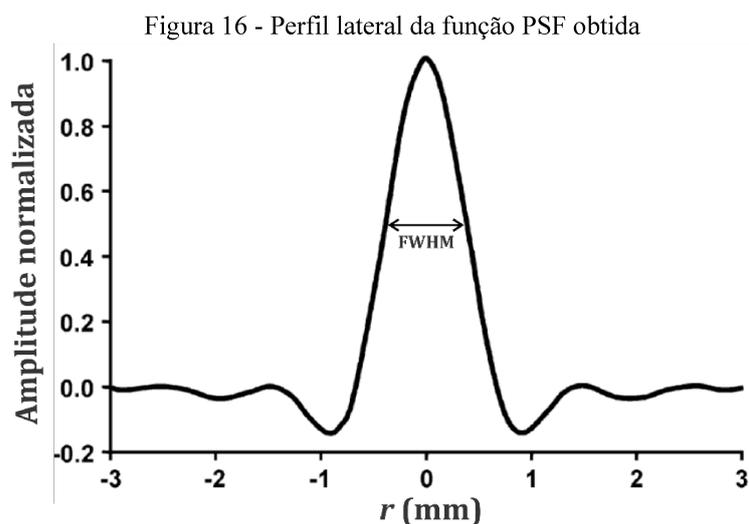
Fonte: adaptado de Baggio (2011).

A resolução espacial da imagem formada pela técnica VA pode ser caracterizada por meio da função de espalhamento de ponto (PSF, do inglês *point spread function*) do sistema de imagem, a qual descreve a distribuição do campo acústico gerado pela interação entre os feixes de ultrassom emitidos pelo transdutor confocal e um objeto que se aproxime de um alvo pontual. A partir da análise dos parâmetros da função PSF, como resolução lateral e axial, é possível definir a resolução espacial da imagem (FATEMI et al., 1999; URBAN et al., 2014). Os valores tanto da resolução axial quanto da lateral são definidos pela largura à meia altura (FWHM, do inglês *full width at half maximum*) da função PSF, a qual pode ser associada ao local onde a intensidade da pressão acústica se mantém maior que a metade do seu valor máximo (ABNT, 2013).

Ao considerar o emprego de um transdutor confocal para avaliar o corpo de prova, é possível estabelecer uma representação matemática da função PSF no plano focal (x, y) e, desse modo, determinar o parâmetro relacionado à resolução lateral, conforme descrição feita por Fatemi et al. (1999). Essa representação matemática mostra que a função PSF no plano focal (x, y) tem um comportamento circularmente simétrico, com máxima amplitude na origem e um decaimento de magnitude com o aumento da distância r . Com o propósito de obter o valor da resolução lateral, calcula-se a largura à meia altura do lóbulo central da função PSF, o que representa o diâmetro do respectivo lóbulo quando sua amplitude decai para a metade do valor máximo. O cálculo da resolução axial também foi proposto no trabalho de Fatemi et al. (1999), cujo valor pode ser obtido por meio de uma representação matemática da

função PSF no plano (x, z) , isto é, na direção longitudinal em relação ao eixo do transdutor confocal (FATEMI et al., 1999; ABNT, 2013).

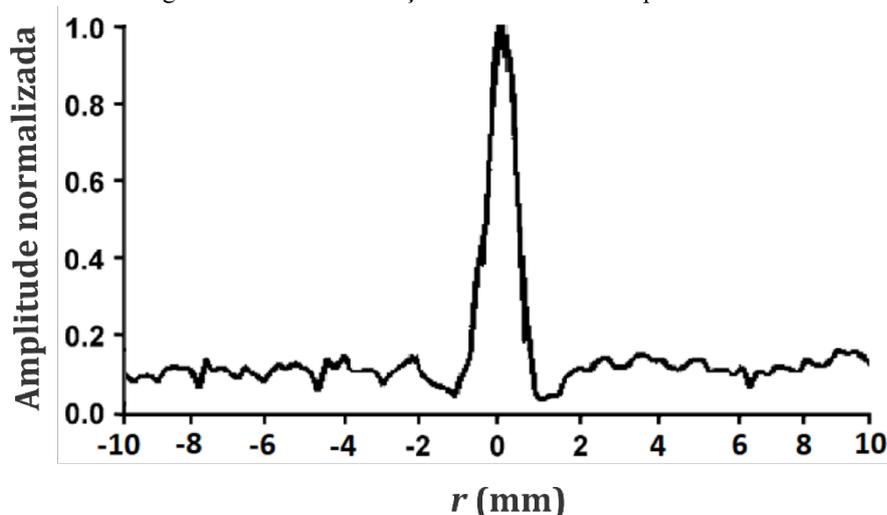
Alizad et al. (2004) realizaram um estudo teórico com o qual puderam determinar a função PSF no plano focal (x, y) e, conseqüentemente, o valor da resolução lateral da imagem gerada pela técnica VA. Para isso, os autores consideraram o emprego de um transdutor confocal constituído por um disco interno com diâmetro de 29,6 mm, um anel externo com diâmetro de 45 mm e um espaço de 2 mm entre os dois elementos. Ademais, a frequência central e a distância focal do transdutor era de 3 MHz e 70 mm, respectivamente. O comportamento da função PSF obtida pelos autores pode ser vista por meio da figura 16, cujo valor de resolução lateral, de aproximadamente 0,7 mm, é definido pelo diâmetro do lóbulo central quando sua amplitude decai para a metade do valor máximo.



Fonte: Adaptado de Alizad et al. (2004).

As resoluções lateral e axial também podem ser estimadas por meio de simulações numéricas ou por ensaios experimentais, conforme pode ser visto em trabalhos publicados por Silva et al. (2006), Baggio (2011), Urban et al. (2014) e Braz (2020). A título de exemplo, Fatemi et al. (1999) realizaram ensaios experimentais empregando um transdutor confocal com frequência central de 3 MHz e uma esfera de vidro com diâmetro de 380 μm para representar um alvo pontual. A figura 17 apresenta o perfil da função PSF obtido por meio dos resultados experimentais. A partir do comportamento dessa função PSF, os autores estimaram a resolução lateral como sendo igual a 700 μm .

Figura 17 – Perfil da função PSF obtida nos experimentos

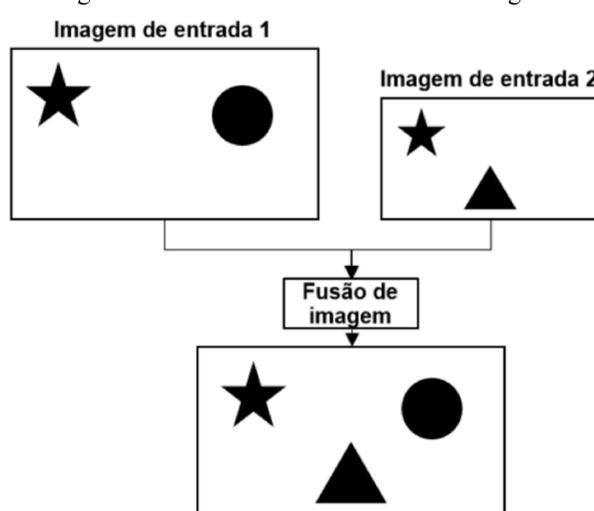


Fonte: Adaptado de Fatemi et al. (1999).

2.3 MÉTODOS DE FUSÃO DE IMAGENS PARA AS TÉCNICAS PE E VA

A fusão de imagens pode ser compreendida como o processo de combinação de múltiplas imagens de entrada, que sozinhas não fornecem informações suficientes para uma determinada aplicação, em uma única representação de saída, a qual apresentará as características de um objeto alvo em uma forma mais adequada para avaliação humana ou de um sistema automatizado (MITCHELL, 2010). Na figura 18 é ilustrado o processo de fusão de duas imagens de entrada e a representação de saída gerada, cujo conteúdo apresenta a combinação das informações contidas em ambas as entradas.

Figura 18 - Processo de fusão de duas imagens



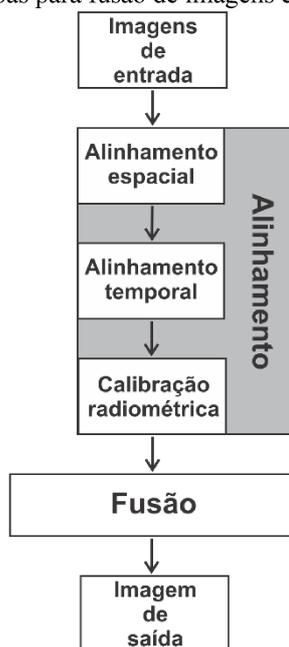
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2019).

Os métodos de fusão de imagens disponíveis atualmente podem ser divididos em três grupos: fusão de pixel, fusão de característica e fusão de decisão (MITCHELL, 2010).

Segundo Mitchell (2010), os métodos de fusão de pixel são os mais empregados para combinar informações das imagens de entrada. Esse tipo de método realiza simples operações pixel-por-pixel, as quais incluem operações matemáticas, lógicas e probabilísticas.

A fusão de imagens em nível de pixel é formada pela etapa de alinhamento, a qual engloba o alinhamento espacial, o alinhamento temporal e a calibração radiométrica, e a etapa de fusão propriamente dita, conforme pode ser visto na figura 19.

Figura 19 - Etapas para fusão de imagens em nível de pixels



Fonte: Adaptado de MITCHELL (2010).

O objetivo da primeira etapa é converter as imagens de entrada em um formato de representação comum. O alinhamento espacial pode ser entendido como um processo de posicionamento de todas as imagens de entrada em uma mesma base geométrica. Esse primeiro passo é normalmente contemplado ao escolher uma das imagens de entrada como referência, enquanto as demais são alinhadas geometricamente com o intuito de posicioná-las no sistema de coordenadas de referência. O alinhamento temporal é um processo de sincronização das imagens de entrada na escala do tempo. Mediante esse tipo de alinhamento, os tempos de aquisição dos dados das imagens de entrada são equiparados ao tempo da imagem de referência. Por fim, o processo de calibração radiométrica realiza uma conversão dos valores dos pixels das imagens de entrada em uma mesma escala de medição. Com uma base radiométrica comum, é possível implementar a fusão das imagens adquiridas por diferentes equipamentos ou de imagens capturadas em diferentes condições de iluminação (STATHAKI, 2008; MITCHELL, 2010).

Posteriormente à etapa de alinhamento, a fusão em nível de pixel das imagens de entrada pode ser feita por meio de diferentes ferramentas. Dentre as existentes, as regras de fusão algébrica e de fusão booleana e a análise por componentes principais (PCA, do inglês *principal component analysis*) se destacam (MITCHELL, 2010). Os conceitos relacionados a essas ferramentas são descritos nas seções 2.3.1 a 2.3.3.

2.3.1 Fusão algébrica

A fusão algébrica utiliza diferentes operações aritméticas para realizar a fusão das imagens de entrada. A adição, por exemplo, é uma regra de fusão utilizada para gerar uma imagem de saída com melhor contraste, ao somar as intensidades dos pixels das imagens de entrada. Quando o objetivo for o realce da diferença entre as imagens de entrada, os respectivos valores dos pixels são normalmente subtraídos para gerar uma imagem de saída (regra de subtração). Outra ferramenta de fusão é a média, a qual determina o valor médio dos pixels das imagens de entrada para criar uma de saída com menor intensidade de ruído (MITCHELL, 2010).

Além das operações aritméticas básicas descritas no parágrafo anterior, merecem destaque também as regras de máximo e de mínimo. Em relação à de máximo, o valor de cada pixel (x, y) da imagem de saída pode ser definido através da equação (8).

$$I_{MAX}(x, y) = \max(I_{ent1}(x, y), I_{ent2}(x, y)) \quad (8)$$

sendo,

$I_{MAX}(x, y)$	pixel (x, y) da imagem de saída com a regra de máximo
$I_{ent1}(x, y)$	pixel (x, y) da imagem de entrada 1
$I_{ent2}(x, y)$	pixel (x, y) da imagem de entrada 2

Quanto à regra de mínimo, a equação (9) descreve como os valores dos pixels que formam a imagem de saída podem ser obtidos.

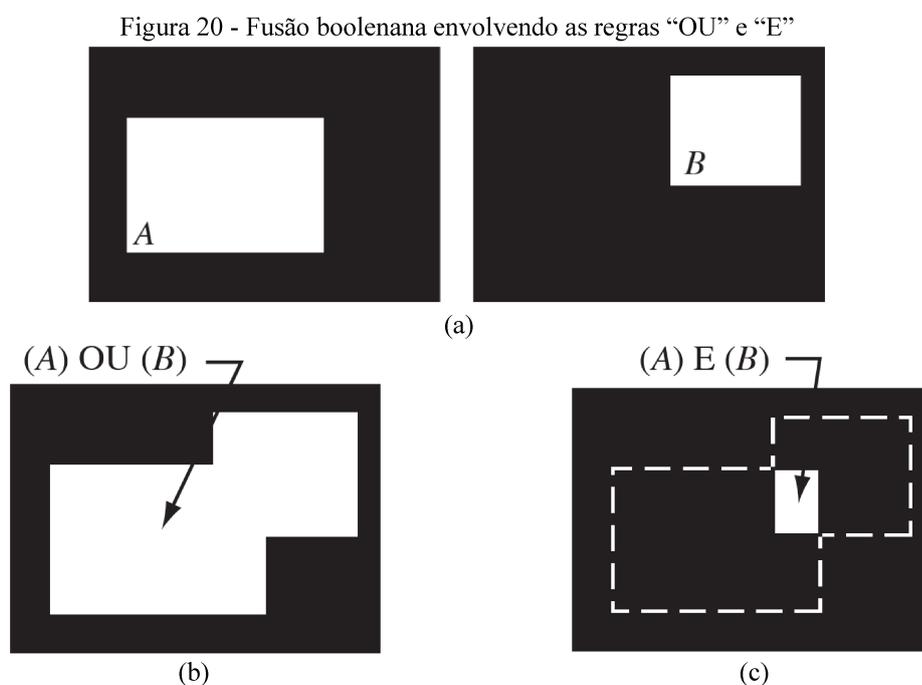
$$I_{MIN}(x, y) = \min(I_{ent1}(x, y), I_{ent2}(x, y)) \quad (9)$$

sendo,

$I_{MIN}(x, y)$	pixel (x, y) da imagem de saída com a regra de mínimo
$I_{ent1}(x, y)$	pixel (x, y) da imagem de entrada 1
$I_{ent2}(x, y)$	pixel (x, y) da imagem de entrada 2

2.3.2 Fusão booleana

A fusão booleana é comumente empregada com o objetivo de identificar a presença de objetos de interesse em imagens de entrada do tipo binário. Existem diferentes ferramentas para realizar a fusão booleana, como as regras “OU” e “E”. A figura 20(a) ilustra duas imagens binárias de entrada que apresentam conjuntos A e B compostos de pixels brancos, cujos valores lógicos são iguais a um. O resultado da regra “OU” quando aplicada nas imagens de entrada é uma imagem de saída que apresenta pixels brancos pertencentes ao conjunto A ou ao B ou aos dois (Figura 20(b)). Por outro lado, a saída gerada a partir da regra “E” é uma imagem que possui pixels brancos que são comuns tanto a A quanto a B, conforme pode ser visto na figura 20(c) (GONZALEZ, 2010).



Fonte: GONZALEZ (2010).

As equações (10) e (11) descrevem o cálculo dos pixels da imagem de saída para as regras de fusão “OU” e “E”, respectivamente (GONZALEZ, 2010).

$$I_{OU}(x, y) = I_{ent1_bin}(x, y) \cup I_{ent2_bin}(x, y) \quad (10)$$

sendo,

$I_{OU}(x, y)$ pixel (x, y) da imagem de saída com a regra “OU”
 $I_{ent1_bin}(x, y)$ pixel (x, y) da imagem de entrada 1 binária
 $I_{ent2_bin}(x, y)$ pixel (x, y) da imagem de entrada 2 binária

$$I_E(x, y) = I_{ent1_bin}(x, y) \cap I_{ent2_bin}(x, y) \quad (11)$$

sendo,

$I_E(x, y)$	pixel (x, y) da imagem de saída com a regra “OU”
$I_{ent1_bin}(x, y)$	pixel (x, y) da imagem de entrada 1 binária
$I_{ent2_bin}(x, y)$	pixel (x, y) da imagem de entrada 2 binária

2.3.3 PCA

A análise por componentes principais é um método estatístico que pode ser usado para identificar características comuns em imagens geradas em tempos distintos ou por diferentes equipamentos. Uma das formas de se trabalhar com esse método é a análise dos autovalores e dos autovetores da matriz de covariância gerada a partir de um conjunto de dados, determinando padrões nessas representações. A partir disso, é possível reduzir as dimensões dos dados ao eliminar informações redundantes e de ruídos, mantendo os elementos mais relevantes. Dessa forma, o processamento e o armazenamento dos dados podem ser feitos de forma mais eficiente, sem perda significativa de informações (MITCHELL, 2010).

Considerando duas imagens de entrada A e B representadas por matrizes com M linhas e N colunas, o primeiro passo para realizar a análise por componentes principais é rearranjar cada uma das imagens em vetores do tipo coluna, cujo número de posições será igual ao produto MN . Em seguida, o cálculo da covariância entre os vetores das imagens A e B é realizado, conforme descrito na equação (12) (LOMAX et al., 2012).

$$\text{cov}(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)(B_i - \mu_B) \quad (12)$$

sendo,

A_i	valor do vetor da imagem A na posição i ;
B_i	valor do vetor da imagem B na posição i ;
μ_A	média do vetor da imagem A ;
μ_B	média do vetor da imagem B ;
N	número de posições em cada vetor.

A matriz de covariância M_C dos vetores das imagens A e B é formada pelo cálculo da covariância relativo a todas as combinações possíveis dentro do conjunto de dados. A equação (13) apresenta o formato da matriz de covariância M_C (JOLLIFFE, 2002).

$$M_C = \begin{pmatrix} \text{cov}(A, A) & \text{cov}(A, B) \\ \text{cov}(B, A) & \text{cov}(B, B) \end{pmatrix} \quad (13)$$

O passo seguinte é representado pelo cálculo das matrizes de autovalores (D) e de autovetores (V) da matriz de covariância M_C . A partir dos valores de D e de V , é possível determinar a componente principal por meio da seleção do autovetor (V_{CP}) associado ao maior autovalor (JOLLIFFE, 2002; SAFF, 2015).

Após a definição da componente principal, o processo de fusão das imagens A e B pode ser feito por meio de uma média ponderada dos valores do autovetor V_{CP} . Ao final dessa operação, a matriz de saída M_{PCA} é obtida, conforme apresentado na equação (14).

$$M_{PCA} = \frac{V_{CP}(1)}{V_{CP}(1) + V_{CP}(2)} I_A + \frac{V_{CP}(2)}{V_{CP}(1) + V_{CP}(2)} I_B \quad (14)$$

sendo,

- $V_{CP}(1)$ valor do vetor V_{CP} na posição 1;
- $V_{CP}(2)$ valor do vetor V_{CP} na posição 2;
- I_A matriz de pixels da imagem A ;
- I_B matriz de pixels da imagem B .

Por fim, a matriz M_{PCA} é convertida em uma imagem, a qual representa o resultado da fusão das imagens A e B .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

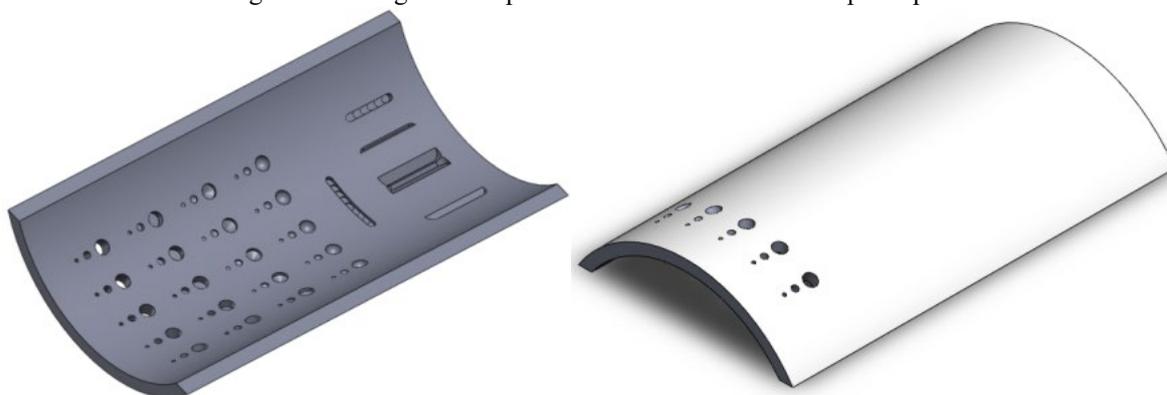
O capítulo três apresenta os recursos experimentais que foram empregados durante o trabalho de doutorado. Na seção 3.1, as características do corpo de prova que foi confeccionado especialmente para este projeto de doutorado são descritas. Em seguida, na seção 3.2, o sistema de medição empregado para os ensaios com a técnica PE é apresentado. E, por fim, na seção 3.3, realiza-se uma caracterização da bancada de ensaios utilizada para a avaliação do corpo de prova por meio da técnica VA.

3.1 CORPO DE PROVA

Ao longo deste trabalho de doutorado, ensaios foram realizados em uma peça metálica que reproduz uma seção de um duto empregado na indústria de petróleo e gás. Dessa forma, criou-se a possibilidade de avaliar e comparar o desempenho das técnicas de ultrassom PE e VA em uma condição que seja ao mesmo tempo representativa dos defeitos reais, bem caracterizada dimensionalmente e reproduzível em laboratório.

Por esse motivo, um corpo de prova foi confeccionado baseado na peça padrão apresentada por Melo (2012). No caso desta tese de doutorado, o objeto é constituído de aço comum, com as seguintes dimensões: 250 mm de comprimento, 7,11 mm de espessura e 76 mm de raio interno. Além disso, orifícios de diferentes formas geométricas conhecidas foram usinados na superfície interna da peça, com o objetivo de simular descontinuidades presentes em dutos reais avariados. A figura 21 apresenta uma visão das superfícies interna e externa do corpo de prova projetado no software SolidWorks.

Figura 21 - Imagens da superfície interna e externa do corpo de prova



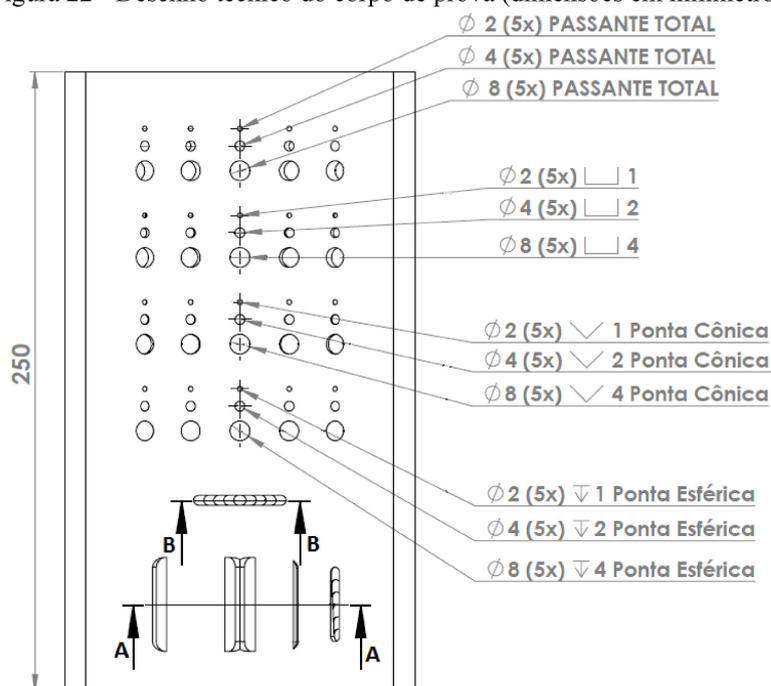
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação às características dos orifícios localizados na superfície interna, dois tipos de descontinuidades foram usinados no corpo de prova. No que concerne ao primeiro tipo, há

quatro conjuntos de cavidades com diferentes formatos de base: passante, plana, cônica e esférica. Além disso, cada conjunto possui três fileiras de discontinuidades que apresentam diferentes dimensões (largura x profundidade): 2 mm x 1 mm (cavidade pequena); 4 mm x 2 mm (cavidade média); 8 mm x 4 mm (cavidade grande). Quanto ao segundo tipo de discontinuidades, usinaram-se dois rebaixos incrementais com diferentes orientações, bem como três vincos com distintas dimensões.

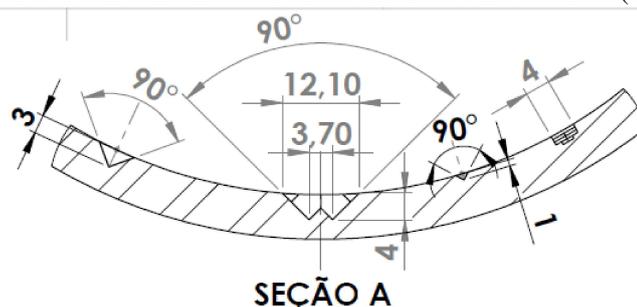
Na figura 22 é apresentado o desenho técnico da peça metálica, ilustrando o posicionamento de todas as discontinuidades presentes, além dos valores das dimensões das cavidades descritas no parágrafo anterior. Ademais, mais detalhes relacionados aos rebaixos incrementais e aos vincos podem ser vistos por meio das figuras 23 e 24, as quais representam cortes transversais denominados A e B na figura 22.

Figura 22 - Desenho técnico do corpo de prova (dimensões em milímetros)



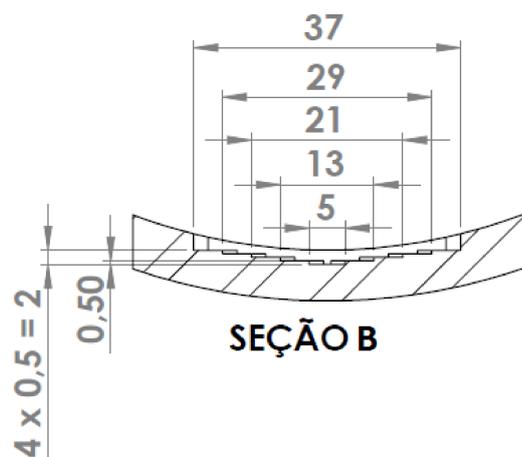
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Corte transversal A com dimensões de vincos e rebaixos incrementais (dimensões em milímetros)



Fonte: Elaborado pelo autor.

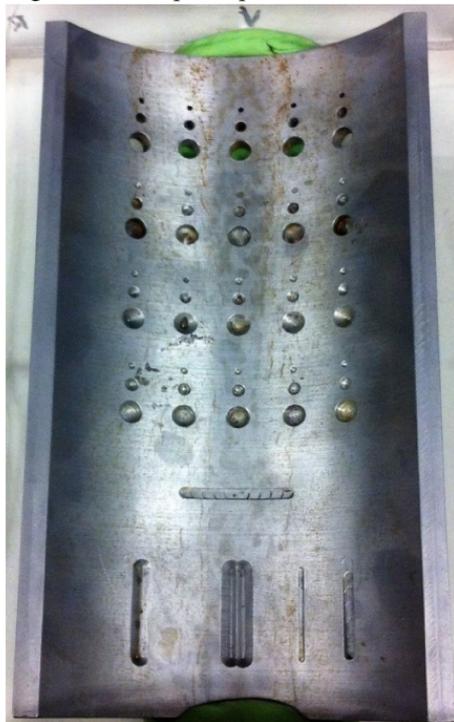
Figura 24 - Corte transversal B com dimensões de vincos e rebaixos incrementais (dimensões em milímetros)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, a figura 25 apresenta a imagem do corpo de prova já confeccionado, de acordo com o desenho técnico ilustrado na figura 22.

Figura 25 - Corpo de prova confeccionado



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 BANCADA DE ENSAIOS PARA A TÉCNICA PE

Durante o estágio doutoral realizado no exterior, mais precisamente no instituto Helmholtz da RWTH Aachen University – Alemanha, a técnica de ultrassom PE foi avaliada

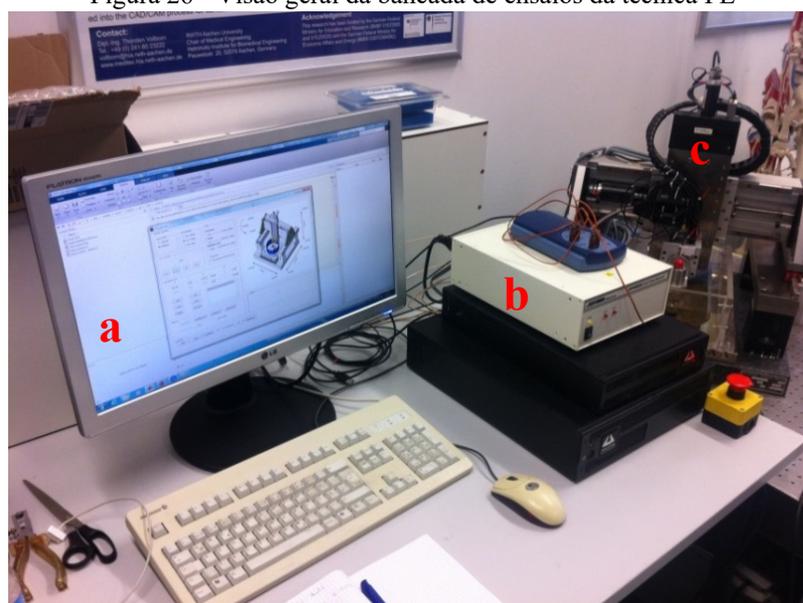
com o intuito de analisar as discontinuidades presentes no corpo de prova confeccionado. A bancada de ensaios empregada durante as medições foi desenvolvida pelo próprio instituto e é constituída pelos seguintes componentes:

- tanque preenchido com água³;
- transdutor focalizado de ultrassom Olympus SU/RM U8424004 com distância focal de 13 mm, resolução axial de 0,65 mm, resolução lateral de 0,05 mm e frequência central de 75 MHz (OLYMPUS, 2020a);
- sistema mecânico de posicionamento do transdutor com resolução de $(5 \pm 2) \mu\text{m}$;
- controlador de movimento e posicionamento Galil Motion Control DMC2280 (GMC, 2020);
- sistema pulsador receptor de pulsos elétricos JSR Ultrasonics DPR 500 com largura de banda de 5 MHz até 500 MHz (JSR ULTRASONICS, 2020);
- sistema de aquisição de dados com resolução de 12 bits e frequência de aquisição de 400 MHz;
- aplicativo de controle de ensaios e análise de dados desenvolvido em Matlab.

A figura 26 apresenta uma visão geral do sistema de medição utilizado para os ensaios, na qual o software desenvolvido em MATLAB, o dispositivo pulsador/receptor e o sistema mecânico de posicionamento do transdutor podem ser vistos. Na figura 27 é possível observar uma visão mais detalhada da parte mecânica da bancada. Tanto o corpo de prova quanto o transdutor de ultrassom são posicionados dentro do tanque preenchido com água, de forma que o transdutor é posteriormente deslocado para fazer a varredura da peça. A movimentação é realizada por meio de um sistema mecânico com três graus de liberdade, cujo posicionamento é controlado pelo equipamento GMC-2280. O referido sistema mecânico possui guias e fusos de esferas, sendo esse último acoplado a três motores de passo, o que possibilita posicionar o transdutor com resolução de $(5 \pm 2) \mu\text{m}$ (HABOR et al., 2013).

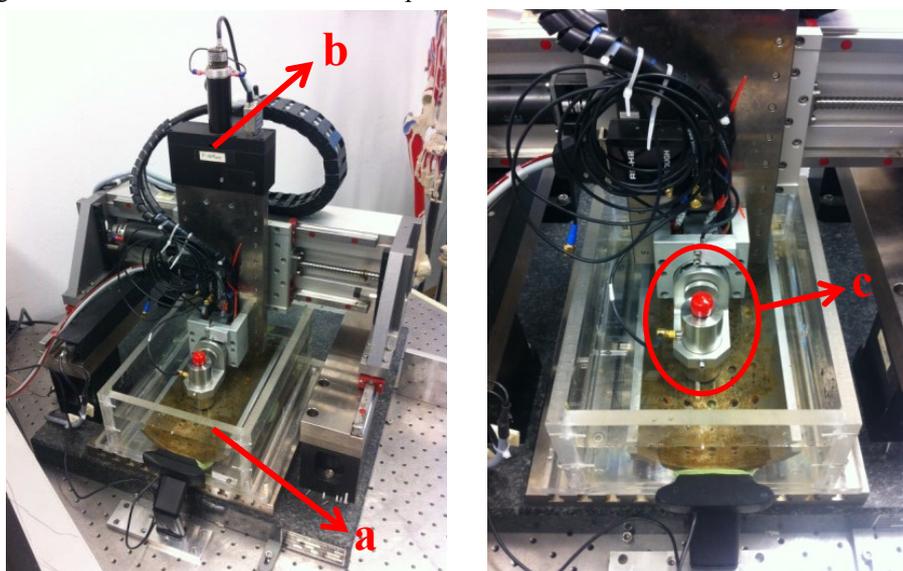
³ A temperatura da água durante a realização dos ensaios era de 25° C.

Figura 26 - Visão geral da bancada de ensaios da técnica PE



- Legenda:
- a software Matlab desenvolvido;
 - b sistema gerador e receptor JSR Ultrasonics DPR 500;
 - c parte mecânica da bancada de ensaios.
- Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Visão com mais detalhes da parte mecânica da bancada de ensaios da técnica PE



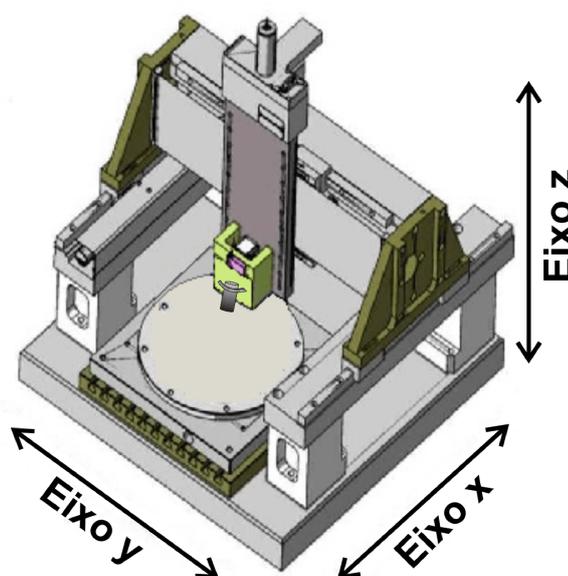
- Legenda:
- a tanque preenchido com água;
 - b sistema mecânico de posicionamento do transdutor;
 - c transdutor de ultrassom.
- Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o início das atividades com a bancada de ensaios, o procedimento adotado foi posicionar o corpo de prova em um tanque de acrílico com dimensões apropriadas, o qual teve seu interior preenchido com água desgaseificada. O transdutor de ultrassom foi, então,

posicionado em um ponto inicial pré-determinado por meio do sistema mecânico, cujas coordenadas puderam ser definidas por uma interface existente no software da bancada.

O passo seguinte ao posicionamento inicial do transdutor foi configurar o processo de varredura, com o intuito de definir qual a região da peça metálica a ser inspecionada, de acordo com o sistema de coordenadas apresentado na figura 28.

Figura 28 - Sistema de coordenadas para movimentação do transdutor de ultrassom nos ensaios com a técnica PE



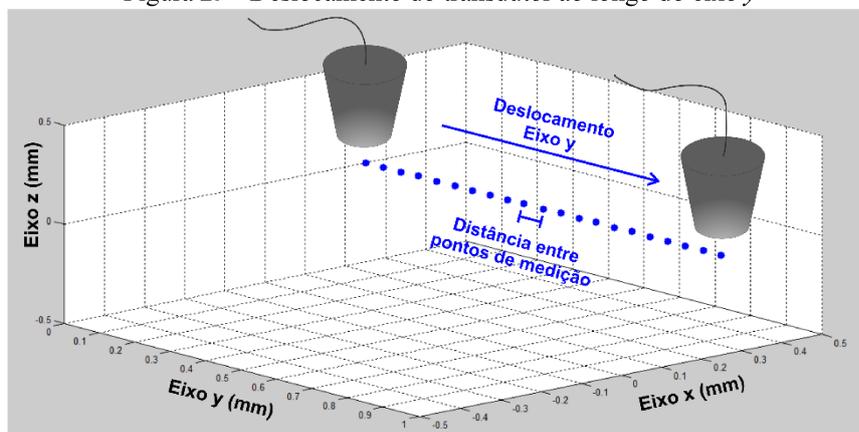
Fonte: Elaborado pelo autor.

A movimentação do transdutor ocorreu, primeiramente, em uma determinada região do plano (x, y) , cujo deslocamento ao longo do eixo y foi estipulado pelo número de pontos de medição e pela distância entre eles (vide Figura 29). Por sua vez, o deslocamento no eixo x foi estabelecido pelo número de sequências de pontos de medição e pela distância entre as mesmas, conforme ilustrado por meio da figura 30. Os valores das distâncias entre os pontos de medição ao longo do eixo y e entre as sequências de pontos no eixo x foram definidos em 0,05 mm e 0,10 mm, respectivamente. Esses valores foram previamente configurados pela equipe responsável do laboratório e não puderam ser alterados durante os ensaios. Mesmo não utilizando a mínima resolução do sistema mecânico de posicionamento da bancada, os valores de distanciamento se mostraram satisfatórios para avaliar as dimensões das descontinuidades presentes no corpo de prova.

Ao final de cada inspeção de uma certa região do plano (x, y) , o transdutor de ultrassom foi deslocado no eixo z de uma dada distância estipulada pelo usuário, de acordo com a imagem apresentada pela figura 31. Para que fosse possível inspecionar a espessura do corpo de prova em sua totalidade dentro de um tempo de ensaios aceitável, o valor do

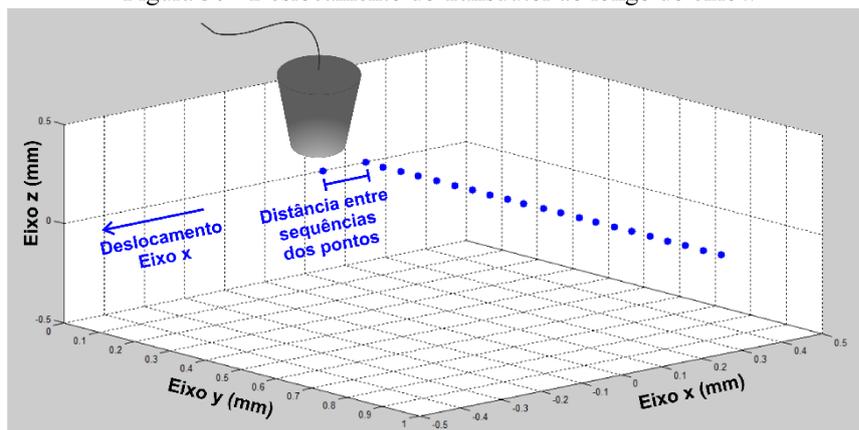
deslocamento no eixo z foi definido em 0,5 mm. É importante notar que a resolução axial do transdutor era insuficiente para realização dos ensaios em uma única varredura no plano (x, y) (MARCIÓ et al., 2019).

Figura 29 - Deslocamento do transdutor ao longo do eixo y



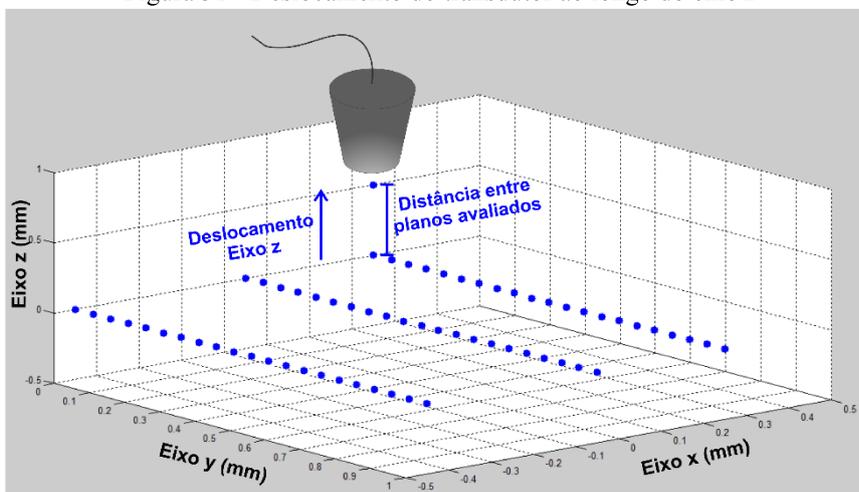
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Deslocamento do transdutor ao longo do eixo x



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Deslocamento do transdutor ao longo do eixo z



Fonte: Elaborado pelo autor.

No momento em que o transdutor se encontrava em um ponto de medição, o sistema DPR 500 era acionado, com o objetivo de excitar o elemento piezelétrico. Em função disso, o transdutor emitia ondas de ultrassom em direção à peça metálica e recepcionava as que eram refletidas pela superfície interna da peça e, em certos casos, pela superfície externa também.

A sincronização entre o ensaio de ultrassom no ponto de medição e a movimentação do transdutor para o referido local era realizada por meio do controlador GMC-2280. Dessa forma, possibilitou-se associar o resultado de cada ensaio de ultrassom com a posição do transdutor no respectivo ponto de medição. Na sequência de cada ensaio, os dados referentes ao sinal elétrico convertido das ondas refletidas eram gravados juntamente com a posição do transdutor, o que criou a possibilidade de gerar uma imagem tridimensional do corpo de prova. Um aplicativo existente na própria bancada foi empregado para a configuração e controle dos equipamentos envolvidos durante os ensaios, bem como para a análise posterior dos dados salvos (MARCIÓ et al., 2019).

3.3 BANCADA DE ENSAIOS PARA A TÉCNICA VA

As medições com a técnica VA foram realizadas por meio de uma bancada de ensaios desenvolvida no Grupo de Inovação em Instrumentação Médica e Ultrassom da Universidade de São Paulo (GIIMUS-USP). A referida técnica foi avaliada com o objetivo de verificar a capacidade da mesma quanto à detecção, localização e dimensionamento das discontinuidades presentes no corpo de prova confeccionado, detalhado na seção 3.1. A bancada de ensaios utilizada nessa etapa é constituída pelos seguintes componentes:

- tanque preenchido com água desgaseificada com dimensões de 100 cm × 64 cm × 37 cm;
- sistema mecânico de posicionamento do corpo de prova com uma resolução de 12,5 μm ;
- dois geradores de funções Agilent modelo 332210A;
- amplificador de potência desenvolvido no próprio laboratório;
- transdutor de ultrassom confocal confeccionado no próprio laboratório com distância focal de 5 cm, resolução axial de 14,5 mm, resolução lateral de 1,7 mm e frequência central de 3,40 MHz (BAGGIO, 2011);
- hidrofone omnidirecional ITC modelo 6050C com intervalo de frequências de medição entre 0,03 kHz e 70 kHz e sensibilidade de -157 dB (referência de 1 V/ μPa);

- sistema de aquisição de dados National Instruments modelo PCI 5122 com resolução de 14 bits e frequência de aquisição máxima de 100 MHz;
- software desenvolvido em LabVIEW para o controle dos ensaios e para a análise dos dados medidos.

Um ponto a ser observado sobre as bancadas é a diferença em relação à frequência central dos transdutores de ultrassom das técnicas PE e VA, com valores de 75 MHz e 3,4 MHz, respectivamente. É importante destacar que esses dispositivos de ultrassom eram os únicos modelos disponíveis para ambas as técnicas no momento dos ensaios.

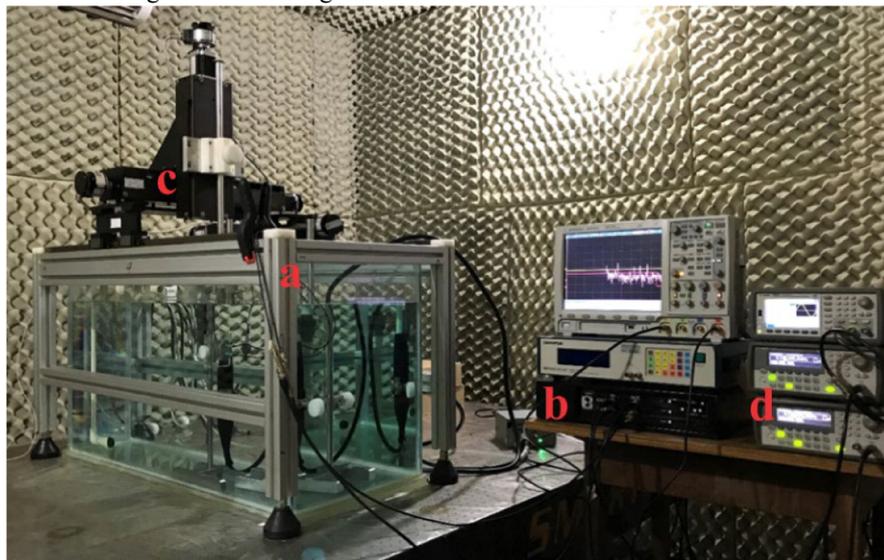
A figura 32 apresenta uma visão geral da bancada de ensaios utilizada para realizar as medições com a técnica VA. Na figura é possível ver o tanque preenchido com água degaseificada, o amplificador de potência e os dois geradores de funções. Além disso, a figura 33 mostra uma visão mais detalhada da parte interna do tanque, onde a peça metálica, o hidrofone e o transdutor confocal foram posicionados.

O procedimento adotado nos ensaios foi conduzir as medições em um tanque de dimensões adequadas e preenchido com água degaseificada, com intuito de proporcionar espaço adequado para movimentação do corpo de prova e estabelecer um bom acoplamento acústico. Com o auxílio de um dispositivo pulsador/receptor de ultrassom e de um osciloscópio, foi possível posicionar a superfície interna do corpo de prova no plano focal (x, y) do transdutor de ultrassom. A distância entre ambos foi determinada ao analisar o intervalo de tempo entre o feixe de ultrassom enviado e a recepção da onda refletida. O sistema mecânico da bancada foi empregado para movimentar a peça metálica ao longo do plano focal (x, y) do transdutor e, dessa forma, garantir que o respectivo emissor estivesse alinhado em pontos pré-estabelecidos da parte interna do corpo de prova. O espaçamento entre esses pontos foi definido como sendo igual 0,25 mm, cujo valor foi escolhido com o objetivo de proporcionar a identificação e caracterização dos defeitos presentes na peça dentro de um tempo de inspeção satisfatório (vide Figura 34). Como a bancada da técnica PE tinha a capacidade de realizar ensaios de forma mais rápida que a da VA, o sistema de posicionamento dessa última foi configurado para executar varreduras no plano (x, y) com um espaçamento de no mínimo 2,5 vezes maior se comparada à primeira.

Ao final da inspeção no plano focal (x, y) do transdutor, o corpo de prova não foi deslocado ao longo do eixo z para realizar ensaios em diferentes profundidades. Uma das razões para isso se deve ao fato de que as ondas de ultrassom em megahertz emitidas pelo transdutor sofrem grande atenuação em virtude da elevada diferença de impedância entre o

meio de acoplamento e o metal (KAMIMURA, 2011). Além disso, o transdutor possuía uma resolução axial ampla o suficiente para que a força de radiação fosse exercida no ponto mais profundo das descontinuidades, mesmo com o plano focal posicionado na superfície interna da peça metálica. Dessa forma, foi possível gerar uma imagem da superfície interna do corpo de prova realizando ensaios em um único plano de varredura.

Figura 32 - Visão geral da bancada de ensaios da técnica VA

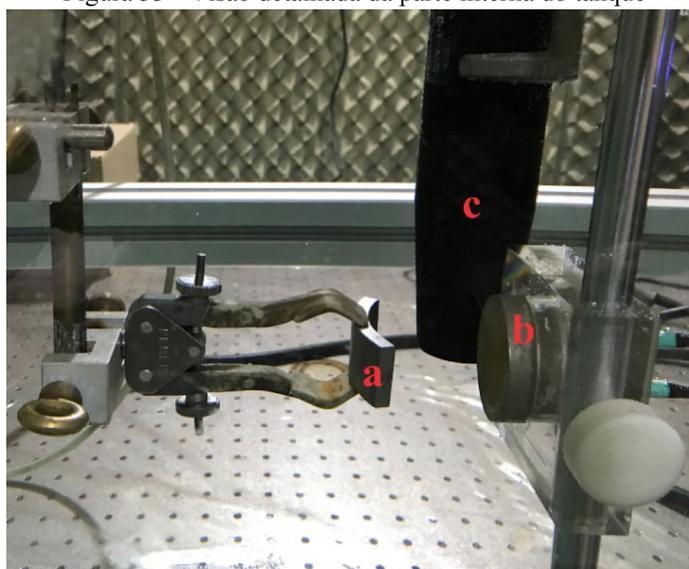


Legenda:

- a tanque preenchido com água desgaseificada;
- b amplificador de potência;
- c sistema mecânico de posicionamento do corpo de prova;
- d geradores de funções.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Visão detalhada da parte interna do tanque

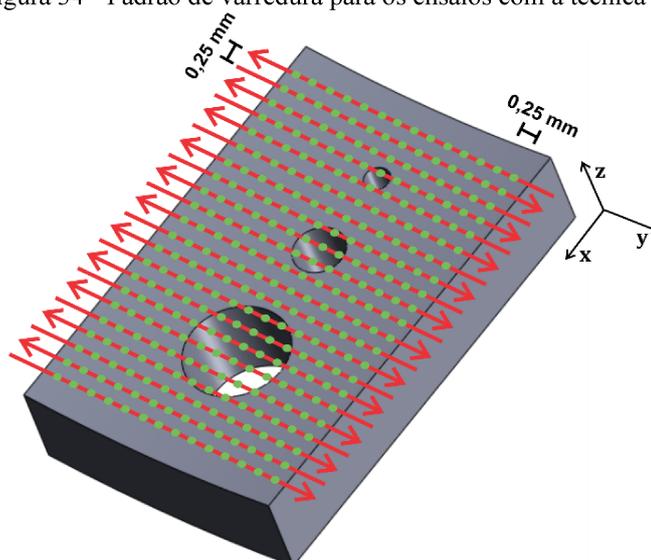


Legenda:

- a corpo de prova;
- b transdutor confocal;
- c hidrofone.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Padrão de varredura para os ensaios com a técnica VA



Fonte: Elaborado pelo autor.

O transdutor confocal utilizado nos ensaios era constituído por dois elementos cerâmicos, um disco na parte central e um anel externo, os quais foram individualmente excitados por cada um dos geradores de funções presentes na bancada. Os respectivos equipamentos foram configurados para gerar sinais com formato senoidal e com frequências ligeiramente diferentes, $\omega_1 = \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}$ e $\omega_2 = \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}$, sendo $\Delta\omega$ a frequência de modulação escolhida e ω_0 a frequência central do transdutor de ultrassom ($\omega_0 = 3,4$ MHz). Além disso, os sinais de saída dos geradores foram produzidos no modo *tone-burst*, isto é, durante um intervalo de tempo Δt , cujo valor corresponde a um determinado número de ciclos completos da frequência central ω_0 . Para este trabalho de doutorado, a frequência de modulação ($\Delta\omega$) e o número de ciclos foram definidos em 60 kHz e 1000, respectivamente, após ensaios preliminares com a peça metálica constatarem um melhor contraste na imagem gerada quando tal frequência e número de ciclos foram empregados.

Em vez do tradicional modo de excitação *continuous-wave*⁴, o modo *tone-burst* foi escolhido com o intuito de atenuar os efeitos causados por dois fenômenos gerados durante os ensaios: ondas de ultrassom estacionárias; e reverberações (MITRI et al., 2009). O primeiro fenômeno é produzido quando inúmeras reflexões do feixe incidente de ultrassom ocorrem entre o objeto em teste e a superfície do transdutor confocal (MITRI et al., 2005). Já as reverberações são produzidas quando ondas acústicas geradas devido à interação entre os

⁴ No modo *continuous-wave*, os geradores de funções produzem sinais de saída continuamente durante todo o processo de ensaio do corpo de prova (FATEMI et al., 1999).

feixes de ultrassom focalizados e o corpo de prova sofrem múltiplas reflexões nas paredes do tanque, na superfície do próprio objeto ou em outras estruturas antes de alcançarem o hidrofone (URBAN et al., 2011). Ambos os fenômenos têm como consequência interferências construtivas e destrutivas das ondas de ultrassom que se propagam no meio onde os ensaios estão sendo feitos. Dessa forma, tais fenômenos têm o potencial de reduzir o desempenho da VA ao gerar artefatos na imagem resultante, que nada mais são do que uma variação gradual de intensidade dos pixels, formando uma série de faixas claras e escuras que afetam significativamente o contraste da imagem e, conseqüentemente, a sua qualidade (MITRI et al., 2009; URBAN et al., 2011).

Vale ressaltar que as saídas de ambos os geradores foram sincronizadas por um terceiro equipamento Agilent modelo 33522A e, posteriormente, amplificadas com uso do dispositivo desenvolvido no laboratório. A resposta do corpo de prova à força de radiação acústica incidente foi medida pelo hidrofone, cujo sinal de saída era adquirido por meio da placa de aquisição de dados com uma frequência de amostragem de 10 MHz.

A bancada de ensaios disponibilizava um aplicativo para a configuração e controle dos equipamentos envolvidos durante os ensaios. Além disso, um programa em LabVIEW foi desenvolvido com o intuito de processar os dados adquiridos pela placa de aquisição e obter os valores de magnitude na frequência de modulação. Para isso, foram utilizadas algumas ferramentas de processamento de sinais disponíveis no software, como as janelas do tipo retangular e Hanning, para extrair apenas o sinal de interesse dentre os dados adquiridos, e a transformada rápida de Fourier, para determinar a magnitude na frequência $\Delta\omega$ por meio da análise em frequência do sinal janelado. A partir desses valores de magnitude, uma matriz de pixels foi construída, gerando uma imagem associada a uma determinada região da peça avaliada durante as medições.

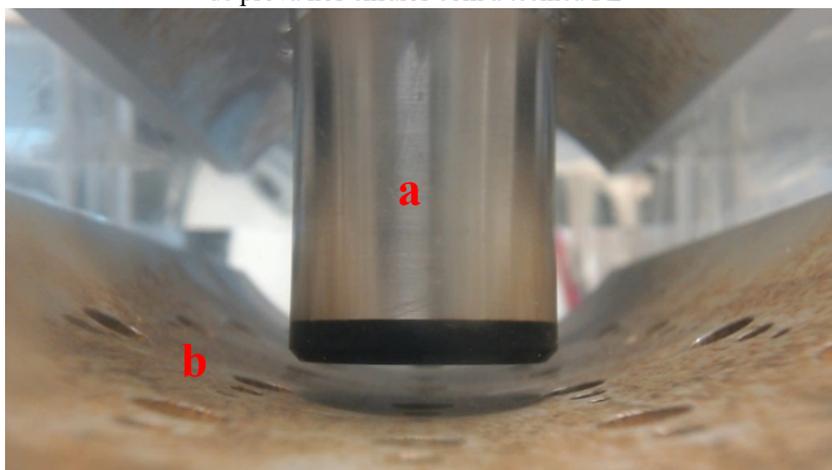
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os resultados das atividades realizadas neste trabalho de doutorado. Na seção 4.1, a análise qualitativa dos resultados das medições com a técnica PE é apresentada. Em seguida, na seção 4.2, a análise qualitativa é feita para os resultados obtidos com a VA. Por fim, uma análise quantitativa é apresentada na seção 4.3, comparando os valores dos diâmetros dos orifícios obtidos nas imagens criadas por ambas as técnicas e o valor verdadeiro convencional dessas dimensões na peça metálica.

4.1 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A TÉCNICA PE

Os ensaios com a técnica PE foram realizados empregando a bancada descrita na seção 3.2. Para o início das atividades, decidiu-se realizar a inspeção do corpo de prova em diferentes etapas, devido a duas limitações apresentadas pela bancada frente às características da peça avaliada. A primeira delas se refere à impossibilidade de o sistema mecânico posicionar o transdutor de ultrassom em todos os pontos de medição desejados, sem que o corpo de prova fosse movimentado ao menos uma vez. Outra limitação apresentada foi a necessidade de posicionar o transdutor de ultrassom muito próximo à superfície interna da peça, em razão da distância focal do elemento piezolétrico. Desse modo, houve uma incompatibilidade entre as dimensões do transdutor de ultrassom e o formato do corpo de prova, o que tornou necessário inspecionar regiões com áreas menores com o propósito de evitar uma colisão entre ambos. A figura 35 ilustra a incompatibilidade descrita.

Figura 35 - Incompatibilidade entre as dimensões do transdutor de ultrassom em relação ao formato do corpo de prova nos ensaios com a técnica PE

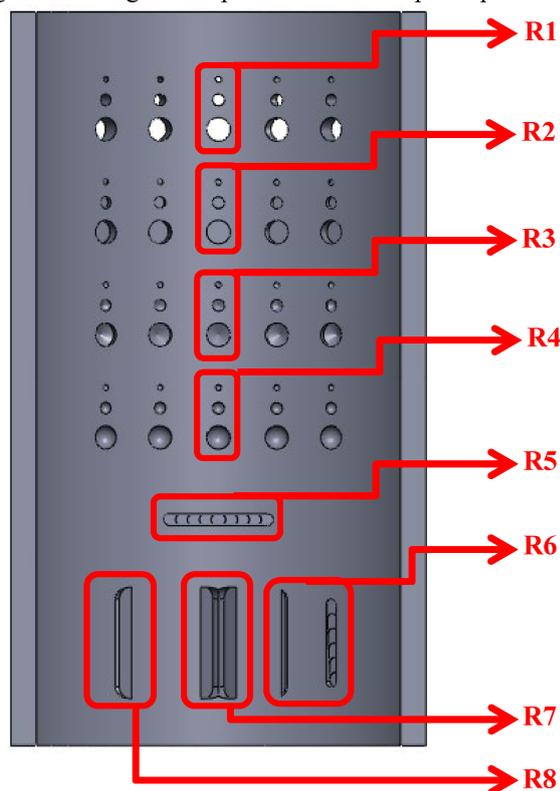


Legenda: a transdutor de ultrassom;
 b corpo de prova.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em vista disso, diferentes inspeções foram realizadas em determinadas regiões da superfície interna do corpo de prova, as quais foram agrupadas pelo fato de conterem descontinuidades com características semelhantes ou pelo fato de estarem fisicamente próximas. A figura 36 apresenta as referidas regiões inspecionadas e as suas respectivas descontinuidades.

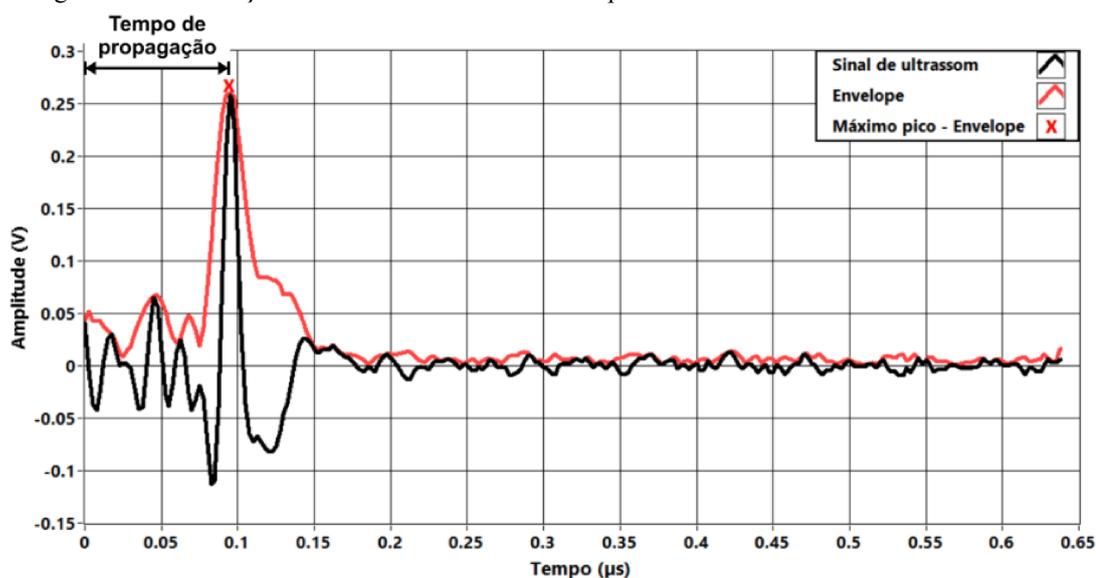
Figura 36 - Regiões inspecionadas do corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente às inspeções das regiões apresentadas na figura 36, realizou-se uma análise dos dados adquiridos por meio de ferramentas de processamento digital de sinais, com o intuito de extrair informações dos ensaios realizados com a técnica PE. Para cada ponto de medição em uma determinada região inspecionada, calculou-se o envelope do sinal elétrico obtido durante o ensaio com uso da transformada de Hilbert (PROAKIS et al., 1996). A partir disso, foi possível identificar o máximo pico existente no referido sinal, cuja posição pôde ser associada ao tempo de propagação da onda de ultrassom emitida pelo transdutor e refletida pela superfície interna ou externa da peça. A figura 37 ilustra o exemplo de um sinal obtido pelo ensaio de ultrassom em um determinado ponto de medição, o respectivo envelope, o máximo pico detectado e o tempo de propagação da onda.

Figura 37 - Informações extraídas de um sinal obtido pelo ensaio de ultrassom com a técnica PE



Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que o processo de aquisição das ondas de ultrassom que sofreram reflexão não foi iniciado no mesmo instante em que houve a emissão das ondas pelo transdutor, mas somente após um intervalo de tempo proporcional à distância focal desse dispositivo. Dessa forma, o tempo de propagação apresentado na figura 37 tem uma relação direta com a distância entre o plano de varredura (x, y) no momento do ensaio e o local de reflexão das ondas de ultrassom. O valor dessa distância foi calculado por meio da relação entre o tempo de propagação determinado e a velocidade das ondas de ultrassom no meio.

Ao final das medições, uma representação tridimensional da região inspecionada foi gerada. A posição de cada ponto no eixo z do espaço tridimensional foi definida levando em consideração a posição do plano de varredura e a distância entre esse plano e o local onde houve a reflexão das ondas de ultrassom.

Nas seções 4.1.1 a 4.1.5, é possível observar como o processo de varredura foi configurado, com o intuito de determinar o deslocamento do transdutor nos eixos (x, y, z), cujos valores equivalem ao comprimento, largura e altura da região a ser inspecionada, respectivamente. Ademais, são mostradas as representações tridimensionais geradas por meio das medições com a bancada de ensaios. Por fim, conclusões acerca da análise qualitativa dos resultados obtidos são apresentadas na seção 4.1.6.

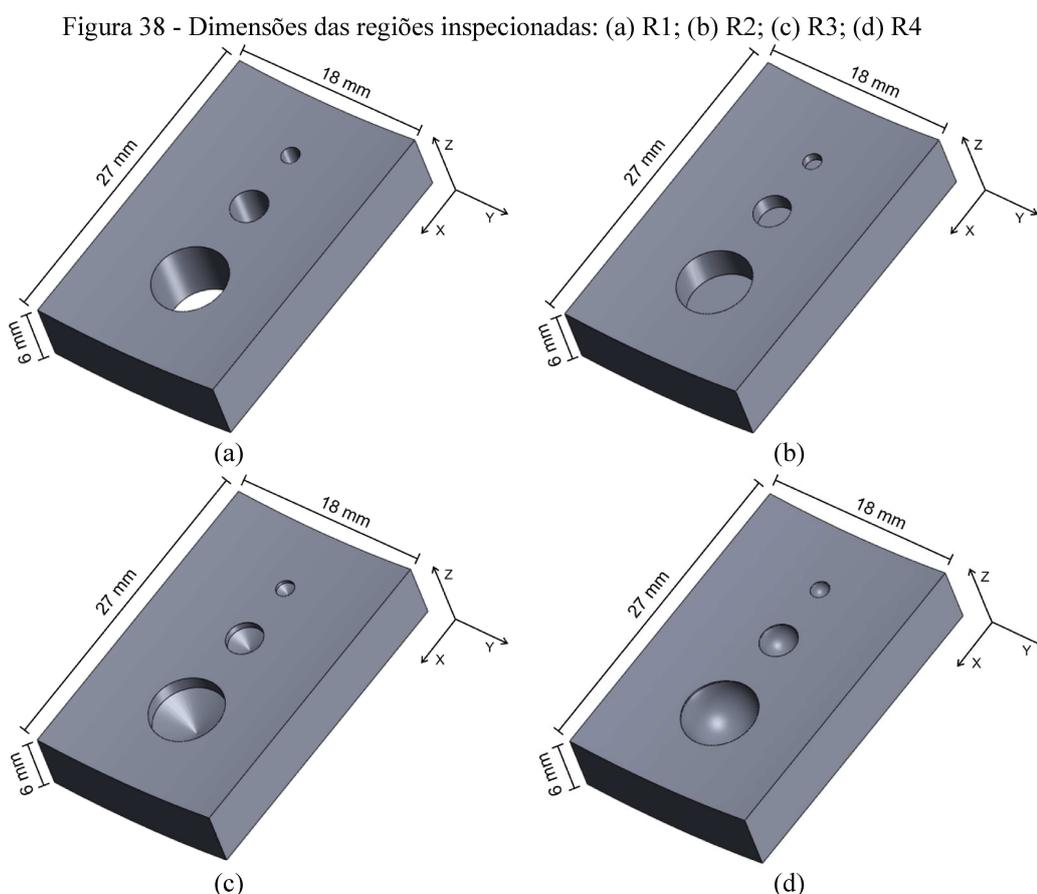
4.1.1 Regiões R1, R2, R3 e R4

Cada uma das regiões avaliadas nesta seção apresenta três discontinuidades de diferentes dimensões. Conforme descrição feita na seção 3.1, a primeira é constituída por

cavidades passantes, a segunda por cavidades com base plana, a terceira por cavidades com base cônica e a quarta por cavidades com base esférica. No que concerne à configuração do processo de varredura, definiram-se os seguintes valores para o deslocamento do transdutor:

- deslocamento no eixo (y): 360 pontos de medição com uma distância de 0,05 mm entre eles – deslocamento total de 18 mm;
- deslocamento no eixo (x): 270 sequências de pontos de medição com uma distância de 0,10 mm entre elas – deslocamento total de 27 mm;
- deslocamento no eixo (z): 12 planos (x, y) com uma distância de 0,5 mm entre eles – deslocamento total de 6 mm.

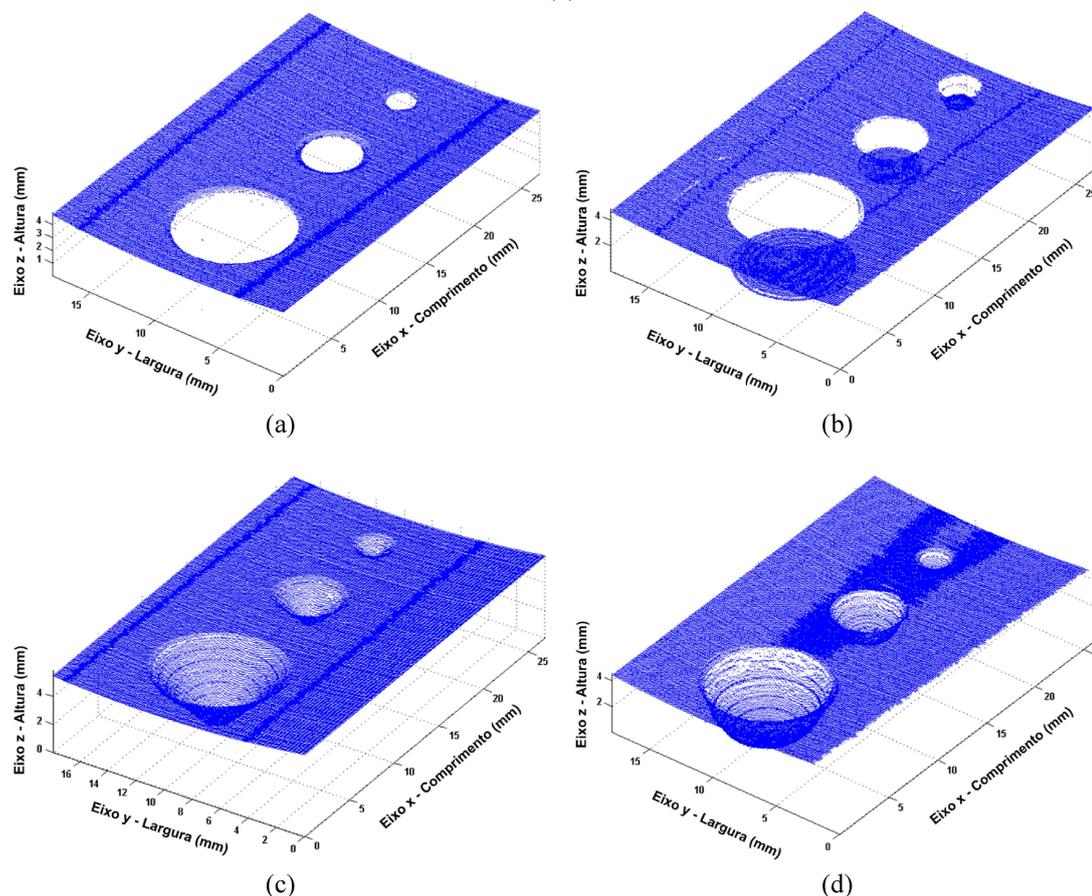
A partir dos valores determinados no processo de varredura, as dimensões das regiões R1, R2, R3 e R4 foram definidas como 27 mm de comprimento, 18 mm de largura e 6 mm de espessura, conforme pode ser visto na figura 38.



Fonte: Elaborado pelo autor.

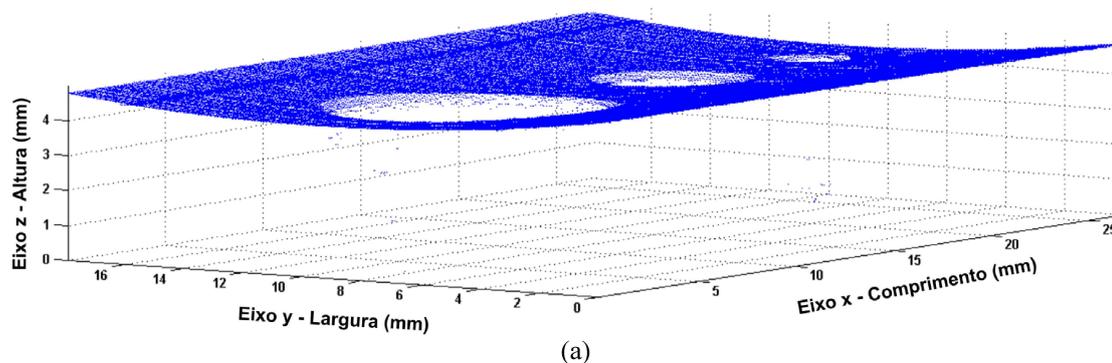
Ao término do processo de inspeção das respectivas regiões, representações tridimensionais foram geradas por meio dos dados obtidos, conforme relatado na seção 4.1. As figuras 39 e 40 ilustram as representações tridimensionais das regiões inspecionadas.

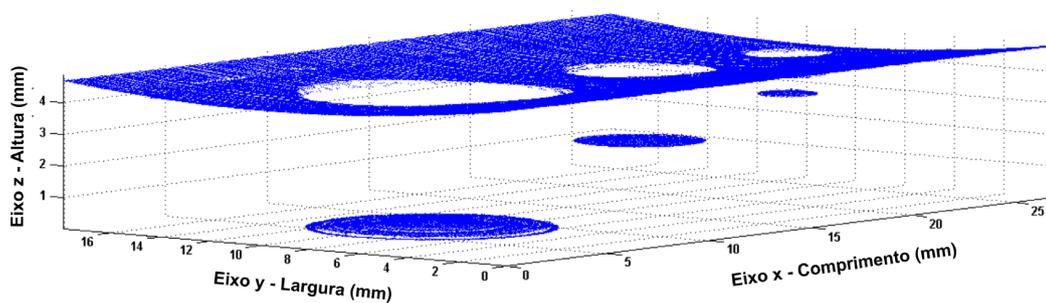
Figura 39 - Representações tridimensionais das regiões inspecionadas usando a técnica PE: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4



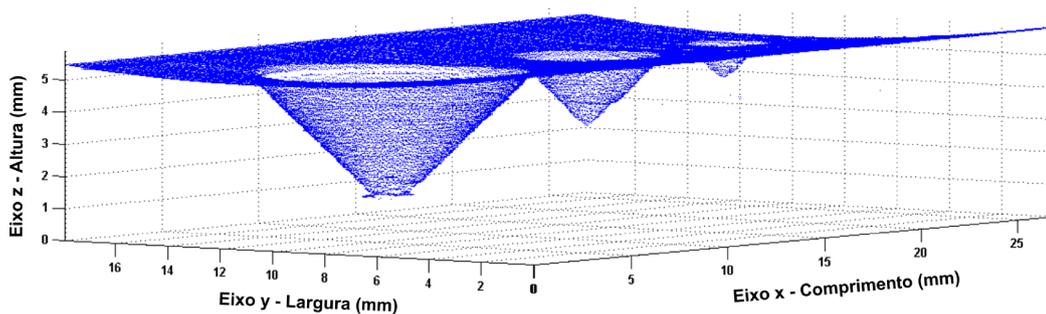
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Representações tridimensionais das regiões inspecionadas usando a técnica PE em diferente perspectiva: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4

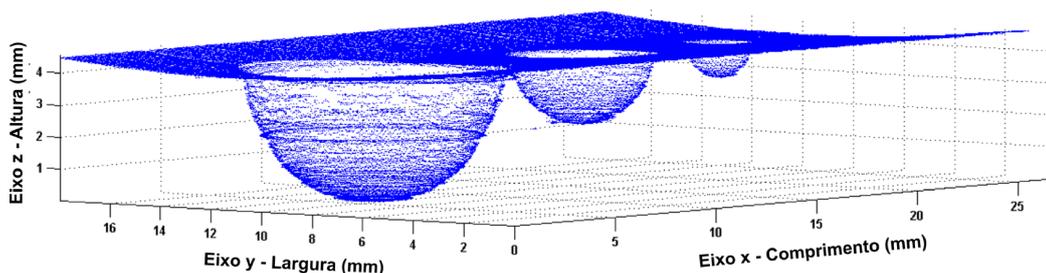




(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pelo autor.

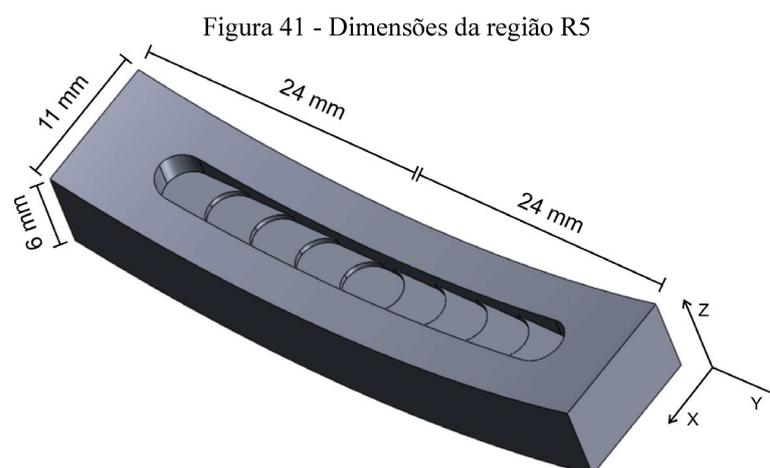
4.1.2 Região R5

A região R5 do corpo de prova é composta por uma descontinuidade com formato de rebaixos incrementais, conforme descrição feita na seção 3.1. No que concerne à configuração do processo de varredura, houve a necessidade de realizar a inspeção em duas etapas, devido à impossibilidade de deslocar o transdutor por toda a largura da descontinuidade. Dessa forma, definiram-se os seguintes valores para o deslocamento do transdutor, os quais foram idênticos em ambas as etapas:

- deslocamento no eixo (y): 480 pontos de medição com uma distância de 0,05 mm entre eles – deslocamento total de 24 mm;
- deslocamento no eixo (x): 110 sequências de pontos de medição com uma distância de 0,10 mm entre elas – deslocamento total de 11 mm;

- deslocamento no eixo (z): 12 planos (x, y) com uma distância de 0,5 mm entre eles – deslocamento total de 6 mm.

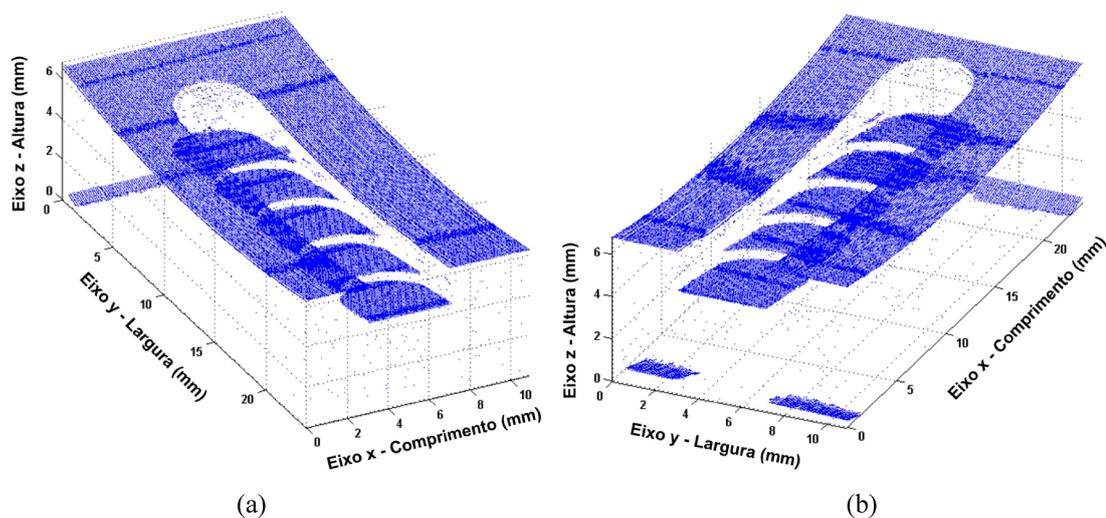
A partir dos valores determinados no processo de varredura, as dimensões da região R5 foram definidas como 48 mm de comprimento (24 mm para cada etapa), 11 mm de largura e 6 mm de espessura (Figura 41).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao término do processo de inspeção da região R5, duas representações tridimensionais foram geradas por meio da análise dos dados obtidos. A figura 42 apresenta em (a) e em (b) as representações tridimensionais referentes à parte esquerda e à parte direita da descontinuidade, respectivamente.

Figura 42 - Representações tridimensionais da região R5 geradas pela técnica PE: (a) parte esquerda; (b) parte direita



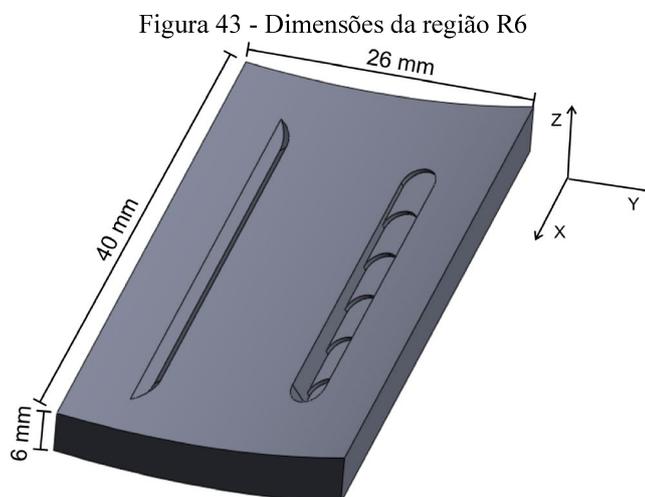
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Região R6

A região R6 do corpo de prova é composta por duas descontinuidades com diferentes formatos, sendo uma formada por rebaixos incrementais e outra por vincos. No que concerne à configuração do processo de varredura, definiram-se os seguintes valores para o deslocamento do transdutor:

- deslocamento no eixo (y): 520 pontos de medição com uma distância de 0,05 mm entre eles – deslocamento total de 26 mm;
- deslocamento no eixo (x): 400 sequências de pontos de medição com uma distância de 0,10 mm entre elas – deslocamento total de 40 mm;
- deslocamento no eixo (z): 12 planos (x, y) com uma distância de 0,5 mm entre eles – deslocamento total de 6 mm.

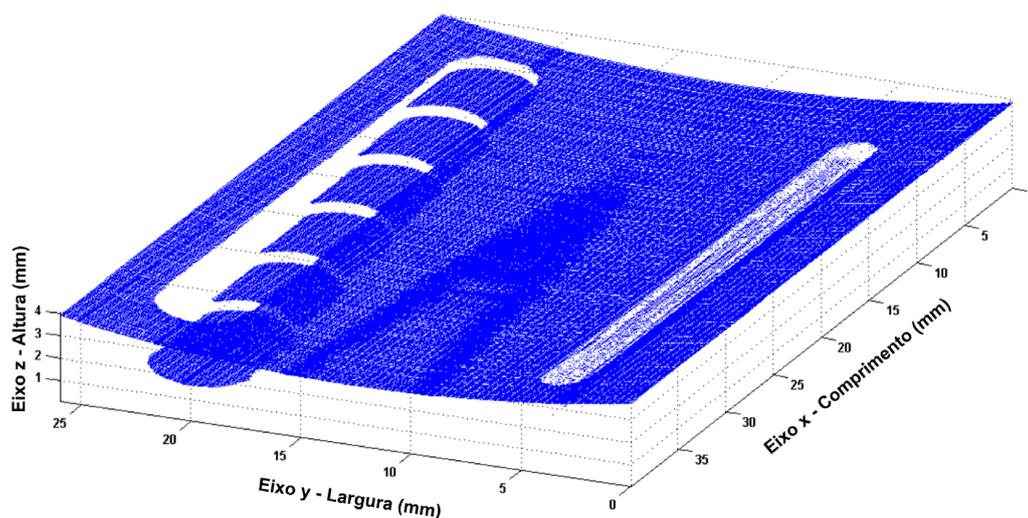
A partir dos valores determinados no processo de varredura, as dimensões da região R6 foram definidas como 40 mm de comprimento, 26 mm de largura e 6 mm de espessura, conforme pode ser visto na figura 43.



Fonte: Elaborado pelo autor.

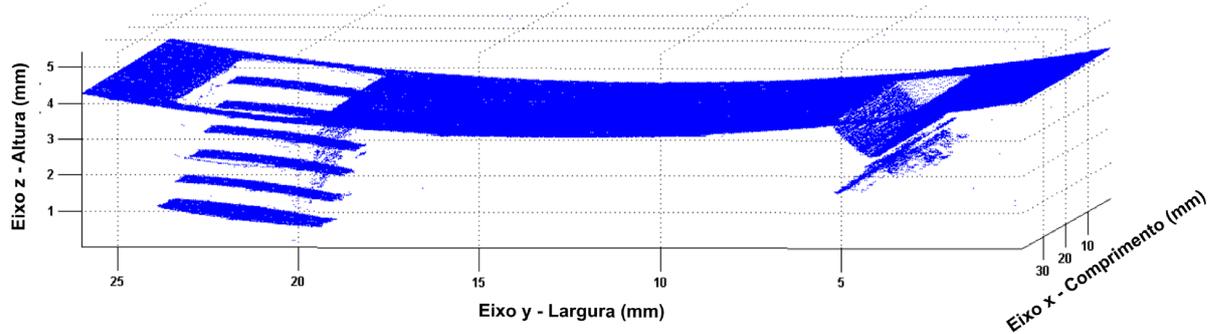
Ao término do processo de inspeção da região R6, uma representação tridimensional foi gerada por meio da análise dos dados obtidos. As figuras 44 e 45 ilustram a respectiva imagem tridimensional.

Figura 44 - Representação tridimensional da região R6 gerada pela técnica PE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 - Representação tridimensional da região R6 gerada pela técnica PE em diferente perspectiva



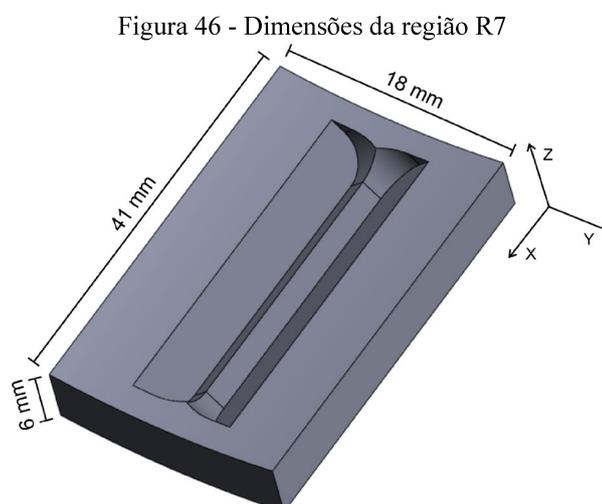
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4 Região R7

A região R7 do corpo de prova é composta por uma descontinuidade formada por dois vincos. No que concerne à configuração do processo de varredura, definiram-se os seguintes valores para o deslocamento do transdutor:

- deslocamento no eixo (y): 360 pontos de medição com uma distância de 0,05 mm entre eles – deslocamento total de 18 mm;
- deslocamento no eixo (x): 410 sequências de pontos de medição com uma distância de 0,10 mm entre elas – deslocamento total de 41 mm;
- deslocamento no eixo (z): 12 planos (x, y) com uma distância de 0,5 mm entre eles – deslocamento total de 6 mm.

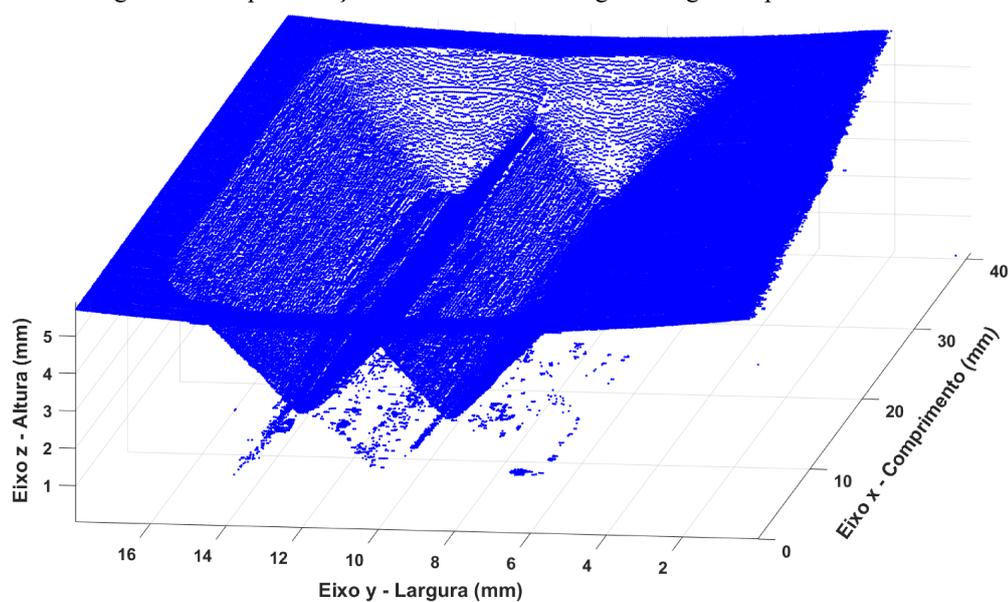
A partir dos valores determinados no processo de varredura, as dimensões da região R7 foram definidas como 41 mm de comprimento, 18 mm de largura e 6 mm de espessura (Figura 46).



Fonte: Elaborado pelo autor.

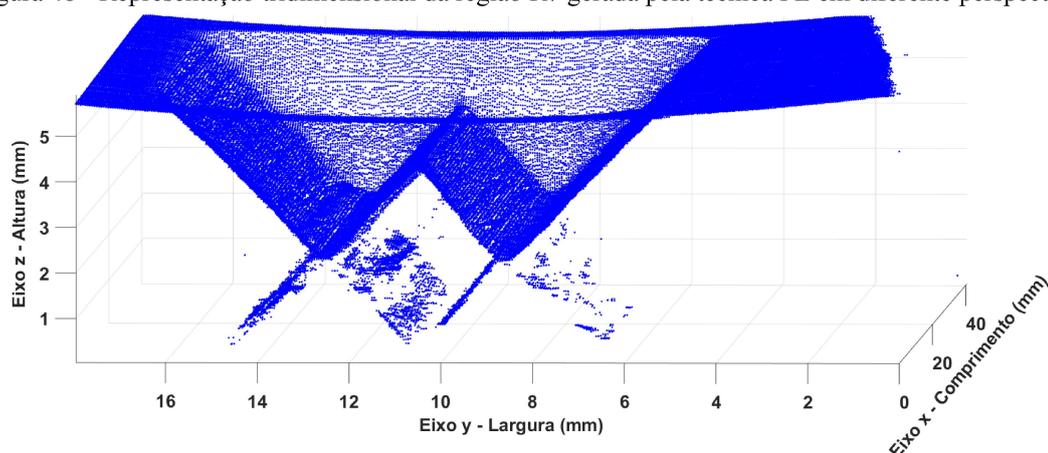
Ao término do processo de inspeção da região R7, uma representação tridimensional foi gerada por meio da análise dos dados obtidos. As figuras 47 e 48 ilustram a respectiva imagem tridimensional.

Figura 47 - Representação tridimensional da região R7 gerada pela técnica PE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 - Representação tridimensional da região R7 gerada pela técnica PE em diferente perspectiva



Fonte: Elaborado pelo autor.

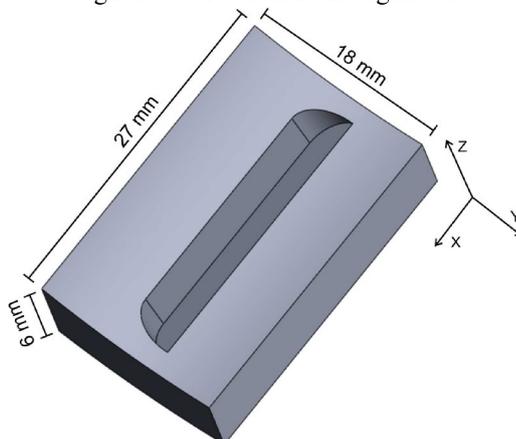
4.1.5 Região R8

A região R8 do corpo de prova é composta por uma descontinuidade com formato de um vinco. No que concerne à configuração do processo de varredura, definiram-se os seguintes valores para o deslocamento do transdutor:

- deslocamento no eixo (y): 360 pontos de medição com uma distância de 0,05 mm entre eles – deslocamento total de 18 mm;
- deslocamento no eixo (x): 400 sequências de pontos de medição com uma distância de 0,10 mm entre elas – deslocamento total de 40 mm;
- deslocamento no eixo (z): 12 planos (x, y) com uma distância de 0,5 mm entre eles – deslocamento total de 6 mm.

A partir dos valores determinados no processo de varredura, as dimensões da região R8 foram definidas como 40 mm de comprimento, 18 mm de largura e 6 mm de espessura, conforme pode ser visto na figura 49.

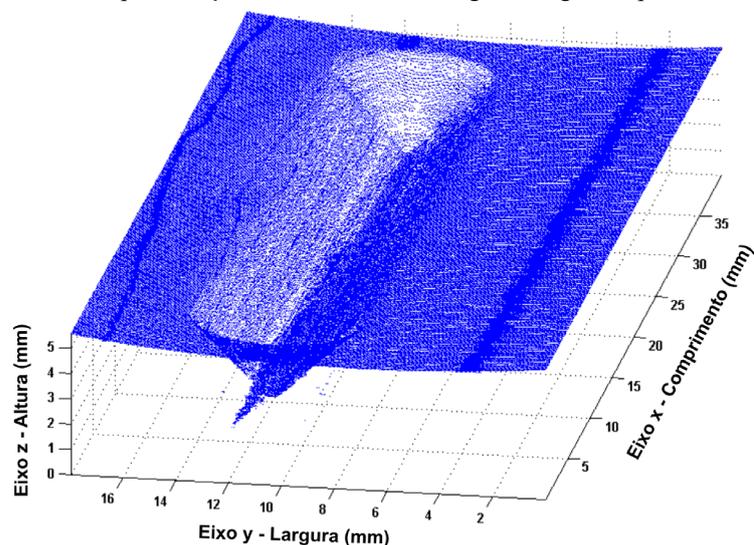
Figura 49 - Dimensões da região R8



Fonte: Elaborado pelo autor.

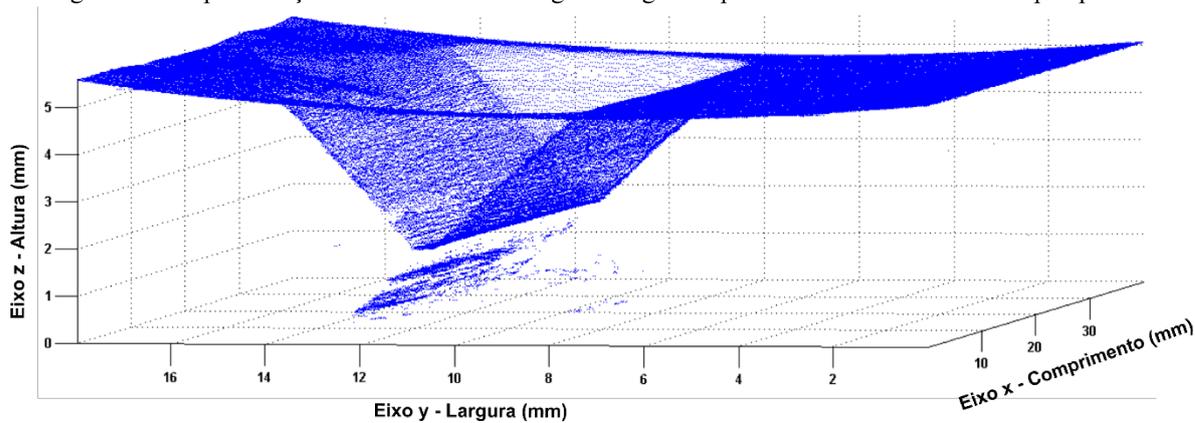
Ao término do processo de inspeção da região R8, uma representação tridimensional foi gerada. As figuras 50 e 51 ilustram a respectiva imagem tridimensional.

Figura 50 - Representação tridimensional da região R8 gerada pela técnica PE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Representação tridimensional da região R8 gerada pela técnica PE em diferente perspectiva

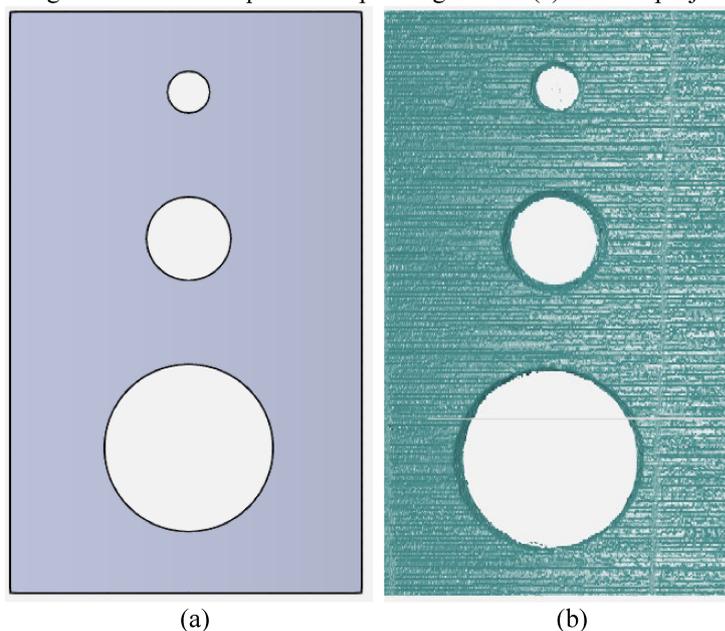


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.6 Conclusões referentes à análise qualitativa das representações tridimensionais geradas pela técnica PE

A partir da análise qualitativa das representações tridimensionais apresentadas nas seções anteriores, observa-se que foi possível identificar todas as descontinuidades presentes na superfície interna do corpo de prova, bem como as suas características (formato e dimensões). A título de exemplo, a figura 52 apresenta uma comparação entre o modelo projetado do corpo de prova e a representação tridimensional da região R1, onde é possível identificar as descontinuidades presentes na superfície da peça metálica.

Figura 52 - Análise qualitativa para região R1: (a) modelo projetado; (b) PE



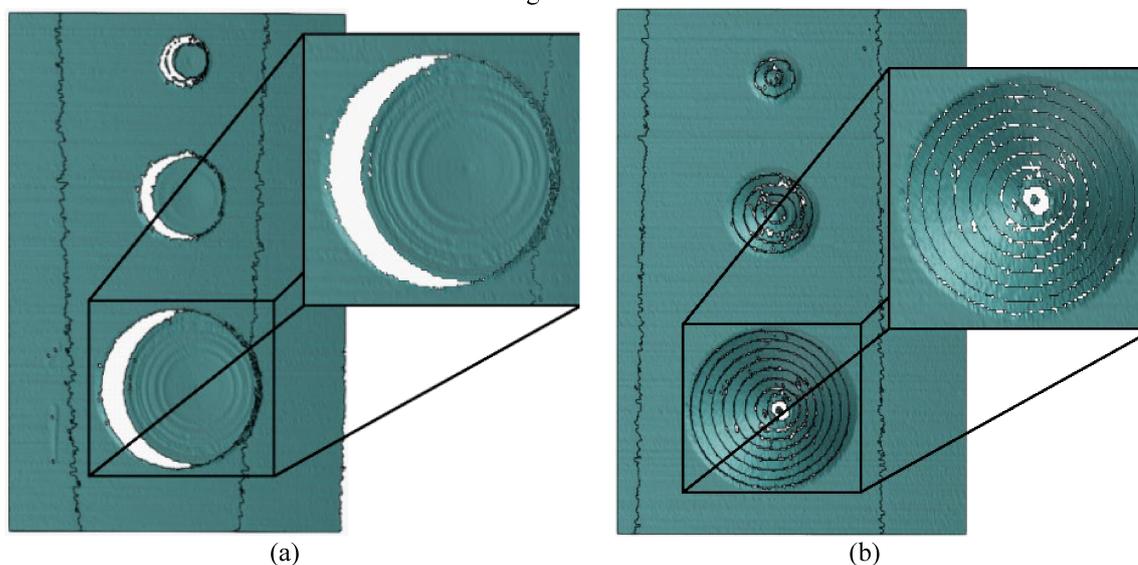
Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando os resultados obtidos, é possível verificar que a superfície externa da peça não foi detectada em praticamente nenhuma das regiões inspecionadas, com exceção da região R5, cuja representação tridimensional apresenta parcialmente a superfície externa do corpo de prova. Isso se deve ao fato de que o tamanho e a distância focal do transdutor de ultrassom não se mostraram adequados frente às características do corpo de prova, visto que não foi possível deslocar o transdutor para uma posição na qual a espessura da peça, em sua totalidade, pudesse ser avaliada.

Além disso, é importante notar que determinadas regiões das representações tridimensionais geradas pela técnica PE apresentaram partes ausentes. Esse fato ocorreu devido à elevada sensibilidade da referida técnica em relação ao ângulo de incidência do feixe de ultrassom emitido na superfície do corpo de prova. A figura 53 apresenta as representações tridimensionais das regiões R2 e R3, onde a ausência das paredes laterais das discontinuidades na primeira e de certas partes na segunda é constatada.

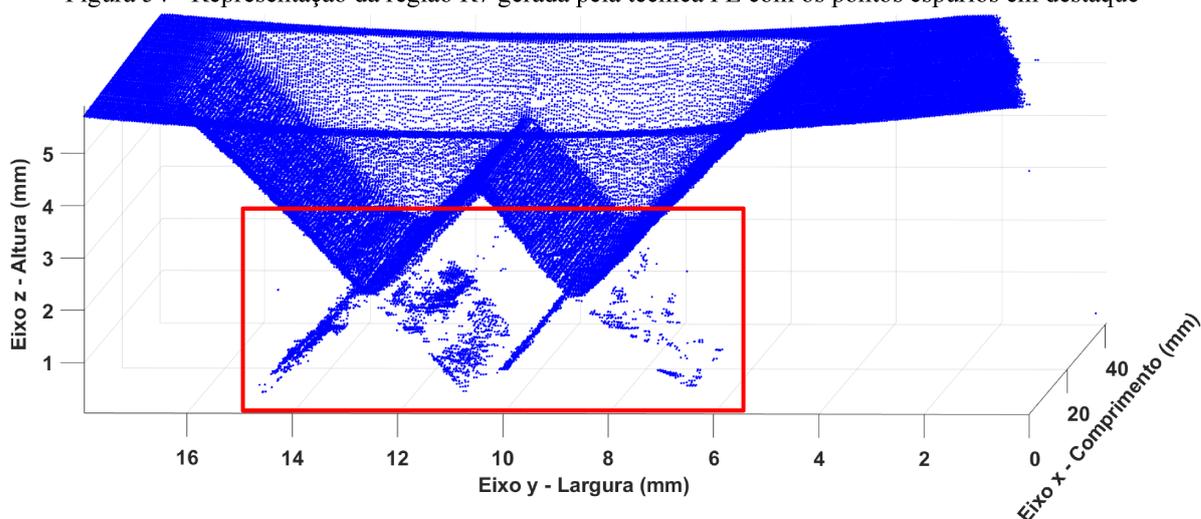
Vale destacar também a ocorrência de erros de medição em determinados pontos de inspeção, o que resultou em uma inadequada representação dos pontos no espaço tridimensional, conforme pode ser visto nas imagens geradas das regiões R6, R7 e R8. Analisando em detalhes a representação da região R7 (Figura 54), é possível observar a existência de pontos espúrios no espaço tridimensional, os quais formaram um espelhamento horizontal da parte inferior da discontinuidade presente na referida região.

Figura 53 - Partes ausentes nas representações tridimensionais geradas pela técnica PE: (a) região R2; (b) região R3



Fonte: Elaborado pelo autor.

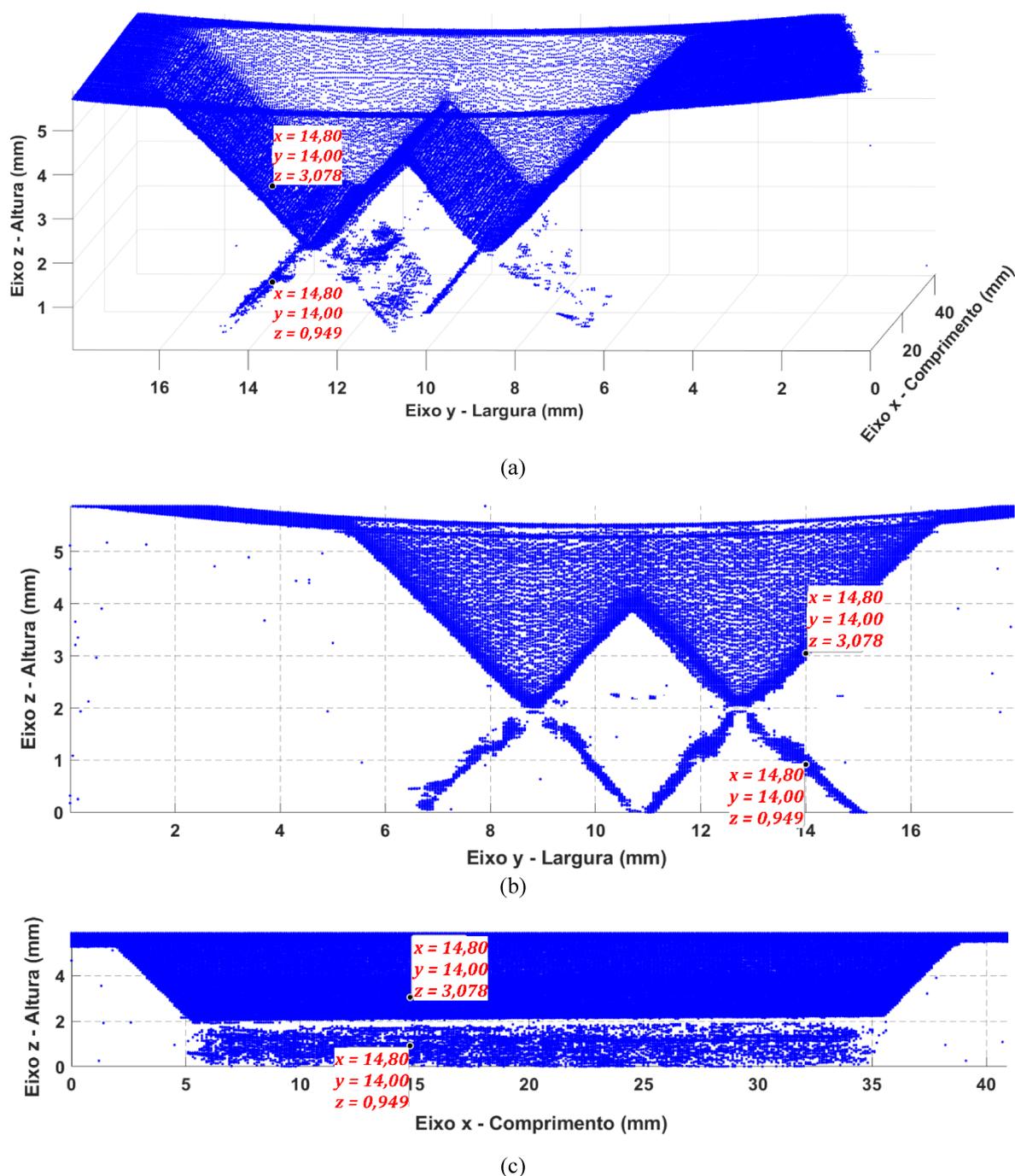
Figura 54 - Representação da região R7 gerada pela técnica PE com os pontos espúrios em destaque



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de analisar a origem desses erros de medição, dois pontos da representação tridimensional da região R7 foram selecionados. O primeiro deles é um ponto localizado na superfície interna da peça, obtido a partir de um ensaio realizado no sétimo plano de varredura (x, y) . Um segundo ponto foi selecionado, que corresponde ao primeiro na parte espelhada da descontinuidade (alinhados em relação aos planos (x, z) e (y, z)), resultante de um ensaio realizado no segundo plano de varredura (x, y) . Na figura 55 é apresentada a posição dos pontos selecionados em diferentes vistas da região R7.

Figura 55 - Diferentes vistas da região R7 gerada pela técnica PE com a posição dos pontos selecionados: (a) visão tridimensional; (b) visão plano (y, z); (c) visão plano (x, z)



Fonte: Elaborado pelo autor.

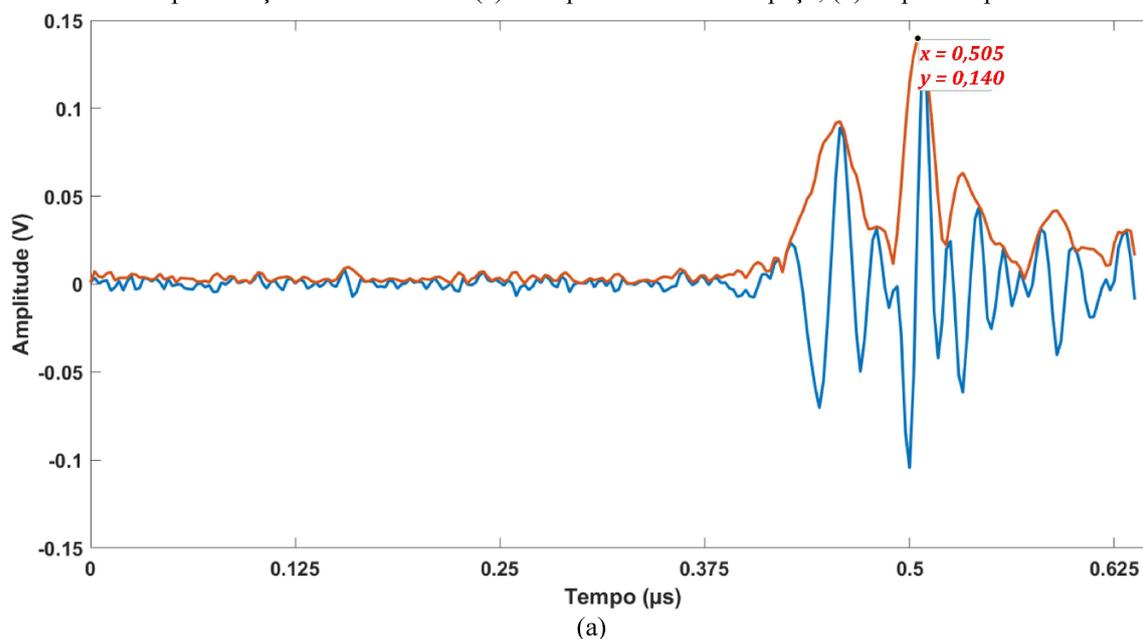
A partir das imagens apresentadas na figura 55, é possível observar a posição de cada ponto selecionado no eixo z do espaço tridimensional. Em relação ao ponto pertencente ao segundo plano de varredura, o valor obtido foi de 0,947 mm. Já para o ponto referente ao sétimo plano de varredura, o valor foi de 3,078 mm. Vale ressaltar que o primeiro plano de varredura foi definido como o mais próximo da superfície externa da peça metálica, sendo o

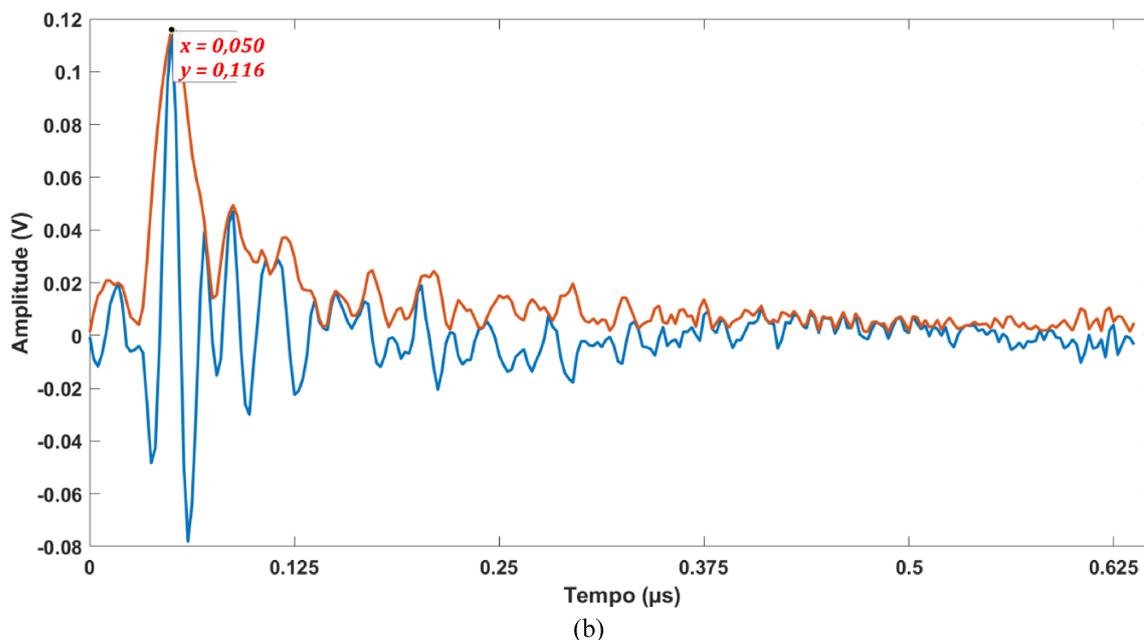
transdutor deslocado para cima ao longo do eixo z com o intuito de realizar a próxima rodada de medições no plano de varredura subsequente.

Após a seleção dos pontos na representação tridimensional de R7, os sinais obtidos pelos ensaios com a técnica PE foram analisados para verificar o tempo de propagação registrado e, por conseguinte, a distância entre o plano de varredura e o ponto de reflexão das ondas emitidas. Desse modo, abre-se a possibilidade de avaliar a posição desses pontos na representação tridimensional, bem como determinar o local onde as ondas de ultrassom sofreram reflexão. A figura 56 apresenta o sinal no tempo obtido no ensaio de ultrassom, o respectivo envelope e o máximo pico detectado tanto para o ponto localizado na superfície interna da peça metálica, quanto para o seu correspondente na parte espelhada da descontinuidade.

A partir dos valores de distância calculados, pode-se concluir que o sistema de medição empregado interpretou de maneira errônea os dados gerados no ensaio que produziu o ponto espúrio. Isso se deve ao fato de que a reflexão das ondas de ultrassom emitidas não poderia ter acontecido em um local que estava a 13,036 mm de distância do transdutor, já que o foco desse dispositivo foi posicionado no segundo plano de varredura, isto é, na parte interna da peça metálica. Além disso, a diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas de ultrassom refletidas nos dois casos se mostrou muito pequena. Vale lembrar que o ponto localizado na superfície interna da peça foi gerado em uma medição no sétimo plano de varredura, enquanto o ponto espúrio em um ensaio no segundo plano.

Figura 56 - Sinais no tempo, envelope e máximo pico obtidos nos ensaios com a técnica PE para os dois pontos da representação tridimensional: (a) na superfície interna da peça; (b) na parte espelhada

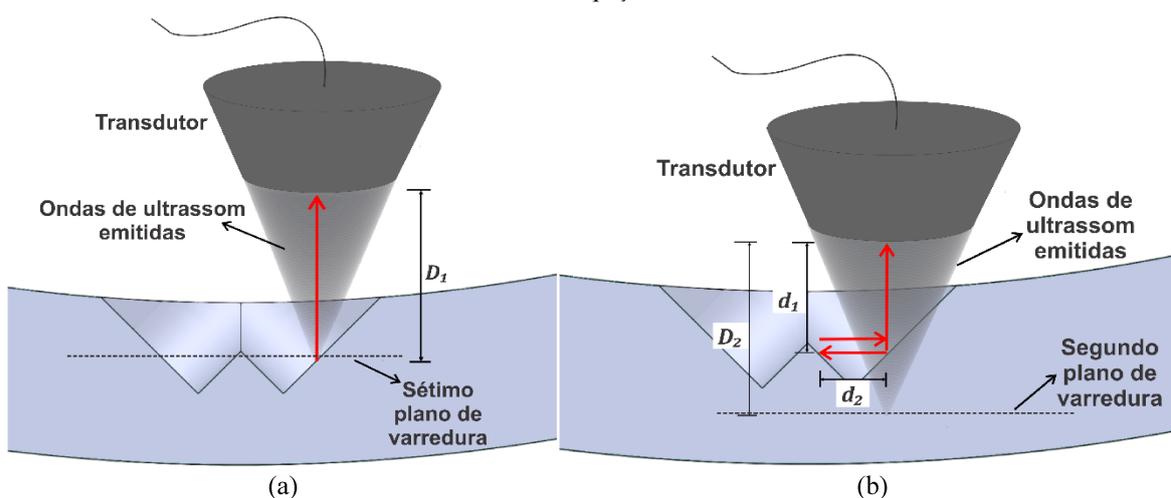




Fonte: Elaborado pelo autor.

Para se ter uma melhor compreensão do ocorrido, a figura 57 ilustra a execução dos ensaios que resultaram nos dois pontos avaliados da representação tridimensional de R7: (a) o ponto localizado na superfície interna da peça; e (b) o ponto espúrio na parte espelhada da descontinuidade. A direção e o sentido de propagação das ondas de ultrassom refletidas são representados pelas setas de cor vermelha. Além disso, deve-se ressaltar que a distância entre o transdutor e o plano de varredura é igual ao valor da distância focal do transdutor.

Figura 57 - Ensaios com a técnica PE que resultaram nos dois pontos avaliados: (a) na superfície interna; (b) no interior da peça metálica



Legenda:

- D_1 distância entre o transdutor e o ponto localizado na superfície interna da peça;
- D_2 distância entre o transdutor e o ponto espúrio;
- d_1 distância percorrida pela onda refletida na direção vertical;
- d_2 distância percorrida pelas ondas refletidas na direção horizontal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No ensaio retratado na figura 57(a), é possível observar que quando o transdutor estava posicionado a uma distância D_1 igual a 13,367 mm, as ondas de ultrassom emitidas sofreram reflexão na superfície interna da peça, resultando em uma representação correta daquele ponto de inspeção no espaço tridimensional. Por outro lado, o caso retratado na figura 57(b) mostra que a reflexão das ondas de ultrassom não ocorre em local situado a 13,036 mm do transdutor, e sim em três pontos da superfície interna do corpo de prova, gerando um ponto espúrio na representação da região R7. A partir da imagem apresentada em 57(b), verifica-se que uma parcela das ondas de ultrassom emitidas sofre múltiplas reflexões na superfície interna da peça e retorna com uma intensidade suficiente para ser detectada pelo transdutor, mesmo que o seu foco estivesse posicionado no interior da peça. Esse fenômeno de múltiplas reflexões tem origem na elevada diferença de impedância entre o meio de acoplamento e o material da peça, bem como devido ao ângulo de incidência das ondas emitidas em relação à superfície do corpo de prova. É importante notar que a distância percorrida pelas ondas de ultrassom refletidas no caso da figura 57(b) determina qual é a distância do transdutor até o ponto espúrio gerado na representação tridimensional. Logo, pode-se afirmar que D_2 é igual à soma dos valores de d_1 e o dobro de d_2 .

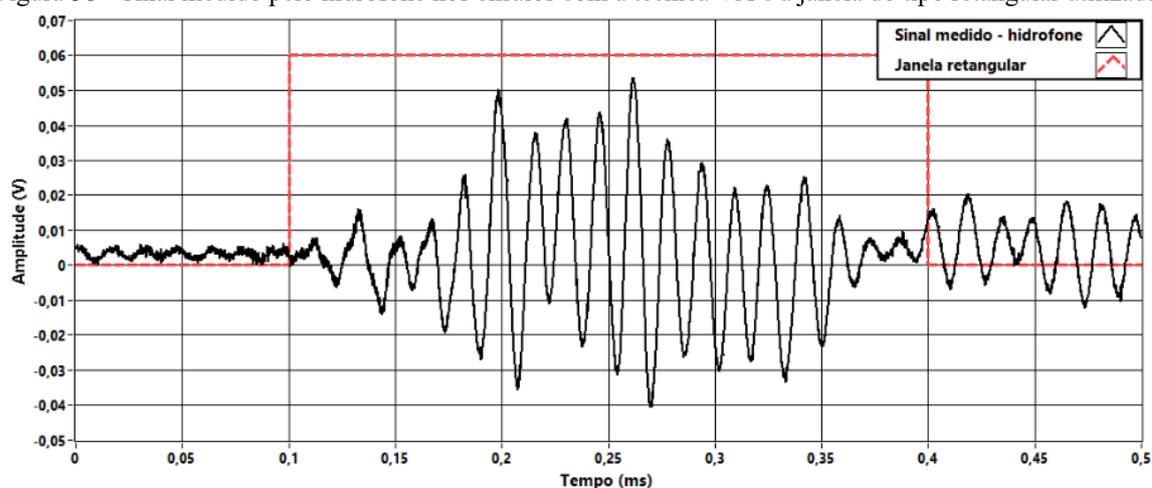
4.2 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A TÉCNICA VA

Os ensaios com a técnica VA foram realizados com emprego da bancada descrita na seção 3.3. Para viabilizar os ensaios, foi necessário cortar o corpo de prova em regiões menores com o propósito de permitir uma fixação satisfatória da peça metálica no suporte existente. Dessa forma, o corpo foi segmentado de acordo com as características das regiões inspecionadas na seção 4.1 (Figura 36).

Para cada ponto de medição no plano focal (x,y) , o sinal acústico medido pelo hidrofone foi adquirido durante um intervalo de tempo igual a 0,5 ms e com um número de amostras igual a 5000. Esses dados foram posteriormente processados por meio de ferramentas de processamento digital de sinais, com o objetivo de gerar as imagens das regiões avaliadas. Um procedimento foi elaborado e depois aplicado em cada um dos pontos de medição. Primeiro, uma janela do tipo retangular foi empregada para separar a resposta em regime permanente, a qual representa o sinal acústico gerado pelo corpo de prova durante um ciclo de excitação, da resposta transitória. O referido processo de janelamento foi iniciado após um determinado intervalo de tempo, cujo valor corresponde aos tempos de propagação das ondas mecânicas geradas pelo transdutor confocal até o corpo de prova e do sinal acústico

produzido pela interação entre os feixes de ultrassom incidentes e o objeto em teste até o hidrofone. Já o período de janelamento foi definido como sendo igual ao intervalo de tempo de excitação das cerâmicas do transdutor ($\Delta t = 0,295$ ms), o que equivale a 1000 ciclos completos da frequência central ($\omega_0 = 3,4$ MHz) ou a aproximadamente 18 ciclos da frequência de modulação ($\Delta\omega = 60$ kHz). A figura 58 ilustra o exemplo de um sinal medido pelo hidrofone em um determinado ponto de medição e a janela do tipo retangular empregada.

Figura 58 - Sinal medido pelo hidrofone nos ensaios com a técnica VA e a janela do tipo retangular utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor.

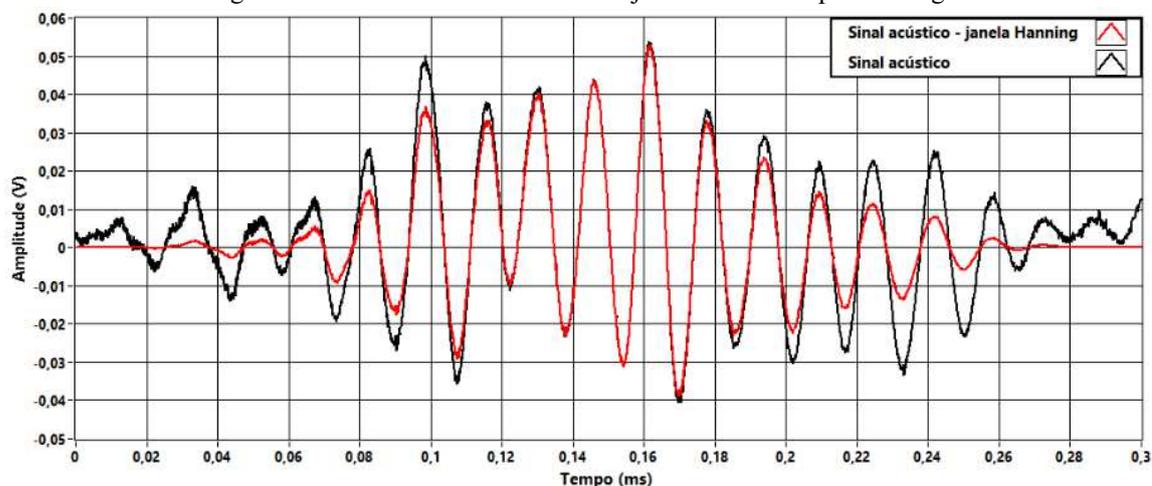
De acordo com a figura 58, é possível observar a presença de reverberações no sinal medido pelo hidrofone a partir do tempo de aproximadamente 0,40 ms. Esse fenômeno tem origem nas seguidas reflexões sofridas pelas ondas sonoras nas paredes do tanque ou até mesmo na superfície da peça metálica. O processo de janelamento se mostra de grande importância nesse caso, pois seu emprego ameniza o efeito da reverberação e de outros fenômenos que podem afetar a qualidade da imagem gerada.

Após o primeiro passo, uma janela do tipo Hanning foi usada com o objetivo de atenuar o efeito das bordas e minimizar o vazamento espectral, em virtude do número de ciclos não inteiros de repetição do sinal resultante (PROAKIS et al., 1996). A figura 59 apresenta um sinal acústico medido pelo hidrofone com e sem a utilização da janela do tipo Hanning.

Por fim, uma transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *fast Fourier transform*) foi aplicada no sinal janelado e uma imagem pôde ser gerada com emprego do parâmetro de magnitude, cujo valor foi extraído da componente de 60 kHz do sinal e, posteriormente, associado ao valor do pixel da imagem no referido ponto de medição. Ao final das medições

no plano de varredura, uma matriz de pixels foi construída para produzir uma imagem da região avaliada.

Figura 59 - Sinais acústicos com e sem janelamento do tipo Hanning



Fonte: Elaborado pelo autor.

As seções 4.2.1 a 4.2.5 descrevem como o processo de varredura da peça foi configurado, com o intuito de determinar o comprimento e a largura da região a ser inspecionada. Além disso, são apresentadas as imagens bidimensionais geradas por meio das medições com a técnica VA para as regiões R1 até R8. Por fim, conclusões acerca da análise qualitativa dos resultados obtidos são mostradas na seção 4.2.6.

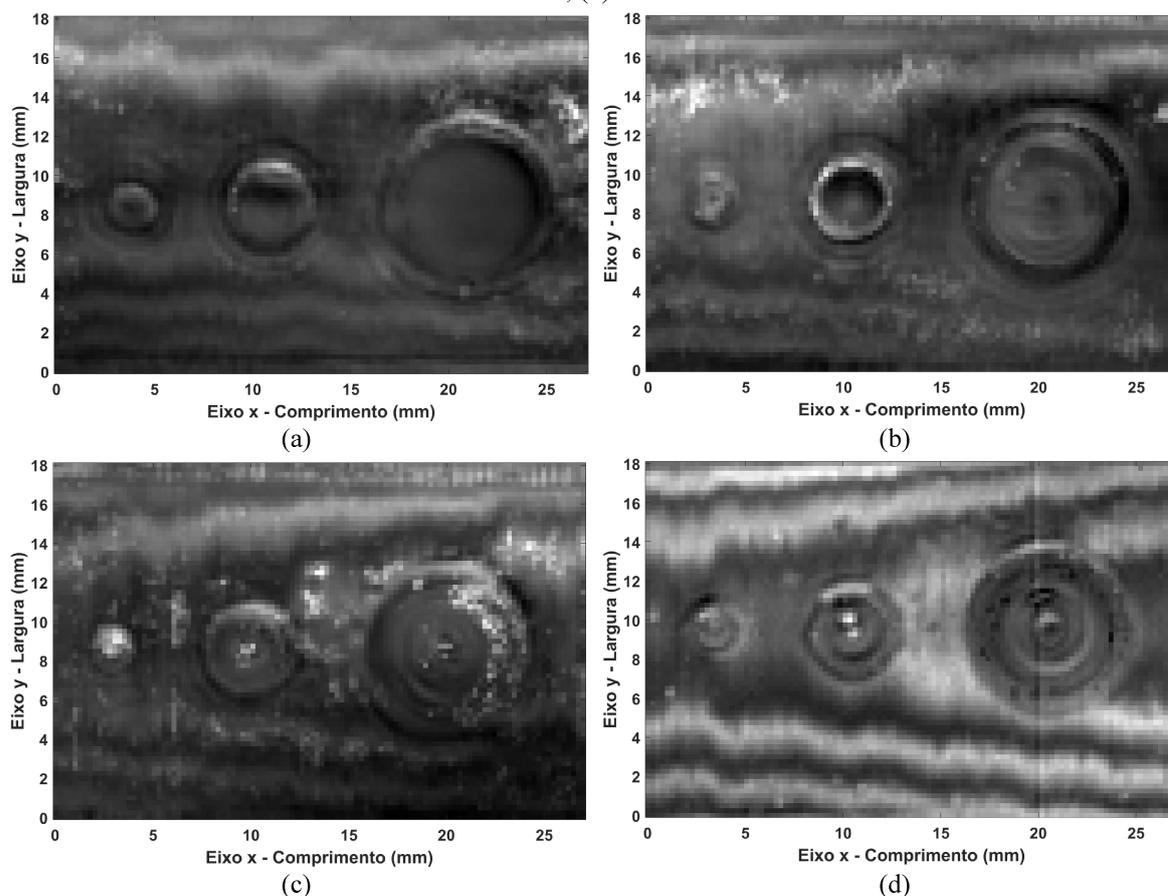
4.2.1 Regiões R1, R2, R3 e R4

Cada uma das regiões avaliadas nesta seção apresenta três descontinuidades de diferentes dimensões, conforme descrição feita na seção 3.1. Em relação à configuração do processo de varredura, definiram-se os seguintes valores para o deslocamento do corpo de prova:

- deslocamento no eixo (y): 72 pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre eles – deslocamento total de 18 mm;
- deslocamento no eixo (x): 108 sequências de pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre elas – deslocamento total de 27 mm.

Ao término do processo de inspeção das respectivas regiões, imagens bidimensionais foram geradas por meio dos dados obtidos. A figura 60 ilustra as representações das regiões inspecionadas.

Figura 60 - Representações bidimensionais das regiões inspecionadas usando a técnica VA: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4



Fonte: Elaborado pelo autor.

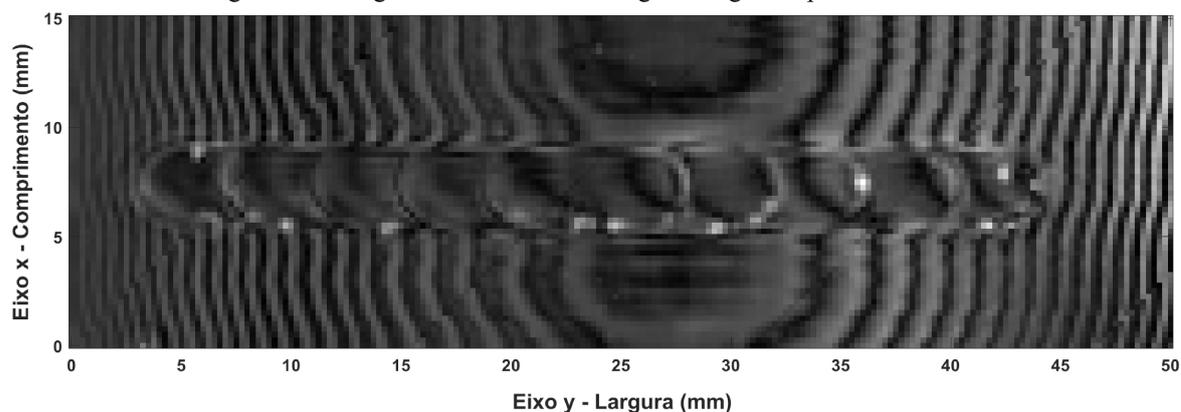
4.2.2 Região R5

A região R5 do corpo de prova é composta por uma descontinuidade com formato de rebaxos incrementais (vide seção 3.1). Sobre o processo de varredura, os seguintes valores foram definidos para o deslocamento do corpo de prova:

- deslocamento no eixo (y): 200 pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre eles – deslocamento total de 50 mm;
- deslocamento no eixo (x): 60 seqüências de pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre elas – deslocamento total de 15 mm.

Ao final do processo de inspeção, uma imagem da região R5 foi gerada, conforme pode ser visto na figura 61.

Figura 61 - Imagem bidimensional da região R5 gerada pela técnica VA



Fonte: Elaborado pelo autor.

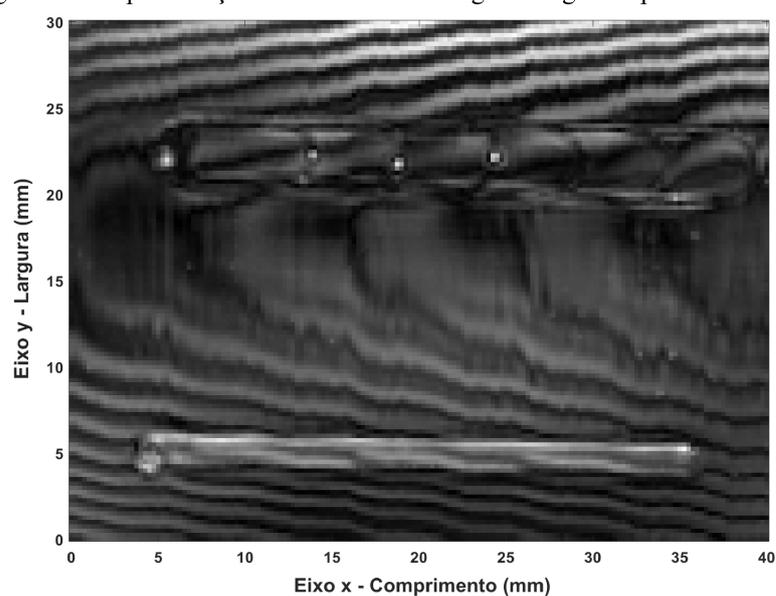
4.2.3 Região R6

A região R6 do corpo de prova é composta por duas descontinuidades, sendo uma formada por rebaixos incrementais e outra por vincos. A configuração do processo de varredura foi definida a partir dos seguintes valores para o deslocamento do corpo de prova:

- deslocamento no eixo (y): 120 pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre eles – deslocamento total de 30 mm;
- deslocamento no eixo (x): 160 sequências de pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre elas – deslocamento total de 40 mm.

A imagem gerada a partir dos dados obtidos nos ensaios é apresentada na figura 62.

Figura 62 - Representação bidimensional da região R6 gerada pela técnica VA



Fonte: Elaborado pelo autor.

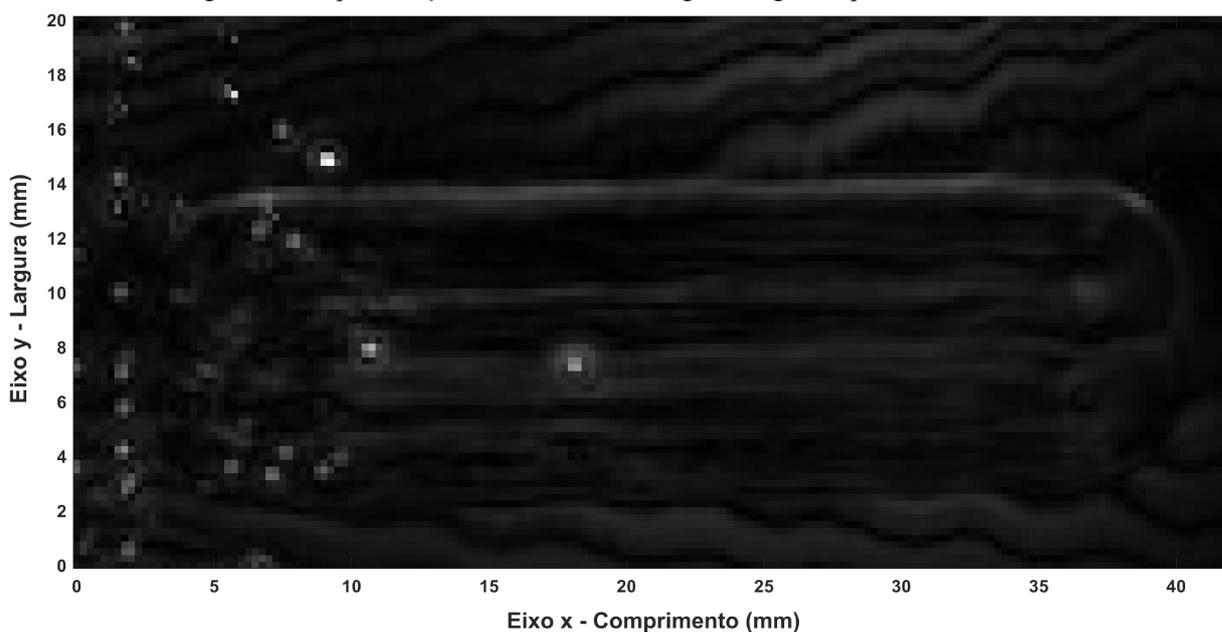
4.2.4 Região R7

A região R7 do corpo de prova é composta por uma descontinuidade formada por dois vincos. No que concerne à configuração do processo de varredura, definiram-se os seguintes valores para o deslocamento do transdutor:

- deslocamento no eixo (y): 80 pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre eles – deslocamento total de 20 mm;
- deslocamento no eixo (x): 168 sequências de pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre elas – deslocamento total de 42 mm.

Ao término do processo de inspeção da respectiva região, uma imagem bidimensional foi gerada por meio dos dados obtidos. A figura 63 ilustra a representação 2D da região R7.

Figura 63 - Representação bidimensional da região R7 gerada pela técnica VA



Fonte: Elaborado pelo autor.

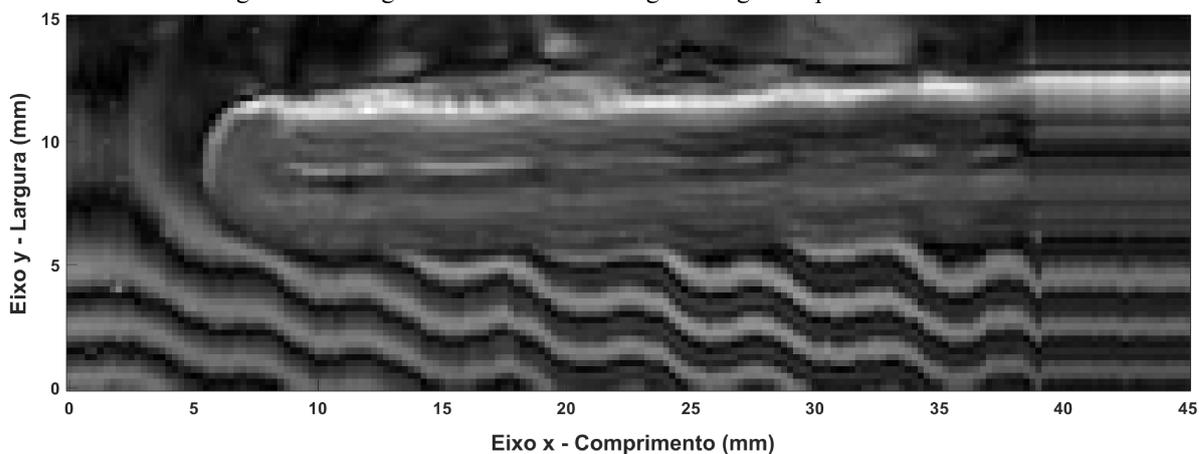
4.2.5 Região R8

A região R8 do corpo de prova é composta por uma descontinuidade com formato de um vinco. Sobre o processo de varredura, os seguintes valores foram definidos para o deslocamento do corpo de prova:

- deslocamento no eixo (y): 60 pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre eles – deslocamento total de 15 mm;
- deslocamento no eixo (x): 180 sequências de pontos de medição com uma distância de 0,25 mm entre elas – deslocamento total de 45 mm.

Ao final do processo de inspeção, uma imagem da região R8 foi gerada, conforme pode ser vista na figura 64.

Figura 64 - Imagem bidimensional da região R8 gerada pela técnica VA



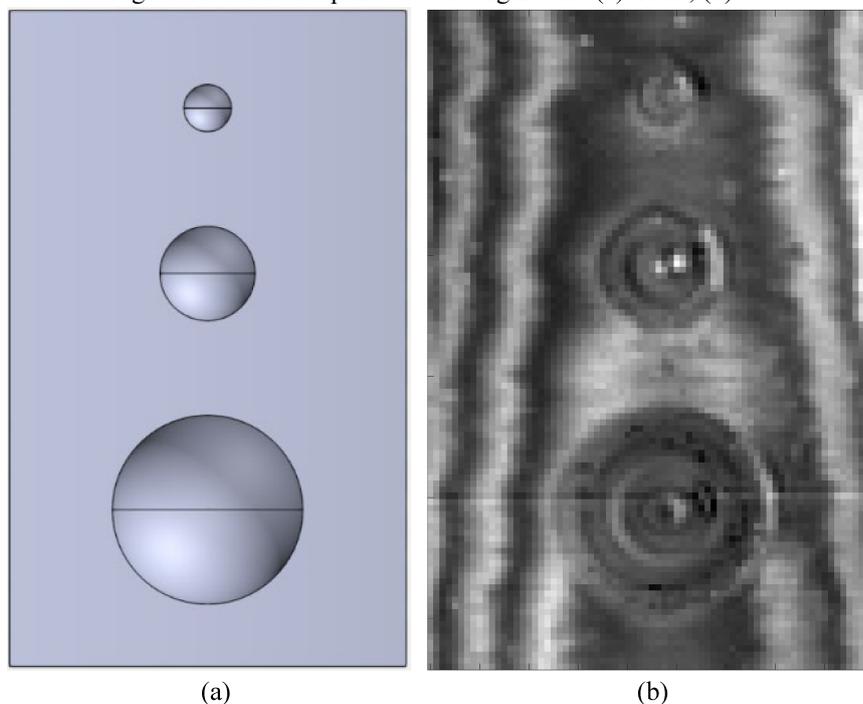
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.6 Conclusões referentes à análise qualitativa das imagens geradas pela técnica VA

Ao analisar qualitativamente as imagens geradas pela técnica VA, é possível observar a presença de todas as descontinuidades presentes na superfície interna do corpo de prova, bem como características relacionadas ao formato e dimensões. A exceção fica com os resultados das medições na região R8, cuja imagem apresenta distorções causadas por problemas no sistema mecânico de posicionamento do corpo de prova durante os ensaios. A partir da posição de 39 mm do comprimento da imagem, verifica-se que o sistema de posicionamento passou a se deslocar somente ao longo eixo y , e não mais no eixo x do plano (x, y) da imagem. Em consequência disso, ensaios foram feitos repetidamente em uma mesma área da peça, o que acarretou uma distorção na parte final da imagem da região R8. Outro ponto importante se refere à presença de anéis circulares dentro das descontinuidades nas imagens das regiões R2, R3 e R4, cuja origem tem relação com o processo de usinagem das cavidades na confecção do corpo de prova. Uma análise da intensidade do nível de cinza desses anéis pode trazer informações do perfil topográfico da superfície da peça e, conseqüentemente, abre a possibilidade de determinar a profundidade do defeito. A figura 65

mostra uma comparação entre o modelo CAD e a representação bidimensional da região R4, onde é possível identificar as descontinuidades presentes na superfície da peça metálica e a existência dos anéis circulares.

Figura 65 - Análise qualitativa da região R1: (a) CAD; (b) VA

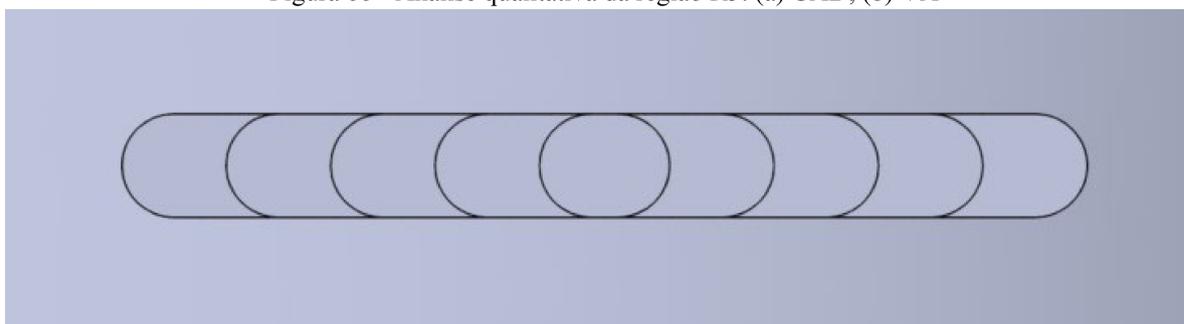


Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando a imagem gerada de R4 e as demais obtidas para as outras regiões, é possível observar a existência de artefatos em forma de faixas claras e escuras. Pode-se afirmar, então, que os efeitos produzidos pelos fenômenos de ondas estacionárias e reverberações afetaram os resultados apresentados, no que diz respeito à identificação das características das descontinuidades, mesmo que o modo de excitação *tone-burst* tenha sido empregado nos ensaios. Uma possível solução para atenuar ainda mais os efeitos gerados por tais fenômenos, ou até mesmo eliminá-los, seria o emprego do modo de excitação *chirp-imaging* proposto por Mitri et al. (2005a).

Além disso, ao analisar a imagem gerada da região R5, verifica-se que a descontinuidade presente não possui um formato análogo ao original. A figura 66 ilustra uma comparação entre o modelo CAD e a imagem da região R5.

Figura 66 - Análise qualitativa da região R5: (a) CAD; (b) VA



(a)



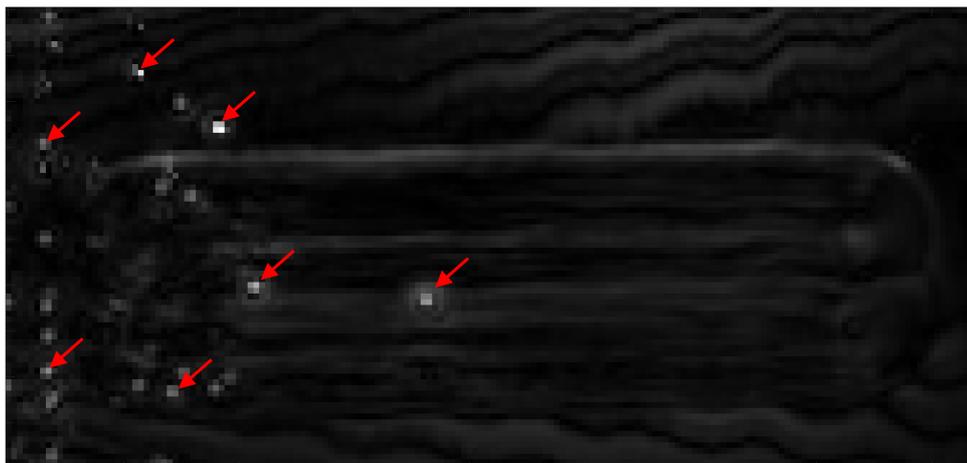
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença dos formatos das discontinuidades apresentadas na figura 66 se deve ao fato de que o processo de posicionamento da peça metálica em relação ao plano focal do transdutor não garantia um perfeito alinhamento entre esses elementos. Para o caso específico da região R5, nota-se que o corpo de prova não estava totalmente alinhado ao transdutor no momento das medições, resultando em uma imagem distorcida. Ademais, verifica-se uma quantidade distinta de faixas claras e escuras se ambos os lados da imagem forem comparados. O número desses artefatos pode ser associado à curvatura da peça na região avaliada e ao alinhamento do corpo de prova em relação ao plano focal do transdutor.

Vale destacar também a qualidade da imagem gerada para a região R7. Analisando em detalhes a representação da referida região, é possível observar a existência de vários pontos de cor mais clara, cuja intensidade alterou significativamente o contraste da imagem, dificultando a identificação da discontinuidade existente. A figura 67 apresenta a imagem da região R7, onde alguns dos pontos de cor mais clara foram evidenciados.

Figura 67 - Pontos de cor mais clara na representação da região R7 gerada pela técnica VA

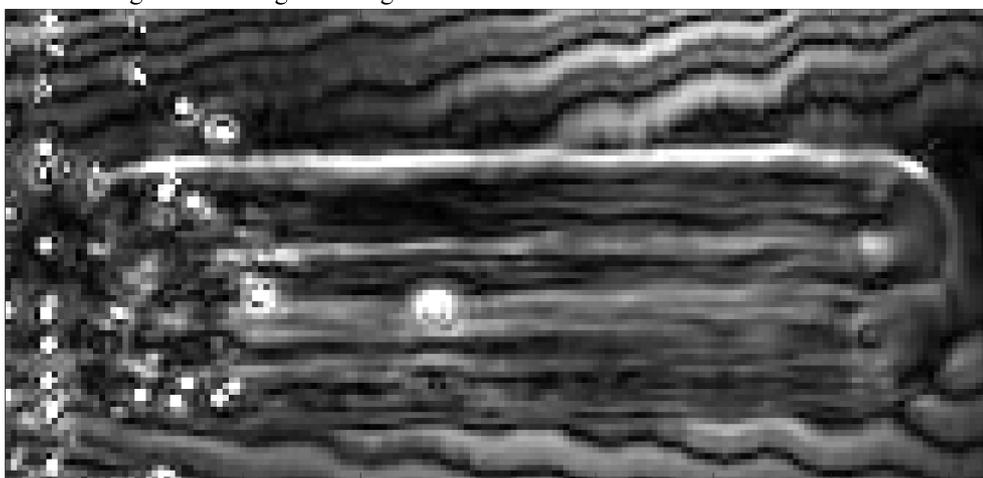


Fonte: Elaborado pelo autor.

A existência desses pontos de cor mais clara pode ser explicada pela presença de bolhas de ar no momento dos ensaios. Apesar de o tanque utilizado durante as medições ter sido preenchido com água degaseificada, esse meio de acoplamento acústico foi perdendo suas propriedades com o passar do tempo, o que permitiu o aparecimento das bolhas. É importante salientar que o processo de varredura para cada uma das regiões da peça metálica demandava entre quatro e cinco horas. Isso também esclarece o motivo pelo qual os pontos de cor mais clara se concentraram em uma determinada região da imagem, local esse onde as últimas medições foram realizadas.

Uma forma de contornar o problema do contraste na imagem original da região R7 é a alteração dos valores da escala de cinza. Para isso, o valor que representa o pixel branco foi reduzido, possibilitando maior distinção entre os outros pixels que formam a imagem. Na figura 68 é ilustrada a imagem da região R7 com a escala de cinza alterada, por meio da qual é possível identificar com maior facilidade a presença da descontinuidade.

Figura 68 - Imagem da região R7 com valores da escala de cinza alterada



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS PELAS TÉCNICAS PE E VA

Esta seção apresenta uma análise quantitativa dos resultados obtidos pelas técnicas PE e VA. Para a realização dessa etapa, foram consideradas somente as representações geradas para as regiões R1 até R4, por essas possuírem descontinuidades com características mais simples. A análise foi feita comparando os valores dos diâmetros das cavidades nas imagens criadas por ambas as técnicas e o valor verdadeiro convencional⁵ dessas cavidades na peça metálica. Para alcançar esse objetivo, ferramentas de processamento digital de imagens foram utilizadas nas representações geradas pelas técnicas de ultrassom. A figura 69 ilustra todos os passos empregados para o processamento das imagens.

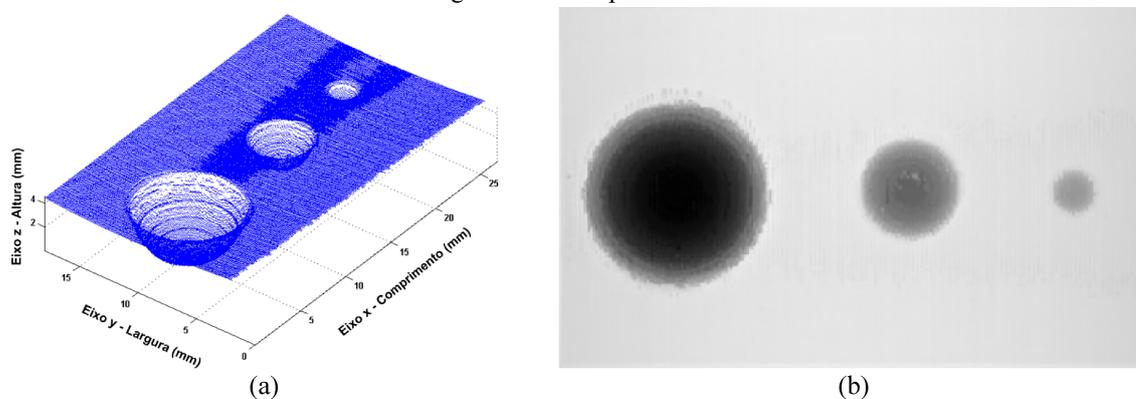
Figura 69 - Passos para o processamento das imagens geradas pelas técnicas PE e VA



Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro passo adotado foi o da conversão dos dados adquiridos por ambas as técnicas em imagens. Em relação à VA, a matriz de pixels gerada foi normalizada e, em seguida, convertida em uma imagem de 8 bits. No que concerne à técnica PE, as suas representações tridimensionais foram primeiramente reamostradas, para que as mesmas pudessem apresentar uma resolução uniforme de 0,10 mm. A partir disso, o eixo z de coordenadas da representação tridimensional foi normalizado e, posteriormente, convertido em uma imagem bidimensional de 8 bits. A figura 70 ilustra a representação tridimensional da região R4 gerada pelo PE e a sua respectiva imagem 2D após a etapa de conversão.

Figura 70 - Conversão realizada para a região R4: (a) representação tridimensional gerada pela técnica PE; (b) imagem 2D correspondente



Fonte: Elaborado pelo autor.

⁵ O valor verdadeiro convencional das cavidades foi determinado usando um micrômetro que apresentava uma incerteza de medição de $\pm 5 \mu\text{m}$.

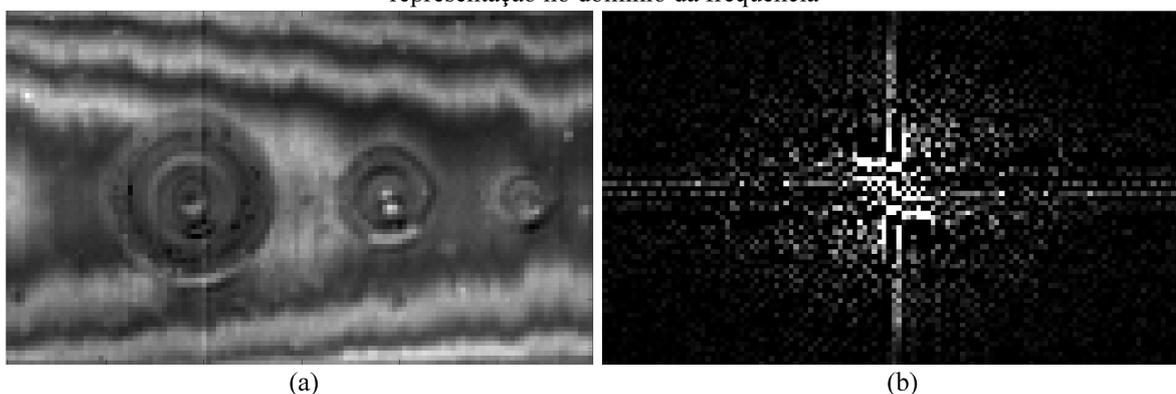
O passo seguinte do processamento digital foi o da filtragem das imagens geradas. Nesse contexto, diferentes processos de filtragem foram utilizados, sendo um especificamente para as imagens da VA e outro para o PE. Em relação à primeira técnica, dois procedimentos foram adotados: a aplicação de um filtro seletivo do tipo *notch* e um filtro passa-alta gaussiano, ambos baseados na transformada rápida de Fourier de duas dimensões (2D-FFT, do inglês *two-dimensional fast Fourier transform*); e o emprego de um filtro baseado na transformada rápida *wavelet* de duas dimensões (2D-FWT, do inglês *two-dimensional fast wavelet transform*). Para uma melhor compreensão, o primeiro procedimento de filtragem para as imagens da técnica VA é denominado deste ponto em diante como FNPA e o segundo como FWAV.

As imagens da VA foram submetidas ao filtro *notch* com o objetivo de atenuar determinadas componentes de frequência, caracterizadas por variações suaves de intensidade, como as faixas claras e escuras causadas pelos fenômenos de ondas estacionárias e reverberações. Já o filtro passa-alta foi utilizado para realçar as componentes de alta frequência das imagens, as quais estão associadas às mudanças abruptas de intensidade, como as bordas das descontinuidades. No contexto deste trabalho, um filtro passa-alta baseado em função gaussiana foi escolhido por não possuir o potencial de incluir artefatos na imagem final (GONZALEZ, 2010). A construção e a definição dos parâmetros de ambos os filtros foram feitas por meio da inspeção visual das representações das imagens da VA no domínio do espaço e da frequência. No que concerne ao filtro *notch*, o mesmo consistia em uma matriz de pixels de valores binários com o mesmo tamanho da imagem de entrada e o modo como esses pixels foram agrupados determinava o seu comportamento no domínio da frequência. A partir da análise do espectro de frequências das imagens, a posição de cada agrupamento de pixels com valor igual a zero (cor preta) ou com valor igual a um (cor branca) foi determinada iterativamente para produzir o melhor resultado visual possível. Quanto ao filtro passa-alta, sua implementação foi feita por meio de uma matriz com o mesmo tamanho da imagem de entrada, cujo conjunto de pixels representava a função gaussiana em duas dimensões. A abrangência de atuação do filtro passa-alta foi definida a partir do ajuste do parâmetro de corte D_0 , cujo valor em número de pixels corresponde ao tamanho do raio do filtro onde a sua amplitude equivale a 39,3% do valor máximo igual a um (GONZALEZ, 2009; MARQUES, 2011).

A figura 71(a) apresenta uma imagem da região R4 gerada pela VA no domínio do espaço, na qual é possível observar a presença de faixas claras e escuras formando um padrão

de interferências na direção vertical e horizontal. Uma análise detalhada do espectro de frequências dessa imagem (Figura 71(b)) indica uma série de picos de energia ao longo dos eixos vertical e horizontal, cuja intensidade resulta no respectivo padrão de interferências.

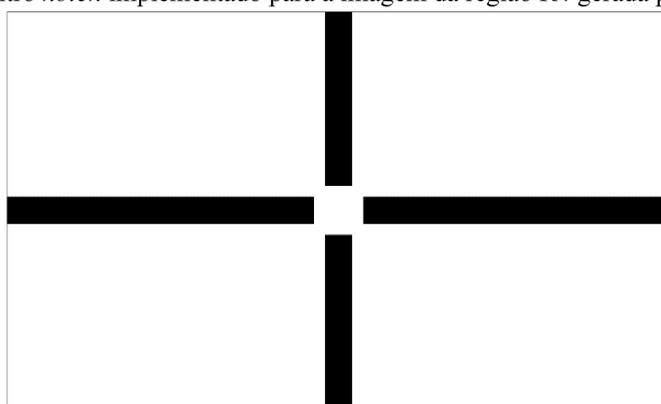
Figura 71 - Imagem da região R4 gerada pela técnica VA: (a) representação no domínio do espaço; (b) representação no domínio da frequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base no comportamento do espectro de frequências da imagem de R4, implementou-se um filtro *notch* formado por pares de retângulos simétricos de pixels com valores iguais a zero, largura de 5 pixels e posicionados ao longo dos eixos vertical e horizontal. Ademais, o início dos retângulos simétricos se dava a uma distância de 5 pixels do centro do filtro e eles se estendiam ao início ou ao final dos eixos. O filtro *notch* implementado para a imagem da região R4 é ilustrado na figura 72.

Figura 72 - Filtro *notch* implementado para a imagem da região R4 gerada pela técnica VA

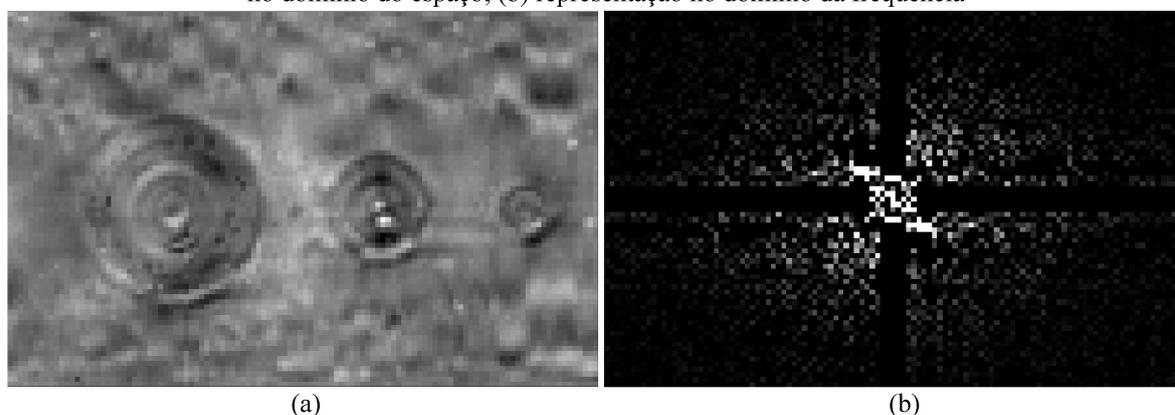


Fonte: Elaborado pelo autor.

O produto entre o espectro da imagem e o filtro implementado produz uma representação com uma redução das faixas claras e escuras em ambas as direções, conforme pode ser visto na figura 73(a). Se comparado ao espectro da imagem original, o espectro de

frequências da imagem filtrada não apresenta aquelas séries de picos de energia ao longo dos eixos vertical e horizontal (figura 73(b)).

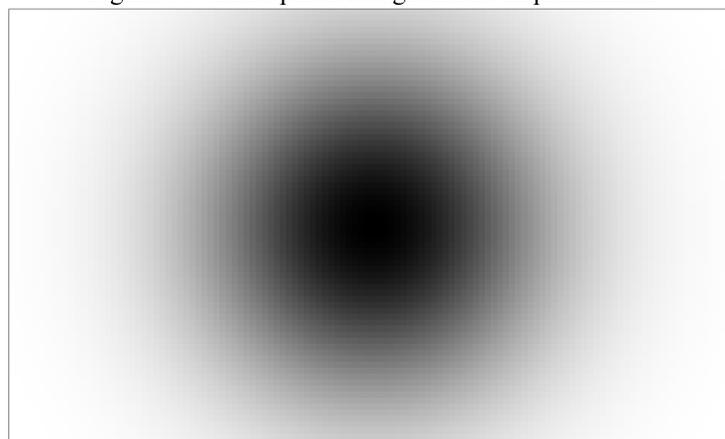
Figura 73 - Imagem da região R4 gerada pela técnica VA após a filtragem com o filtro *notch*: (a) representação no domínio do espaço; (b) representação no domínio da frequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final da aplicação do filtro *notch* nas imagens da VA, um filtro passa-alta gaussiano foi empregado para realçar as bordas das discontinuidades presentes. Para a imagem da região R4, um filtro passa-alta gaussiano foi implementado com o parâmetro de corte D_0 igual a 20 pixels, conforme pode ser visto na figura 74.

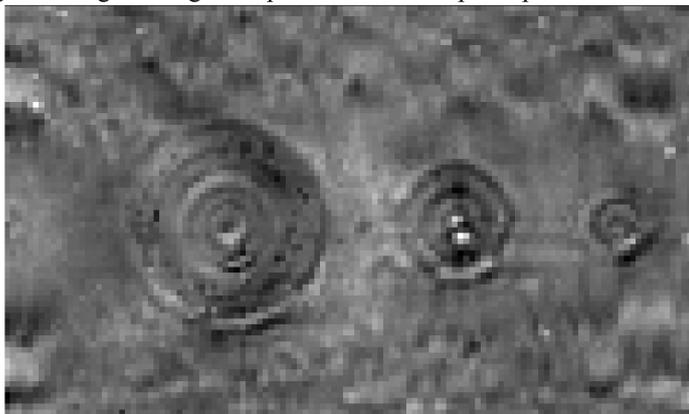
Figura 74 - Filtro passa-alta gaussiano implementado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o produto entre o espectro da imagem resultante da primeira etapa de filtragem e o filtro passa-alta gaussiano, calculou-se a transformada inversa do resultado para gerar a imagem filtrada da técnica VA (GONZALEZ, 2010). A figura 75 apresenta a imagem filtrada da região R4, na qual é possível observar um maior realce nas bordas das discontinuidades.

Figura 75 - Imagem da região R4 gerada pela técnica VA após o procedimento de filtragem FNPA

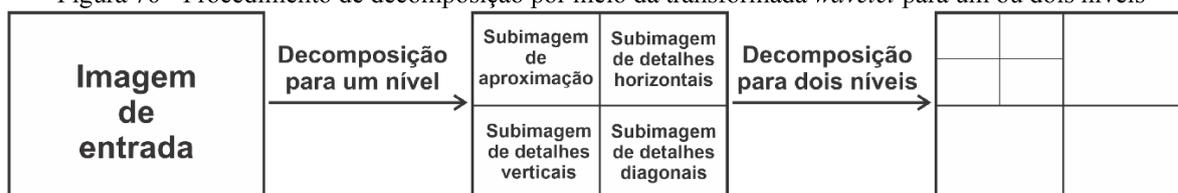


Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo procedimento de filtragem adotado para as imagens da VA foi a aplicação de um filtro baseado na transformada rápida *wavelet* de duas dimensões. O motivo para o seu emprego se deve ao fato de que as componentes que representam os artefatos nas imagens não são perfeitamente senoidais, isto é, a frequência dessas componentes varia de acordo com o ponto no espaço. Dessa forma, a utilização da transformada *wavelet* neste trabalho pode ser de grande valia, pois essa ferramenta de processamento de imagens tem a capacidade de remover ou atenuar ruídos que possuem o mesmo tipo de comportamento dos artefatos presentes nas imagens da técnica VA (MALLAT, 1989; MITCHELL, 2010).

Em termos gerais, a transformada *wavelet* de duas dimensões decompõe a imagem de entrada em uma sequência de subimagens, ao empregar filtros passa-baixa e passa-alta, além de um operador de subamostragem. As características dos filtros de decomposição utilizados nessa transformada são definidas pela escolha de uma função de base *wavelet* e por seus coeficientes. Quando essa ferramenta é aplicada com um único nível de decomposição, é possível obter uma sequência de imagens composta por uma subimagem de aproximação, a qual possui informações de baixa frequência da imagem de entrada, bem como três subimagens de detalhes, cujas representações estão associadas às componentes de alta frequência da imagem de entrada nas direções horizontal, vertical e diagonal. Deve-se destacar que as quatro subimagens resultantes do procedimento de decomposição possuem um quarto do tamanho da imagem original. Caso a transformada *wavelet* seja aplicada em dois níveis, um novo procedimento de decomposição é realizado na subimagem de aproximação gerada na primeira etapa de filtragem, cuja representação é substituída por quatro novas subimagens (com um dezesseis avos do tamanho da imagem original) (MALLAT, 1989; MITCHELL, 2010). A figura 76 ilustra o procedimento de decomposição de uma imagem por meio da transformada *wavelet* para um ou dois níveis.

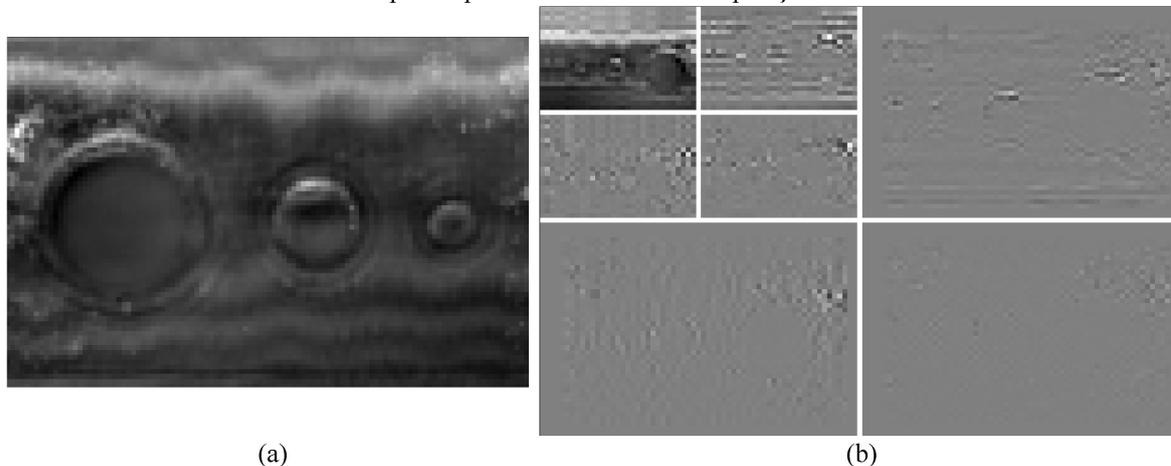
Figura 76 - Procedimento de decomposição por meio da transformada *wavelet* para um ou dois níveis



Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da imagem de R1 gerada pela técnica VA (Figura 77(a)), é possível observar a presença de faixas claras e escuras formando um padrão de interferências na direção horizontal. O primeiro passo para realizar o procedimento de filtragem foi a seleção de uma função de base dentre as disponíveis, como as funções *Daubechies* de quarta ordem, *Haar*, *Symlets* e *Antonini-Barlaud-Mathieu-Daubechies*. Após uma inspeção visual dos resultados obtidos em testes preliminares, a função de base *Daubechies* de quarta ordem foi a escolhida por apresentar o melhor desempenho no procedimento de filtragem da imagem de R1. A partir da aplicação de uma transformada *wavelet* com dois níveis de decomposição e o uso da respectiva função de base para caracterização dos filtros, a imagem original foi decomposta em subimagens de aproximação e de detalhes, conforme pode ser visto na figura 77(b).

Figura 77 - Imagem da região R1 gerada pela técnica VA: (a) imagem original; (b) subimagens produzidas após os procedimentos de decomposição

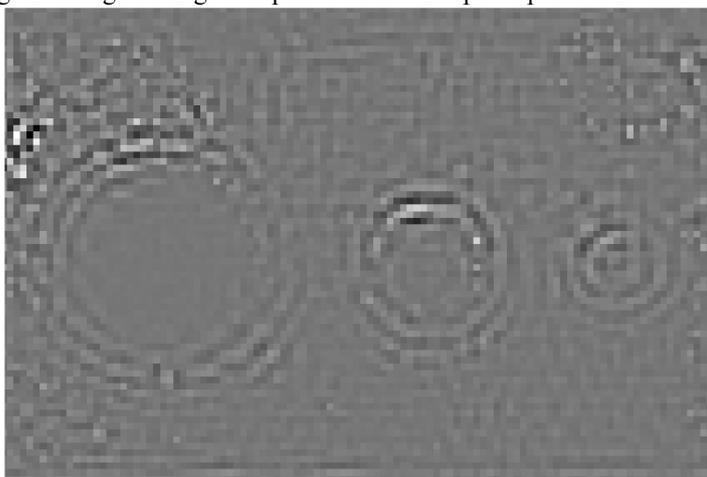


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na análise visual da figura 77(b), é possível observar que as características dos artefatos presentes na imagem original se concentraram na subimagem de detalhes horizontais gerada no segundo procedimento de decomposição, cuja representação está localizada no canto superior direito do primeiro quadrante. Com o objetivo de atenuar as faixas claras e escuras e de realçar as bordas das cavidades da imagem de R1, essa subimagem de detalhes horizontais e a de aproximação (canto superior esquerdo do primeiro quadrante na

figura 77(b)) foram eliminadas ao definir o valor dos seus pixels igual a zero. Após isso, a transformada *wavelet* inversa foi calculada com o objetivo de produzir a imagem filtrada da região R1. A figura 78 apresenta a respectiva imagem filtrada, na qual é possível observar a atenuação dos artefatos, bem como um maior destaque das bordas das discontinuidades.

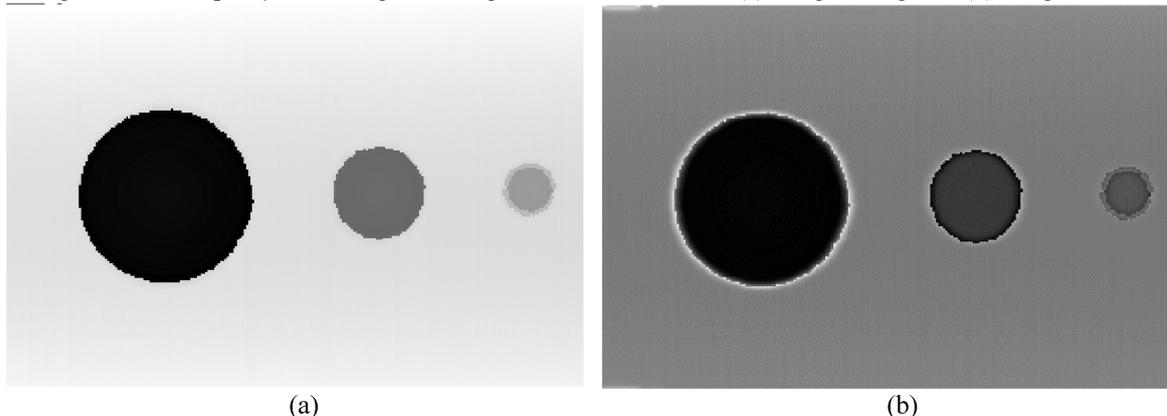
Figura 78 – Imagem da região R1 gerada pela técnica VA após o procedimento de filtragem FWAV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação ao processo de filtragem das imagens da técnica PE, o procedimento adotado foi o emprego de filtros passa-alta gaussianos com o objetivo de realçar as bordas das discontinuidades presentes. É importante destacar que não houve a necessidade de utilizar o filtro *notch* ou o filtro baseado na transformada *wavelet* nas imagens dessa técnica, pois as mesmas não apresentaram artefatos em forma de faixas claras e escuras como os presentes nas imagens da VA. A partir de uma comparação entre as imagens original e filtrada⁶ da região R2 (Figura 79), é possível verificar que as bordas das discontinuidades se tornaram mais nítidas após o processo de filtragem.

Figura 79 - Comparação de imagens da região R2 da técnica PE: (a) imagem original; (b) imagem filtrada



Fonte: Elaborado pelo autor.

⁶ O filtro passa-alta gaussiano foi implementado com o parâmetro de corte D_0 igual a 20 pixels.

O último passo adotado do processamento digital foi o da caracterização das descontinuidades presentes nas imagens filtradas de ambas as técnicas. Para isso, aplicou-se a transformada de Hough para identificar elementos circulares associados ao contorno das bordas dos orifícios presentes nas imagens avaliadas (DAVIES, 2005). Por fim, as relações pixel-milímetro das técnicas de ultrassom⁷ foram empregadas com o objetivo de estimar o diâmetro dos elementos circulares referentes às descontinuidades existentes nas regiões da peça metálica.

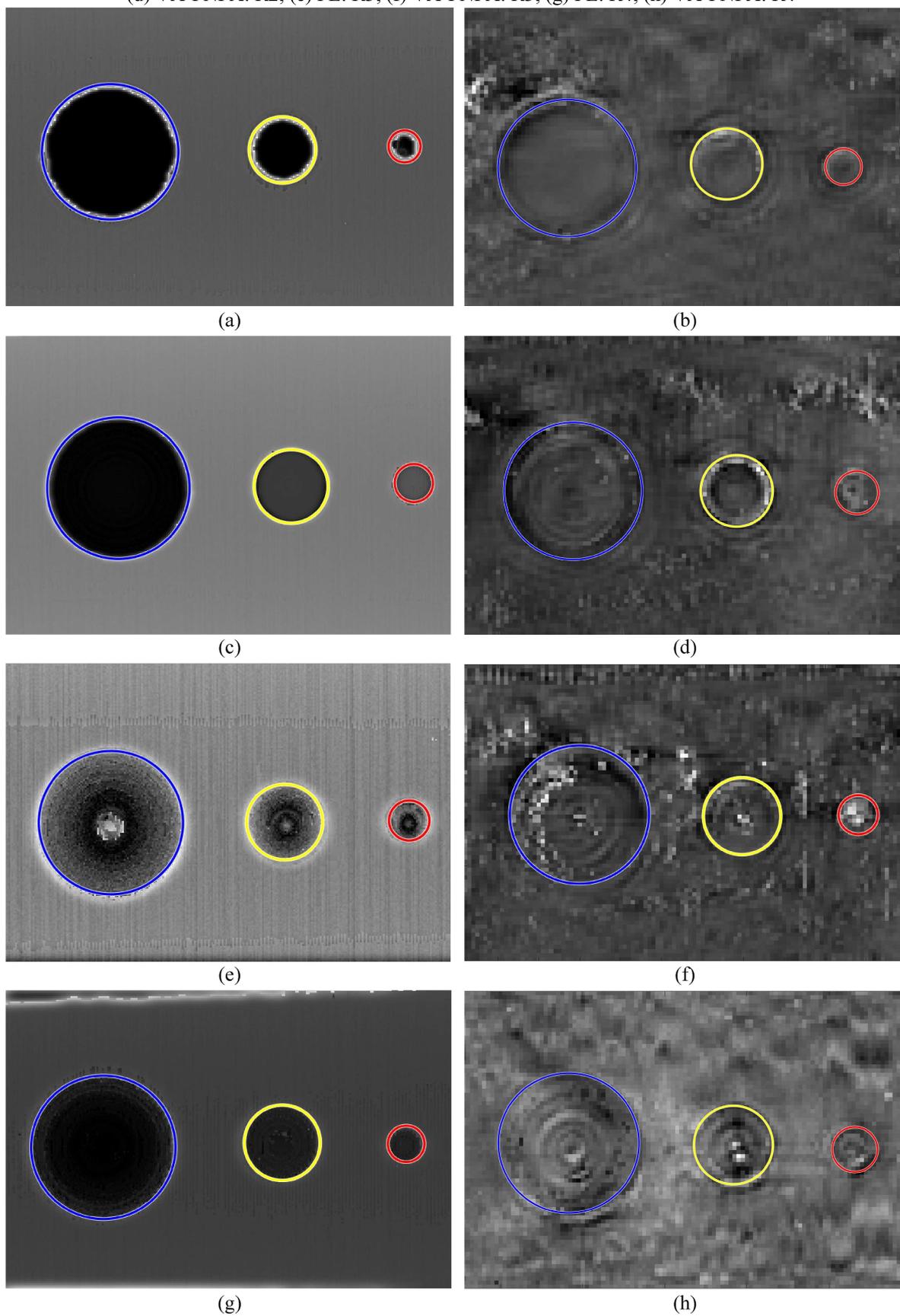
Os resultados obtidos ao fim do processamento das imagens da técnica PE e da VA utilizando o procedimento de filtragem FNPA (VA-FNPA) podem ser vistos na figura 80. Por ter apresentado um desempenho inferior, conforme será apresentado mais a frente, as imagens da técnica VA utilizando o procedimento de filtragem FWAV (VA-WAV) são ilustradas separadamente na figura 81. Os elementos circulares de cor azul, amarelo e vermelho estão associados às cavidades grande, média e pequena presentes nas regiões avaliadas.

Os diâmetros dos elementos circulares referentes aos orifícios grande, médio e pequeno, bem como os desvios gerados quando comparados ao valor verdadeiro convencional, podem ser vistos na tabela 1. Para um melhor entendimento, a figura 82 apresenta os desvios calculados para cada técnica e para cada região avaliada.

De acordo com a tabela 1 e a figura 82, é possível verificar que as imagens geradas pela técnica PE apresentaram orifícios com diâmetros mais próximos ao valor verdadeiro convencional se comparadas às da técnica VA, principalmente quando as regiões R3 e R4 são avaliadas. Para a maioria das cavidades analisadas, a técnica PE obteve desvios com pelo menos três quartos da magnitude dos encontrados para a VA-FNPA e desvios com pelo menos a metade da magnitude para a VA-FWAV. Essa diferença entre os desempenhos das técnicas PE e VA pode ser explicada pela configuração e pelas características das bancadas de ensaio utilizadas durante as medições. É importante lembrar que o sistema mecânico de posicionamento da bancada da técnica VA foi configurado para realizar varreduras no corpo de prova com espaçamento de 0,25 mm entre os pontos de medição. Por outro lado, o sistema de posicionamento da bancada da técnica PE realizou varreduras com um espaçamento de no mínimo 2,5 vezes menor.

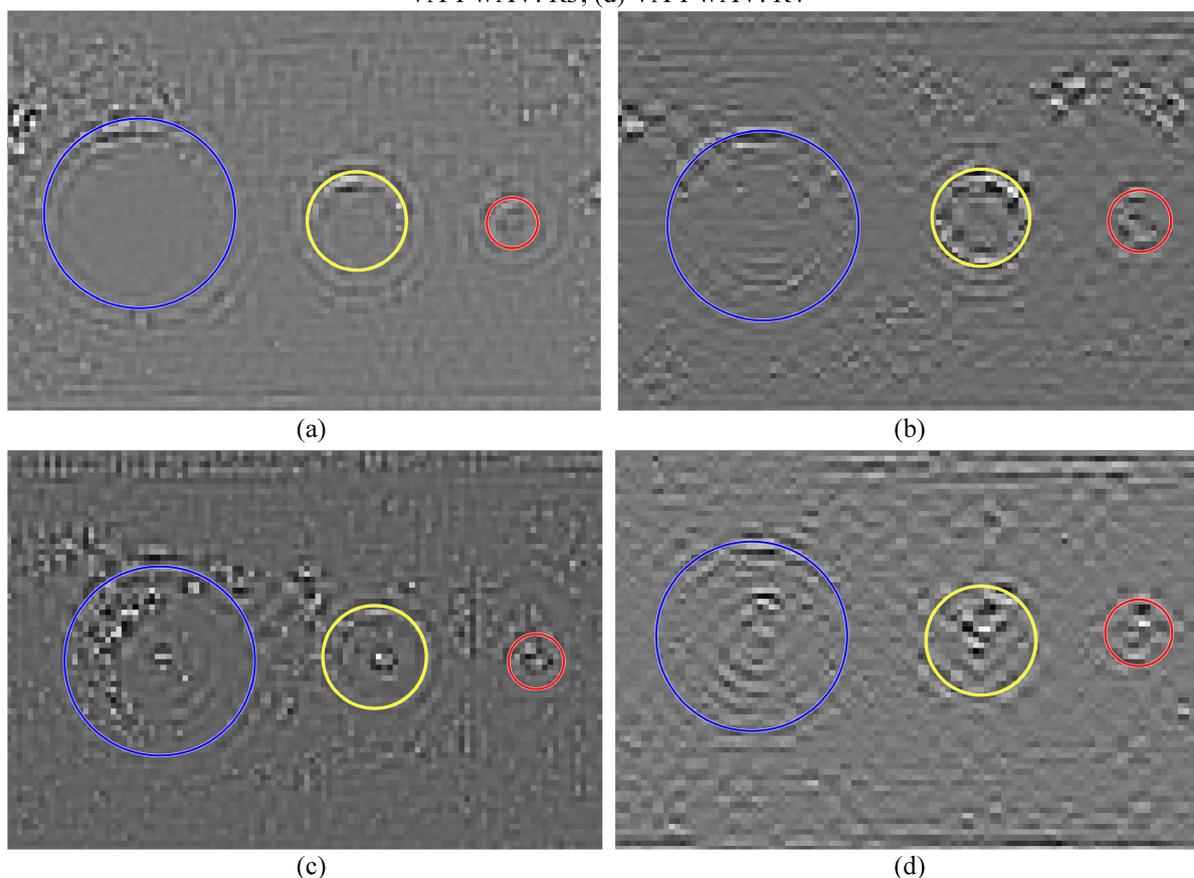
⁷ Para as imagens da técnica VA, a relação pixel-milímetro foi de 0,25 mm⁻¹. Já para as imagens do PE, a relação foi de 0,1 mm⁻¹.

Figura 80 - Resultados obtidos após o processamento das imagens:(a) PE: R1; (b) VA-FNPA: R1; (c) PE: R2; (d) VA-FNPA: R2; (e) PE: R3; (f) VA-FNPA: R3; (g) PE: R4; (h) VA-FNPA: R4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 81 - Resultados obtidos após o processamento das imagens:(a) VA-FWAV: R1; (b) VA-FWAV: R2; (c) VA-FWAV: R3; (d) VA-FWAV: R4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 - Diâmetros dos orifícios e desvios obtidos

Região	Tamanho orifício	Diâmetro (mm)			Desvio (mm)		
		VA-FNPA	VA-FWAV	PE	VA-FNPA	VA-FWAV	PE
R1 (passante)	Grande	8.17	8.46	7.87	+ 0.17	+0.46	- 0.13
	Médio	4.22	4.39	3.85	+ 0.22	+0.39	- 0.15
	Pequeno	2.16	2.25	1.85	+ 0.16	+0.25	- 0.15
R2 (base plana)	Grande	8.23	8.52	8.21	+ 0.23	+0.52	+ 0.21
	Médio	4.29	4.36	4.27	+ 0.29	+0.36	+ 0.27
	Pequeno	2.56	2.78	2.21	+ 0.56	+0.78	+ 0.21
R3 (base cônica)	Grande	8.36	8.46	8.24	+ 0.36	+0.46	+ 0.24
	Médio	4.65	4.60	4.34	+ 0.65	+0.60	+ 0.34
	Pequeno	2.36	2.45	2.30	+ 0.36	+0.45	+ 0.30
R4 (base esférica)	Grande	8.42	8.48	8.14	+ 0.42	+0.48	+ 0.14
	Médio	4.73	4.88	4.28	+ 0.73	+0.88	+ 0.28
	Pequeno	2.71	2.97	2.06	+ 0.71	+0.97	+ 0.06

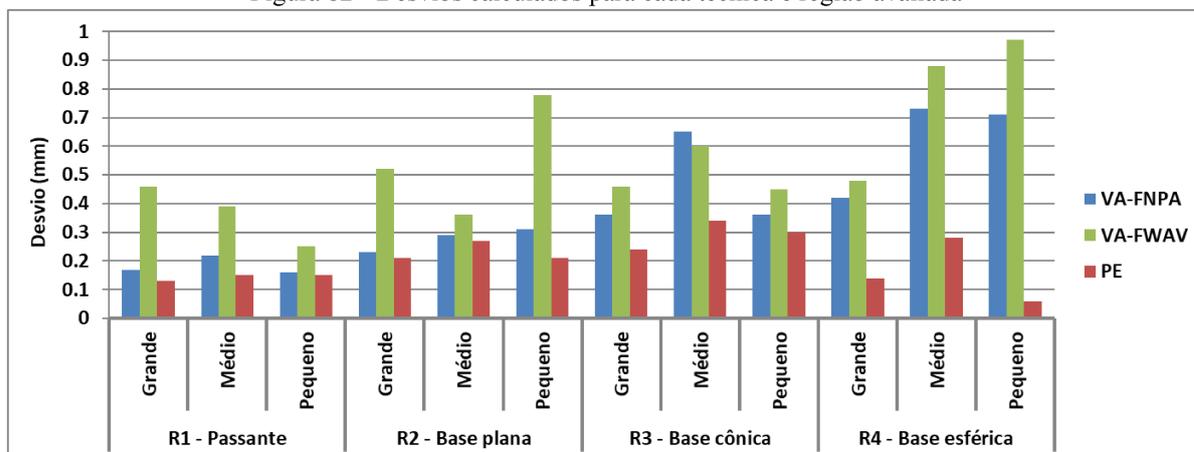
Legenda:

PE: técnica pulso-eco

VA: técnica de vibro-acustografia

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 82 - Desvios calculados para cada técnica e região avaliada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, o transdutor de ultrassom utilizado nos ensaios da VA apresentava uma resolução axial e lateral pelo menos vinte vezes maior se comparado ao da bancada do PE⁸. É possível verificar que os maiores desvios obtidos pela VA-FNPA e VA-FWAV (0,73 mm e 0,97 mm, respectivamente) são da mesma ordem de grandeza da resolução lateral do transdutor confocal empregado nos ensaios (1,7 mm). A partir desses dois fatores, pode-se afirmar que as imagens da técnica PE foram criadas com uma melhor resolução se comparadas às da técnica VA. No entanto, os resultados obtidos por essa última indicam que a maioria dos erros observados nas medições são menores que o dobro do valor de deslocamento do sistema de posicionamento entre os pontos de inspeção, o que mostra a possibilidade de aprimorar o desempenho da VA se um valor de deslocamento menor for utilizado. Ademais, o transdutor de ultrassom confocal empregado neste estudo era um protótipo desenvolvido para esta avaliação específica. Portanto, um transdutor com melhores propriedades pode contribuir para que a técnica VA alcance um desempenho mais próximo ao da técnica PE.

Em uma análise mais específica dos resultados alcançados com as técnicas PE e VA-FNPA, foi observado um desempenho semelhante de ambas as técnicas quando os desvios dos orifícios da região R1 são avaliados, com erros em torno de 0,14 mm e 0,18 mm, respectivamente. É possível verificar que, por possuir cavidades do tipo passante, a imagem da região R1 produzida pela técnica VA-FNPA (Figura 80(b)) não apresenta anéis circulares internos às descontinuidades, como ocorre nas demais imagens associadas às regiões R2, R3 e R4 (Figura 80(d)(f)(h)). Além disso, artefatos próximos às cavidades, em forma de pontos de cor mais clara presentes na representação de R3 ou como faixas claras e escuras em R4,

⁸ A diferença entre as resoluções axial e lateral dos transdutores de ultrassom das técnicas PE e VA tem uma relação direta com os valores da frequência central desses dispositivos.

não são perceptíveis na imagem da região R1. A partir disso, pode-se concluir que a presença desses anéis internos e dos artefatos próximos às cavidades prejudicou a aplicação da transformada de Hough e a consequente identificação dos elementos circulares associados às bordas dos orifícios em R2, R3 e R4, resultando em um desempenho mais fraco da VA-FNPA nessas regiões se comparado ao obtido em R1.

Quando os diâmetros das cavidades da região R2 são avaliados frente aos resultados da região R1, observa-se que os desvios calculados apresentaram um aumento de mesma proporção tanto para a VA-FNPA quanto para o PE, com exceção ao erro obtido para o orifício pequeno. A queda no desempenho de ambas as técnicas para analisar a região R2 está relacionada com os seguintes fatores: a presença dos anéis circulares internos na imagem gerada pela VA-FNPA, conforme descrito no parágrafo anterior; e de partes ausentes na representação da técnica PE próxima à região das bordas das descontinuidades, decorrente da sensibilidade dessa técnica em relação ao ângulo de incidência do feixe de ultrassom emitido na superfície do corpo de prova. A ocorrência desses dois fatores acabou afetando a identificação dos elementos circulares associados às bordas dos orifícios da região R2.

Uma possível forma de melhorar o desempenho das técnicas de ultrassom para identificar as bordas das cavidades nas regiões avaliadas seria o emprego da transformada de Radon em substituição à transformada de Hough. Em trabalho publicado por Okman et al. (2013), os autores mostraram que essa ferramenta se mostrou mais robusta em imagens com artefatos e que alcançou um melhor desempenho frente à transformada de Hough para detectar círculos em imagens obtidas por satélites.

Por fim, uma análise dos resultados alcançados por VA-FWAV mostra que ainda existe a necessidade de aprimorar o emprego da ferramenta wavelet para processamento de imagens neste trabalho. Isso se deve ao fato de que VA-FWAV obteve um desempenho inferior à VA-FNPA, apresentando desvios com maior magnitude para praticamente todos os casos avaliados. Entretanto, é importante notar um comportamento semelhante entre VA-FWAV e VA-FNPA quando os desvios por regiões são avaliados. A média dos valores obtidos para R1, por exemplo, apresentou a menor magnitude dentre todas as regiões tanto para VA-FWAV quanto para VA-FNPA.

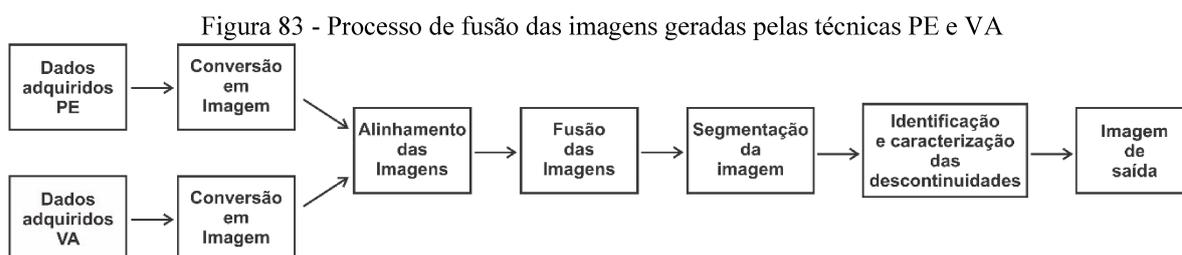
5 FUSÃO DAS IMAGENS GERADAS PELAS TÉCNICAS PE E VA

O capítulo cinco apresenta o uso de ferramentas de fusão de imagens que envolvem as técnicas PE e VA, com o objetivo de aprimorar a detecção e a caracterização das descontinuidades presentes no corpo de prova. Como PE e VA possuem sistemas de medição semelhantes, é possível realizar medições simultâneas com ambas as técnicas em um mesmo arranjo estrutural. Dessa forma, informações adicionais a respeito do objeto em teste podem ser obtidas sem que haja um aumento significativo do tempo de inspeção. Em um contexto de dados gerados por técnicas independentes de um mesmo corpo de prova, o emprego de ferramentas de fusão de imagens se mostra de grande valia (MITCHELL, 2010). A partir disso, pretende-se aproveitar o potencial da técnica VA na identificação e caracterização de defeitos com o intuito de mitigar as limitações apresentadas pela técnica PE, como a sensibilidade em relação ao ângulo de incidência do feixe de ultrassom com a superfície do objeto em teste, além de problemas com o fenômeno de múltiplas reflexões.

Este capítulo está dividido em duas seções: a primeira descreve o processo de fusão adotado para as imagens geradas pelas técnicas PE e VA; e a segunda apresenta uma análise quantitativa dos resultados obtidos. Como já feito na seção 4.3, somente as representações criadas para as regiões R1 até R4 foram consideradas nesta etapa.

5.1 PROCESSO DE FUSÃO DE IMAGENS

Esta seção descreve o processo utilizado para a fusão das imagens geradas pelas técnicas PE e VA, cujas etapas são apresentadas na figura 83.



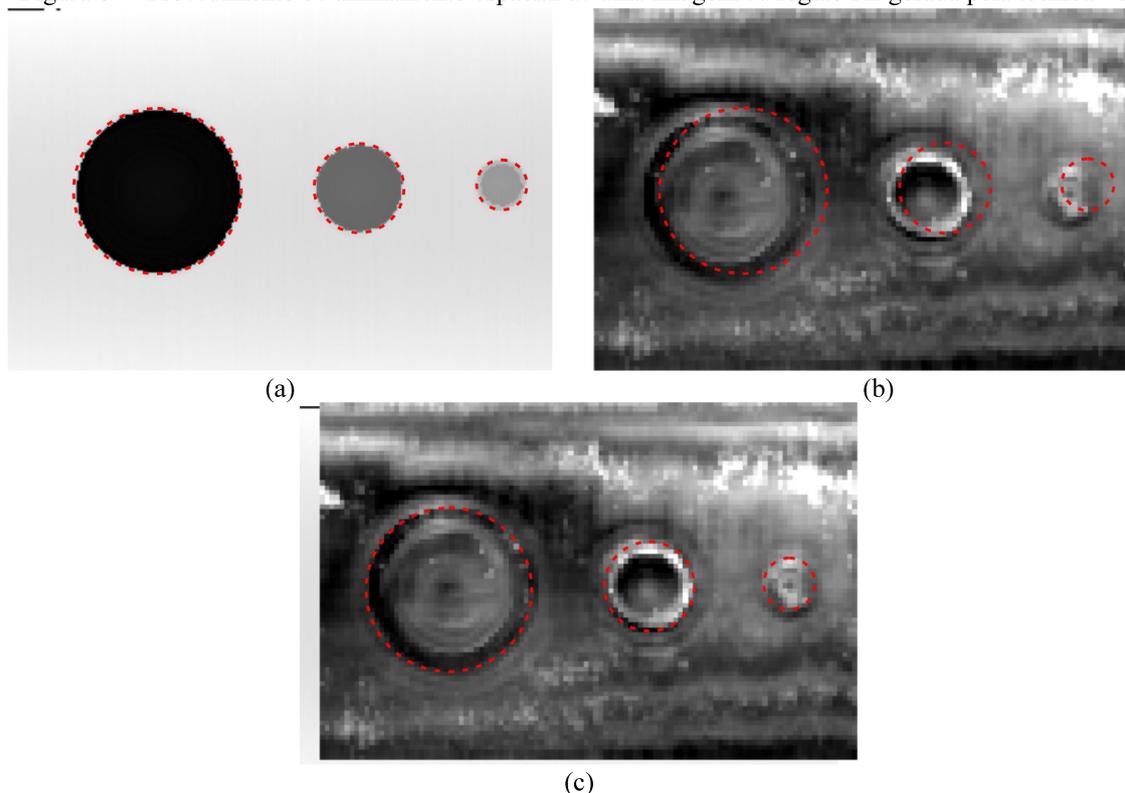
Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira etapa do processo de fusão foi o da conversão dos dados adquiridos por ambas as técnicas em imagens (procedimento similar ao descrito na seção 4.3). Para VA, a matriz de pixels gerada foi normalizada e, em seguida, convertida em uma imagem de 8 bits. Já para a técnica PE, as suas representações tridimensionais foram primeiramente reamostradas, para que as mesmas pudessem apresentar uma resolução espacial equivalente ao dos dados gerados pela técnica VA. A partir disso, o eixo z de coordenadas da

representação tridimensional foi normalizado e, posteriormente, convertido em uma imagem bidimensional de 8 bits.

Posteriormente à primeira etapa, o procedimento de alinhamento das imagens geradas foi realizado. É importante destacar que o único alinhamento feito foi o tipo espacial, já que as imagens das técnicas PE e VA apresentavam a mesma resolução. Uma ferramenta baseada em transformação geométrica iterativa foi empregada para efetuar o alinhamento espacial das imagens da VA, utilizando as imagens da técnica PE como referência (MATTES et al., 2001). Primeiro, estimou-se uma transformação geométrica inicial, a qual foi sendo iterativamente modificada por meio de uma interpolação bilinear, de uma métrica de similaridade e de uma ferramenta de descida de gradiente⁹. Um exemplo de alinhamento empregado pode ser visto na figura 84, que apresenta uma imagem da região R2 gerada pela técnica PE (referência) com as bordas das discontinuidades destacadas em vermelho (a), uma imagem da técnica VA desalinhada e o que deveria ser a posição correta das discontinuidades (b) e, por fim, uma imagem da técnica VA já alinhada (c), de acordo com a imagem de referência.

Figura 84 - Procedimento de alinhamento espacial de uma imagem da região R2 gerada pela técnica VA

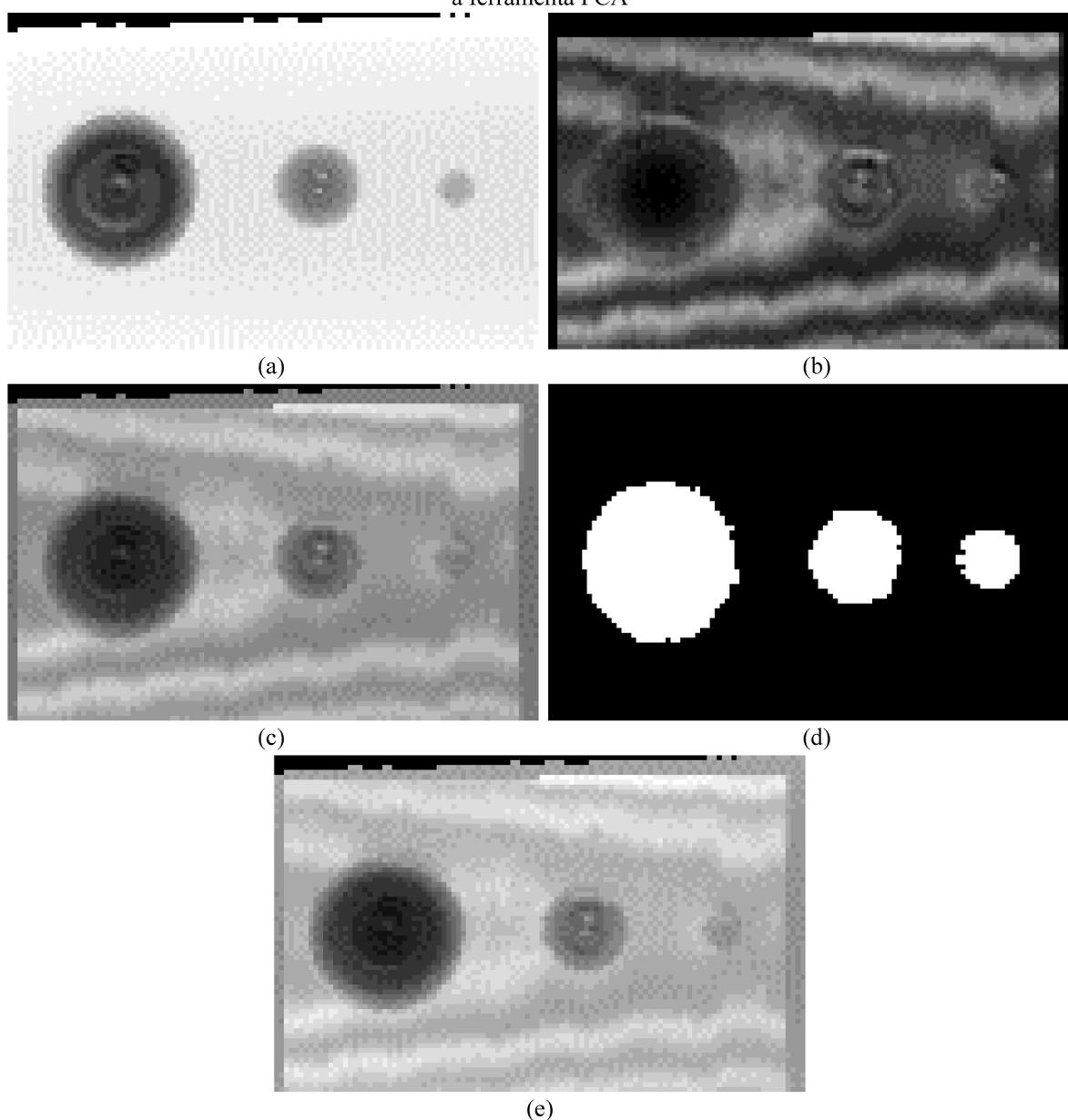


Fonte: Elaborado pelo autor.

⁹ Mais informações sobre o princípio de funcionamento dessa ferramenta de transformação geométrica iterativa podem ser encontradas em trabalhos de Styner et al. (2000), Mattes et al. (2001), Vercauteren et al. (2009) e Gonzalez (2010).

A terceira etapa se refere à fusão propriamente dita das imagens de ambas as técnicas. Dentre as regras de fusão disponíveis, as empregadas neste trabalho de doutorado foram: regra de máximo (MAX); regra de mínimo (MIN); regra de média (MED); e regra booleana “OU”. Além disso, a ferramenta de análise PCA foi empregada em uma das abordagens adotadas para a fusão das imagens. A figura 85 ilustra alguns exemplos de imagens da região R4 geradas por meio das referidas regras de fusão e da ferramenta PCA.

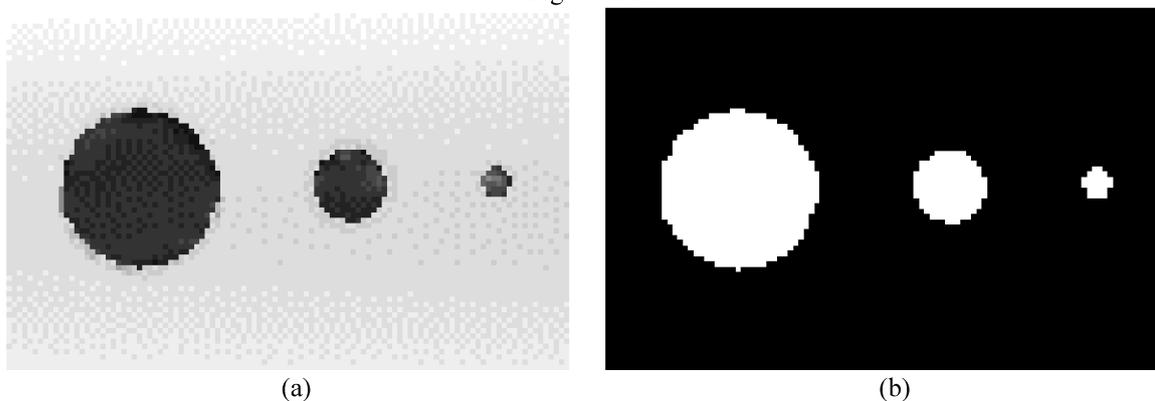
Figura 85 - Imagens geradas da região R4 após o uso de regras de fusão e da ferramenta PCA: (a) fusão com a regra MAX; (b) fusão com a regra MIN; (c) fusão com a regra MED; (d) fusão com a regra OU; (e) fusão com a ferramenta PCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

O passo seguinte do processo de fusão foi o da segmentação de imagens, cujo procedimento foi dividido em três partes. É importante frisar que esse passo foi aplicado depois ou até mesmo antes da fusão propriamente dita, dependendo da abordagem empregada. A primeira parte da segmentação é o uso de um filtro passa-baixa baseado na transformada rápida de Fourier de duas dimensões (2D-FFT, do inglês *two-dimensional fast Fourier transform*), com o objetivo de atenuar componentes de alta frequência associadas aos ruídos. Já a segunda parte está relacionada com a aplicação do método de segmentação de Otsu (OTSU, 1979), cuja ferramenta calcula um limiar de valor ótimo para dividir o histograma da imagem em dois grupos dominantes. A partir desse método, uma imagem binária é gerada com os defeitos formados por pixels de cor branca e o fundo da imagem com pixels de cor preta. Por fim, um algoritmo baseado em reconstrução morfológica foi empregado para eliminar os pixels considerados como artefatos na imagem (SOILLE, 2013). A figura 86 ilustra uma comparação entre uma imagem da região R1 após o processo de fusão e a respectiva imagem já segmentada.

Figura 86 - Comparação entre imagens da região R1: (a) após o processo de fusão; (b) a respectiva imagem segmentada

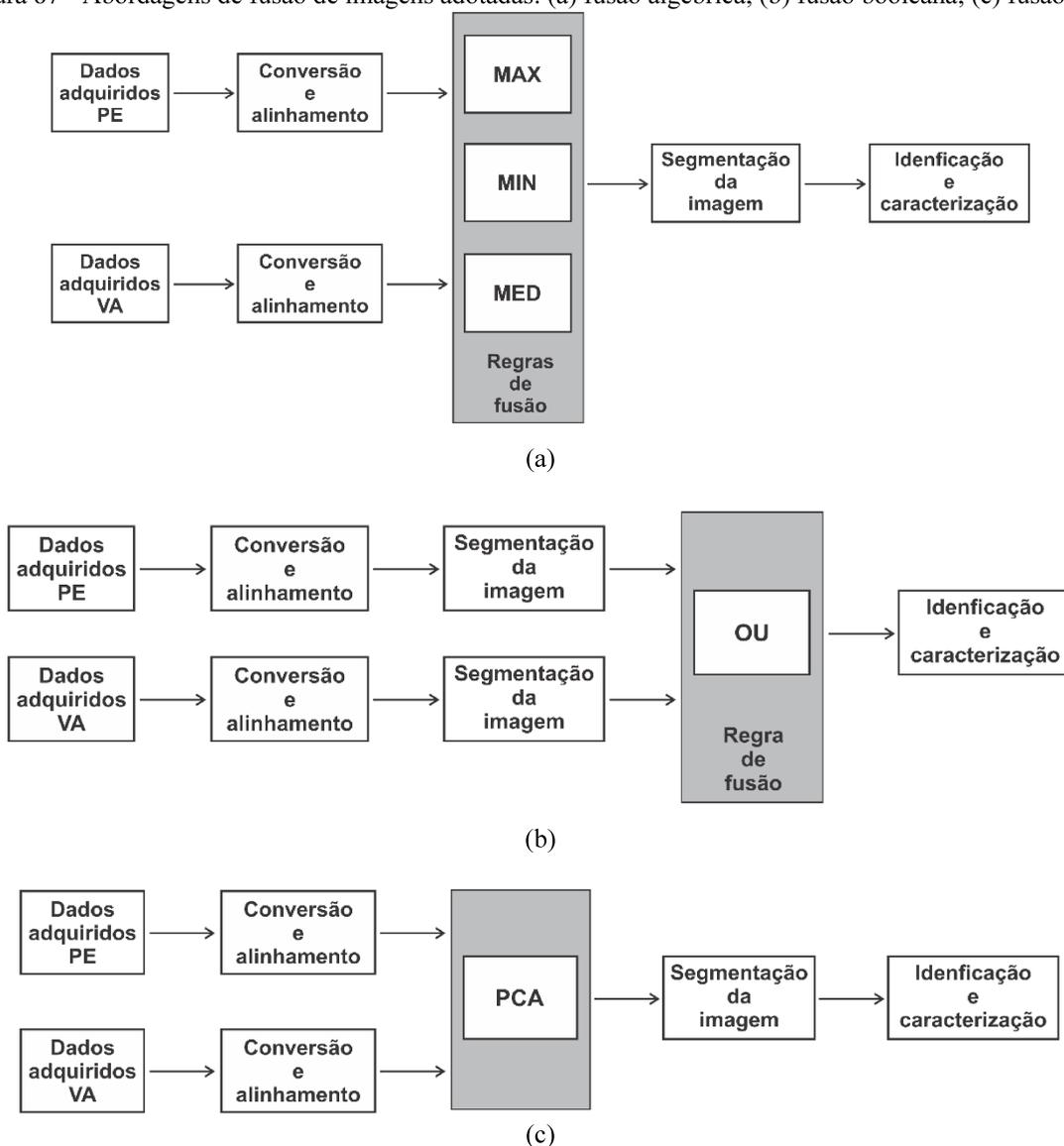


Fonte: Elaborado pelo autor.

O último passo adotado foi o da identificação e da caracterização das discontinuidades presentes nas imagens segmentadas. Para alcançar esse objetivo, a Transformada de Hough foi utilizada para identificar elementos circulares associados ao contorno das bordas dos orifícios. Após a detecção desses elementos, seus respectivos diâmetros foram determinados ao usar a relação pixel-milímetro da técnica VA.

A partir das etapas descritas, algumas abordagens de fusão foram definidas e adotadas neste trabalho, conforme apresentado na figura 87.

Figura 87 - Abordagens de fusão de imagens adotadas: (a) fusão algébrica; (b) fusão booleana; (c) fusão PCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da figura 87, é possível observar que cada abordagem apresenta uma estrutura específica. As abordagens apresentadas na figura 87(a) e 87(b), por exemplo, podem ser resumidas pela aplicação direta das regras de fusão algébrica e booleana, respectivamente, além das etapas de segmentação e caracterização das descontinuidades presentes nas imagens de saída. Essas abordagens são denominadas deste ponto em diante como fusão algébrica com a regra de máximo (FA-MAX), com a regra de mínimo (FA-MIN) e com a média (FA-MED), além da fusão booleana (FB). Já a abordagem em (c) utiliza a ferramenta PCA para implementar a fusão das imagens de entrada e, na sequência, realiza as etapas de segmentação e caracterização. Essa última abordagem é denominada como fusão PCA (FPCA).

5.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS

A atual seção apresenta uma análise quantitativa dos resultados obtidos com a aplicação das abordagens de fusão descritas na seção 5.1. Para alcançar esse objetivo, determinou-se, primeiramente, o desvio entre os valores dos diâmetros das cavidades nas imagens criadas e os seus respectivos valores medidos pelo micrômetro. Em seguida, os desvios obtidos foram agrupados por meio do cálculo da média da raiz do erro quadrático (E_q) para cada abordagem de fusão utilizada, para cada tipo de orifício da peça e para cada região avaliada. A equação (15) descreve como esse parâmetro de comparação foi calculado.

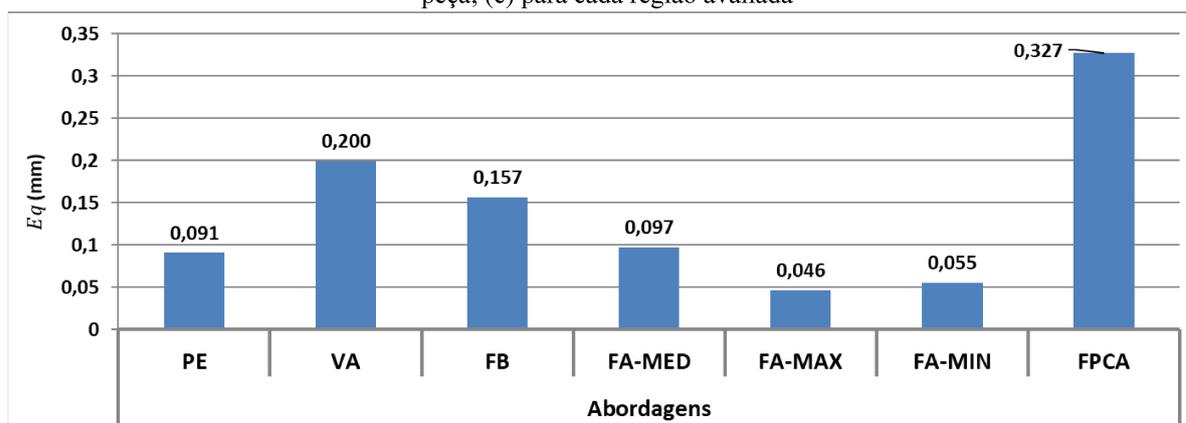
$$E_q = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N e_i^2}}{N} \quad (15)$$

sendo,

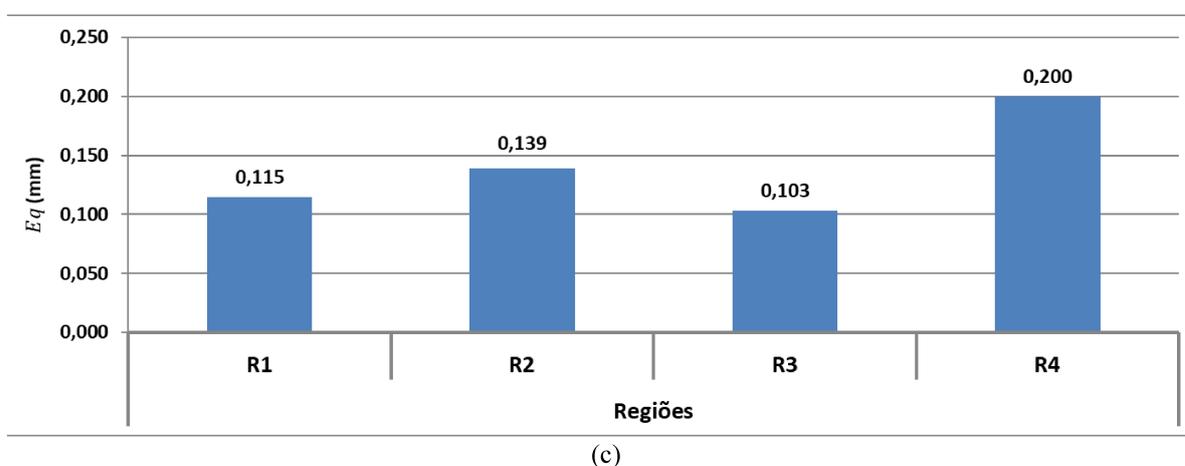
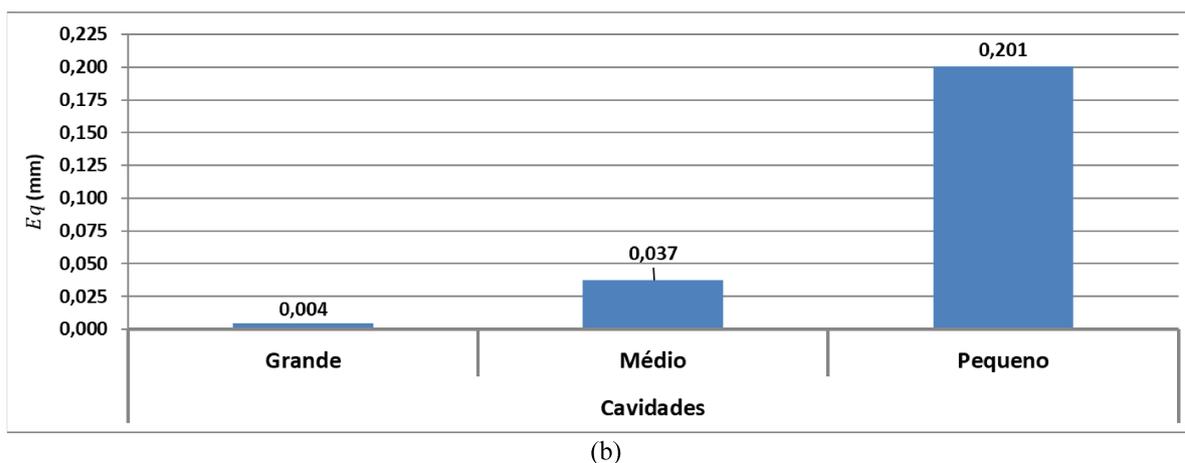
N número de medições
 e_i valor do desvio da i -ésima medição

A figura 88 apresenta os valores de E_q calculados para cada uma das abordagens de fusão, para cada tipo de orifício da peça e para cada região avaliada. Para fins de comparação, os valores de E_q também foram calculados para as imagens de entrada, isto é, para as imagens geradas pelas técnicas PE e VA, conforme pode ser visto na figura 88(a).

Figura 88 - Valores dos erros calculados: (a) para cada abordagem de fusão; (b) para cada tipo de orifício da peça; (c) para cada região avaliada



(a)



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os dados da figura 88(a), é possível verificar que a abordagem FA-MAX apresentou um erro menor que os obtidos pelas técnicas PE e VA, como também para as outras abordagens de fusão empregadas. O desempenho da FA-MAX pode ser explicado pelo procedimento de fusão adotado por essa abordagem, o que resulta na eliminação de regiões de contraste mais baixo e, conseqüentemente, facilita a detecção dos defeitos na imagem final. Além disso, pode-se destacar o desempenho superior da abordagem FA-MIN frente aos erros obtidos pelas técnicas de ultrassom PE e VA e pelas abordagens FB, FA-MED e FPCA. Os resultados alcançados por FA-MAX e FA-MIN são de grande relevância para o contexto deste trabalho, pois mostra que pelo menos uma das abordagens avaliadas obteve um erro menor que os apresentados por ambas as técnicas de ultrassom, corroborando o uso da fusão de imagens para aprimorar a detecção e a caracterização das discontinuidades presentes no corpo de prova.

Outro ponto relevante nos dados apresentados na figura 88(a) se refere aos desempenhos de FA-MED e de FB. Diante dos resultados alcançados, não é possível afirmar que o uso dessas abordagens de fusão trará algum ganho na inspeção de dutos metálicos, já

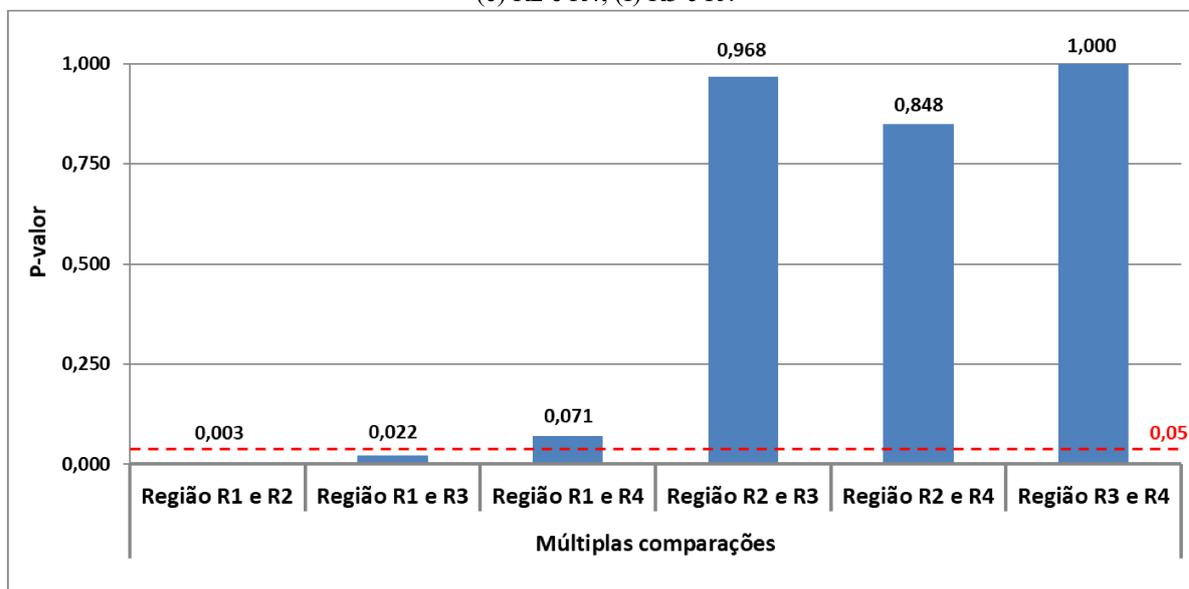
que FA-MED e FB apresentaram um erro menor que o obtido pela técnica VA, porém maior que o da técnica PE tomada de forma isolada. No que concerne aos resultados com a FPCA, observa-se que essa abordagem obteve o maior erro dentre todos os casos avaliados. Uma das razões para esse mau desempenho se refere à dificuldade em identificar os orifícios pequenos nas imagens após a fusão com a FPCA, o que elevou o seu erro quadrático em 49,83%. Se somente forem consideradas os orifícios grandes e médios, o erro apresentado pela abordagem FPCA seria 0,194, ou seja, próxima ao desempenho alcançado pela técnica VA. É importante destacar que as outras abordagens de fusão obtiveram erros semelhantes na análise dos orifícios grandes, médios e pequenos, bem como das regiões R1, R2, R3 e R4.

Quando os dados da figura 88(b) são analisados, é possível observar uma relação inversa entre o tamanho da cavidade presente nas regiões da peça e o valor de E_q . Isso pode ser explicado pela maior facilidade em identificar e caracterizar defeitos de maiores dimensões frente aos que possuem um menor tamanho. Vale lembrar que os valores de E_q apresentados na figura 88(b) representam a contribuição dos erros de todas as abordagens de fusão empregadas, e não somente dos erros individuais das técnicas PE ou VA.

Por fim, o gráfico da figura 88(c) mostra que R3 obteve o menor erro dentre todas as regiões avaliadas, mesmo que as imagens de R1 e R2 tenham apresentado um contraste maior entre os defeitos e as áreas próximas. A partir de uma análise de variância¹⁰ (ANOVA, do inglês *analyses of variance*) para verificar se existe uma diferença significativa entre as medições realizadas para cada região, é possível observar uma elevada variância relacionada à R3 e R4 devido ao baixo contraste nos defeitos presentes nessas regiões. Apesar de apresentar o menor erro, a elevada variância presente nos resultados não torna R3 significativamente diferente dos dados das demais regiões, com exceção para R1. A figura 89 ilustra a análise de variância realizada com as múltiplas comparações entre as regiões R1, R2, R3 e R4.

¹⁰ Nível de confiança utilizado foi de 95%.

Figura 89 - Análise de variância comparando as regiões: (a) R1 e R2; (b) R1 e R3; (c) R1 e R4; (d) R2 e R3; (e) R2 e R4; (f) R3 e R4



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo é dividido em três seções. A seção 6.1 apresenta as conclusões desta tese de doutorado, enquanto a seção 6.2 descreve as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, os artigos escritos durante o desenvolvimento desta tese de doutorado são apresentados na seção 6.3.

6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou uma análise de viabilidade da técnica VA para avaliação da integridade de trechos de dutos metálicos com características típicas dos utilizados na indústria de petróleo e gás. A partir de um levantamento bibliográfico apresentado no capítulo 2, verificou-se que a aplicação da técnica de ultrassom PE se apresenta como uma das soluções mais difundidas para a identificação e caracterização de descontinuidades em dutos. Apesar de seu emprego generalizado na inspeção desse tipo de estrutura, o desempenho da técnica PE pode ser prejudicado em razão das condições da superfície do objeto a ser avaliado. Dentro desse contexto, a técnica VA apresenta um grande potencial para aprimorar a avaliação da integridade de dutos metálicos. Isso se deve ao fato de o desempenho da respectiva técnica não depender diretamente das condições da superfície do objeto em teste.

Neste trabalho, um corpo de prova constituído de aço foi confeccionado para reproduzir uma seção de um duto utilizado na indústria de petróleo e gás. Descontinuidades com diferentes características geométricas foram usinadas em sua superfície interna e, a partir de ensaios experimentais, os desempenhos das técnicas de ultrassom de referência, nesse caso o PE, e VA foram avaliados por meio de análises qualitativas e quantitativas.

No que concerne à análise qualitativa dos resultados alcançados, foi possível identificar todas as descontinuidades presentes na superfície interna do corpo de prova, bem como determinadas características e dimensões, a partir das imagens geradas por ambas as técnicas. Entretanto, é importante notar que certas regiões das representações tridimensionais criadas pela técnica PE apresentaram partes ausentes, em razão da sua sensibilidade ao ângulo de incidência do feixe de ultrassom na superfície do corpo de prova. Além disso, houve a ocorrência de erros de medição em alguns pontos de inspeção nas regiões R6, R7 e R8 da peça metálica, processo que gerou pontos espúrios nas suas representações tridimensionais. Esse fato aconteceu devido a múltiplas reflexões das ondas de ultrassom na superfície do corpo e que apresentaram uma intensidade suficiente para serem detectadas pelo transdutor, mesmo que o foco desse elemento estivesse posicionado no interior do corpo de prova. Em relação à

VA, vale destacar que as imagens geradas por essa técnica apresentaram artefatos em forma de faixas claras e escuras, cuja origem está associada aos fenômenos de ondas estacionárias e reverberações. O número de faixas presentes nas imagens pode ser vinculado à curvatura e ao alinhamento da peça metálica em relação ao plano focal do transdutor, além de outras características da montagem experimental, como as dimensões do tanque empregado. Ademais, a imagem distorcida gerada da região R5 mostra o quão complicado era o processo de alinhamento do corpo de prova para o transdutor no momento das medições. Por fim, é importante destacar a existência de vários pontos de cor mais clara na imagem de R7, o que dificultou a identificação das características da descontinuidade. A ocorrência desses pontos pode ser explicada pela presença de bolhas de ar junto à superfície da peça no momento dos ensaios. A partir da alteração dos valores da escala de cinza da imagem original, tornou-se mais fácil identificar a presença da descontinuidade na região R7, porém a análise na região com as bolhas permaneceu comprometida.

A análise quantitativa foi realizada comparando os valores dos diâmetros dos orifícios presentes nas imagens criadas por ambas as técnicas e o valor verdadeiro convencional dos diâmetros dessas cavidades na peça metálica. A partir dos resultados obtidos, observou-se que os diâmetros dos orifícios nas imagens da técnica PE apresentaram valores mais próximos ao valor verdadeiro convencional se comparados aos da técnica VA. A diferença de desempenho de ambas as técnicas está relacionada com a configuração e as características dos sistemas de medição empregados. O sistema de posicionamento da bancada de ensaios da técnica VA, por exemplo, foi configurado para realizar varreduras com um espaçamento 2,5 vezes maior que o do PE, com o intuito de limitar o tempo de inspeção. Além disso, o transdutor de ultrassom do sistema de medição do PE apresentava uma resolução axial e lateral pelo menos vinte vezes menor se comparado ao da bancada da VA. Com base nesses dois fatores, é possível verificar que as imagens da técnica PE foram criadas com uma melhor resolução se comparadas às da técnica VA. Outro ponto a ser destacado na análise quantitativa se refere ao desempenho semelhante das técnicas de ultrassom quando a região R1 é avaliada. Isso se deve ao fato de a imagem dessa região produzida pela VA não apresentar anéis circulares internos às descontinuidades, como ocorreu nas demais imagens associadas às outras regiões avaliadas, e de artefatos próximos às cavidades, como pontos de cor mais clara em R3 ou em forma de faixas claras e escuras na representação de R4. Dessa forma, pode-se afirmar que a presença desses anéis e desses artefatos afetou a identificação do contorno das bordas das cavidades presentes nas regiões R2, R3 e R4, prejudicando o desempenho da VA.

Diante desse cenário, foi proposto o uso de técnicas de fusão de imagens para aliar as contribuições alcançadas pelas técnicas PE e VA, bem como sobrepor as suas limitações. Desse modo, buscou-se aprimorar a detecção e a caracterização das descontinuidades presentes no corpo de prova. Algumas abordagens de fusão de imagens foram empregadas neste trabalho, cuja estrutura era formada por regras de fusão e técnicas de processamento de imagens. A partir da análise do erro médio quadrático das imagens produzidas por todas as abordagens e pelas técnicas de ultrassom, verificou-se que a imagem gerada pela abordagem de fusão algébrica com a regra de máximo apresentou cavidades com diâmetros mais próximos aos valores medidos pelo micrômetro. Com base nos resultados alcançados, é possível concluir que o uso dos conceitos de fusão de imagens, no âmbito deste trabalho, proporcionou um melhor desempenho na identificação e caracterização das cavidades presentes nas regiões avaliadas.

Outro fator relevante que deve ser analisado se refere à aplicabilidade da técnica VA em inspeções reais de dutos metálicos, lembrando que a avaliação das técnicas de ultrassom no contexto deste trabalho foi realizada em ambiente de laboratório. O arranjo estrutural da VA apresentaria uma implementação mais complexa se comparado ao do PE, pois a primeira requer o emprego de um elemento adicional – o hidrofone – no momento dos ensaios. Em consequência disso, o sistema de medição da VA necessitaria de maior espaço, dificultando a inspeção interna de dutos subterrâneos de menor porte. Ademais, quando for preciso deslocar o conjunto transdutor confocal/hidrofone em vez do objeto em teste, como em casos relacionados à inspeção de estruturas de maior porte, é importante ressaltar que a distância entre ambos os elementos deve ser mantida estável para garantir um funcionamento adequado dessa técnica de ultrassom.

De uma forma geral, as análises qualitativas e quantitativas realizadas neste trabalho de doutorado mostraram a viabilidade da técnica VA para avaliação da integridade de dutos metálicos, tópico ainda pouco explorado na literatura científica. A partir da referida técnica, foi possível identificar todas as descontinuidades presentes no corpo de prova confeccionado, bem como caracterizar as cavidades usinadas em determinadas regiões. Apesar de um desempenho mais fraco frente à técnica de ultrassom de referência, pode-se afirmar que resultados promissores foram alcançados quando foram empregadas ferramentas de fusão para combinar as imagens das técnicas PE e VA, o que tornou ainda mais robusta a avaliação da integridade da peça metálica. Dessa forma, esta tese alcançou de maneira satisfatória o

objetivo estabelecido, proporcionando avanços de maneira direta para a área de ensaios não destrutivos.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na atual seção, alguns fatores relevantes que podem ser explorados são apresentados como possibilidade de trabalhos futuros. Dessa forma, as seguintes atividades são propostas para o prosseguimento deste trabalho de doutorado:

- definir a função de espalhamento pontual e a faixa dinâmica do sistema da técnica VA, cujos parâmetros envolvem o estudo da geração dos feixes de ultrassom emitidos pelo transdutor confocal e do comportamento do hidrofone nas medições dos sinais acústicos produzidos durante os ensaios;
- realizar uma análise dos anéis circulares presentes nas cavidades das imagens geradas pela VA (regiões R1 até R4), com o objetivo obter informações sobre a profundidade dessas descontinuidades;
- analisar o uso de ferramentas de deconvolução e do modo *chirp-imaging* para a excitação do transdutor confocal nos ensaios com a técnica VA, com o intuito de minimizar os efeitos produzidos pelos fenômenos de ondas estacionárias e de reverberações nos resultados alcançados;
- aprimorar a bancada da técnica VA em pelo menos dois pontos: empregar um transdutor confocal com melhor resolução axial e lateral, com o objetivo de produzir imagens de melhor resolução; e aperfeiçoar o processo de alinhamento do corpo de prova em relação ao plano focal do transdutor, evitando a geração de imagens distorcidas das regiões avaliadas;
- realizar uma análise da incerteza instrumental do sistema de medição utilizado nos ensaios com a técnica VA;
- aprimorar o emprego da transformada *wavelet* no processamento das imagens geradas pela técnica VA;
- avaliar outras ferramentas de fusão de imagens disponíveis, visando o aprimoramento da identificação e caracterização das descontinuidades presentes no corpo de prova;
- analisar o desempenho da técnica VA na avaliação de dutos de maior porte ou em aplicações reais;

- avaliar a possibilidade de gerar representações tridimensionais do corpo de prova pela técnica VA, realizando medições em diferentes profundidades da peça metálica com um transdutor de ultrassom que apresente melhor resolução axial, se comparado ao utilizado neste trabalho – essa atividade pode proporcionar a obtenção dos valores de profundidade das cavidades presentes no corpo de prova;
- avaliar a opção de empregar ferramentas de fusão em representações tridimensionais geradas pelas técnicas PE e VA, a fim de verificar quais seriam os ganhos para a identificação e caracterização das descontinuidades presentes no corpo de prova;
- analisar a possibilidade de realizar inspeções simultâneas com as técnicas PE e VA utilizando um único arranjo estrutural.

6.3 TRABALHOS PUBLICADOS

No escopo deste trabalho de doutorado, três artigos foram publicados e um aceito para publicação até o momento. O primeiro deles foi apresentado em um congresso internacional, cujo tema aborda o desenvolvimento de um amplificador de carga para aplicações com um sistema de inspeção baseado em ultrassom (MARCIÓ et al., 2016). O segundo artigo foi publicado em um periódico e seu objetivo era comparar o desempenho da técnica de ultrassom PE e de uma técnica óptica a laser para a avaliação qualitativa e quantitativa de descontinuidades presentes em um corpo de prova (MARCIÓ et al., 2019). O terceiro trabalho foi publicado em um periódico e abordava o uso de ferramentas de fusão de imagens que envolvem as técnicas PE e VA para aprimorar a detecção e a caracterização das descontinuidades presentes em um corpo de prova (OLIVEIRA et al., 2021). Por fim, um quarto artigo foi aceito para publicação em um periódico, cujo objetivo era analisar a viabilidade da técnica VA para a inspeção de trechos de dutos metálicos por meio de avaliações qualitativa e quantitativa de descontinuidades usinadas na superfície de uma peça metálica (MARCIÓ et al., 2021).

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15404**: Ensaio não destrutivo – Emissão acústica – Detecção e localização de vazamento, 2013b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16030**: Ensaio não destrutivo – Partículas magnéticas – Detecção de descontinuidades, 2012b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 330**: Ensaio não destrutivo – Ensaio por ultrassom – Princípios gerais, 2011.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 334**: Ensaio não destrutivo – Líquidos penetrantes – Detecção de descontinuidades, 2012a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 335**: Ensaio não destrutivo – Ultrassom – Terminologia, 2012.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 335**: Ensaio não destrutivo – Ultrassom – Terminologia, 2013.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM ISO 9712:2014**: Ensaio não destrutivo - Qualificação e certificação de pessoal em END, 2014a.
- ALIZAD, A.; WHALEY, D. H.; GREENLEAF, J. F.; FATEMI, M. Image features in medical vibro-acoustography: In vitro and in vivo results. **Ultrasonics**, v. 48, p. 559-562, 2008.
- ALIZAD, A.; WOLD, L. E.; GREENLEAF, J. F. Imaging mass lesions by vibro-acoustography: Modeling and experiments. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v. 23, p. 1087-1093, 2004.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção -ABENDI, 2011.
- ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção -ABENDI, 2013a.
- ANDREUCCI, R. **Partículas Magnéticas**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção -ABENDI, 2009.
- ANDREUCCI, R. **Radiologia Industrial**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção -ABENDI, 2013.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Regulamento técnico do sistema de gerenciamento da integridade estrutural das instalações terrestres de produção de petróleo e gás natural**. Disponível em: <www.anp.gov.br/wwwanp/?dw=14877> Acesso em: 05/04/2020.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 570**: Piping Inspection Code - Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-Service Piping Systems, 2012.

ASNT - THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. **Introduction to nondestructive testing.** Disponível em: <https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Testing.aspx>. Acesso em: 25/04/2020.

BAGGIO, A. L. **Imagens acústicas geradas pela interação da radiação ultrassônica com o meio material.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada à Medicina e Biologia. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 2011.

BAGGIO, A. L.; KAMIMURA, H. A. S.; LOPES, J. H.; CARNEIRO, A. A. O.; SILVA, G. T. Parametric array signal in confocal vibro-acoustography. **Applied Acoustics**, v. 126, p. 143-148, 2017.

BARBIAN, A.; BELLER, M.; HARTMANN, S.; SCHNEIDER, U. High resolution ultrasonic in-line inspection: added value and special applications. **In: 6th Pipeline Technology Conference**, Alemanha, 2011.

BARROSO, F. A. **Projeto e desenvolvimento de um sistema intercambiável para inspeção em dutos de petróleo e gás.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2011.

BENEDET, M. E. **Desenvolvimento de um sistema de comunicação dinâmica sem fio através de paredes metálicas.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

BERSANI, C.; CITRO, L.; GAGLIARDI, R. V.; SACILE, R. Accident occurrence evaluation in the pipeline transport of dangerous goods. **Chemical Engineering Transactions**, v. 19, p. 249-254, 2010.

BOHLOULI, R.; ROSTAMI, B.; KEIGHOBADI, J. Application of neuro-wavelet algorithm in ultrasonic-phased array nondestructive testing of polyethylene pipelines. **Journal of Control Science and Engineering**, v. 2012, 2012.

BRAZ, G. A. **Implementação de uma técnica de caracterização de tecidos biológicos baseada na emissão acústica em baixa frequência (kHz) de alvos excitados em alta frequência (MHz).** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada à Medicina e Biologia. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 2020.

BURGESS, N.T. **Quality assurance of welded construction.** 2 ed. Barking: Elsevier science publishers LTD, 1989.

BUSCHINELLI, P. D. V. **Desenvolvimento de um sistema óptico por triangulação cônica para inspeção do perfil interno de dutos.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

CAMINERO, M. A.; GARCÍA-MORENO, I.; RODRÍGUEZ, G. P.; CHACÓN, J. M. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 165, p. 131-142, 2019.

CERQUEIRA, A. S. **Avaliação da técnica de ultrassom phased array na inspeção de juntas soldadas dissimilares e cladeadas com diferentes espessuras de amanteigamento**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

CHEN, S.; FATEMI, M.; KINNICK, R.; GREENLEAF, J. F. Comparison of stress field forming methods for vibro-acoustography. **Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 51, p. 313-321, 2004.

DAVIES, E. R. **Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities**. 3 ed. Morgan Kaufman Publishers, 2005.

DEIGHTON, M. G. **Facility Integrity Management: Effective Principles and Practices for the Oil, Gas, and Petrochemical Industries**. Elsevier, 2016.

DHILLON, B. S. **Safety and Reliability in the Oil and Gas Industry: A Practical Approach**. CRC Press, 2016.

FAHIM, M. A.; ALSAHHAF, T. A.; ELKILANI, A. **Fundamentals of Petroleum Refining**. Elsevier, 2010.

FATEMI, M.; GREENLEAF, J. F. Ultrasound-stimulated vibro-acoustic spectrography. **Science**, v. 280, p. 82-85, 1998.

FATEMI, M.; GREENLEAF, J. F. Vibro-acoustography: An imaging modality based on ultrasound-stimulated acoustic emission. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 96, p. 6603-6608, 1999.

FATEMI, M.; WOLD, L. E.; ALIZAD, A.; GREENLEAF, J. F. Vibro-acoustic tissue mammography. **IEEE Trans. Med. Imaging**, v. 21, p. 1-8, 2002.

FREIRE, J. L. F. **Engenharia de Dutos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2009.

GEREMIA, G. **Sistema autônomo de inspeção de dutos**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

GHAVAMI, S.; DENIS, M.; GREGORY, A.; WEBB, J.; BAYAT, M.; KUMAR, V.; FATEMI, M.; ALIZAD, A. Pulsed vibro-acoustic method for assessment of osteoporosis & osteopenia: A feasibility study on human subjects. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 97, p. 187-197, 2019.

GMC - GALIL MOTION CONTROL. **DMC-22X0 and -20x0 Series Datasheet**. Disponível em:<http://www.galilmc.com/download/datasheet/ds_2xx0.pdf> Acesso em: 23/05/2020.

GONZALEZ, R; WOODS, R. E. **Digital image processing**. 3 ed, Pearson, 2010.

GONZALEZ, R; WOODS, R. E; EDDINS, S. **Digital image processing using MATLAB**. 2 ed, Gatesmark Publishing, 2009.

HABOR, D.; NEUHAUS, S.; VOLLBORN, T; WOLFART, S; RADERMACHER, K.; HEGER, S. Model based assessment of vestibular jawbone thickness using high frequency 3D ultrasound micro-scanning. **In: Proceedings of SPIE 8675, Medical Imaging 2013: Ultrasonic Imaging, Tomography, and Therapy**, Florida, 2013.

HELLIER, C. J. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. McGraw Hill Professional, 2001.

HUANG, J.; QUE, P. W.; JIN, J. Adaptive dynamic focusing system for ultrasonic nondestructive testing of pipeline girth welds. **Review of Scientific Instruments**, v. 75, p. 1341-1346, 2004.

HUGGER, A.; ALLEN, D.; LACHTCHOUK, I.; SENF, P.; FALTER, S. Ultrasonic Phased Array Crack Detection Update. **In: 4th Pipeline Technology Conference**, Alemanha, 2009.

INKPEN, A; MOFFETT, M. H. **The Global Oil & Gas Industry: Management, Strategy & Finance**. PennWell Corporation, 2011.

IYER, S.; SINHA, S. K.; PEDRICK, M. K.; TITTMANN, B. R. Evaluation of ultrasonic inspection and imaging systems for concrete pipes. **Automation in Construction**, v. 22, p. 149-164, 2012.

JACKSON JR., C. N.; SHERLOCK, C. N. **Nondestructive Testing Handbook Volume 1: Leak Testing**. 3 ed. American Society for Nondestructive Testing, 1998.

JINBO, M. **Imagens ultra-sônicas em modo-B com técnicas de abertura focal sintética - SAFT**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis**. 2 ed. Springer, 2002.

JSR ULTRASONICS. **DPR500 Dual Pulser-Receiver Operator Manual**. Disponível em:<<http://www.jsrultrasonics.com/documents/DPR500OpManual.pdf>>Acesso em: 23/05/2020.

KAMIMURA, H. A. S. **Vibroacustografia na avaliação tridimensional de artroplastia total de quadril**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada à Medicina e Biologia. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 2011.

KAMIMURA, H. A., WANG, L., CARNEIRO, A. A., KINNICK, R. R., AN, K. N., FATEMI, M. Vibroacoustography for the assessment of total hip arthroplasty. **Clinics**, v. 68, p. 463-468, 2013.

LEO, M.; LOONEY, D.; D'ORAZIO, T.; MANDIC, P. M. Identification of defective areas in composite materials by bivariate EMD analysis of ultrasound. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 61, p. 221-232, 2012.

LIU, B.; HE, L.; MA, Z.; ZHANG, H.; SFARRA, S.; FERNANDES, H.; PERILLI, S. Study on internal stress damage detection in long-distance oil and gas pipelines via weak magnetic method. **ISA Transactions**, v. 89, p. 272-280, 2019.

LIU, Z.; KLEINER, Y. State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes. **Measurement**, v. 46, p. 1-15, 2013.

LOMAX, R. G.; HAHS-VAUGHN, D. L. **An Introduction to Statistical Concepts**. 3 ed. Routledge, 2012.

MARCIÓ, B. S.; SANT'ANA, M.; FLESCHE, R. C. C. Signal conditioning for an ultrasound-based inspection system using a custom-developed charge amplifier. **In: International Conference and Exhibition NDE for Safety/Defeltoskopia**, Luhacovice, 2016.

MARCIÓ, B. S.; NIENHAYSEN, P.; HAVOR, D.; FLESCHE, R. C. C. Quality assessment and deviation analysis of three-dimensional geometrical characterization of a metal pipeline by pulse-echo ultrasonic and laser scanning techniques. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**. v. 145, p. 30-37, 2019.

MARCIÓ, B. S.; SEIBERT, A. A.; BRAZ, G. A.; CARNEIRO, A. A. O.; FLESCHE, R. C. C. Nondestructive inspection of metal specimen using tone-burst vibro-acoustography. **Ultrasonics**. 2021. No prelo.

MARQUES, O. **Practical Image and Video Processing Using Matlab**. John Wiley & Sons, Inc, 2011.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MATTES, D.; HAYNOR, D. R.; VESSELLE, H.; LEWELLYN, T. K.; EUBANK, W. Nonrigid multimodality image registration. **In: Medical Imaging 2001: Image Processing**, SPIE, San Diego, 2001.

MELO, J. R. C. **Contribuições ao desenvolvimento de um perfilômetro óptico a laser para medição e visualização da geometria interna de dutos**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

MIAO, C.; GUO, W.; DU, X.; LING, Z. Ultrasonic inspection technique for inside pressurized pipe elbows. **In: Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference**, Waikoloa, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2018**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/36208/948169/Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasi>

leira+-+edi%C3%A7%C3%A3o+2019+v3.pdf/92ed2633-e412-d064-6ae1-eefac950168b>
Acesso em: 02/02/2020.

MITCHELL, H. B. **Image Fusion: Theories, Techniques and Applications**. Springer, 2010.
MITRI, F. G.; DAVIS, B. J.; GREENLEAF, J. F.; FATEMI, M. In vitro comparative study of vibro-acoustography versus pulse-echo ultrasound in imaging permanent prostate brachytherapy seeds. **Ultrasonics**, v. 49, p. 31-38, 2009a.

MITRI, F. G.; EBERLEIN, U.; FATEMI, M. Surface roughness imaging using the acoustic emission induced by the dynamic radiation force of ultrasound. **Applied Physics Letters**, v. 88, 2006.

MITRI, F. G.; FATEMI, M. Improved vibroacoustography imaging for nondestructive inspection of materials. **Journal of Applied Physics**, v. 98, 2005.

MITRI, F. G.; GREENLEAF, J. F.; FATEMI, M. Chirp imaging vibro-acoustography for removing the ultrasound standing wave artifact. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v. 24, p. 1249-1255, 2005a.

MITRI, F. G.; GREENLEAF, J. F.; FATEMI, M. Comparison of continuous-wave (CW) and tone-burst (TB) excitation modes in vibro-acoustography: Application for the non-destructive imaging of flaws. **Applied Acoustics**, v. 70, p. 333-336, 2009.

MITRI, F. G.; SILVA, G. T.; GREENLEAF, J. F.; FATEMI, M. Simultaneous sum-frequency and vibro-acoustography imaging for nondestructive evaluation and testing applications. **Journal of Applied Physics**, v. 102, 2007.

MIX, P. E. **Introduction to Nondestructive Testing: a training guide**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

MOLES, M.; DUBÉ, N.; LABBÉ, S.; GINZEL, E. Review of Ultrasonic Phased Arrays for Pressure Vessel and Pipeline Weld Inspections. **Journal of Pressure Vessel Technology**, v. 127, p. 351-356, 2005.

NESS, S.; SHERLOCK, C. N. **Nondestructive Testing Handbook Volume 10: Overview**. 2 ed. American Society for Nondestructive Testing, 1996.

NYKYFORCHYN, H.; TSYRULNYK, O.; ZVIRKO, O.; KRECHKOVSKA, H. Non-destructive evaluation of brittle fracture resistance of operated gas pipeline steel using electrochemical fracture surface analysis. **Engineering Failure Analysis**, v. 104, p. 617-625, 2019.

OKMAN, O. E.; AKAR, G. B. A circle detection approach based on Radon Transform. **In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing**, Vancouver, 2013.

OKOH, P.; HAUGEN, S. The influence of maintenance on some selected major accidents. **Chemical Engineering Transactions**, v. 31, p. 493-498, 2013.

OLIVEIRA, B. C. F. **Inspection of impact damages in carbon fibre reinforced plastic plates through the fusion of images from optical lock-in thermography and optical square-pulse shearography techniques.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

OLIVEIRA, B. C. F.; MARCIÓ, B. S.; FLESCHE, R. C. C. Enhanced damage measurement in a metal specimen through the image fusion of tone-burst vibro-acoustography and pulse-echo ultrasound data. **Measurement**, v. 167, 2021.

OLYMPUS. **OmniScan MX2.** Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/pt/omniscan-mx2/>> Acesso em: 09/05/2020.

OLYMPUS. **Transducer SU/RM U8424004.** Disponível em: <[http://www.olympus-ims.com/pt/ultrasonic-transducers/highfrequency/#!cms\[tab\]=%2Fpanametrics-ndt-ultrasonic%2Fhighfrequency%2Fsu-rm-immersion](http://www.olympus-ims.com/pt/ultrasonic-transducers/highfrequency/#!cms[tab]=%2Fpanametrics-ndt-ultrasonic%2Fhighfrequency%2Fsu-rm-immersion)> Acesso em: 24/05/2020a.

OTSU, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 09, p. 62-66, 1979.

PAPAVINASAM, S. **Corrosion Control in the Oil and Gas Industry.** Elsevier, 2013.

PIPING ENGINEERING. **Pipeline Internal Corrosion, Protection and Monitoring.** Disponível em: <<https://www.pipingengineer.org/pipeline-internal-corrosion-protection-and-monitoring/>> Acesso em: 04/05/2020.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital Signal Processing: Principles, algorithms and Applications.** 3 ed. Prentice-Hall, 1996.

SCHMERR, L. W. **Fundamentals of ultrasonic phased arrays.** Springer International Publishing, 2015.

RUSSELL NDE SYSTEMS. **Detecting Dents in Pipelines.** Disponível em: <<https://www.russelltech.com/News/ArtMID/719/ArticleID/197/Detecting-Dents-in-Pipelines>> Acesso em: 05/05/2020.

SAFF, E. B.; SNIDER, A. D. **Fundamentals of Matrix Analysis with Applications.** Wiley-Blackwell, 2015.

SHULL, P. J. **Nondestructive Evaluation: theory, techniques and applications.** Marcel Dekker, Inc, 2001.

SILVA, G. T.; FRERY, A. C.; FATEMI, M. Image formation in vibro-acoustography with depth-of-field effects. **Computerized Medical Imaging and Graphics**, v. 30, p. 321-327, 2006.

SILVA, G. T.; MITRI, F. G. Difference-frequency generation in vibro-acoustography. **Physics in Medicine and Biology**, v. 56, p. 5985-5993, 2011.

SKJELVAREID, M.; BIRKELUND, Y.; LARSEN, Y. Internal pipeline inspection using virtual source synthetic aperture ultrasound imaging. **NDT&E International**, v. 54, p. 151-158, 2013.

SOILLE, P. **Morphological Image Analysis - Principles and Applications**. Springer Science & Business Media, Berlin, 2013.

SPEIGHT, J. G. **Oil and Gas Corrosion Prevention: From Surface Facilities to Refineries**. Gulf Professional Publishing, 2014.

STATHAKI, T. **Image Fusion: Algorithms and Applications**. Elsevier, 2008.

STYNER, M.; BRECHBUHLER, C.; SZCKELY, G.; GERIG, G. 3D Parametric estimate of intensity inhomogeneities applied to MRI. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v. 19, p. 153-165, 2000.

URBAN, M. W.; ALIZAD, A.; FATEMI, M. Vibro-acoustography and multifrequency image compounding. **Ultrasonics**, v. 51, p. 689-696, 2011.

URBAN, M. W.; WANG, C.; ALIZAD, A.; FATEMI, M. Complex background suppression for vibro-acoustography images. **Ultrasonics**, v. 56, p. 456-472, 2014.

VERCAUTEREN, T.; PENNEC, X.; PERCHANT, A.; AYACHE, N. Diffeomorphic demons: Efficient non-parametric image registration. **NeuroImage**, v. 45, p. 61-72, 2009.

VICTORETTE, M. W. D. **Correção de erros de medição da geometria interna de tubos provocados pelas rodas de um perfilômetro óptico**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

WANG, H.; DUNCAN, I. J. Likelihood, causes, and consequences of focused leakage and rupture of U.S. natural gas transmission pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 30, p. 177-187, 2014.

XIAO, X.; GAO, B.; TIAN, G. Y.; CAI, Z. G.; WANG, K. Q. Physical perspective forward-inverse learning for ultrasonic sensing diagnosis in small diameter and thin-wall tube. **Ultrasonics**, v. 105, p. 106-115, 2020.

XIE, M.; TIAN, Z. A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data. **Engineering Failure Analysis**, v. 92, p. 222-239, 2018.

APÊNDICE A – MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Na seção A.1, os principais métodos de ensaios não destrutivos para aplicações em geral são descritos. Já na seção A.2, fatores técnicos e econômicos para seleção de um método adequado de END são apresentados.

A.1 Métodos de ensaios não destrutivos

No que tange aos diferentes métodos de END existentes, a Sociedade Americana para Ensaios não Destrutivos (ASNT, do inglês *American Society for Nondestructive Testing*) os define pelo tipo de meio penetrante (ASNT, 2020). O objetivo de cada método de END é fornecer informações a respeito dos seguintes parâmetros:

- descontinuidades, como trincas, espaços vazios e inclusões;
- características estruturais, como tamanho do grão, segregação e desalinhamento;
- dimensões, como espessura, diâmetro e tamanho da descontinuidade;
- propriedades físicas e mecânicas, como condutividade e módulo de elasticidade.

No âmbito da literatura científica, os métodos de END mais encontrados são por radiografia, ultrassom, partículas magnéticas, líquidos penetrantes e emissão acústica (JACKSON JR. et al., 1998; ASNT, 2020). As subseções a seguir apresentam uma breve descrição de cada um dos métodos citados.

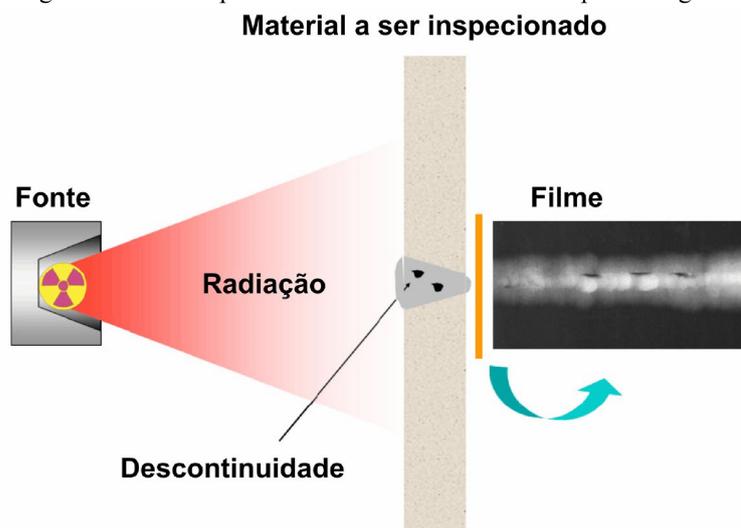
A.1.1 Método por radiografia

O método de END por radiografia tem por finalidade gerar um registro fotográfico pela passagem de raios-X ou raios gama através do corpo de prova. Este tipo de ensaio pode ser utilizado no intuito de identificar descontinuidades presentes na superfície e no interior da peça, como trincas, vazios ou inclusões (SHULL, 2001; ANDREUCCI, 2013).

O princípio de funcionamento desse método se baseia na absorção diferenciada da radiação pelo objeto a ser avaliado, devido a alterações na densidade e na espessura ou de variações na composição do mesmo (SHULL, 2001; ANDREUCCI, 2013). Dessa forma, a presença de descontinuidades na estrutura do corpo de prova altera o nível de absorção de radiação, o que permite identificá-las e caracterizá-las por meio de filmes radiográficos ou tubos de imagem (BURGESS, 1989; ANDREUCCI, 2013). A figura A.1 ilustra o princípio do método por radiografia, no qual o objeto a ser inspecionado é posicionado entre uma fonte

de radiação e um filme radiográfico. Após certo tempo de exposição à radiação é possível verificar no filme a existência e algumas das características da descontinuidade na estrutura do objeto.

Figura A.1 - Princípio de funcionamento do método por radiografia



Fonte: Andreucci, 2013.

A.1.2 Método por ultrassom

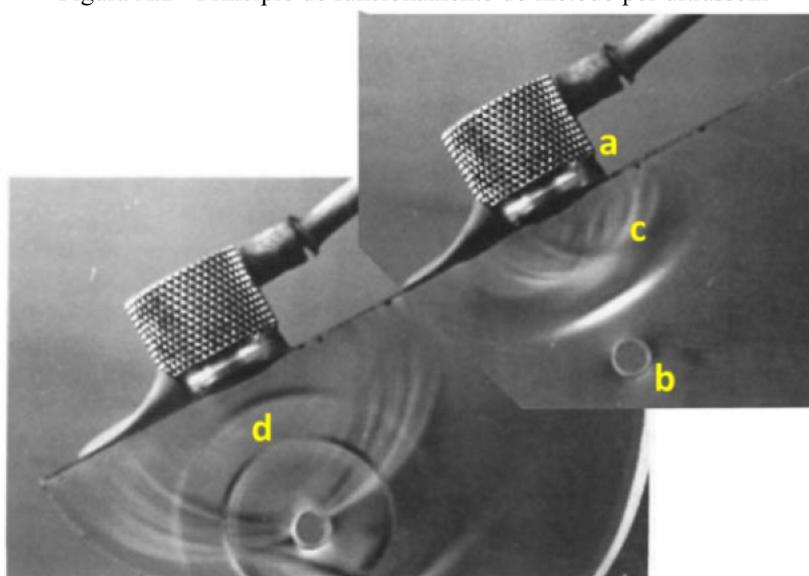
O ensaio por ultrassom tem o objetivo de detectar e caracterizar descontinuidades internas presentes nos objetos avaliados (SHULL, 2001; ANDREUCCI, 2011). O respectivo método é normalmente utilizado em inspeções de matérias-primas, na fabricação de peças ou durante a operação de equipamentos, para identificar problemas como trincas, bolhas de gás e inclusões em regiões soldadas. Além disso, o ensaio em questão pode ser aplicado na medição de espessura de elementos como tubulações, peças de aeronaves e cascos de submarinos (NESS et al., 1996; HELLIER, 2001; MIX, 2005).

O princípio básico do método por ultrassom está baseado na emissão de ondas acústicas de alta frequência, as quais são geradas principalmente por elementos piezelétricos. Para o início dos ensaios, esse elemento é posicionado próximo ao objeto avaliado e, na presença de descontinuidades ou devido à parede interna do componente, as ondas mecânicas de alta frequência sofrem reflexão. Para a recepção das respectivas ondas refletidas, pode-se empregar o próprio elemento emissor utilizado para iniciar o ensaio ou outro elemento piezelétrico distinto (NESS et al., 1996; ABNT, 2011; ANDREUCCI, 2011). No momento em que são recepcionadas, as ondas de ultrassom refletidas são convertidas em sinais elétricos para posterior processamento dos dados. A partir da análise do tempo de propagação das ondas

emitidas e recepcionadas, é possível determinar a espessura da parede do objeto em teste ou identificar a presença de descontinuidades (SHULL, 2001; MIX, 2005).

Na figura A.2 é apresentado o princípio de funcionamento do ensaio por ultrassom. Um transdutor formado por um elemento piezelétrico é responsável por emitir e recepcionar as ondas acústicas de alta frequência. Devido à presença de uma descontinuidade com formato circular no interior da parede do objeto em teste, as ondas de ultrassom emitidas sofrem um processo de reflexão e retornam em direção ao transdutor.

Figura A.2 - Princípio de funcionamento do método por ultrassom



- Legenda:
- a transdutor (elemento piezelétrico);
 - b descontinuidade circular;
 - c ondas de ultrassom emitidas;
 - d ondas de ultrassom refletidas pela descontinuidade.
- Fonte: adaptado de Shull, 2001.

A.1.3 Método por partículas magnéticas

O método por partículas magnéticas possui a finalidade de detectar descontinuidades superficiais e próximas à superfície em materiais ou estruturas ferromagnéticas (NESS et al., 1996; HELLIER, 2001; ABNT, 2012b). Com aplicação semelhante ao ensaio por ultrassom, este método pode ser utilizado na avaliação de matérias-primas, bem como durante os processos de fabricação e operação de um equipamento.

O princípio de funcionamento do método em questão consiste em submeter o corpo de prova a um campo magnético e, na presença de descontinuidades na região magnetizada da estrutura, um campo de fuga do fluxo magnético irá surgir. Após a aplicação de partículas

ferromagnéticas¹¹ na superfície do objeto em teste, as referidas partículas serão atraídas e irão se agrupar próximas ao campo de fuga gerado.

Desse modo, por meio do método por partículas magnéticas, é possível identificar o contorno do campo de fuga gerado, o que irá proporcionar o reconhecimento do formato e da extensão da descontinuidade (NESS et al., 1996; HELLIER, 2001; ANDREUCCI, 2009; ABNT, 2012b). A figura A.3 ilustra um corpo de prova submetido ao ensaio por partículas magnéticas, por meio da qual é possível observar o agrupamento das partículas em uma determinada região da superfície do objeto avaliado, indicando a existência de uma trinca próxima ao furo.

Figura A.3 - Peça submetida ao método por partículas magnéticas



Fonte: adaptado de Andreucci, 2009.

A.1.4 Método por líquidos penetrantes

O ensaio por líquidos penetrantes é um método empregado com o intuito de detectar e proporcionar evidência visual de descontinuidades abertas na superfície de materiais sólidos não porosos (NESS et al., 1996; SHULL, 2001; ABNT, 2012a).

O método em questão pode ser considerado como um dos mais antigos ensaios não destrutivos, visto que o emprego do mesmo, principalmente em fábricas de manutenção de estradas de ferro, teve início por volta do século XIX (NESS et al., 1996). Ainda hoje, o ensaio por líquidos penetrantes é utilizado em diferentes segmentos da indústria, com ênfase nas que possuem processos de fabricação como soldagem e usinagem, os quais comumente geram descontinuidades no objeto produzido (HELLIER, 2001; ANDREUCCI, 2013a).

¹¹ O método por partículas magnéticas utiliza, principalmente, partículas de óxido de ferro (SHULL, 2001).

Outro aspecto importante desse método se refere à sua capacidade em identificar descontinuidades passantes. Porém, deve-se atentar ao fato que a peça a ser analisada deve proporcionar acesso a ambos os lados, bem como possuir paredes estreitas o suficiente, com o intuito de propiciar ao líquido penetrante um modo de percorrer o caminho formado pela descontinuidade e expor o mesmo na superfície oposta àquela pela qual ingressou (NESS et al., 1996; HELLIER, 2001).

O princípio de funcionamento do método por líquidos penetrantes está relacionado ao fenômeno de interação entre determinados tipos de líquidos com pequenas aberturas. Caso o corpo de prova apresente descontinuidades em sua superfície, o líquido empregado no ensaio irá penetrar na mesma, incitado por forças de tensão superficial. Como consequência dessa interação, indicações visuais da localização, forma e tamanho aproximado da descontinuidade na superfície da peça poderão ser proporcionadas ao operador (NESS et al., 1996; ABNT, 2012a; ANDREUCCI, 2013a). Na figura A.4 é apresentada uma peça submetida ao método por líquidos penetrantes, o qual indica descontinuidades na região do cordão de solda.

Figura A.4 - Peça submetida ao método por líquidos penetrantes



Fonte: adaptado de Andreucci, 2013a.

A.1.5 Método por emissão acústica

O ensaio por emissão acústica tem o propósito de monitorar a integridade dos objetos a serem avaliados, além de detectar a presença de descontinuidades (NESS et al., 1996). Um aspecto importante deste ensaio se refere à sua capacidade em fornecer informações sobre a origem de uma descontinuidade, bem como em relação à expansão da mesma durante a operação de um equipamento (HELLIER, 2001; MIX, 2005; ABNT, 2013b). O método por emissão acústica pode ser utilizado em diferentes aplicações, entre as quais se destacam as

inspeções em vasos de pressão, caldeiras, além de outras estruturas (NESS et al., 1996; SHULL, 2001; MIX, 2005).

O princípio de funcionamento do ensaio em questão é baseado na detecção de ondas mecânicas, emitidas em virtude de uma deformação ou fratura em uma determinada estrutura, quando essa é submetida a algum tipo de tensão mecânica. Essas ondas são normalmente medidas por meio de transdutores piezelétricos, os quais são acoplados à superfície da peça avaliada. Em vista disso, esse método possui a capacidade de detectar, localizar e evidenciar descontinuidades no instante que as mesmas ocorrem ou durante sua expansão (HELLIER, 2001; SHULL, 2001; MIX, 2005).

A.2 Seleção de um método de END

Com a finalidade de selecionar um método de END adequado para uma determinada aplicação, torna-se necessário analisar diferentes fatores técnicos e econômicos, conforme listados abaixo (SHULL, 2001):

- compreender o princípio de funcionamento do método de END e sua interação com o corpo de prova;
- analisar as características da propriedade do material e da descontinuidade presente no objeto em teste;
- avaliar a capacidade da tecnologia existente para a realização dos ensaios;
- possuir um corpo técnico qualificado para operar os testes.

Ao analisar os fatores citados acima, deve-se, primeiramente, ter um considerável conhecimento sobre a interação entre os princípios de operação dos métodos de END e as propriedades de interesse do corpo de prova. Esse entendimento precisa ser adquirido com o intuito de verificar se o método de END escolhido será compatível ou não com as características apresentadas pelo objeto. Caso esse requisito seja satisfeito, o método selecionado poderá exercer efetivamente as suas funções. O ensaio por partículas magnéticas, por exemplo, apresentará um desempenho satisfatório se o corpo de prova a ser inspecionado for constituído de material condutivo (HELLIER, 2001; SHULL, 2001).

Em relação ao segundo fator listado, o mesmo envolve o entendimento da natureza física e as características do objeto que será avaliado. Com a finalidade de realizar END de forma efetiva, é essencial possuir elevado conhecimento e compreensão a respeito das características das descontinuidades que estão previstas e suas relações com material que

constitui o corpo de prova, bem como das propriedades físicas e mecânicas e dos processos de fabricação aos quais o objeto em teste foi submetido (HELLIER, 2001; SHULL, 2001).

Outro fator que se destaca dentre os listados se refere aos equipamentos a serem empregados nos ensaios. Na seleção de um determinado método de END, deve-se analisar a capacidade e a limitação da tecnologia existente, pois, mesmo que exista uma correlação entre os princípios de operação do método de END e as propriedades ou características do corpo de prova, não se pode afirmar que os equipamentos disponíveis sejam adequados para a realização dos ensaios (SHULL, 2001).

Por último, a qualificação do corpo técnico também é um fator determinante na eficácia dos END. Para realizar os testes de modo apropriado, é imprescindível que os operadores sejam devidamente treinados e certificados. Um primeiro documento para esse fim, denominado SNT-TC-1A, foi publicado pela ASNT no ano de 1967 como uma série de recomendações para a qualificação e certificação dos operadores de métodos de ensaios não destrutivos (HELLIER, 2001; MIX, 2005). No momento presente, a SNT-TC-1A ainda continua sendo amplamente empregada em vários países para qualificar operadores. No Brasil, o processo de certificação é realizado pela Associação Brasileira de Ensaios não Destrutivos e Inspeção (ABENDI), o qual possui como base a norma ABNT NBR NM/ISO 9712 (ANDREUCCI, 2013; ABNT, 2014a).

Além dos elementos listados anteriormente, existem outros fatores que podem influenciar a escolha de um método de END, como o custo para empregá-lo, o tempo requerido e o local onde o ensaio será realizado. A compreensão desses pontos geralmente resulta na seleção de um método adequado para determinada aplicação (SHULL, 2001).