



APLICAÇÃO DA TÉCNICA PHASED ARRAY NA INSPEÇÃO DE JUNTAS DE TUBULAÇÕES EM MATERIAL POLIMÉRICO REFORÇADO POR FIBRA DE VIDRO

Priscila Duarte de Almeida

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

APLICAÇÃO DA TÉCNICA PHASED ARRAY NA INSPEÇÃO DE JUNTAS DE
TUBULAÇÕES EM MATERIAL PLÁSTICO REFORÇADO POR FIBRA DE VIDRO

Priscila Duarte de Almeida

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:

Prof^a. Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Dr. Sérgio Damasceno Soares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2016

Almeida, Priscila Duarte de

Aplicação da técnica phased array na inspeção de juntas de tubulações em material polimérico reforçado por fibra de vidro / Priscila Duarte de Almeida. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIII, 117 p.: il.; 29,7 cm

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 109-112.

1. Phased array 2. Juntas compósitas 3. GFRP. I. Pereira, Gabriela Ribeiro. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus;

Aos meus pais, Madalena e Edmilson, pelo incentivo em cumprir mais esta etapa da minha vida;

À professora Gabriela Ribeiro Pereira, por acreditar no meu trabalho, pela orientação, paciência e flexibilidade nos momentos difíceis;

Ao Professor João Marcos Alcoforado Rebello, pelos muitos anos de ensinamento e orientação;

Ao engenheiro Sérgio Damasceno Soares pelo acompanhamento e incentivo deste estudo ao longo destes últimos anos e suas sempre pertinentes observações práticas;

À equipe de END do LNDC (Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem), pelo agradável convívio diário e suporte durante esta longa jornada;

À engenheira Fabiana Martins e à equipe do Laboratório de Tomografia Computadorizada do Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES/PDEP/CRF-PETROBRAS), pelo auxílio e tempo disponibilizados nas inspeções por tomografia;

À Petrobrás pelo suporte financeiro para a execução do projeto;

A todos os amigos, em especial, à Ana Paula, Mariana e Diogo, sempre dispostos a dividir os momentos de alegria e dificuldades durante o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APLICAÇÃO DA TÉCNICA PHASED ARRAY NA INSPEÇÃO DE JUNTAS DE TUBULAÇÕES EM MATERIAL POLIMÉRICO REFORÇADO POR FIBRA DE VIDRO

Priscila Duarte de Almeida

Dezembro/2016

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Juntas laminadas em material Polimérico Reforçado por Fibra de Vidro (PRFV) aliam propriedades como alta resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência à corrosão, tornando-as atrativas a aplicações em ambientes inóspitos. A integridade estrutural destes componentes deve ser assegurada, e, portanto, a aplicação de métodos não destrutivos capazes de atestar tal integridade se faz necessária. Este trabalho avalia a aplicabilidade da inspeção por *phased array* em juntas laminadas em material PRFV, no intuito de detectar discontinuidades tipicamente apresentadas por este material. Para o desenvolvimento do estudo, defeitos artificiais representando delaminações entre mantas e descolamento duto/laminado foram inseridos nas juntas para posterior inspeção por *phased array*, cujos ensaios foram conduzidos empregando um transdutor matricial de 32 elementos e 500 kHz de frequência em um equipamento de 64 canais paralelos. Quatro leis focais foram utilizadas e fatores como deflexão angular e emprego de focalização foram avaliados visando detectar, localizar e dimensionar os defeitos existentes. Os resultados indicaram que a metodologia proposta é adequada para a detecção dos defeitos, destacando-se o desempenho de leis focais com focalização no fundo da junta.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PHASED ARRAY INSPECTION OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMERS PIPELINE JOINTS

Priscila Duarte de Almeida

December/2016

Advisor: Gabriela Ribeiro Pereira

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP) laminated joints combine properties such as high mechanical resistance, low specific gravity and high corrosion resistance, characteristics that promote their application in harsh environments. The structural integrity of these components must be ensured; therefore, the application of non-destructive methods capable of certifying such integrity is necessary. This work evaluates the applicability of the phased *array* inspection in GFRP laminated joints, in order to detect discontinuities frequently found in this material. For the development of the study, artificial defects representing interply delamination and ply/pipeline debonding were inserted in the material for further inspection by phased *array*. The experiments were conducted with a 32 elements matrix probe (500 kHz frequency) and a 64 parallel channels equipment. Four focal laws were applied and parameters such as angular sweep and focalization were evaluated aiming the detection, location and sizing of the existing defects. Results indicated that the proposed methodology is adequate for the detection of the defects, highlighting the performance of focal laws with focal spots in the back wall of the joint.

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO TEÓRICA	4
2.1. Ultrassom	4
2.1.1. Oscilações e Modos de Propagação	4
2.1.2. Comportamento das Ondas Ultrassônicas	9
2.1.2.1. Reflexão e Transmissão de Ondas com Incidência Normal	9
2.1.2.2. Reflexão e Transmissão de Ondas com Incidência Oblíqua	10
2.1.3. Geração e Recepção das Ondas Ultrassônicas	12
2.1.3.1. Efeito Piezoelétrico e Transdutores Ultrassônicos	12
2.1.3.2. Interferência de Ondas	13
2.1.3.3. Feixe Ultrassônico	15
2.1.4. Atenuação das Ondas Ultrassônicas	18
2.1.5. Técnicas de Inspeção	20
2.1.6. Apresentação dos Dados	22
2.2. <i>Phased Array</i>	24
2.2.1. O Método	24
2.2.2. Tipos de Transdutores	25
2.2.3. Leis Focais	27
2.2.4. Formação do Feixe	29
2.2.5. Apresentação dos Dados	32
2.3. Materiais Compósitos	33
2.3.1. Compósitos de Matriz Polimérica	33
2.3.2. Laminação Manual	35
2.4. Ultrassom em Materiais Compósitos	37
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS	53
4.1. Corpos de Prova	53
4.2. Simulações	56
4.2.1. Sólido virtual	57
4.2.2. Transdutor e inspeção	58
4.2.3. Leis Focais	58
4.3. Inspeções	59
4.4. Tomografia Computadorizada	60

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS	61
5.1. Simulações.....	61
5.1.1. Traçagem do feixe	61
5.1.2. Detecção de defeitos	64
5.2. Inspeções.....	65
5.2.1. Detecção.....	68
5.2.1.1. Resultados Junta 1	68
5.2.1.2. Resultados Junta 2.....	70
5.2.1.3. Resultados Junta 3.....	78
5.2.1.4. Resultados Junta 4.....	84
5.2.2. <i>Phased Array versus</i> Tomografia.....	85
5.2.2.1. Tomografia J2	85
5.2.2.2. Tomografia J3	92
5.2.2.3. Tomografias - Comentários	95
5.2.3. Dimensionamento e Profundidade	97
CAPITULO 6 – CONCLUSÕES	105
CAPÍTULO 7 - SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	107
CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE 1 – Mapas <i>B-scan</i> dos defeitos detectados.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Modelo de um corpo elástico (NDT, 2015)	4
Figura 2. 2 - Modos de oscilação: (a) longitudinal, (b) transversal, (c) superficial (Adaptado de (NDT, 2015))	6
Figura 2. 3 –Velocidades de grupo e de fase	7
Figura 2. 4 – Fenômenos de reflexão, transmissão, refração e conversão de modo (MARTIN, 2012).....	11
Figura 2. 5 – Transdutores segundo a quantidade de cristais: (a) monoelemento, (b) duplo cristal e (c) <i>phased-array</i> (OLYMPUS, 2007).	13
Figura 2.6 – Interferência entre ondas: (a) perfeitamente construtiva, (b) perfeitamente destrutiva, (c) situação intermediária (NDT, 2015).	14
Figura 2. 7 – Campo de interferência entre ondas irradiadas de duas fontes pontuais próximas entre si (Adaptado de OLYMPUS, 2015).	15
Figura 2. 8 –Comportamento axial da variação de pressão sonora com o aumento da distância em relação a um cristal circular (Adaptado de OLYMPUS, 2012).....	16
Figura 2. 9 - Perfil de um feixe ultrassônico: áreas vermelhas representam pontos de alta energia, áreas verdes representam pontos de baixa energia (OLYMPUS, 2012).	16
Figura 2. 10 – Técnicas de inspeção por ultrassom: (a) pulso-eco, (b) transparência, (c) tandem (MARTIN, 2012).	21
Figura 2. 11 – Sinal <i>A-scan</i>	22
Figura 2. 12 – Representação de uma mapa <i>B-scan</i> e a relação com a amplitude dos sinais <i>A-scan</i> durante uma varredura. (OLYMPUS, 2007)	23
Figura 2. 13 - Exemplo de um mapa <i>C-scan</i> (Adaptado de NDT, 2015).	23
Figura 2. 14 – Focalização do feixe: (a) incidência normal, (b) incidência angular (Adaptado de OLYMPUS, 2007b).	25
Figura 2. 15 – Exemplos de varreduras lineares (Adaptado de OLYMPUS, 2012).....	28
Figura 2. 16 – Exemplos de varreduras setoriais (Adaptado de OLYMPUS, 2012).....	28
Figura 2. 17 – Valores de atraso (esquerda) e princípios da DDF (direita) para um transdutor linear de 32 elementos, com foco em 15, 30 e 60mm, empregando ondas longitudinais e contato direto (Adaptado de OLYMPUS, 2007b).....	29
Figura 2. 18 – Principais parâmetros de um transdutor <i>phased array</i> (Adaptado de OLYMPUS, 2012).....	30
Figura 2. 19 – Influência da abertura efetiva sobre a divergência do feixe (Adaptado de OLYMPUS, 2012).....	30
Figura 2. 20 – Focalização do feixe empregando diferentes aberturas (Adaptado de OLYMPUS, 2012).....	31
Figura 2. 21 – Posicionamento do transdutor e mapas <i>S-scan</i> para varredura <i>Setorial</i> (a) -30° a $+30^{\circ}$ e (b) $+35^{\circ}$ a $+70^{\circ}$. (OLYMPUS, 2012).....	32
Figura 2. 22 - Possíveis classificações de materiais compósitos	33
Figura 2. 23 - Etapas de fabricação de uma junta laminada. (a) Aspecto dos dutos unidos através de solda polimérica antes da aplicação das camadas laminadas. (b) Processo de laminação manual. (c) Deposição das camadas laminadas sobre os dutos. (d) Acabamento superficial após a cura da resina.....	36
Figura 3. 1 – (a) Sistema desenvolvido pelos autores. (b) Esquema do material investigado. (c) <i>A-scan</i> registrado (Adaptado de FORTUNKO e FITTING, 1991).	39

Figura 3. 2 – Mapas C-scan obtidos na inspeção de painéis compósitos. (a) C-scan bruto e (b) C-scan após processamento proposto pelos autores (MURRI <i>et al</i> , 1991).	40
Figura 3. 3 – (a) A-scan do material virgem e (b) após 20000 ciclos de fadiga. (c) e (d) demonstram as trincas e delaminações decorrentes dos ensaios de fadiga. (MOURITZ <i>et al</i> , 2000).....	41
Figura 3. 4 – (a) Amostra em degrau com delaminação artificial para avaliação do limite de detecção da técnica. (b) Resultado gráfico que aponta a detectabilidade do defeito em função de seu tamanho e profundidade (MOURITZ <i>et al</i> , 2000).....	41
Figura 3. 5 - C-scan com delaminações (à esquerda) e núcleo de porosidades (à direita) detectadas em material CFRP (LETHIECQ <i>et al</i> , 1994).	42
Figura 3. 6 – Equipamento de <i>phased array</i> desenvolvido para a inspeção de compósitos laminados (BROTHERHOOD <i>et al</i> , 2003).	43
Figura 3. 7 – (a) B-scan e C-scan de áreas delaminadas e (b) C-scans de áreas que apresentaram porosidades (NAGESWARAN <i>et al</i> , 2006).....	44
Figura 3. 8 – Aparato experimental utilizado por HABERMEHL <i>et al</i> (2009) na inspeção de painéis CFRP.	45
Figura 3. 9 – Resultados obtidos na inspeção de painéis CFRP. (a) Localização dos gates de aquisição; (b) C-scan de amplitude do gate A; (c) C-scan de tempo de voo do gate A; (d) C-scan de amplitude do gate B. (Adaptado de HABERMEHL <i>et al</i> , 2009) .	46
Figura 3. 10 – (a) Tubo laminado em CFRP; (b) Transdutor <i>array</i> de formato especial com detecção de defeito em formato S-scan; (c) Mapas C-scan em tempo de voo e amplitude para a inspeção com o <i>array</i> circular; (d) C-scan em amplitude para a inspeção empregando a técnica SAUL. (HOPKINS <i>et al</i> , 2011)	48
Figura 3. 11 – Imagens geradas por TFM (a) Imagem padrão, sem tratamento e (b) imagem após processamentos indicados pelos autores, com os 3 furos detectados (LI <i>et al</i> , 2013).....	49
Figura 3. 12 – Comparação entre ultrassom convencional e <i>phased array</i> pós-processado na inspeção de defeitos artificiais inseridos em bloco de CFRP (Adaptado de KREUTZBRUCK <i>et al</i> , 2014)	50
Figura 3. 13 – Imagens de defeito provocado por impacto de baixa energia em material CFRP: (a) C-scan e (b) S-scan (MEOLA <i>et al</i> , 2015).....	51
Figura 4. 1 – Corpos de prova inspecionados	53
Figura 4. 2 - Defeitos de bolha de ar de inseridos. (a) Defeito de bolha de ar inserido no lado direito da junta. (b) Defeito de bolha de ar inserido em detalhe.....	54
Figura 4. 3 - Defeitos inseridos na superfície do duto e entre as mantas de fibra de vidro. Fitas de acetato simulam o descolamento e a delaminação entre mantas.	55
Figura 4. 4 - Esquema representando o sólido virtual inserido no CIVA (esquerda) e vista com os 3 defeitos inseridos (direita)	58
Figura 4. 5 – Aparato utilizado para os ensaios por <i>phased array</i>	59
Figura 5.1 – Escala de cores, em valores de amplitude do sinal, para todos os resultados gerados no CIVA.....	61
Figura 5.2 – Perfil do feixe sônico na água. A região de maior intensidade do feixe (final do campo próximo) está entre 114 e 172 mm de distância do transdutor.	62
Figura 5.3 - Traçagem do feixe para a lei focal Direction and Depth.....	62
Figura 5.4 - Traçagem do feixe para a lei focal Setorial.	63

Figura 5.5 - Traçagem do feixe para a lei focal Single Point Focus.....	63
Figura 5.6 - Traçagem do feixe para a lei focal <i>Several Depths Focus</i>	63
Figura 5.7 – Resultado de inspeção (B-scan) na simulação realizada no CIVA para a lei focal <i>Direction and Depth</i>	64
Figura 5.8 - Resultado de inspeção (B-scan) na simulação realizada no CIVA para a lei focal <i>Setorial</i>	64
Figura 5.9 - Resultado de inspeção (B-scan) na simulação realizada no CIVA para a lei focal <i>Single Point Focus</i>	65
Figura 5.10 - Resultado de inspeção (B-scan) na simulação realizada no CIVA para a lei focal <i>Several Depths Focus</i>	65
Figura 5.11 – Calibração dos ensaios realizados: posição do transdutor na parede do duto (região verde) e A-scan desta região, elevado a 80% da tela.	66
Figura 5.12 - Em marrom a região que representa esquematicamente os B-scans doravante apresentados.....	67
Figura 5.13 – B-scans para uma região sem defeito do material. Da esquerda para a direita: <i>Direction and Depth</i> , <i>Setorial</i> , <i>Single Point Focus</i> e <i>Several Depths Focus</i>	67
Figura 5.14 - B-scans para uma região com defeito do material. Da esquerda para a direita: <i>Direction and Depth</i> , <i>Setorial</i> , <i>Single Point Focus</i> e <i>Several Depths Focus</i>	67
Figura 5.15 – Esquema para auxílio da interpretação dos mapas C-scan planejados.	69
Figura 5.16 - Mapas C-scan planejados para as 4 leis focais utilizadas na inspeção da J1. Da esquerda para a direita: <i>Direction and Depth</i> , <i>Setorial</i> , <i>Single Point Focus</i> e <i>Several Depths Focus</i>	69
Figura 5.17 - Mapas B-scan de áreas de alta refletividade: (a) áreas localizadas na superfície da junta; (b) áreas localizadas no interior do duto.....	70
Figura 5.18 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal <i>Direction and Depth</i> na inspeção da J2.....	71
Figura 5.19 - B-scans representando a detecção de bolhas de ar na J2 com a lei focal <i>Direction and Depth</i> : (a) bolha 2 e (b) bolha 4. As setas indicam os pontos de descontinuidade que caracterizam a detecção.	72
Figura 5.20 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal <i>Setorial</i> na inspeção da J2.....	73
Figura 5.21 - B-scans representando a detecção de bolhas de ar na J2 com a lei focal <i>Setorial</i> : (a) bolha 2 e (b) bolha 4. As setas indicam os pontos de descontinuidade que caracterizam a detecção.	73
Figura 5.22 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal <i>Single Point Focus</i> na inspeção da J2.....	74
Figura 5.23 - B-scans representando a detecção de bolhas de ar na J2 com a lei focal <i>Single Point Focus</i> : (a) bolha 2 e (b) bolha 4. As setas indicam os pontos de descontinuidade que caracterizam a detecção.	75
Figura 5.24 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal <i>Several Depths Focus</i> na inspeção da J2.	76
Figura 5.25 - B-scans representando a detecção de bolhas de ar na J2 com a lei focal <i>Several Depths Focus</i> : (a) bolha 2 e (b) bolha 4. As setas indicam os pontos de descontinuidade que caracterizam a detecção.	76
Figura 5.26 – B-scan indicando a existência de uma descontinuidade que não atinge o limiar de defeito estabelecido – defeito a da J2.	78
Figura 5.27 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal <i>Direction and Depth</i> na inspeção da J3.....	79

Figura 5.28- B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J3 com a lei focal <i>Direction and Depth</i>	79
Figura 5.29 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal Setorial na inspeção da J3.....	80
Figura 5.30 -B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J3 com a lei focal Setorial	80
Figura 5.31 -Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal Single Point Focus na inspeção da J3.....	81
Figura 5.32 -B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J3 com a lei focal Single Point Focus.....	82
Figura 5.33 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal Several Depths Focus na inspeção da J3.....	83
Figura 5.34 - B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J3 com a lei focal Several Depths Focus.....	83
Figura 5.35 - Mapas C-scan planejados para as 4 leis focais utilizadas na inspeção da J1. Da esquerda para a direita: Direction and Depth, Setorial, Single Point Focus e Several Depths Focus.	85
Figura 5.36 - Referência para localização dos defeitos nas imagens tomográficas da J2, com os marcos que possibilitam identificar o posicionamento das indicações.	87
Figura 5.37 – Relação entre o C-scan projetado e as marcações realizadas nas imagens tomográficas que permitem a identificação dos defeitos detectados e correlação entre resultados de phased array e tomografia computadorizada.	87
Figura 5.38 - Imagens tomográficas da J2: (a), (b) e (c) representam cortes transversais em diferentes regiões ⁴⁴ do lado esquerdo do corpo de prova. Os defeitos detectados estão identificados.	89
Figura 5.39 – B-scans para as leis focais Direction and Depth (posição 84 mm circunferencial) e Single Point Focus (posição 77 mm circunferencial), com indicação abaixo do limiar estabelecido para o defeito apontado pela tomografia.	90
Figura 5.40 - Imagens tomográficas da J2: (a), (b) e (c) representam cortes transversais em diferentes pontos do lado direito do corpo de prova. Os defeitos detectados estão identificados.	91
Figura 5.41 - Referência para localização dos defeitos nas imagens tomográficas da J3.	93
Figura 5.42 - Relação entre o C-scan projetado e as marcações realizadas nas imagens tomográficas que permitem a identificação dos defeitos detectados e correlação entre resultados de phased array e tomografia computadorizada.	93
Figura 5.43 - Imagem tomográfica da J3: seção transversal em um ponto do lado direito do corpo de prova, comprovando a detecção de todos os defeitos inseridos. Adicionalmente, há indicação de um defeito não planejado.	94
Figura 5.44 - Imagem tomográfica da J3: seção transversal em um ponto do lado esquerdo do corpo de prova, comprovando a presença de defeito não-intencional.....	95
Figura 5.45 - Regiões de porosidade inerentes à estrutura de laminação (realçadas em vermelho).....	96
Figura 5.46 – Sinal de maior amplitude retornado por um defeito e tomado como referência para medição da profundidade.....	102
Figura 5.47 - Imagem tomográfica da J3, sem diferenciação aparente entre a profundidade de alguns dos defeitos inseridos.	104

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Processos de espalhamento (KRÜGER, 2000)	19
Tabela 2. 2 – Distribuições usuais de elementos em transdutores <i>phased array</i> . (Adaptado de OLYMPUS, 2007b).....	26
Tabela 4.1 - Identificação dos corpos de prova disponíveis.....	53
Tabela 4.2 - Fitas de acetato inseridas no corpo de prova J2	55
Tabela 4.3 - Fitas de acetato inseridas no corpo de prova J3	56
Tabela 5.1 – Dimensionamento e erro empregando a lei focal <i>Direction and Depth</i>	98
Tabela 5.2 - Dimensionamento e erro empregando a lei focal <i>Setorial</i>	99
Tabela 5.3 - Dimensionamento e erro empregando a lei focal <i>Single Point Focus</i>	100
Tabela 5.4 - Dimensionamento e erro empregando a lei focal <i>Several Depths Focus</i>	101
Tabela 5. 5 – Ordem correta e ordem de detecção para cada lei focal empregada na inspeção da J2.....	103
Tabela 5. 6 - Ordem correta e ordem de detecção para cada lei focal empregada na inspeção da J3.....	103

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A extração e o refino de petróleo são processos frequentemente realizados em ambientes inóspitos. Consequentemente, para suportar esforços mecânicos em meios agressivos, os materiais empregados em equipamentos e estruturas sob estas condições devem apresentar propriedades como alta resistência à corrosão e elevada tenacidade. No Brasil, com a descoberta de reservas de petróleo na camada pré-sal, a problemática tornou-se ainda maior. Estas reservas são as mais profundas já encontradas em todo o mundo, apresentando maiores concentrações de contaminantes e pressões de trabalho quando comparadas ao ambiente da camada pós-sal.

Nos últimos anos, a indústria de óleo e gás tem apresentado um aumento progressivo de substituição de ligas metálicas nobres por materiais compósitos. Estes, a depender de sua configuração estrutural, apresentam propriedades mecânicas equivalentes ou superiores às ligas tradicionalmente empregadas. Compósitos de matriz polimérica, em caráter especial, aliam ainda propriedades como alta resistência à corrosão e baixo peso específico, tornando-os uma opção atrativa para aplicação em instalações *onshore* ou *offshore*, tanto em termos técnicos quanto em termos econômicos.

Assegurar a integridade de equipamentos e/ou estruturas é essencial para garantir a segurança de uma planta operacional. Esta análise frequentemente é realizada através da aplicação de ensaios não destrutivos (ENDs). A aplicação dos ENDs consiste na inspeção dos materiais sem danificá-los, permitindo a identificação de eventuais defeitos presentes em sua estrutura ou, ainda, caracterizá-los através da monitoração de seu grau de degradação em serviço ou sua tenacidade à fratura. Diversos ENDs são consolidados e amplamente aplicados na indústria atualmente. Apenas a título de exemplo, é possível citar as seguintes técnicas: ultrassom, correntes parasitas, radiografia, ensaio visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, termografia, entre outras.

Os constantes avanços tecnológicos permitem um rápido desenvolvimento e aprimoramento dos ENDs. O *phased array*, por exemplo, é uma técnica derivada dos mesmos princípios físicos do ultrassom convencional, porém, de maior sofisticação,

flexibilidade e complexidade, fatores que a tornam atrativa para diversas aplicações em detrimento à técnica que lhe deu origem.

A inspeção ultrassônica atualmente é realizada em diversos materiais empregados nas mais variadas configurações, sendo regida por procedimentos e normas consolidadas há décadas. Porém, sua aplicação em material compósito de matriz polimérica ainda se constitui um desafio em decorrência de diversos fatores, sendo os principais:

- Anisotropia: materiais compósitos aliam características de dois materiais química e fisicamente distintos; como resultado, a microestrutura deste tipo de material em geral é extremamente heterogênea e apresenta grande anisotropia, proporcionando a perda de energia ultrassônica por espalhamento;
- Atenuação por absorção: polímeros são materiais cuja microestrutura propicia uma alta perda de energia ultrassônica por absorção (conversão de energia mecânica em calor);
- Geometria complexa: a flexibilidade de combinações entre materiais para a geração de um compósito também permite a sua aplicação em geometrias por vezes extremamente complexas para a realização de inspeção não-destrutiva: componentes com alta curvatura e com variações de espessura são os exemplos mais simplórios a serem citados.

Estas características possuem influência direta nas propriedades sônicas do material, intensificando os fenômenos de atenuação inerentes à propagação da onda ultrassônica. Assim, este tipo de inspeção vem sendo objeto de estudo de diversos autores durante os últimos anos, tendo em vista mitigar ou solucionar a dificuldade em questão.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a inspeção por *phased array* em juntas de tubulações de material compósito de matriz polimérica reforçada por fibra de vidro (PRFV). Para o desenvolvimento do estudo, defeitos artificiais representando delaminações entre mantas e descolamento duto/laminado foram inseridos nas juntas

para posterior inspeção por *phased array*, cujos ensaios foram conduzidos empregando um transdutor matricial de 32 elementos e 500 kHz de frequência em um equipamento de 64 canais paralelos. Quatro leis focais foram utilizadas e fatores como deflexão angular e emprego de focalização foram avaliados visando detectar, localizar e dimensionar os defeitos existentes.

Para contemplar o estudo desenvolvido, inicialmente são fornecidos ao leitor conceitos teóricos necessários para o entendimento da proposta de trabalho. Posteriormente, há uma revisão bibliográfica, na qual são expostos uma evolução histórica e o estado da arte referente ao tema proposto. Em seguida os materiais e metodologia empregados para a condução do estudo são descritos: corpos de prova fabricados, defeitos avaliados, configurações das simulações e inspeções por *phased array*. Adicionalmente, inspeções por tomografia computadorizada são apresentadas com o simples objetivo de corroborar as indicações obtidas por *phased array*. Por fim, os respectivos resultados são analisados, assim como são indicadas as conclusões acerca do tema investigado e sugestões para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO TEÓRICA

2.1. Ultrassom

Em um ensaio típico por ultrassom convencional, um feixe sônico é introduzido no material a ser inspecionado através de um transdutor acoplado ao aparelho de ultrassom, com o objetivo de detectar discontinuidades superficiais, internas e subsuperficiais. O som que percorre o material é refletido pelas interfaces presentes em sua estrutura, detectado pelo transdutor e analisado por um operador que determina, ou não, a presença, localização e dimensões das discontinuidades. As seções a seguir irão abordar em maior detalhe os princípios básicos deste ensaio, cuja noção é necessária para o entendimento do trabalho desenvolvido.

2.1.1. Oscilações e Modos de Propagação

Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que se propagam através da oscilação de partículas de um meio material (KRAUTKRÄMER, 1969). A Figura 2.1 apresenta um modelo amplamente adotado para exemplificar a propagação de ondas mecânicas, considerando um corpo elástico (NDT, 2015). Nesta figura, observa-se que as partículas circulares possuem uma posição de equilíbrio, determinada pelas forças elásticas de atração e repulsão atuantes sobre elas. A propagação da onda ultrassônica ocorre através de uma excitação simultânea de diversas destas partículas; quando estas são removidas de sua posição de equilíbrio pela ação de uma força externa, tensões internas agem para reorientá-las à sua posição original. Assim, cada partícula é influenciada pelo movimento de sua vizinha e tanto as forças inerciais quanto as forças de restauração elástica atuam sobre cada uma delas (MARTIN, 2012).

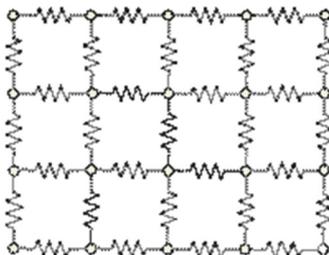


Figura 2.1 - Modelo de um corpo elástico (NDT, 2015)

O movimento de oscilação dos átomos determina o modo de propagação das ondas ultrassônicas, que por sua vez pode assumir as seguintes classificações (KRAUTKÄMER, 1969):

- Ondas longitudinais: ocorrem quando a direção de propagação da onda e a direção em que as partículas oscilam são iguais. Estas ondas propagam-se em meios sólidos, líquidos ou gasosos.

- Ondas transversais: ocorrem quando a direção de propagação da onda e a direção em que as partículas oscilam são perpendiculares entre si. Ondas transversais possuem capacidade de propagação apenas em meios sólidos.

- Ondas superficiais: conjugam os modos longitudinal e transversal, criando um movimento elíptico das partículas. São ondas restritas à superfície de meios sólidos, atingindo a profundidade de 1 comprimento de onda no interior do material.

- Ondas de Lamb: modo de propagação mais complexo, no qual as vibrações atingem toda a espessura do material.

A Figura 2.2 ilustra os três primeiros modos de propagação. Nesta figura, a direção de propagação de todas as ondas se dá da esquerda para a direita.

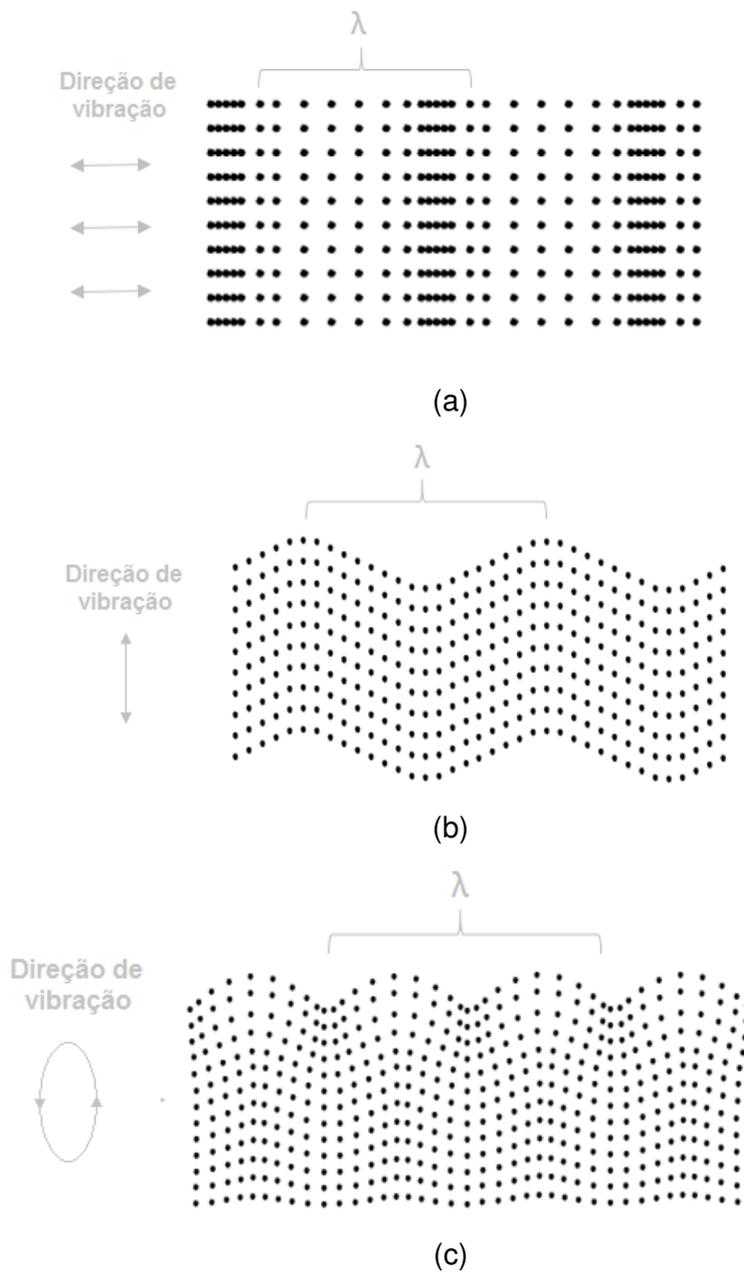


Figura 2.2 - Modos de oscilação: (a) longitudinal, (b) transversal, (c) superficial (Adaptado de (NDT, 2015))

Adicionalmente aos modos de propagação, a onda ultrassônica é definida essencialmente pelos seguintes parâmetros (KRAUTKÄMER, 1969):

- Frequência (f): número de oscilações de uma partícula por segundo.

- Comprimento de onda (λ): distância entre dois planos nos quais as partículas estão no mesmo estado de movimentação (e.g. dois planos de compressão consecutivos no caso de uma onda longitudinal).
- Velocidade de fase (v): velocidade de propagação de uma dada condição da onda (e.g. de um plano de compressão).
- Velocidade de grupo: a superposição de diversas frentes de onda cria um envelope de ondas; a velocidade de grupo é a velocidade de propagação deste envelope. A Figura 2.3 apresenta a diferença entre as velocidades de fase e de grupo.
- Pressão sônica (P): mudança de pressão intermitente em uma determinada região durante a propagação da onda, causada pela diferença de densidade de partículas.
- Amplitude (A): maior deflexão da partícula em relação à sua posição de equilíbrio.

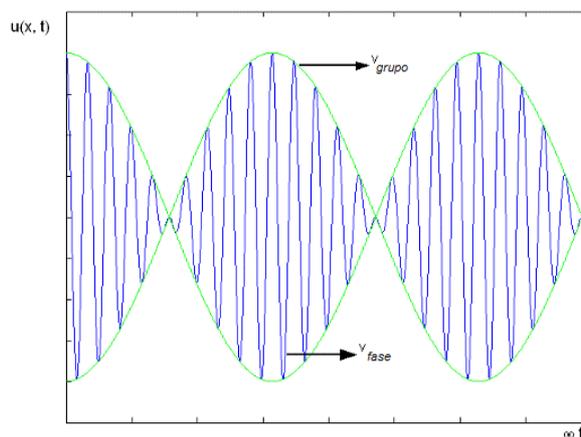


Figura 2.3 –Velocidades de grupo e de fase¹

¹ Fonte: <http://fisicaessencial.blogspot.com.br/2013/02/ondas-fisica-ii.html> Acessado em: 05/2015.

A relação entre frequência, comprimento de onda e velocidade de fase do som é expressa pela Equação 2. 1, sendo válida para todos os tipos de onda (KRAUTKÄMER, 1969).

$$f \cdot \lambda = v \quad \text{Equação 2. 1}$$

A velocidade de fase do som é característica de cada material e depende das constantes elásticas do meio em questão (KRAUTKÄMER, 1969). As Equações 2.2 a 2.4 apresentam as relações matemáticas que definem o valor da velocidade de fase ultrassônica para cada modo de propagação.

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - \mu)}} \quad \text{Equação 2.2}$$

$$v_T = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1 + \mu)}} = v_L \sqrt{\frac{(1 - 2\mu)}{2(1 - \mu)}} \quad \text{Equação 2.3}$$

$$v_S = \left(\frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \right) v_T \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde:

v_L : velocidade de fase da onda longitudinal [m/s]

v_T : velocidade de fase da onda transversal [m/s]

v_S : velocidade de fase da onda superficial [m/s]

E: módulo de elasticidade [N/m²]

μ : coeficiente de Poisson;

ρ : massa específica [kg/m³]

Para materiais sólidos o coeficiente de Poisson possui valores entre 0 e 0,5. Conseqüentemente, através da avaliação da Equação 2.3, é possível verificar que a velocidade transversal de um material apresenta valor aproximadamente 50% inferior ao valor de sua velocidade longitudinal. Verificação análoga pode ser realizada na Equação 2.4, da qual conclui-se que a velocidade de uma onda superficial de um material apresenta valores próximos a 90% de suas ondas transversais (KRAUTKÄMER, 1969).

2.1.2. Comportamento das Ondas Ultrassônicas

Quando as ondas sonoras atingem uma interface entre dois meios distintos durante a sua propagação, parte da energia acústica é refletida de volta para o primeiro meio e a energia restante é transmitida para o segundo meio. As seções a seguir irão abordar a ocorrência deste fenômeno em alguns casos específicos.

2.1.2.1. Reflexão e Transmissão de Ondas com Incidência Normal

No caso de incidência normal de uma onda sonora sobre uma interface, a grandeza que definirá as parcelas de energia refletida e transmitida será a impedância acústica, definida como o produto da densidade e a velocidade sonora de um material, conforme apresentado na Equação 2.5 (KRAUTKÄMER, 1969).

$$Z = \rho v \qquad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

Z: impedância acústica [kg/m²s]

ρ : densidade [kg/m³]

v: velocidade do meio [m/s]

Quanto maior for a diferença de impedância acústica entre dois materiais, maior será a parcela de energia refletida de volta ao primeiro meio. O valor desta parcela pode ser quantificado de acordo com a Equação 2.6 (MARTIN, 2012).

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 * 100 \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:

R: parcela refletida do feixe [%]

Z₁: impedância acústica do meio 1 [kg/m²s]

Z₂: impedância acústica do meio 2 [kg/m²s]

A soma das quantidades de energia refletida e transmitida deve ser igual à quantidade total da energia incidente. Portanto, a obtenção da parcela transmitida (T) pode ser realizada a partir de uma simples subtração: T = 100 – R (MARTIN, 2012).

2.1.2.2. Reflexão e Transmissão de Ondas com Incidência Oblíqua

Quando uma onda ultrassônica incide com angulação oblíqua em uma interface entre dois meios com propriedades acústicas distintas, em adição aos fenômenos de reflexão e transmissão descritos na seção anterior, ocorrem também fenômenos mais complexos: a refração e a conversão de modo. Estes fenômenos estão ilustrados na Figura 2.4 (MARTIN, 2012).

Uma onda sônica sofre refração na interface entre dois meios quando estes possuem propriedades acústicas diferentes, ou seja, cada qual possui uma velocidade ultrassônica característica. A direção da onda refratada pode ser determinada a partir da aplicação da Lei de Snell, que estabelece a relação entre os ângulos de propagação e as velocidades das ondas sonoras (MARTIN, 2012). A Equação 2.7 apresenta essa relação.

$$\frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Equação 2.7

Onde:

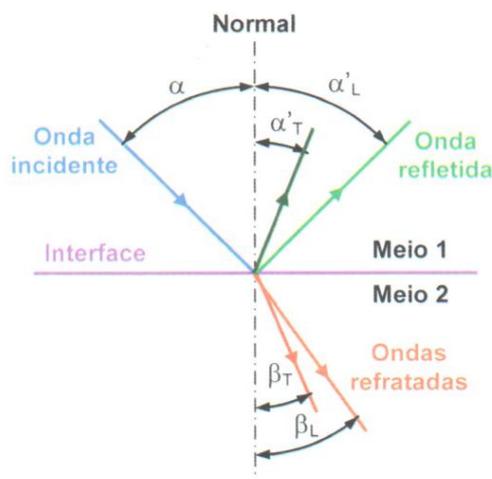
α : ângulo de incidência no meio 1

β : ângulo de refração no meio 2

v_1 : velocidade da onda incidente no meio 1 [m/s]

v_2 : velocidade da onda refratada no meio 2 [m/s]

A Equação 2.7 é aplicável também nos casos em que ocorre a conversão de modo. Durante a propagação da onda sonora em um material, é possível que a natureza do movimento das partículas sofra alterações quando a onda atinja com angulação oblíqua a interface de meios acusticamente distintos, gerando a conversão de modo (MARTIN, 2012). A Figura 2.4 demonstra esta ocorrência. Nesta figura, a onda longitudinal incidente no meio 1 é decomposta em duas ondas refratadas no meio 2: uma longitudinal e outra transversal. Estas ondas possuem velocidades de propagação diferentes (conforme apresentado na seção 2.1.1) e, portanto, possuem direções de propagação diferentes – fato facilmente comprovado a partir da aplicação da Lei de Snell.



Onde:

α : ângulo de incidência no meio 1

α'_L : ângulo da onda longitudinal

refletida no meio 1

α'_T : ângulo da onda transversal

refletida no meio 1

β_L : ângulo da onda longitudinal

refratada no meio 2

β_T : ângulo da onda transversal

refratada no meio 2

Figura 2.4 – Fenômenos de reflexão, transmissão, refração e conversão de modo (MARTIN, 2012)

2.1.3. Geração e Recepção das Ondas Ultrassônicas

Diversos são os efeitos e processos que possibilitam a geração de uma onda ultrassônica; a seguir será detalhado apenas o efeito piezoelétrico, empregado no âmbito deste trabalho e na grande maioria dos ensaios ultrassônicos realizados atualmente.

2.1.3.1. Efeito Piezoelétrico e Transdutores Ultrassônicos

O efeito piezoelétrico é um fenômeno reversível apresentado por alguns materiais, caracterizado como a capacidade destes se expandirem ou comprimirem em resposta a aplicação de uma diferença de potencial externa ou, reciprocamente, produzirem uma polarização dielétrica em resposta a uma deformação externa ao material (MARTIN, 2012, NDT, 2015).

Esta conversão mútua entre pulsos elétricos e vibrações mecânicas é o fundamento do método ultrassônico. Materiais piezoelétricos são comumente encontrados na forma de cristais e são o elemento mais importante de um componente denominado transdutor, responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam nos materiais.

O transdutor pode conter um ou mais cristais piezoelétricos. A Figura 2.5 apresenta as configurações existentes. A grande maioria dos transdutores empregados em inspeções por ultrassom convencional são monoelemento, ou seja, possuem apenas um cristal piezoelétrico, responsável por emitir e receber os pulsos de energia sônica. Também existem os transdutores duplo-cristal: possuem dois cristais piezoelétricos elétrica e acusticamente independentes, isto é, um é responsável por emitir e o outro por receber os sinais ultrassônicos. O terceiro caso abrange os transdutores multielementos, ou *phased array*, que possuem diversos cristais acusticamente independentes – usualmente entre 16 e 256 (OLYMPUS, 2007).

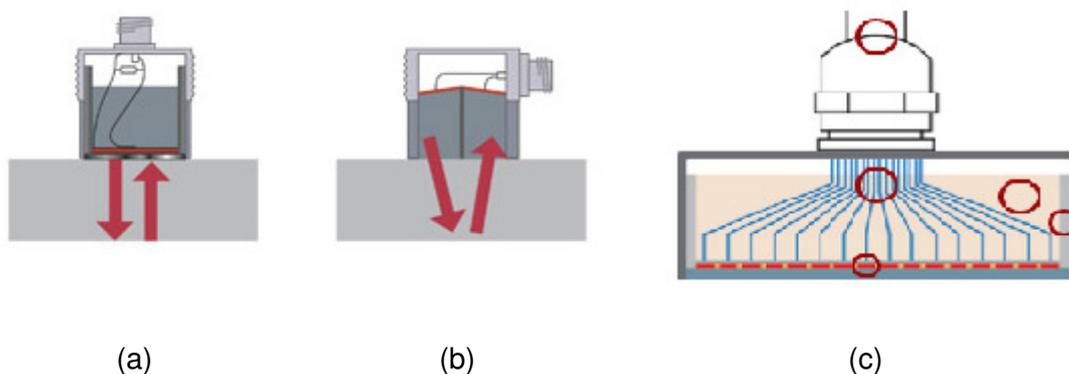


Figura 2.5 – Transdutores segundo a quantidade de cristais: (a) monoelemento, (b) duplo cristal e (c) *phased array* (OLYMPUS, 2007).

Em adição ao número de cristais, os transdutores piezoelétricos podem ainda ser classificados segundo as seguintes características (MARTIN, 2012, SANTIN, 2003):

- Tipo de onda gerada: longitudinal, transversal ou superficial;
- Ângulo de incidência da onda gerada: normal ou angular;
- Tipo de acoplamento: contato direto ou imersão;
- Focalização: focalizados ou não focalizados.

2.1.3.2. Interferência de Ondas

A geração de um feixe ultrassônico em um transdutor obedece basicamente a dois princípios: o princípio de Huygens e a interferência de ondas. O **princípio de Huygens** estabelece que cada ponto de uma frente de onda possui a capacidade de geração de ondas secundárias, ou seja, funciona como fonte pontual, cuja frente de onda gerada assume formato esférico. Já o princípio de **interferência** estabelece que duas ondas coerentes entre si interagem de forma a criar uma nova onda através da superposição das ondas originais. A amplitude em qualquer ponto desta nova onda é a soma das amplitudes das ondas originais em cada ponto (NDT, 2015, MARTIN, 2012, SANTIN, 2003).

A Figura 2.6 ilustra três situações distintas, considerando a interação de duas ondas provenientes do mesmo ponto. Em 2.6(a) é apresentado o caso no qual estas duas ondas estão perfeitamente em fase. Neste caso, a interferência é construtiva e a onda resultante possui amplitude duas vezes maior em comparação às ondas originais. Em 2.6 (b), as ondas originais estão perfeitamente fora de fase. Neste caso, a interferência é destrutiva e a onda resultante possui amplitude nula. Em 2.6(c) é apresentado um caso intermediário, no qual as ondas originais estão parcialmente fora de fase e a onda resultante é a soma das amplitudes dessas em todos os pontos.

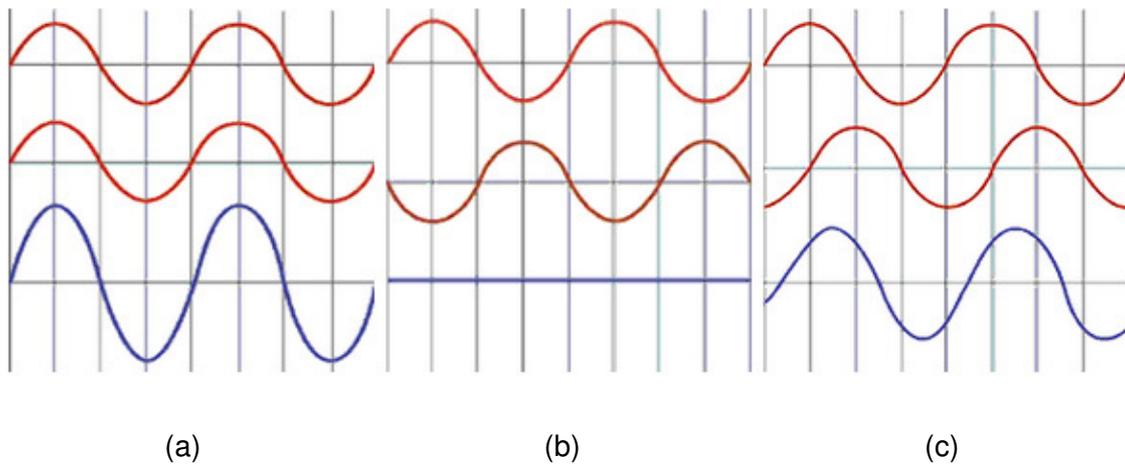


Figura 2.6 – Interferência entre ondas: (a) perfeitamente construtiva, (b) perfeitamente destrutiva, (c) situação intermediária (NDT, 2015).

A Figura 2.7 demonstra como a interferência ocorre para o caso de duas fontes pontuais próximas entre si, que emitem ondas de mesma frequência e fase. Nesta figura, as fontes estão representadas na cor verde; a partir destas, ondas esféricas são emitidas – as semicircunferências. Os traços mais espessos estão em oposição de fase em relação aos traços mais finos. A título de simplificação, neste exemplo, os traços espessos serão considerados as cristas e os traços finos os vales das ondas representadas. Quando duas cristas ou dois vales se cruzam, ocorre interferência perfeitamente construtiva, dando origem aos pontos de máxima pressão sônica (pontos vermelhos na Figura 2.7). Quando a crista de uma onda encontra o vale da outra, ocorre interferência perfeitamente destrutiva, dando origem aos pontos de pressão sônica nula (pontos azuis na Figura 2.7).

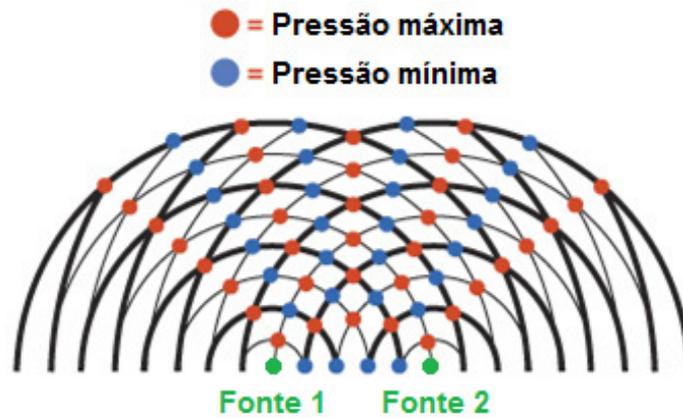


Figura 2.7 – Campo de interferência entre ondas irradiadas de duas fontes pontuais próximas entre si (Adaptado de OLYMPUS, 2015).

O cristal piezoelétrico é considerado uma fonte extensa, composta por diversas fontes pontuais próximas entre si, cada qual irradiando a sua frente de onda esférica, em comportamento análogo ao apresentado na Figura 2.7 (MARTIN, 2012). Estas frentes de onda interagem e criam interferências construtivas e destrutivas ao longo do seu percurso, determinando o formato do feixe sônico, cujo detalhamento será realizado na seção a seguir.

2.1.3.3. Feixe Ultrassônico

O feixe ultrassônico é dividido em três regiões: campo próximo, zona de transição e campo distante. Seu perfil é complexo, com gradientes de energia tanto na direção axial quanto na direção transversal (OLYMPUS, 2007). As Figuras 2.8 e 2.9 apresentam o formato do feixe ultrassônico emitido por um transdutor de cristal circular.

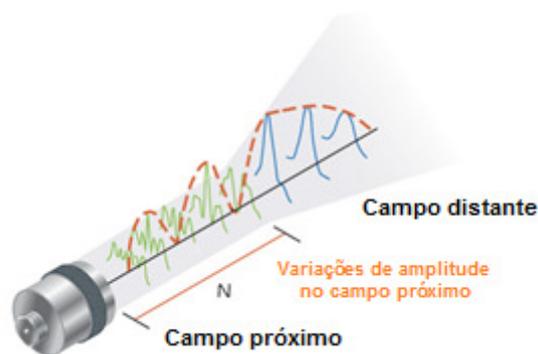


Figura 2.8 –Comportamento axial da variação de pressão sonora com o aumento da distância em relação a um cristal circular (Adaptado de OLYMPUS, 2012).



Figura 2. 9 - Perfil de um feixe ultrassônico: áreas vermelhas representam pontos de alta energia, áreas verdes representam pontos de baixa energia (OLYMPUS, 2012).

No campo próximo, região localizada imediatamente à frente do cristal piezoelétrico, há uma grande variação de pressão sônica em decorrência dos fenômenos de interferência construtiva e destrutiva entre as ondas irradiadas por cada fonte pontual. Conseqüentemente, neste campo não há uma relação direta entre o valor da pressão sônica e a distância à frente do cristal (OLYMPUS, 2012, MARTIN, 2012). A extensão do campo próximo depende de fatores geométricos do cristal e de características intrínsecas do material a ser inspecionado, conforme apresentado nas Equações 2.8 e 2.9. Ao final do campo próximo, o feixe sônico apresenta a sua máxima concentração de energia (MARTIN, 2012, NDT, 2015).

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4 \cdot V} \quad (\text{cristal circular}) \quad \text{Equação 2.8}$$

$$N = 1,3 \frac{M_{ef}^2 \cdot f}{V} \quad (\text{cristal retangular}) \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde:

N: extensão do campo próximo

V: velocidade do som

f: frequência

D_{ef} : diâmetro efetivo do cristal ($D_{ef} = 0,97 \cdot$ diâmetro real do cristal)

M_{ef} : metade do comprimento efetivo do maior lado do cristal retangular (comprimento efetivo = $0,97 \cdot$ comprimento real)

Ao fim do campo próximo, a interação das ondas originais forma uma frente de onda relativamente uniforme. É iniciada então a zona de transição, a partir da qual o feixe passa a divergir, os fenômenos de interferência já não são observados e há o decaimento progressivo da pressão sônica com o aumento da distância do feixe em relação ao cristal (MARTIN, 2012).

Após a distância de aproximadamente 3 campos próximos, começa o campo distante. A partir desta zona, a divergência do feixe se dá a um ângulo constante. A determinação deste ângulo pode ser realizada através da aplicação das fórmulas apresentadas nas Equações 2.10 e 2.11. Transdutores com cristais de menor tamanho e menor frequência apresentam o fenômeno de divergência de forma mais acentuada. Adicionalmente, nesta zona, é verificada a proporcionalidade entre o decaimento da pressão sônica e inverso do quadrado da distância ao transdutor (MARTIN, 2012, NDT, 2015).

$$\text{sen } \gamma = K_1 \frac{v}{D \cdot f} \quad \text{Equação 2.10}$$

$$\text{sen } \gamma = K_2 \frac{v}{M \cdot f} \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde:

γ : ângulo de divergência, medido a partir do eixo central [radianos];

v: velocidade do som [m/s]

f: frequência [Hz]

D: diâmetro do elemento ativo [m]

M: comprimento ou largura do elemento ativo retangular [m]

K_n : constantes cujos valores dependem da queda de amplitude expressa em dB em relação ao eixo central.

2.1.4. Atenuação das Ondas Ultrassônicas

Quando o som percorre um material, sua intensidade diminui com o aumento da distância viajada. Em situações ideais, a divergência da onda seria o único fator a influenciar o decaimento de amplitude do sinal. Entretanto, em meios reais, outros fatores também contribuem para a diminuição da energia sonora: o espalhamento e a absorção. Juntos, estes fenômenos acarretam na atenuação da energia sonora (KRAUTKRÄMER, 1969, MARTIN, 2012, NDT, 2015).

O decaimento da amplitude de uma onda plana em função da distância propagada pode ser expresso de acordo com a Equação 2.12.

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad \text{Equação 2.12}$$

Onde:

x: distância percorrida pela onda

A_0 : amplitude inicial

A: amplitude final, após a onda percorrer a distância x

α : coeficiente de atenuação [dB/[L]]

Heterogeneidades estão presentes na microestrutura de qualquer material - desde grãos com propriedades elásticas distintas, orientados aleatoriamente na rede cristalina, até a presença de trincas, inclusões ou poros. Ondas ultrassônicas, durante a sua propagação, interagem com estas heterogeneidades. Esta interação acarreta em sucessivos desvios de parte da onda ultrassônica para direções distintas à direção original de propagação. Com isto, as ondas perdem energia para o meio, resultando na

atenuação do sinal. Esta perda é conhecida como espalhamento do feixe ultrassônico (KRAUTKRÄMER, 1969, SANTIN, 2003, MARTIN, 2012).

O espalhamento depende diretamente de fatores como quantidade, dimensões e forma geométrica dos espalhadores, comprimento de onda e diferença entre as impedâncias acústicas do meio de propagação e o espalhador. No caso de materiais metálicos, existem três processos de espalhamento, definidos pela razão entre o tamanho médio dos grãos e o comprimento de onda dominante: Rayleigh, Estocástico e Difusão, cujas definições matemáticas estão apresentadas na Tabela 2.1 (KRÜGER, 2000).

Tabela 2.1 – Processos de espalhamento (KRÜGER, 2000)

Tipo de espalhamento	Campo de predominância	Coefficiente de atenuação
Rayleigh	$\lambda \gg D$	$\alpha = C_1 D^3 f^4$
Estocástico	$\lambda \approx D$	$\alpha = C_2 D f^2$
Difusão	$\lambda \ll D$	$\alpha = C_3 / D$

Onde:

λ : comprimento de onda

F: frequência

D: dimensão do espalhador

α : coeficiente de atenuação

C_i : constantes que englobam fatores geométricos, velocidades transversal e longitudinal, densidade e anisotropia do sistema.

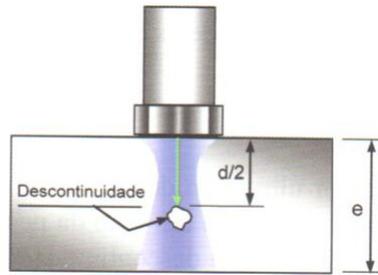
Outro fator que contribui com a diminuição da energia sonora, a absorção é caracterizada como a conversão de energia acústica em calor durante o movimento oscilatório das partículas. Este mecanismo é essencialmente independente do tamanho, da forma e da densidade de grãos (NDT, 2015).

2.1.5. Técnicas de Inspeção

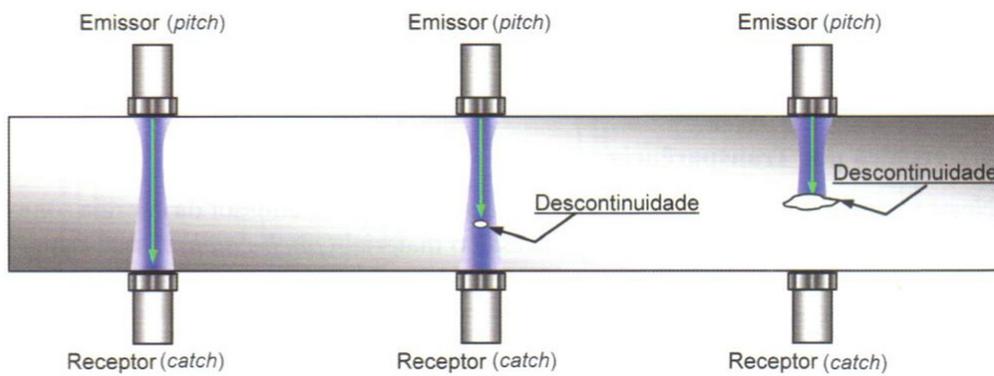
A diferença de impedância acústica entre o ar e os sólidos é extremamente grande, ou seja, quase toda a energia ultrassônica incidente neste tipo de interface é refletida, dificultando a inspeção do objeto de interesse. Conseqüentemente, para permitir o ensaio ultrassônico, é necessário o uso de um meio líquido acoplante entre o transdutor e a peça inspecionada; os meios acoplantes mais comuns são: água, óleo e géis especiais (MARTIN, 2012). Quando o transdutor está em contato direto com a peça inspecionada e apenas uma fina camada de acoplante é utilizada entre ambos, a inspeção é identificada como contato direto. Quando a peça inspecionada está imersa no líquido acoplante e não há contato entre o transdutor e a peça, a inspeção é identificada como imersão (MARTIN, 2012).

Outros fatores como quantidade e posicionamento dos transdutores durante o ensaio também caracterizam diferentes técnicas de inspeção. A seguir serão detalhadas as técnicas mais usuais (MARTIN, 2012, SANTIN, 2003).

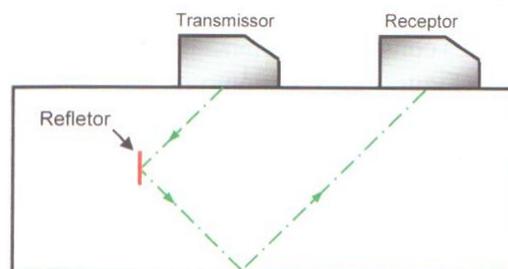
- Técnica de pulso-eco: é a mais empregada; nesta técnica apenas um transdutor age como emissor e receptor das ondas, requerendo, portanto, acesso a apenas uma das superfícies de ensaio. Possibilita detecção, localização e dimensionamento de descontinuidades. Está apresentada na Figura 2.10(a).
- Técnica de transparência: dois transdutores são empregados em superfícies opostas da peça, um trabalha como o emissor e o outro como receptor das ondas. Empregada apenas para detecção, não sendo possível a localização da profundidade nem dimensionamento da descontinuidade. Está apresentada na Figura 2.10(b).
- Técnica de tandem (ou *pitch-catch*): dois transdutores são empregados na mesma superfície da peça, um é o emissor e o outro o receptor das ondas ultrassônicas. Geralmente empregada em peças de grande espessura, nas quais a orientação das descontinuidades é desfavorável para detecção pela técnica de pulso-eco. Está apresentada na Figura 2.10(c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.10 – Técnicas de inspeção por ultrassom: (a) pulso-eco, (b) transparência, (c) tandem (MARTIN, 2012).

2.1.6. Apresentação dos Dados

A apresentação dos dados de inspeções ultrassônicas é realizada de acordo com o sinal retornado pelo transdutor ao aparelho. Este sinal pode assumir diversos formatos, sendo os três mais comuns citados a seguir (MARTIN, 2012, SANTIN, 2003, NDT, 2015).

- Sinal *A-scan*: consiste em um gráfico clássico da amplitude do sinal recebido (eixo vertical) versus tempo (eixo horizontal). A Figura 2.11 apresenta um sinal *A-scan* típico.

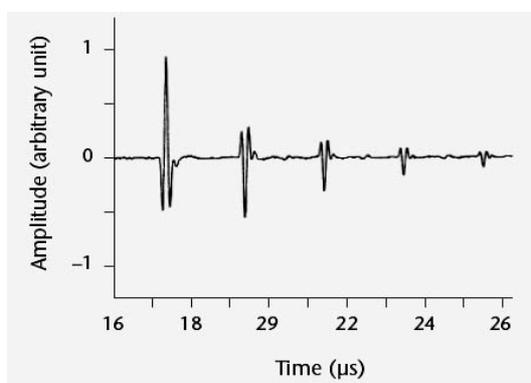


Figura 2.11 – Sinal *A-scan* ²

- Sinal *B-scan*: nesta configuração, a tela do aparelho reproduz em um mapa 2D a seção transversal da peça de acordo com a amplitude do sinal recebido. Isto é realizado a partir da conversão das amplitudes registradas pelo sinal *A-scan* em paletas de cores, sendo cada amplitude representada por uma cor específica. Em geral, em um mapa *B-scan*, o eixo vertical representa o percurso sônico e o eixo horizontal a distância percorrida pelo transdutor. A Figura 2.12 ilustra como é originado um mapa *B-scan*.

² Fonte: Non Destructive Testing Handbook, Volume 7: Ultrasonic Testing (UT), Third Edition, American Society for Nondestructive Testing, 2007

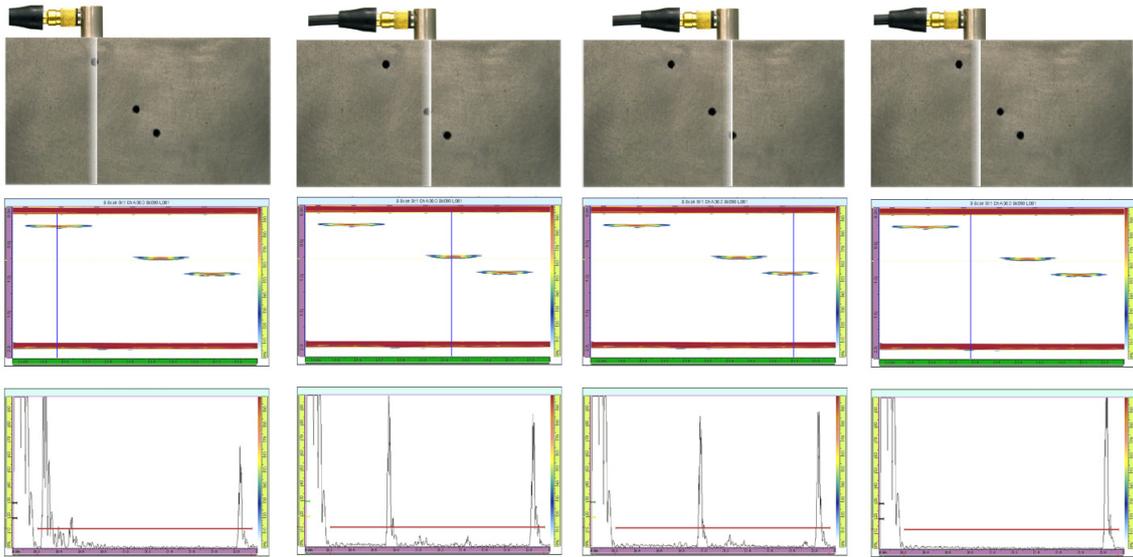


Figura 2.12 – Representação de uma mapa B-scan e a relação com a amplitude dos sinais A-scan durante uma varredura. (OLYMPUS, 2007)

- Sinal C-scan: os resultados são plotados em um sistema gráfico correspondente à vista superior da peça em planta, com a dimensão e posição das possíveis discontinuidades. A Figura 2.13 apresenta um mapa C-scan.

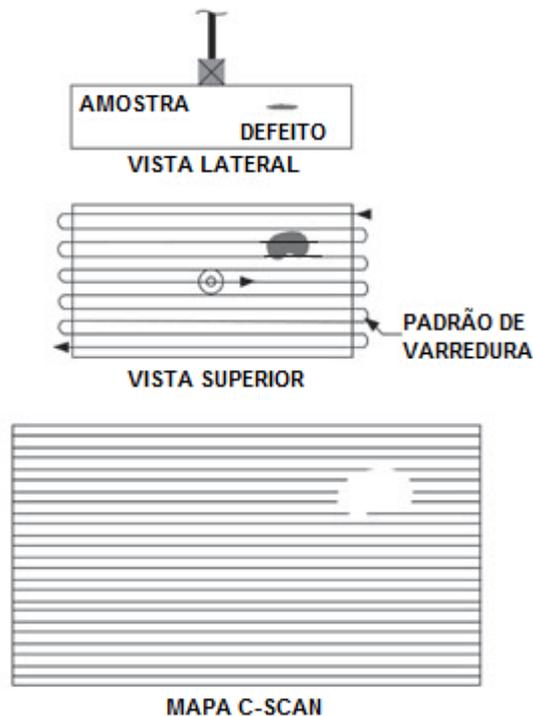


Figura 2.13 - Exemplo de um mapa C-scan (Adaptado de NDT, 2015).

2.2. *Phased Array*

2.2.1. O Método

O *phased array* é uma modalidade ultrassônica empregada na medicina desde meados do século XX. Porém, sua implementação em larga escala a nível industrial só foi possível através dos avanços tecnológicos ocorridos nas duas últimas décadas nas áreas de microeletrônica e capacidade de processamento de dados.

Um transdutor *phased array* é formado por diversos elementos piezoelétricos independentes, ou seja, que podem ser excitados separadamente. Estes elementos possuem uma particularidade geométrica: sua largura é muito menor que sua altura, tornando, portanto, cada cristal uma fonte linear de ondas cilíndricas. Estes fatores combinados são o grande progresso do *phased array* frente ao ultrassom convencional: a defasagem temporal de excitação de cada elemento permite ao usuário a criação de uma frente de onda manipulável – a **lei focal** – cujo formato é escolhido em função do objetivo da inspeção (OLYMPUS 2007a).

Dentre as diversas possibilidades apresentadas por este método, se destacam a capacidade de deflexão angular e a focalização do feixe em diferentes profundidades e por diferentes distâncias, a partir de uma única posição do transdutor. A Figura 2.14 apresenta estes fenômenos: a depender do atraso temporal de excitação de cada elemento, o feixe resultante pode ser apenas focalizado, conforme Figura 2.14(a) ou focalizado e defletido, conforme Figura 2.14(b) (OLYMPUS, 2007b).

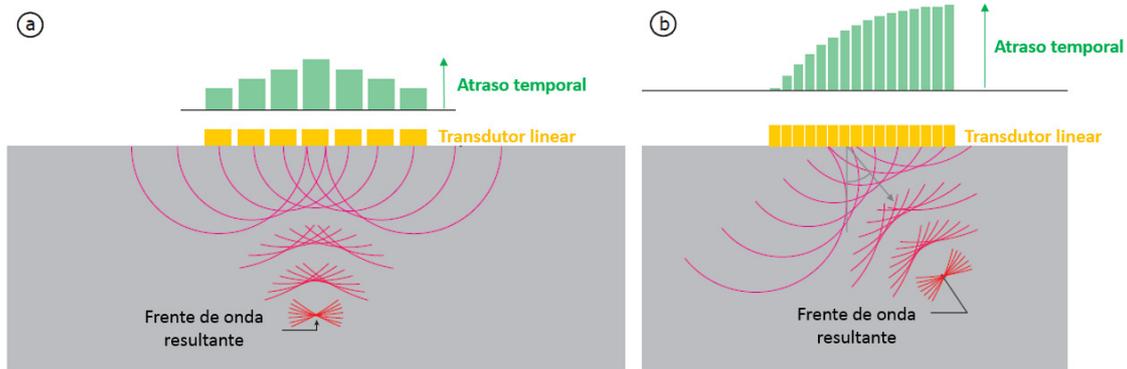


Figura 2.14 – Focalização do feixe: (a) incidência normal, (b) incidência angular (Adaptado de OLYMPUS, 2007b).

Em geral, os elementos não são excitados individualmente, mas em grupos de 4 a 32 elementos. O controle dos atrasos temporais necessários para a obtenção de uma lei focal específica é realizado computacionalmente, através de *softwares* presentes nos equipamentos de *phased array*. Este cálculo considera parâmetros como geometria do transdutor, da sapata (quando empregada) e do material, assim como as propriedades acústicas de todos os meios envolvidos na inspeção (OLYMPUS, 2007a).

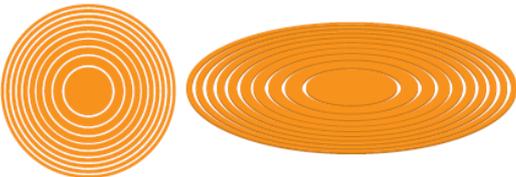
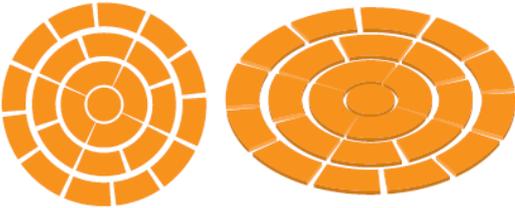
2.2.2. Tipos de Transdutores

Diversos parâmetros podem ser utilizados na caracterização de transdutores *phased array*. Transdutores mais sofisticados permitem maior versatilidade de inspeção, porém, também trazem maior complexidade à montagem experimental, assim como maior custo de aquisição e implementação. A seguir são listadas as principais características que definem os transdutores de *phased array* (OLYMPUS, 2012).

- Tipo de acoplamento: contato direto (geralmente intermediado com o auxílio de uma sapata - normal ou angular) ou imersão;
- Número de elementos: usualmente um transdutor *phased array* possui entre 16 e 256 elementos. Um maior número de elementos promove um maior poder de cobertura, maior capacidade de focalização e deflexão angular.

- Distribuição dos elementos: a forma como os elementos estão distribuídos permite maior flexibilização das leis focais. A Tabela 2.2 demonstra os modelos usualmente empregados atualmente.

Tabela 2.2 – Distribuições usuais de elementos em transdutores *phased array*.
(Adaptado de OLYMPUS, 2007b)

Distribuição dos Elementos	Identificação	Características
	1D Linear	Configuração mais usual; Formato de feixe: elíptico. Focalização: uma direção. Deflexão: angular e em profundidade; 1D.
	2D Matricial	Formato de feixe: elíptico. Focalização: esférica. Deflexão: angular e profundidade; 3D.
	1.5D Matricial	Formato de feixe: elíptico. Focalização: uma direção. Deflexão: angular e profundidade; 1D.
	1D Anular	Formato de feixe: esférico. Focalização: esférica.
	2D Anular	Formato de feixe: esférico/cilíndrico. Deflexão: angular e profundidade; 3D.
	1D Circular	Formato de feixe: esférico/cilíndrico. Deflexão: angular e profundidade; 3D.

2.2.3. Leis Focais

Conforme descrito anteriormente, o feixe de um transdutor *phased array* é gerado através da excitação de elementos individuais (ou grupos de elementos) em uma sequência específica. Cada grupo de elementos, quando disparado, possuirá uma frente de onda individual. *Softwares* integrados aos equipamentos de inspeção determinam o momento em que cada grupo de elementos deve ser disparado, de forma que as interferências construtivas e destrutivas entre estas frentes de onda eventualmente criem uma frente de onda única que viajará pelo material (OLYMPUS, 2012).

O controle sobre a defasagem temporal de excitação de cada grupo de elementos permite que o feixe apresente diversos formatos e comportamentos, desde a deflexão angular, até a focalização do feixe em diversas profundidades no material inspecionado. É importante salientar que tal atraso temporal é aplicado tanto na emissão quanto na recepção das ondas (OLYMPUS 2007a, 2007b, 2012).

Existem três padrões essenciais de leis focais, descritos a seguir (OLYMPUS 2007a, 2007b, 2012):

- Varredura eletrônica ou linear: a mesma lei focal é multiplexada através de um grupo de elementos ativos; a varredura ocorre a um ângulo fixo através de todo o transdutor. A Figura 2.15 ilustra esta lei focal.

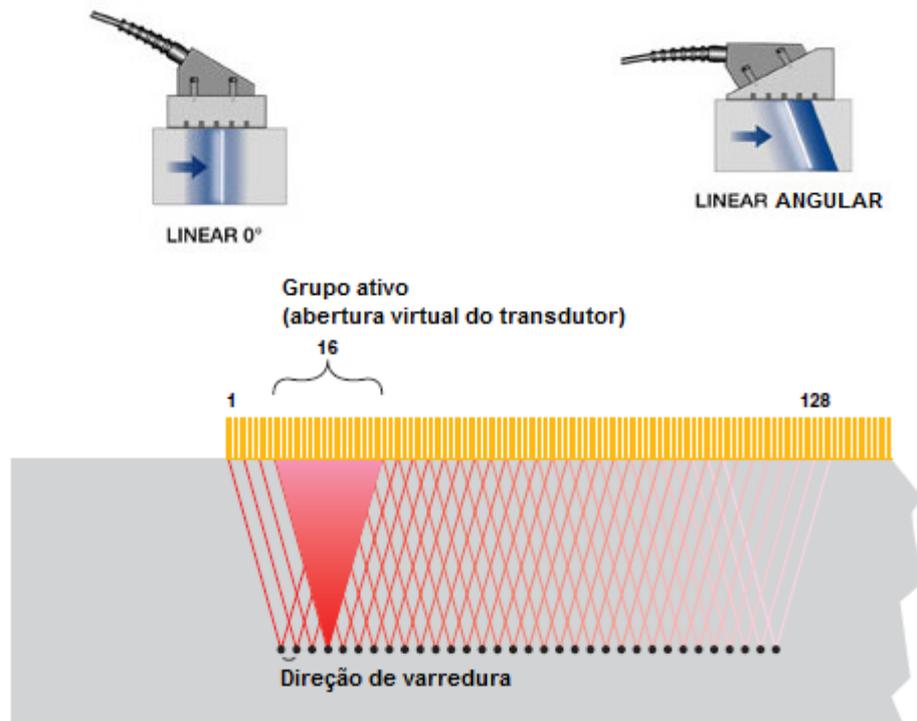


Figura 2.15 – Exemplos de varreduras lineares (Adaptado de OLYMPUS, 2012).

- Varredura *Setorial*: o feixe percorre diversos ângulos de varredura dentro de um intervalo pré-determinado pelo usuário, sempre utilizando os mesmos elementos. A Figura 2.16 ilustra esta lei focal.



Figura 2.16 – Exemplos de varreduras setoriais (Adaptado de OLYMPUS, 2012).

- Profundidade de foco dinâmica (DDF): Nesta modalidade, há uma única lei focal de emissão e são geradas diferentes leis focais de recepção, de forma a propiciar a focalização simultânea em diversas profundidades. As regiões onde há focalização são pré-estabelecidas pelo usuário; o equipamento utiliza esta informação de forma a modificar o retardo de recepção para cada elemento. A Figura 2.17 apresenta os princípios desta lei focal: para um transdutor de 32

elementos, são apresentados os momentos em que cada elemento deve ser excitado durante a recepção para realizar a focalização em uma determinada profundidade (no caso, 15 mm, 30 mm e 60 mm).

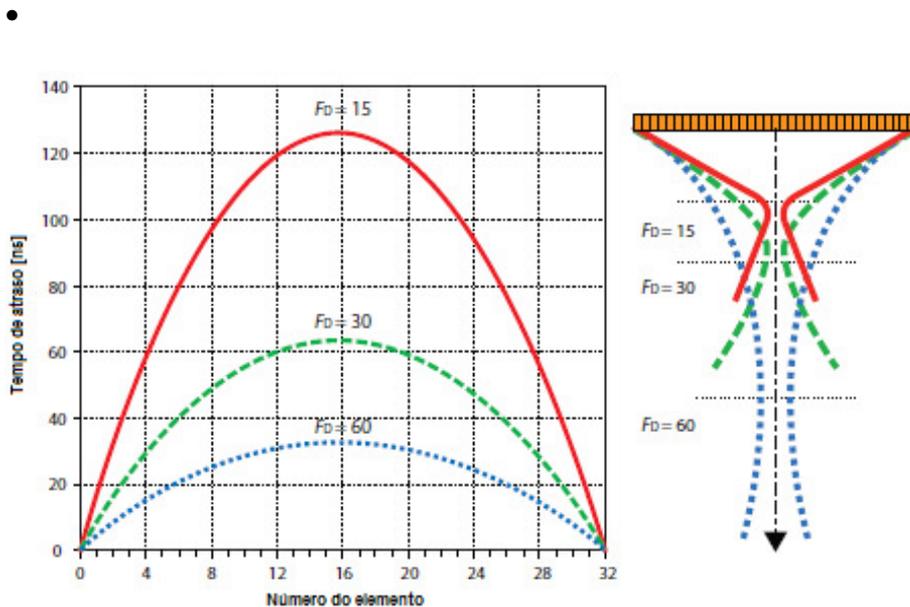
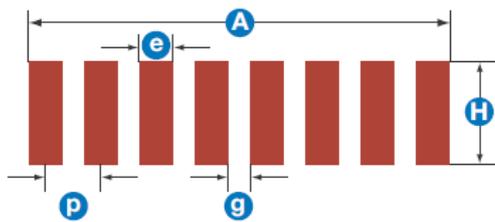


Figura 2.17 – Valores de atraso (esquerda) e princípios da DDF (direita) para um transdutor linear de 32 elementos, com foco em 15, 30 e 60mm, empregando ondas longitudinais e contato direto (Adaptado de OLYMPUS, 2007b).

2.2.4. Formação do Feixe

O *phased array* obedece aos mesmos princípios físicos que o ultrassom convencional. Consequentemente, parâmetros como dimensão do cristal e frequência de oscilação, que influenciam a formação do feixe de um transdutor monoelemento, também determinam o comportamento do feixe de um transdutor *phased array*. Porém, em adição a estes parâmetros, fatores como distribuição e número de elementos também devem ser considerados na técnica em questão (OLYMPUS 2007a, 2012).

A Figura 2.18 apresenta parâmetros do transdutor cujo conhecimento é primordial para o cálculo das leis focais.



Onde:

A: abertura efetiva na direção de refração do feixe

H: altura do elemento

P: pitch (distância centro a centro entre dois elementos consecutivos)

E: largura do elemento

G: Distância entre dois elementos consecutivos

Figura 2.18 – Principais parâmetros de um transdutor *phased array* (Adaptado de OLYMPUS, 2012).

Estes parâmetros influenciam diretamente a versatilidade de um transdutor *phased array*. Quanto menor é a largura de um elemento, por exemplo, mais este se aproxima de uma fonte pontual, ou seja, maior será o ângulo de divergência de sua frente de onda, acarretando em uma maior capacidade de deflexão angular do feixe resultante (OLYMPUS, 2012).

Conforme mencionado anteriormente, em geral, os elementos são disparados em grupos, criando o conceito de abertura efetiva, apresentado geometricamente na Figura 2.18. Raciocínio similar ao empregado na avaliação do tamanho do elemento pode ser aplicado ao valor da abertura efetiva: quanto maior esta for, menor será a capacidade de divergência do feixe, e, conseqüentemente, menor será a máxima deflexão angular do feixe resultante, conforme apresentado na Figura 2.19.

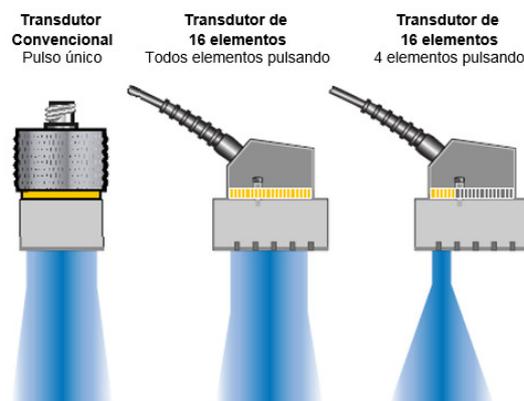


Figura 2.19 – Influência da abertura efetiva sobre a divergência do feixe (Adaptado de OLYMPUS, 2012).

Apesar de limitar a máxima deflexão angular, a maior direcionalidade do feixe quando um maior número de elementos são empregados pode trazer benefícios à inspeção. Dentro do campo próximo, o transdutor pode ser focalizado para criar um feixe que convirja em vez de divergir. O estreitamento do diâmetro do feixe para um ponto focal aumenta a energia sonora por unidade de área dentro da zona focal, e, portanto, aumenta a sensibilidade a refletores menores, assim como aumenta a resolução do ensaio. Adicionalmente, a sensibilidade no campo distante também pode ser aumentada em decorrência da dissipação mais suave da energia do feixe. A Figura 2.20 apresenta a influência da abertura no poder de focalização de um transdutor *phased array* (OLYMPUS, 2012). Nesta figura, 3 aberturas distintas são empregadas e a concentração de energia promovida por cada uma delas ao longo da profundidade da peça é demonstrada. Áreas vermelhas representam regiões com alta concentração de energia.

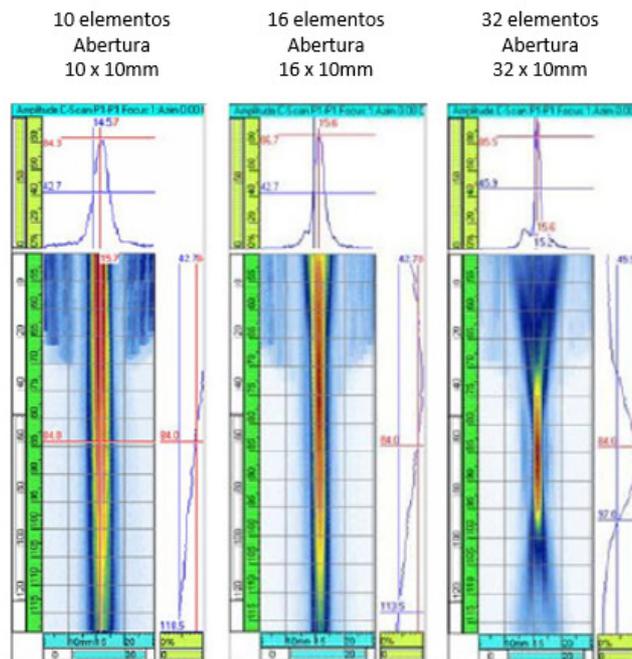


Figura 2.20 – Focalização do feixe empregando diferentes aberturas (Adaptado de OLYMPUS, 2012).

2.2.5. Apresentação dos Dados

Assim como no ultrassom convencional, a representação dos dados de inspeção por *phased array* pode ser realizada através de sinais A, B ou C-scans, conforme exposto na seção 2.1.6 deste trabalho. Há ainda uma visualização característica deste ensaio, o S-scan. Esta visualização representa uma vista 2D de todos os A-scans de uma abertura angular específica e fixa, corrigidos quanto ao atraso e ao ângulo de refração. Em um S-scan, o eixo horizontal representa a distância projetada (largura da peça) e o eixo vertical representa a profundidade. A Figura 2.21 apresenta dois S-scans típicos: o primeiro, de uma varredura *setorial* com ondas longitudinais variando de -30° a $+30^\circ$; o segundo, de uma varredura *setorial* com ondas transversais variando de $+35^\circ$ a $+70^\circ$ (OLYMPUS, 2007b, 2012).

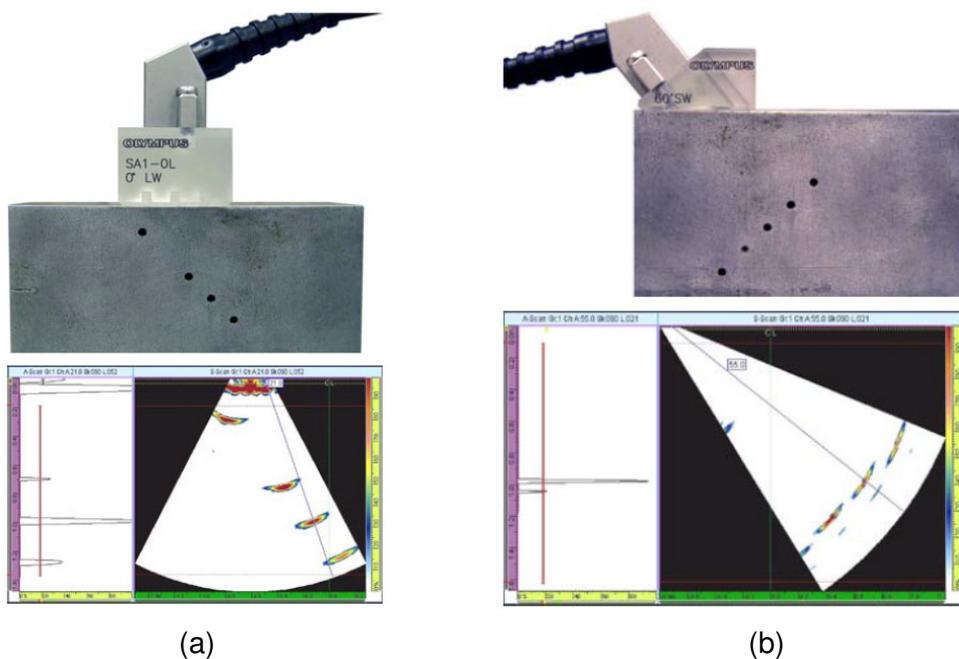


Figura 2.21 – Posicionamento do transdutor e mapas S-scan para varredura *setorial* (a) -30° a $+30^\circ$ e (b) $+35^\circ$ a $+70^\circ$. (OLYMPUS, 2012)

2.3. Materiais Compósitos

Materiais compósitos possuem em sua estrutura duas ou mais fases quimicamente diferentes, apresentando combinações de propriedades dos materiais que constituem cada fase, de forma que estes materiais combinados tenham propriedades superiores às que possuíam de forma independente (CHUNG, 2010). Na configuração mais usual, uma das fases, denominada matriz, é contínua, e a outra, denominada reforço, é descontínua. A matriz geralmente é mais dúctil e menos resistente do que o reforço, que, por sua vez, confere a resistência mecânica do material propriamente dita (ISHAI, 1994). Compósitos podem ser classificados de acordo com o material que compõe a matriz – poliméricos, metálicos ou cerâmicos – ou de acordo com o formato do reforço – particulados ou fibrosos (CHUNG, 2010). Existem ainda diversas subcategorias nas quais materiais compósitos podem ser classificados, como, por exemplo, de acordo com o tipo e a disposição dos reforços (CHUNG, 2010). A Figura 2.22 apresenta as subcategorias de classificação.

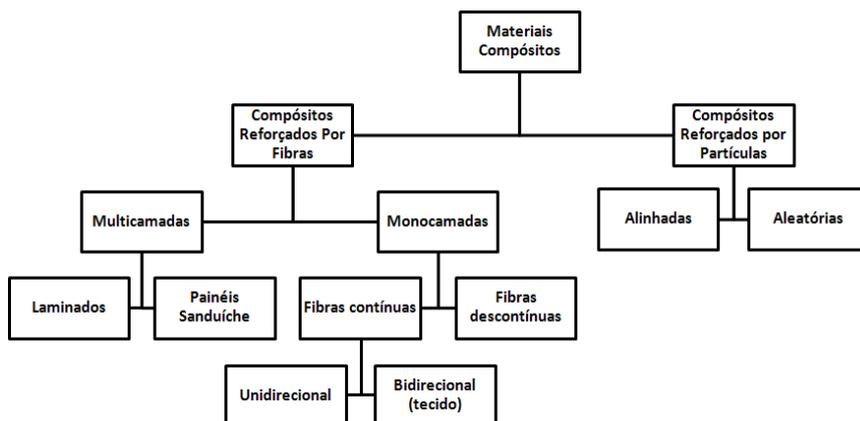


Figura 2.22 - Possíveis classificações de materiais compósitos³

2.3.1. Compósitos de Matriz Polimérica

Dentre todas as classes de materiais compósitos, os de matriz polimérica são os de mais fácil fabricação, pois polímeros permitem, de forma geral, baixas temperaturas de processo para serem conformados (CHUNG, 2010). O polímero que constitui a matriz pode ser tanto termoplástico como termofixo, sendo os mais utilizados para tal

³ Disponível em: <http://www.demar.eel.usp.br/compositos/Notas_aula/introducao.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2016.

aplicação os poliésteres insaturados e as epóxies. (PINTO, 2002, OTA, 2004, FARO, 2008).

A matriz polimérica possui, como principal função, a transferência do carregamento aplicado no compósito para as fibras, mantendo-as ancoradas e agrupadas, assim como protegendo-as contra danos superficiais (abrasão mecânica ou reações com o ambiente), e, portanto, contribui com o controle das propriedades do compósito (GIBSON, 1994).

Neste tipo de compósito, o reforço pode estar presente na forma de partículas ou fibras, de forma que partículas possuem menor poder de reforço. As fibras, a priori, possuem a finalidade de aumentar a resistência mecânica do material, mas também podem assumir outras funções, como, por exemplo, diminuição de custos ou aumento da estabilidade dimensional do material (OTA, 2004, BOERI, 2006). As fibras mais empregadas são as de vidro e as de carbono. Fibras de vidro possuem características como baixo coeficiente de dilatação térmica, altas propriedades mecânicas que se mantêm em altas temperaturas, facilidade de processamento e baixo custo, que as tornam interessantes para a aplicação como reforços (OTA, 2004, GIBSON, 1994).

A fração volumétrica de fibras, sua geometria e disposição são alguns dos principais fatores que determinam as propriedades de compósitos poliméricos. Estas variáveis definem a resistência/rigidez mecânica do material, sua anisotropia e o modo de falha mais provável de ocorrer. Adicionalmente, uma adequada adesão entre fibras e matriz também é de suma importância, pois garante que a transferência de carregamento da matriz para as fibras seja realizada da forma mais eficiente possível, evitando a propagação de trincas e a falha catastrófica do material (BOERI, 2006, HUANG *et al*, 1995).

A principal vantagem deste tipo de compósito é a capacidade de aliar propriedades como baixo peso específico, boa performance mecânica e excelente resistência à corrosão. Consequentemente, compósitos poliméricos têm se destacado na substituição de materiais tradicionais nas mais diversas aplicações, especialmente nas estruturais. (ISHAI, 1994, PINTO, 2002, OTA, 2004, FONSECA, 2006 FARO, 2008, CHUNG, 2010)

Apesar de apresentar grande resistência à corrosão, este material não é inerte à influência de meios agressivos. Suas propriedades são progressivamente degradadas através de fenômenos de difusão quando ele está em contato com água e solventes sob condições de altas temperaturas e pressões. Defeitos provenientes do processo de fabricação ou criados durante o tempo de serviço podem levar o material à falha, e, portanto, devem ser monitorados.

Dentre os defeitos eventualmente encontrados em compósitos de matriz polimérica, merecem destaque (TEAGLE, 1984, ADAMS e CAWLEY, 1988):

- Delaminações / descolamentos
- Vazios / porosidades
- Trincas
- Desalinhamento de fibras
- Inclusões
- Áreas pobres ou ricas em resina
- Danos por fadiga

A presença destes defeitos possui influência direta na deterioração de propriedades do material, seja pela diminuição da resistência mecânica e rigidez, seja pela concentração de tensões.

2.3.2. Laminação Manual

A laminação manual é o método mais simples empregado para a fabricação de materiais compósitos. Considerando os compósitos de matriz polimérica em caráter particular, consiste no empilhamento de diversas camadas do material de reforço embebidas pela resina que compõe a matriz, processo realizado em um molde que determina a forma final do laminado. O operador, com o auxílio de um pincel ou rolete, distribui manualmente a resina de forma uniforme pelas camadas; esta etapa também tem o intuito de compactar e retirar bolhas de ar do interior do laminado. A quantidade necessária de camadas de reforço é definida pela espessura projetada para a estrutura fabricada. Quando a espessura final é atingida, é necessário aguardar a cura da resina

polimérica, que pode ocorrer em temperatura ambiente ou com o fornecimento externo de calor. A Figura 2.23 ilustra o procedimento adotado para a fabricação de uma junta polimérica através de laminação manual.

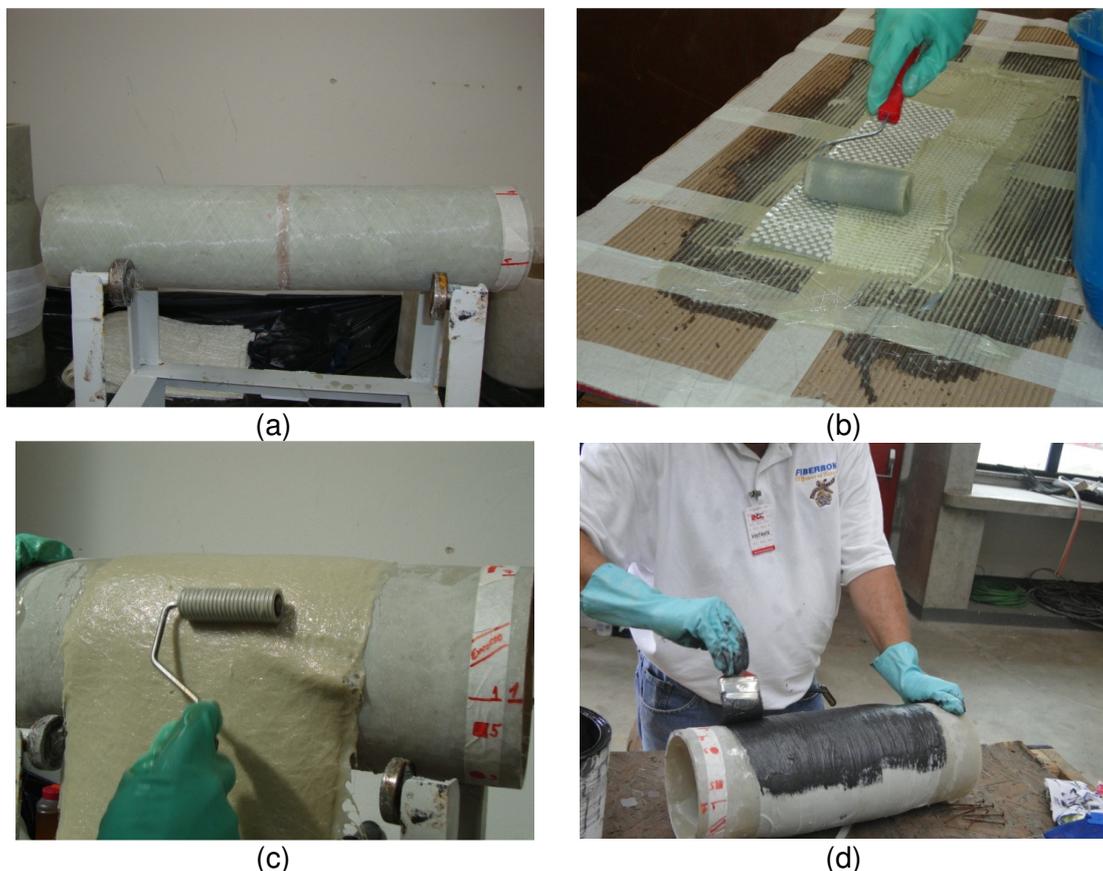


Figura 2.23 - Etapas de fabricação de uma junta laminada. (a) Aspecto dos dutos unidos através de solda polimérica antes da aplicação das camadas laminadas. (b) Processo de laminação manual. (c) Deposição das camadas laminadas sobre os dutos. (d) Acabamento superficial após a cura da resina.

A simplicidade deste método de fabricação, aliada ao seu baixo custo de operação, permite que este seja amplamente empregado nas mais diversas aplicações. Porém, por se tratar de um procedimento rústico, a qualidade final do produto depende fortemente das habilidades do operador. Defeitos de fabricação como presença de vazios ou corpos estranhos e descolamentos entre camadas são os mais frequentemente encontrados em compósitos de matriz polimérica fabricados através do processo de laminação.

2.4. Ultrassom em Materiais Compósitos

A microestrutura de materiais compósitos constitui um grande desafio para o emprego de técnicas ultrassônicas para a sua inspeção. Em geral, este tipo de material é heterogêneo e anisotrópico, fatores que contribuem com a intensificação da perda de energia ultrassônica pelos fenômenos de atenuação: espalhamento e absorção (MASON, 1964, LIONETTO *et al*, 2013).

O espalhamento é, por definição, a perda de energia ultrassônica quando o feixe atinge a interface entre dois meios distintos. É intuitivo que este fenômeno seja acentuado em compósitos, uma vez que estes consistem na mistura de dois ou mais materiais com diferentes propriedades, incluindo as propriedades sônicas. Desta forma, toda interface entre estes materiais é uma fonte de espalhamento da onda ultrassônica, tornando a microestrutura do material compósito altamente atenuante.

Compósitos de matriz polimérica oferecem ainda uma maior dificuldade para a aplicação do ultrassom como metodologia de inspeção não-destrutiva. Polímeros geram uma grande perda de energia ultrassônica por absorção em decorrência de suas ligações intermoleculares. A quantidade de energia absorvida está relacionada aos rearranjos moleculares da estrutura polimérica (transição vítrea, fusão, reações durante a cura, entre outras); diversos estudos vêm, inclusive, sendo conduzidos de forma a caracterizar o estado de cura de polímeros com o emprego de técnicas ultrassônicas (LIONETTO *et al*, 2013).

A estes fatores, soma-se ainda os casos em que a geometria ser inspecionada também é desafiadora, o que não é incomum no caso de materiais compósitos dada a sua versatilidade de aplicações. A combinação de todas essas características produz diversas implicações práticas no emprego da técnica ultrassônica em compósitos de matriz polimérica, conforme poderá ser avaliado nos trabalhos expostos na próxima seção.

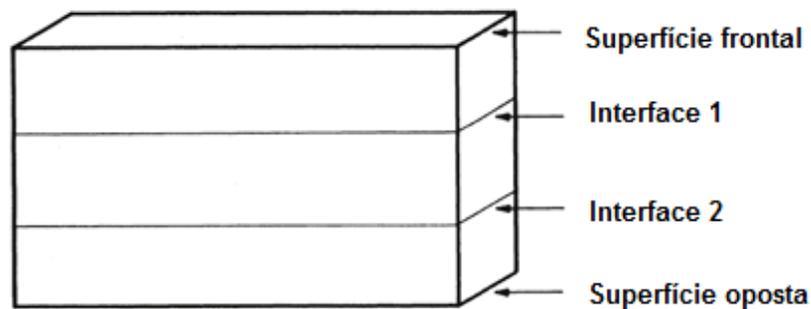
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura apresenta um número considerável de autores dedicados à investigação da inspeção ultrassônica em compósitos de matriz polimérica. Os primeiros estudos datam do início da década de 70, quando MARKHAM (1970) empregou o ultrassom para a obtenção das propriedades sônicas e mecânicas de painéis CFRP. Entretanto, a ampla maioria dos trabalhos existentes se restringe à aplicação do método em estruturas de baixa espessura (até 10 mm), empregadas majoritariamente na indústria aeroespacial. Conseqüentemente, dificuldades decorrentes da estrutura complexa deste tipo de material são atenuadas, mas ainda assim são existentes.

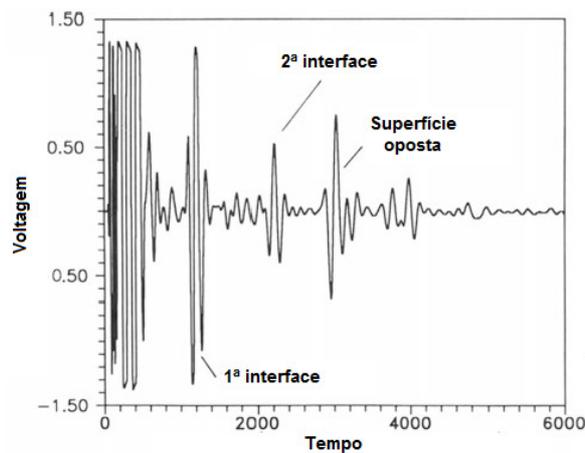
A seguir será apresentado um apanhado histórico abordando o emprego do ultrassom convencional em estruturas compósitas de alta espessura. Adicionalmente, alguns trabalhos que investigaram a aplicação do *phased array* neste tipo de material também serão expostos, independente da espessura da estrutura estudada.

HSU e MINACHI (1990) empregaram o ultrassom para detecção de porosidade e delaminações em dois compósitos de epóxi/fibra de grafite com espessura de 35 mm e 20 mm. Os corpos de prova contendo delaminações foram inspecionados por pulso-eco, com transdutores de 1 MHz, 5 MHz e 5 MHz focalizado. Houve detecção das delaminações, porém, estas foram superdimensionadas em aproximadamente 100% quando comparadas ao seu tamanho real, indicando que melhorias necessitavam ser realizadas para aplicação do ultrassom para este fim. Os corpos de prova contendo porosidade, por sua vez, foram inspecionados pela técnica de transparência, empregando transdutores de 1 MHz e 2,25 MHz. Os resultados foram avaliados segundo o comportamento das curvas de atenuação experimentais. Os autores inferiram que qualquer discrepância apresentada por estas curvas frente ao comportamento esperado seria consequência direta da presença de porosidade no interior do material. Para um corpo de prova com 4,4% em volume de porosidade real, o ultrassom apontou valores entre 2,6% e 7,2%. Apesar de ter sido considerado um resultado satisfatório pelos autores, ressalvas devem ser realizadas, uma vez que diversos outros fatores microestruturais podem exercer influência quanto ao comportamento do poder de atenuação do material.

FORTUNKO e FITTING (1991) investigaram o comportamento ultrassônico em um painel laminado de epóxi/fibra de vidro de 50 mm de espessura. Para tal, desenvolveram aparato próprio, composto por dois transdutores banda larga de 1 MHz no modo *pitch-catch*. Os resultados demonstraram boa relação sinal-ruído no que tange a detecção das interfaces internas do material, conforme apresentado na Figura 3.1. Porém, os autores não investigaram o comportamento da técnica na presença de eventuais defeitos típicos desta estrutura, apresentando, portanto, resultados promissores, porém incompletos.



(a)



(b)

Figura 3.1 – (a) Esquema do material investigado. (b) A-scan registrado (Adaptado de FORTUNKO e FITTING, 1991).

MURRI *et al* (1991) aplicaram o ultrassom na inspeção de painéis compósitos de epóxi/fibra de grafite aderidos a material elastômero. O material possuía aproximadamente 76 mm de espessura e defeitos foram artificialmente inseridos na camada de união entre os materiais. Uma varredura em pulso-eco foi realizada com um transdutor de frequência de 500 kHz e os defeitos foram detectados com sucesso.

Entretanto, a morfologia dos defeitos indicada pelo ultrassom apresentou certa discrepância em comparação ao formato real, conforme apresentado Figura 3.2(a). Os defeitos foram melhor definidos quando os autores realizaram um simples pós-processamento dos sinais, de forma que a imagem *C-scan* foi formada a partir da razão entre os ecos de fundo e de interface do material, conforme apresentado na Figura 3.2(b).

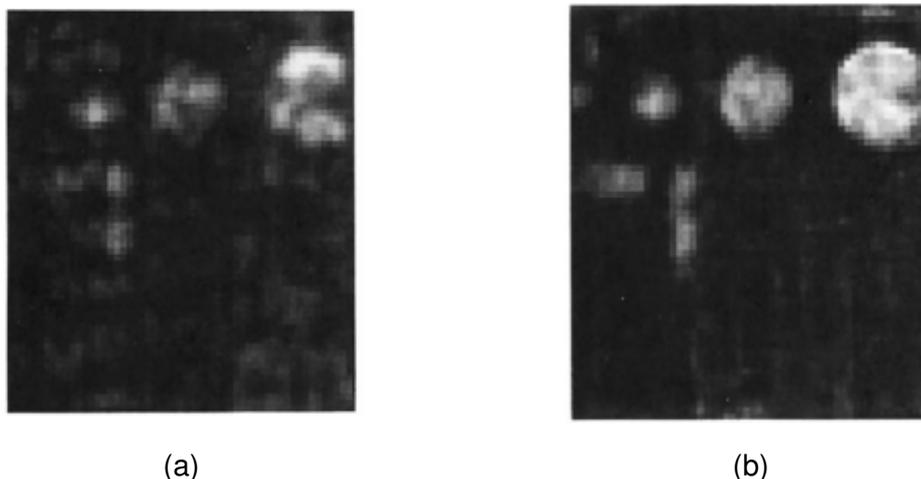
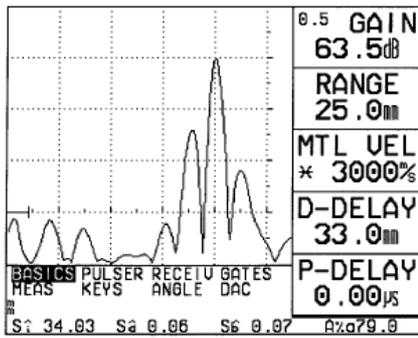
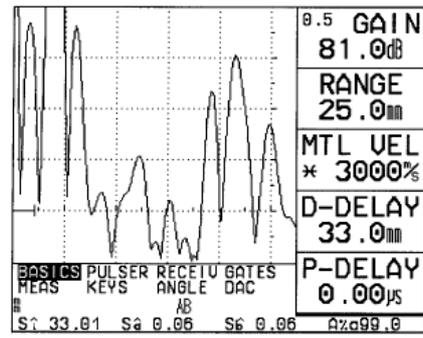


Figura 3.2 – Mapas *C-scan* obtidos na inspeção de painéis compósitos. (a) *C-scan* bruto e (b) *C-scan* após processamento proposto pelos autores (MURRI *et al*, 1991).

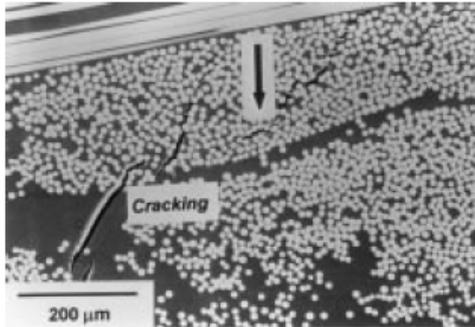
MOURITZ *et al* (2000) avaliaram a detecção por ultrassom de danos por fadiga e delaminações em material compósito de matriz em resina poliéster com reforço de fibra de vidro. Os corpos de prova investigados possuíam espessura entre 8 e 150 mm. O transdutor empregado possuía frequência de 500 kHz e as varreduras foram realizadas em modo pulso-eco. Os resultados apresentados na Figura 3.3 demonstraram que o ultrassom foi capaz de detectar danos por fadiga sob altas tensões, situação na qual o material apresenta delaminações mais grosseiras e trincas que se propagam em direções distintas à de propagação do feixe ultrassônico. A detecção é caracterizada pela necessidade de aumentar o ganho em 17,5 dBs para manter o eco de fundo em 80% da tela no material fadigado. Para avaliar o limite da técnica, os autores fabricaram corpos de prova no estilo “degrau” com delaminações artificiais, de 0,1 mm de espessura e 2 a 150 mm de largura. A Figura 3.4 apresenta graficamente os resultados obtidos, considerando o tamanho do defeito e a sua profundidade.



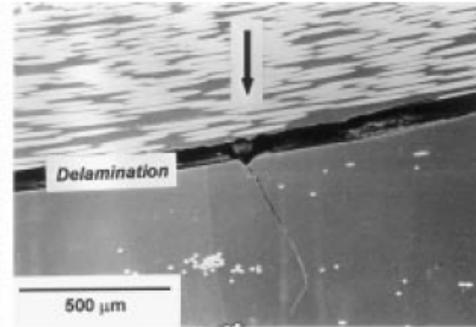
(a)



(b)

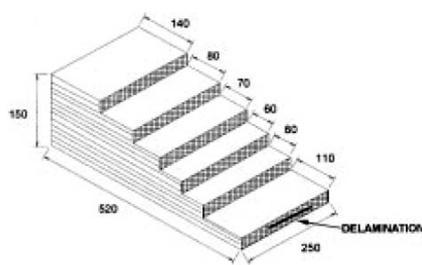


(c)

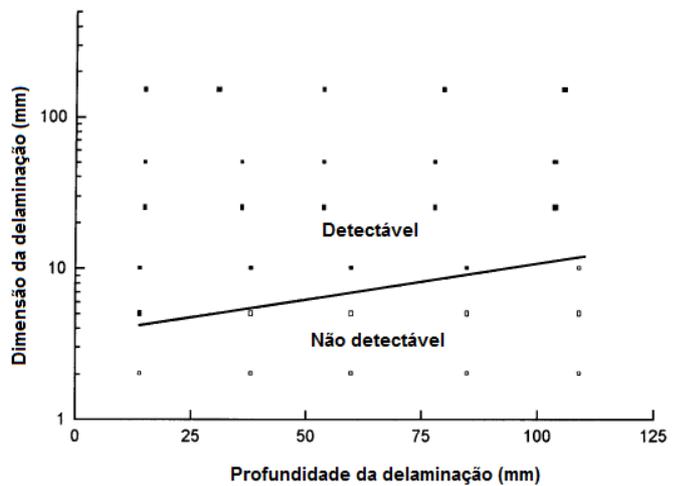


(d)

Figura 3.3 – (a) A-scan do material virgem e (b) após 20000 ciclos de fadiga. (c) e (d) demonstram as trincas e delaminações decorrentes dos ensaios de fadiga. (MOURITZ *et al*, 2000)



(a)



(b)

Figura 3.4 – (a) Amostra em degrau com delaminação artificial para avaliação do limite de detecção da técnica. (b) Resultado gráfico que aponta a detectabilidade do defeito em função de seu tamanho e profundidade (MOURITZ *et al*, 2000)

LETHIECQ *et al* (1994) desenvolveram dois transdutores *array* lineares para a inspeção de materiais poliméricos e compósitos. Para tal, realizaram um estudo extensivo tendo em vista obter os parâmetros de configuração ótima para o seu caso de estudo. Como resultado, identificaram que o melhor compromisso entre cobertura, resolução, penetração, relação sinal-ruído e diminuição da influência dos lóbulos laterais, o *array* ideal seria de 72 elementos (com abertura efetiva de 8 elementos), pitch de 1,25 mm e frequência de 3,5 MHz. Estes *arrays* foram aplicados empregando a técnica de transparência para a inspeção de um painel compósito de matriz epóxi com reforço em fibra de carbono, com 5 mm de espessura e contendo os defeitos de porosidade e delaminações. A Figura 3.5 apresenta um *C-scan* representativo dos resultados obtidos, no qual é possível observar a detecção da delaminação e das porosidades existentes no material.



Figura 3.5 - *C-scan* com delaminações (à esquerda) e núcleo de porosidades (à direita) detectadas em material CFRP (LETHIECQ *et al*, 1994).

BROTHERHOOD *et al* (2003) apresentaram um aparato desenvolvido em parceria com a Airbus que consiste em um sistema de *phased array* de 32 canais ativos multiplexáveis em 128. O sistema é voltado para inspeções manuais e opera nos modos *B-scan* e *C-scan*, utilizando como sensores *wheel probes* de 1 a 10 MHz de frequência. O equipamento foi testado em compósitos de fibra de carbono utilizados na indústria aeroespacial, detectando com sucesso defeitos como danos por impacto, descolamento, porosidade e dobramento de fibras. A Figura 3.6 apresenta uma foto com o equipamento desenvolvido.

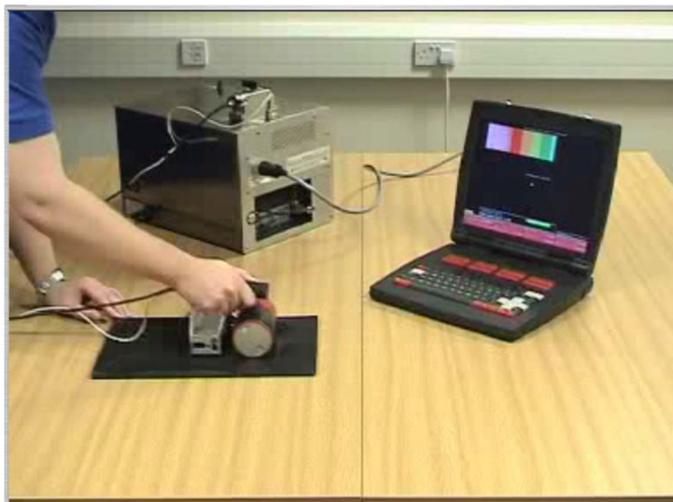
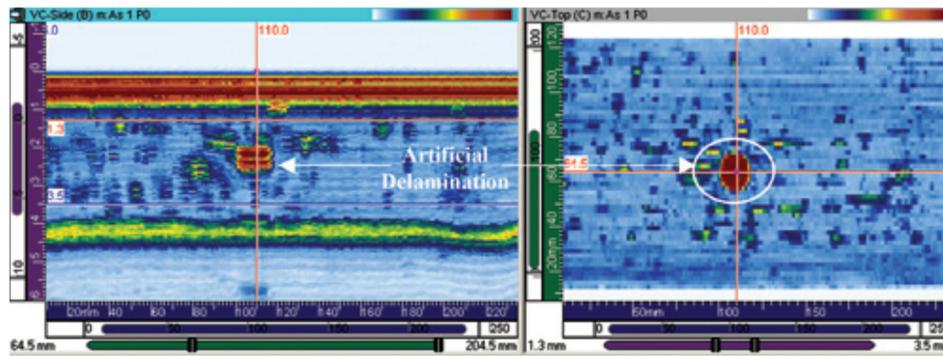
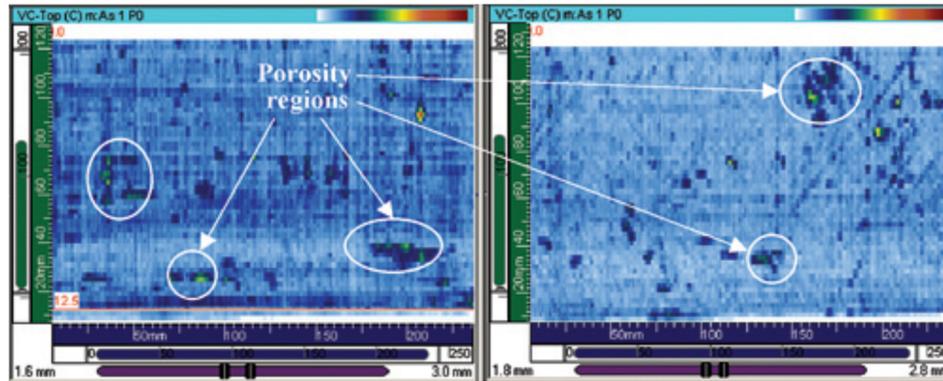


Figura 3.6 – Equipamento de *phased array* desenvolvido para a inspeção de compósitos laminados (BROTHERHOOD *et al*, 2003).

NAGESWARAN *et al* (2006) testaram a detectabilidade de defeitos artificialmente inseridos em amostras de CFRP por *phased array*. Foram estudados defeitos de delaminação entre camadas laminadas e inclusões de partículas estranhas. A inspeção foi simulada no *software* CIVA para a sua prévia validação. Foi utilizado um *array* de 7 MHz, com 16 elementos multiplexados em 128, através do método pulso-eco em imersão. A imersão foi empregada, pois de acordo com a lei focal utilizada, é necessário que o transdutor esteja a uma determinada distância da superfície da amostra para que a focalização desejada seja atingida, uma vez que as amostras eram muito finas e anisotrópicas, provocando uma má formação do feixe. Através desta configuração, os defeitos artificiais de delaminação e porosidade foram detectados com sucesso. A Figura 3.7 apresenta alguns dos mapas obtidos. Os autores ressaltam a grande vantagem, em relação ao tempo de inspeção, do *phased array* (~2min) em comparação a um transdutor convencional (~33min) para os materiais estudados.



(a)



(b)

Figura 3.7 – (a) B-scan e C-scan de áreas delaminadas e (b) C-scans de áreas que apresentaram porosidades (NAGESWARAN *et al*, 2006).

Mais uma vez com foco na indústria aeroespacial, HABERMEHL *et al* (2009) aplicaram a técnica de *phased array* para detecção de falhas artificiais em painéis de material CFRP. O corpo de prova estudado possuía duas espessuras distintas: 16 e 24 camadas (de espessura não explicitada), e teve 70 defeitos artificialmente inseridos, dentre furos de fundo plano e camadas circulares de grafite e teflon. A inspeção foi realizada com um sistema de movimentação em XY, com o auxílio de uma sapata com lâmina d'água, conforme apresentado na Figura 3.8. Para detecção e dimensionamento, os autores empregaram dois *gates* de aquisição: o primeiro (*gate A*), iniciado após o eco de superfície e o segundo (*gate B*) centralizado no eco de fundo do material, conforme esquema apresentado na Figura 3.9(a). Os resultados de inspeção estão apresentados na Figura 3.9 (b) a (d), nas quais são apresentados 3 mapas C-scan: o primeiro, com os valores de amplitude lidos pelo *gate A*; o segundo, com os valores de tempo de voo lidos pelo *gate A* e o terceiro, com os valores de amplitude lidos pelo *gate B*. Os autores consideraram todos os defeitos detectáveis e dimensionáveis, somando as detecções dos 3 mapas C-scan gerados. Entretanto, nenhum valor de dimensão e erro são apresentados no trabalho. Adicionalmente, é

importante salientar que a abordagem sugerida pelos autores é válida para geometrias e superfícies bem comportadas. Isto fica nítido na avaliação da região central dos mapas C-scan da Figura 3.9, na qual há uma transição gradual de 24 para 16 camadas de compósito. É possível observar que a detecção nesta região é dificultada, a morfologia dos defeitos não é tão nítida quanto nos outros pontos onde a espessura é uniforme e a relação sinal ruído nesta região é muito menor quando comparada às demais.

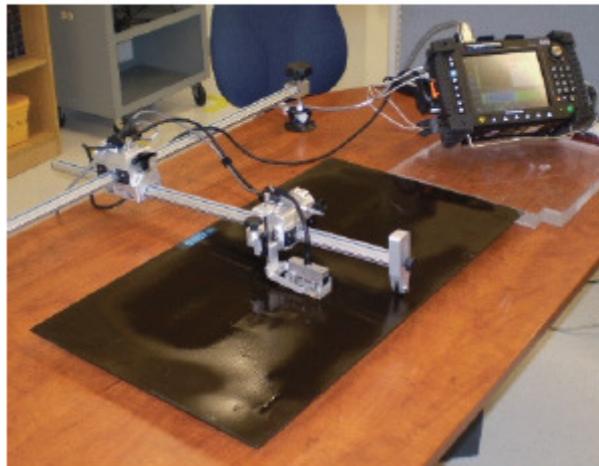
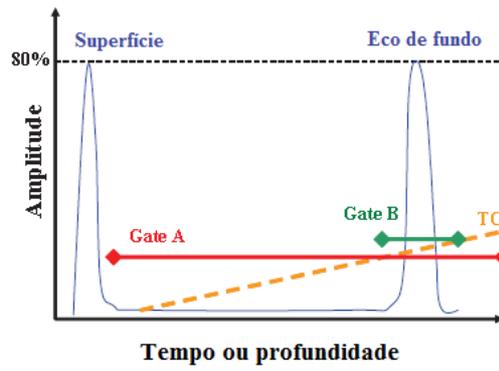
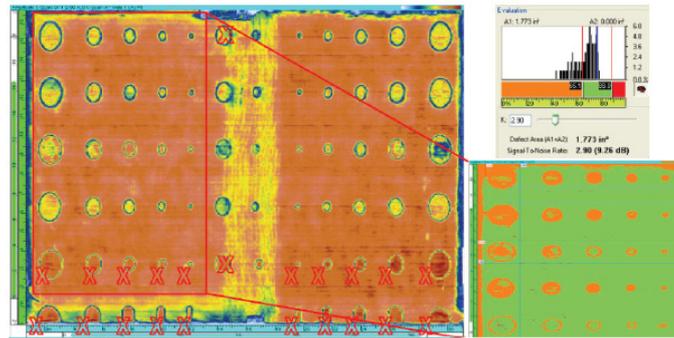


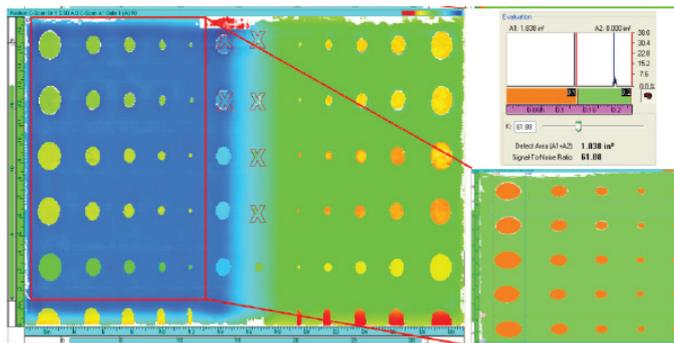
Figura 3.8 – Aparato experimental utilizado por HABERMEHL *et al* (2009) na inspeção de painéis CFRP.



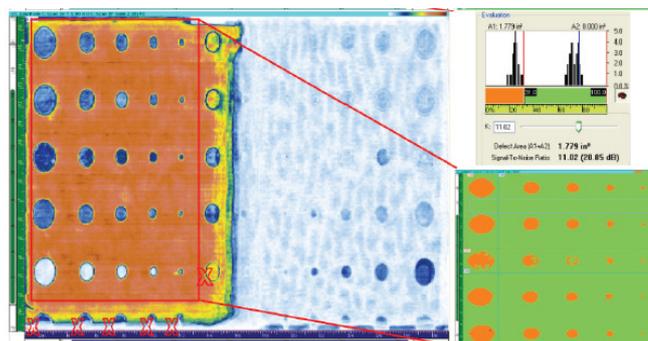
(a)



(b)



(c)



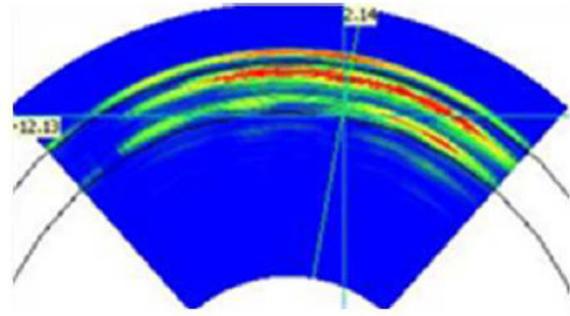
(d)

Figura 3.9 – Resultados obtidos na inspeção de painéis CFRP. (a) Localização dos *gates* de aquisição; (b) C-scan de amplitude do *gate* A; (c) C-scan de tempo de voo do *gate* A; (d) C-scan de amplitude do *gate* B. (Adaptado de HABERMEHL *et al*, 2009)

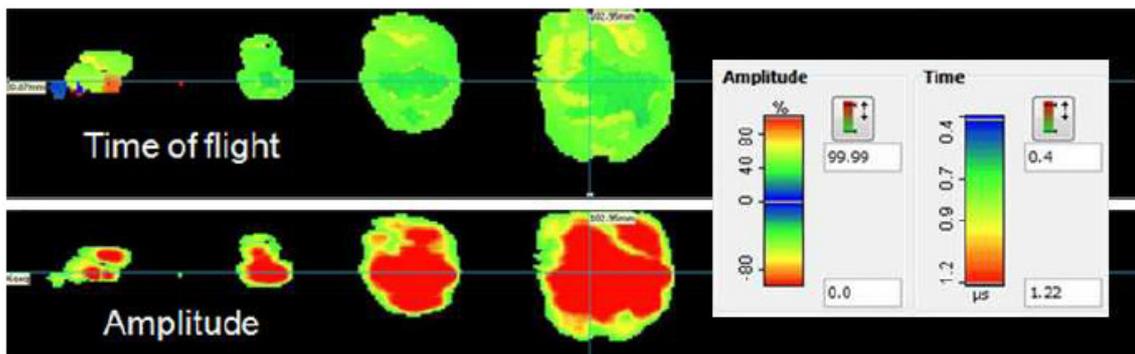
HOPKINS *et al* (2011) demonstraram diversas aplicações do *phased array* na inspeção de materiais compósitos. Ilustrando a versatilidade que a técnica provém, dois dos casos apresentados merecem destaque. Um tubo laminado em material CFRP contendo defeitos artificiais de delaminação (fitas de teflon com 4 a 20 mm de extensão) foi inspecionado empregando duas abordagens diferentes. A primeira consistiu no emprego de um transdutor *array* fabricado conforme a geometria avaliada, ou seja, os elementos estão dispostos em formato circular, conforme apresentado na Figura 3.10(b). Posteriormente, o tubo foi novamente inspecionado em ambiente de imersão empregando um transdutor linear. Neste caso, um processamento de dados chamado SAUL (*Surface Adaptive Ultrasound*) foi aplicado. No SAUL, o formato do objeto inspecionado é medido através da resposta em tempo de voo dos sinais refletidos pela sua superfície; com estes valores, as leis focais são adaptadas (recalculadas) de forma a considerar a geometria superficial do material. A Figura 3.10 demonstra os resultados obtidos para ambas as inspeções. Todos os defeitos foram detectados nos dois casos, sendo possível observar uma grande correlação entre os mapas *C-scan* produzidos em ambas as inspeções.



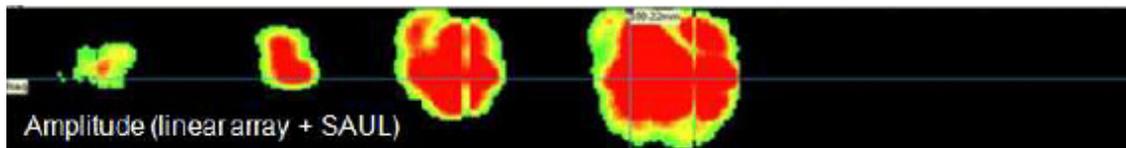
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.10 – (a) Tubo laminado em CFRP; (b) Transdutor *array* de formato customizado com detecção de defeito em formato *S-scan*; (c) Mapas *C-scan* em tempo de voo e amplitude para a inspeção com o *array* circular; (d) *C-scan* em amplitude para a inspeção empregando a técnica SAUL. (HOPKINS *et al*, 2011)

LI *et al* (2013) avaliaram a inspeção por *phased array* em compósitos através do método de FMC/TFM (*Full Matrix Capture/Total Focusing Method*). A FMC, ou Captura de Matriz Completa, consiste na emissão individual de cada elemento do transdutor, seguida pela recepção por todos os seus elementos. Este processo se repete até que todos os elementos tenham realizado emissão. O TFM, ou Método de Focalização total, é uma das inúmeras formas de pós-processar os dados registrados por FMC. O TFM processa sinais de todas as combinações possíveis de emissão-recepção de um transdutor *phased array*, realizando a focalização tanto na emissão quanto na recepção, gerando, portanto, uma imagem de alta resolução para o material inspecionado. Apesar de tratar-se de uma metodologia poderosa que tem sido cada vez mais empregada, o FMC/TFM encontra grandes desafios para a sua aplicação em compósitos em decorrência da anisotropia destes materiais. LI *et al* (2013) propõem algumas modificações do método para a anisotropia do material, como a correção do perfil de velocidades em função da direção de propagação, aliada ao emprego de filtros no domínio da frequência. A metodologia proposta foi testada empiricamente em um painel de CFRP, com 19 mm de espessura, contendo furos laterais de 1,5 mm de diâmetro nas profundidades de 4 mm, 10 mm e 16 mm. Foi empregado um transdutor *array* linear de 64 elementos e 5 MHz de frequência. A Figura 3.11 compara os resultados obtidos via um procedimento FMC/TFM padrão e via o FMC/TFM proposto pelos autores. É possível observar que de fato há uma melhora substancial nas imagens geradas (o FMC/TFM padrão não gera resultados interpretáveis), mas, ainda assim, há uma relação sinal-ruído razoavelmente baixa nas imagens tratadas.

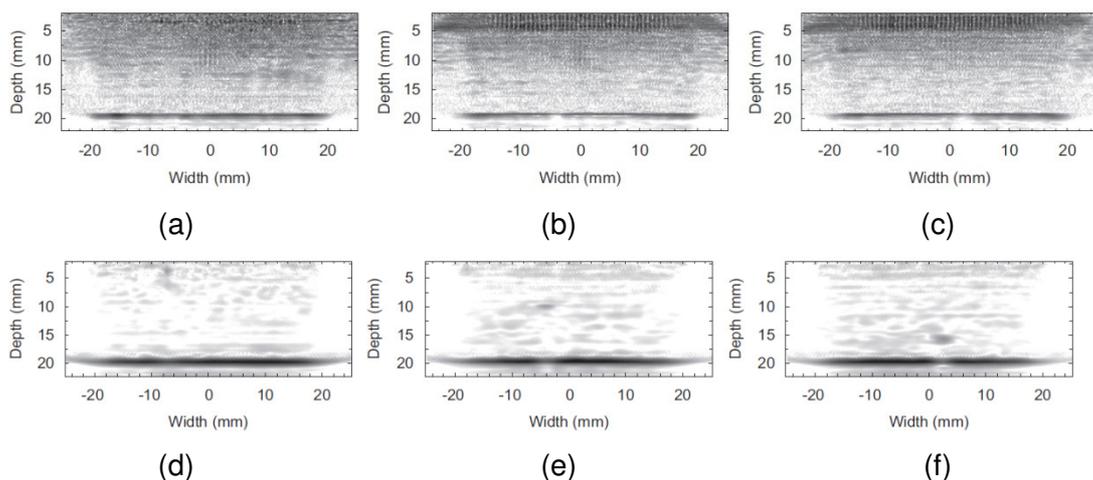


Figura 3.11 – Imagens geradas por TFM: (a), (b) e (c) imagens padrão, sem tratamento; (d), (e) e (f) imagens após processamentos indicados pelos autores, com os 3 furos detectados (LI *et al*, 2013).

KREUTZBRUCK *et al* (2014) apresentaram um comparativo interessante entre resultados obtidos com ultrassom convencional e *phased array* na inspeção de materiais CFRP. Os autores demonstram que a versatilidade de manipulação sobre o feixe ultrassônico possibilitada pelo *phased array* promove melhorias substanciais nos resultados de inspeção. Ao aplicar um pós-processamento de dados análogo ao modo FMC/TFM, a resolução da imagem gerada é imensamente superior à obtida com um transdutor convencional. Para traçar este paralelo, os autores empregaram um transdutor convencional de 2 MHz e um transdutor *array* de 2,25 MHz na inspeção de um painel CFRP de 6 mm de espessura, contendo furos de fundo plano, conforme esquema apresentado na Figura 3.12. Nesta figura, é possível observar que as imagens geradas pelo *array* matricial têm melhor relação sinal-ruído, maior resolução e maior detecção em comparação aos resultados obtidos com ultrassom convencional.

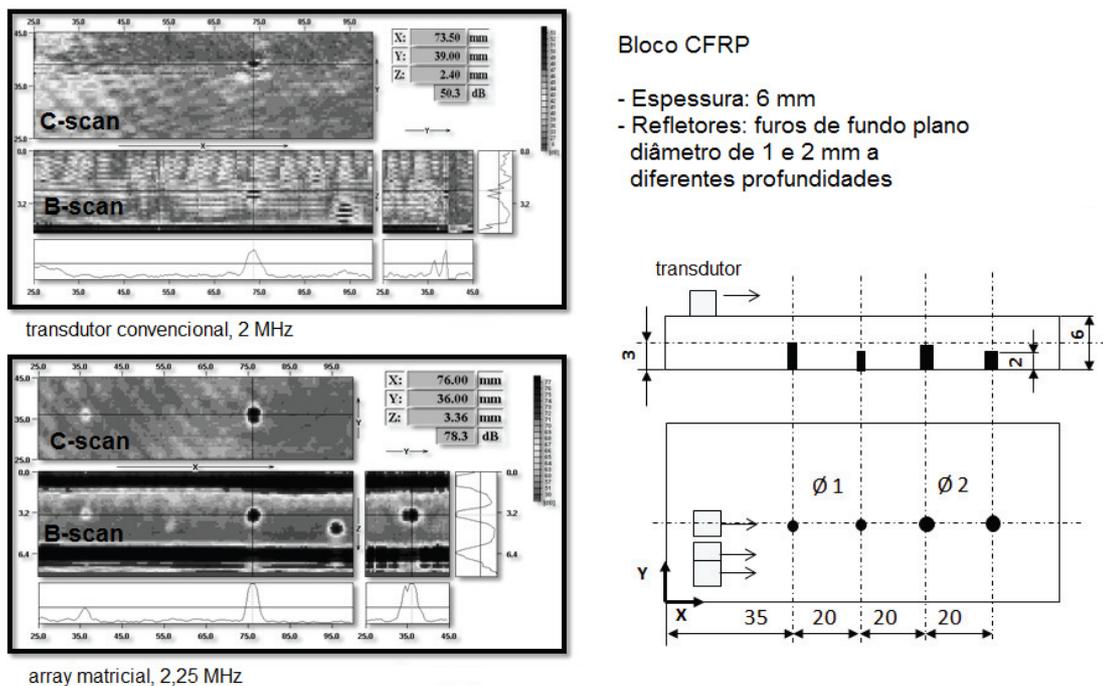


Figura 3.12 – Comparação entre ultrassom convencional e *phased array* pós-processado na inspeção de defeitos artificiais inseridos em bloco de CFRP (Adaptado de KREUTZBRUCK *et al*, 2014)

MEOLA *et al* (2015) empregaram o *phased array* para a detecção de defeitos causados por impactos de baixa energia em painéis laminados de CFRP. Os painéis tinham aproximadamente 5 mm de espessura aproximada e os defeitos foram gerados em

laboratório através de ensaio Charpy. Para a inspeção, foi empregado um transdutor linear de 64 elementos e 5 MHz de frequência, em conjunto com equipamento que permite a ativação de 16 elementos simultâneos. A Figura 3.13 mostra, a título de exemplo, a inspeção de um dos corpos de prova avaliados. No *C-scan* é possível identificar a extensão do defeito provocado pelo ensaio de impacto; já o *S-scan* demonstra a disposição dos defeitos ao longo da espessura do corpo de prova. Os mesmos corpos de prova também foram inspecionados por termografia, cujos resultados para dimensionamento demonstraram grande correlação com os valores apontados pelo *phased array*, sugerindo que ambas as técnicas são indicadas para a detecção deste tipo de defeito em material CFRP.

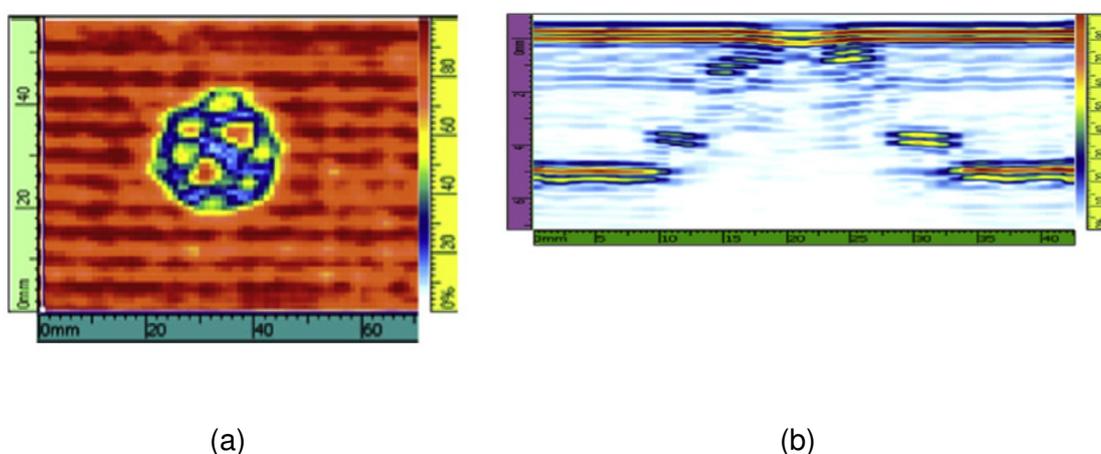


Figura 3.13 – Imagens de defeito provocado por impacto de baixa energia em material CFRP: (a) *C-scan* e (b) *S-scan* (MEOLA *et al*, 2015).

Conforme exposto nos trabalhos apresentados nesta seção, apesar de ser alvo de extensa investigação nas últimas três décadas, a aplicação da inspeção por ultrassom/*phased array* ainda se constitui um desafio em materiais compósitos. O avanço obtido neste período é evidente, vide a possibilidade de aplicação de técnicas complexas como a FMC/TFM e a criação de acessórios avançados, como os *wheel probes*, que mitigam a problemática do acoplamento. Não há, entretanto, um consenso na literatura quanto a metodologias ou procedimentos a serem aplicados nestes materiais, tampouco os resultados estão próximos de apresentar alguma convergência para tais avaliações quando estruturas de maior espessura são avaliadas.

Neste cenário, surge a motivação para o desenvolvimento desta dissertação. O estudo doravante apresentado tem como objetivo avaliar a inspeção por *phased array* em juntas

de tubulações de material compósito de matriz polimérica reforçada por fibra de vidro (PRFV). Fatores como frequência, lei focal e metodologia de inspeção foram avaliados no intuito de detectar, localizar e dimensionar defeitos típicos deste material, originados na etapa de fabricação ou decorrentes de serviço.

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Corpos de Prova

Foram fabricadas em laboratório 4 juntas laminadas em material PRFV para a realização deste trabalho. Das 4 juntas, 2 tiveram defeitos inseridos durante o processo de fabricação. O material e mão-de-obra necessários para a produção destes corpos de prova foi cedido por uma das fabricantes responsáveis pela instalação deste tipo de junta no Brasil. A Figura 4.1 apresenta uma fotografia dos corpos de prova disponíveis e a Tabela 4.1 apresenta suas identificações e parâmetros geométricos.



Figura 4.1 – Corpos de prova inspecionados

Tabela 4.1 - Identificação dos corpos de prova disponíveis

Identificação	Diâmetro (mm)	Espessura aproximada (mm)	Presença de defeitos
J1	101,6 (4")	mín. 13, máx. 27	Não
J2	101,6 (4")	mín.18, máx. 33	Sim
J3	101,6 (4")	mín.10, máx. 30	Sim
J4	152,4 (6")	mín.18 máx. 33	Não

Foram simulados defeitos de bolhas de ar, delaminação entre mantas e descolamento duto/laminado, todos passíveis de ocorrer durante a fabricação ou durante a vida útil deste material.

A bolha de ar foi simulada durante a passagem do rolo metálico sobre as mantas, de forma a deixar deliberadamente algumas áreas com a presença de bolhas de ar. A Figura 4.2 demonstra este defeito.



(a)



(b)

Figura 4.2 - Defeitos de bolha de ar de inseridos. (a) Defeito de bolha de ar inserido no lado direito da junta. (b) Defeito de bolha de ar inserido em detalhe.

A delaminação e o descolamento de mantas foram simulados através da inserção de fitas de acetato na superfície dos dutos GFRP e entre as mantas. Para verificar a capacidade de penetração e resolução da técnica, foram inseridas fitas de variados tamanhos, formatos, espaçamentos e em diferentes profundidades (aplicadas entre diferentes camadas de mantas). A Figura 4.3 apresenta algumas das fitas inseridas nos corpos de prova com presença de defeitos. As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam a descrição de todos os defeitos inseridos em cada corpo de prova.

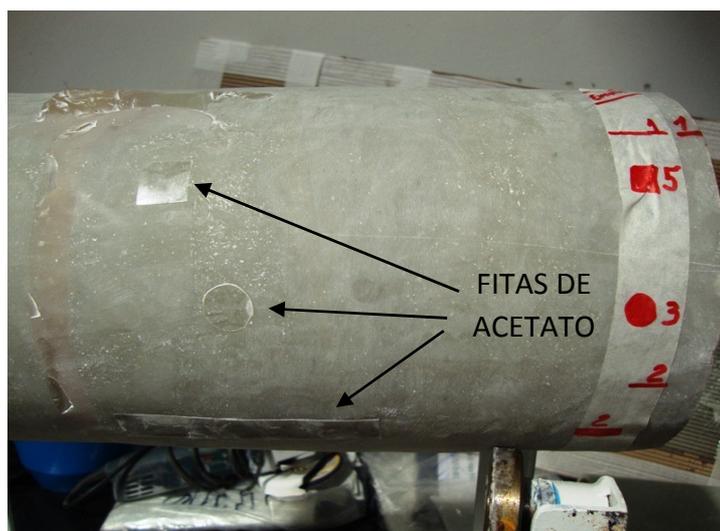


Figura 4.3 - Defeitos inseridos na superfície do duto e entre as mantas de fibra de vidro. Fitas de acetato simulam o descolamento e a delaminação entre mantas.

Tabela 4.2 - Fitas de acetato inseridas no corpo de prova J2

Identificação	Formato	Posição	Lado	Posição Circunferencial (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
a	Retangular	Superfície do Duto	Direito	30	80	18
b	Retangular	Superfície do Duto	Direito	120	105	18
c	Retangular	Superfície do Duto	Direito	45	18	13
d	Retangular	Superfície do Duto	Direito	190	18	14
e	Circular	Superfície do Duto	Direito	240	18	20
f	Quadrado	Superfície do Duto	Direito	80	11	11
g	Quadrado	Superfície do Duto	Direito	80	11	11
1	Quadrados	Entre Mantas 1 e 2	Esquerdo	30	(3x) 20	(3x) 20
2	Retangular	Entre Mantas 2 e 3	Esquerdo	110	70	16
3	Quadrados	Entre Mantas 3 e 4	Esquerdo	180	(3x) 20	(3x) 20
4	Retangular	Entre Mantas 4 e 5	Esquerdo	270	71	16
5	Quadrados	Entre Mantas 5 e 6	Esquerdo	16	(3x) 20	(3x) 20

Em adição aos defeitos apresentados na Tabela 4.2, também foram inseridas no corpo de prova J2 quatro bolhas de ar. Não houve dimensionamento pré-determinado para essas bolhas, apenas foram registradas as suas posições circunferenciais aproximadas:

- Bolha 1: Lado direito / 30 mm
- Bolha 2: Lado esquerdo / 140 mm
- Bolha 3: Lado esquerdo / 250 mm
- Bolha 4: Lado esquerdo / 330 mm

Tabela 4.3 - Fitas de acetato inseridas no corpo de prova J3

Identificação	Formato	Posição	Lado	Posição circunferencial (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
1	Retangular	Entre Mantas 1 e 2	Direito	50	80	17
2	Retangular	Entre Mantas 2 e 3	Direito	120	80	17
3	Retangular	Entre Mantas 3 e 4	Direito	200	49	16
4	Retangular	Entre Mantas 4 e 5	Direito	250	66	17
5	Retangular	Entre Mantas 5 e 6	Direito	330	75	19
6	Retangular	Entre Mantas 6 e 7	Direito	16	67	18

4.2. Simulações

A plataforma de simulação CIVA (versão 2016) foi utilizada visando um melhor direcionamento para a execução dos ensaios experimentais. A avaliação prévia através da simulação computacional da escolha mais adequada de parâmetros como leis focais, cobertura do feixe e extensão da coluna d'água permitem que as inspeções sejam realizadas de forma objetiva, com menor perda de tempo dedicado a estes pequenos ajustes.

O CIVA é um *software* que permite a reprodução virtual de um caso experimental sob estudo. Esta plataforma trabalha em três grandes vertentes: avaliação da morfologia do feixe sônico, simulação de inspeção (detecção de defeitos) e importação de arquivos reais de inspeção para coleta de resultados e pós-processamento de dados. Para desenvolvimento de tais funcionalidades, o usuário deve fornecer ao *software* parâmetros como a descrição da amostra avaliada (material, geometria e propriedades sônicas) e detalhes da inspeção (tipo de transdutor ultrassônico e suas características, inspeção por imersão ou contato, tipo e passo de varredura, lei focal – no caso de *phased array* – entre outros).

A seguir será detalhado como o CIVA foi empregado no desenvolvimento deste estudo.

4.2.1. Sólido virtual

Uma junta compósita foi reproduzida virtualmente no *software* SolidWorks®. Neste *software*, apenas as características referentes à geometria foram consideradas, nenhuma informação a respeito de material foi inserida. Posteriormente este sólido foi importado ao CIVA como um 3D CAD.

A definição estrutural do material foi realizada no CIVA. A quantidade de camadas e proporção de fibra/matriz seguiram o manual de fabricação das juntas. As propriedades sônicas da fibra e da matriz utilizadas para as simulações foram teóricas e retiradas da base de dados do próprio *software*, uma vez que não foi possível medi-las empiricamente. Desta forma, os resultados de simulação não devem ser avaliados como ferramenta de reprodução fiel de resultados obtidos via experimental, mas como bom indicativo do comportamento sônico neste material.

Apenas os defeitos de delaminação foram avaliados na plataforma de simulação, uma vez que são os que apresentam maior desafio quanto à detecção por ultrassom. Foram inseridos 3 defeitos no sólido virtual, todos de dimensão 5 mm x 5 mm: um próximo à superfície externa da junta, um à metade da espessura e um próximo à interface laminado-duto. A Figura 4.4 mostra o sólido virtual e os defeitos inseridos no CIVA.

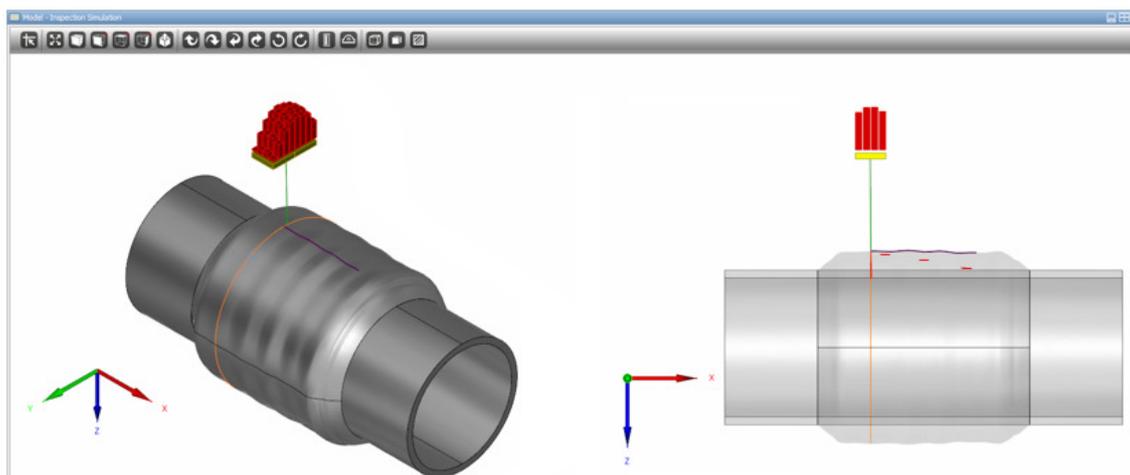


Figura 4.4 - Esquema representando o sólido virtual inserido no CIVA (esquerda) e vista com os 3 defeitos inseridos (3 traços vermelhos no interior da junta à direita).

4.2.2. Transdutor e inspeção

As simulações foram realizadas com um sensor *phased array* matricial 2D de frequência 500 kHz, com 32 elementos (4x8) e 6 mm de pitch. As simulações reproduziram ambiente de imersão em água.

4.2.3. Leis Focais

Foram selecionadas 4 leis focais para avaliação neste estudo, conforme apresentado na Tabela 4.5. A escolha das leis focais teve como objetivo avaliar a influência da deflexão angular e a focalização no poder de detecção da técnica.

Tabela 4.5 – Leis focais empregadas

Lei focal	<i>Setorial</i>	<i>Direction and Depth</i>	<i>Single Point Focusing</i>	<i>Several Depths Focusing</i>
Tipo de disparo	Unisequencial	Unisequencial	Unisequencial	Unisequencial
Abertura angular	- 15° a + 15°	- 15° a + 15°	-	-
Resolução angular	1°	1°	-	-
Tipo de onda	Longitudinal	Longitudinal	Longitudinal	Longitudinal
Focalização	-	Fundo da junta	Fundo da junta	A cada 2,5 mm

4.3. Inspeções

As inspeções foram conduzidas com um sensor matricial 2D de 500 kHz, com 32 elementos (4x8), 6 mm de pitch, da fabricante Imasonic. O equipamento utilizado foi o Multix++, da M2M, que possui interface direta com o CIVA, facilitando a importação dos parâmetros de configuração do ensaio. As inspeções foram realizadas em tanque de imersão em água, empregando um sistema de movimentação em XYZ, responsável pela manipulação do transdutor. O registro de dados em dois eixos das juntas foi realizado com o emprego de dois *encoders*:

- Eixo longitudinal: *Encoder* de roda, com resolução de 27 pontos/mm.
- Eixo circunferencial: *Encoder* de corda, com resolução de 40 pontos/mm.

A Figura 4.5 apresenta o aparato experimental empregado nos ensaios.

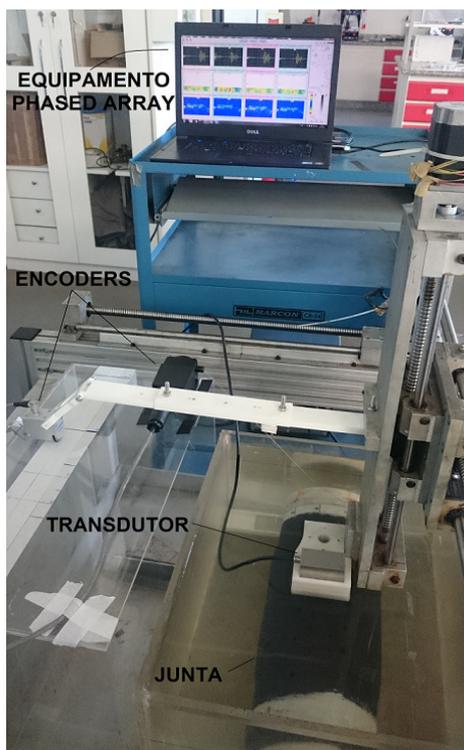


Figura 4.5 – Aparato utilizado para os ensaios por *phased array*.

As mesmas leis focais avaliadas no CIVA foram aplicadas nas inspeções realizadas. A versatilidade apresentada pelo equipamento de *phased array* permite que em uma única varredura as quatro leis focais sejam disparadas simultaneamente, promovendo grande economia no tempo de inspeção.

4.4. Tomografia Computadorizada

Tendo em vista corroborar os resultados obtidos pela técnica *phased array*, os 2 corpos de prova que possuem defeitos (J2 e J3) foram submetidos à inspeção não-destrutiva por uma técnica complementar, a tomografia computadorizada (TC). A TC foi escolhida por se tratar de uma técnica de alta resolução, capaz de apontar com precisão a existência e a localização dos defeitos avaliados.

Para a execução dos ensaios, foi utilizado um tomógrafo médico da fabricante GE, modelo Brightspeed 16 canais, cordialmente disponibilizado pelo Laboratório de Tomografia Computadorizada do Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES/PDEP/CRF-PETROBRAS). A Figura 4.6 demonstra o equipamento utilizado. Os parâmetros empregados foram: energia de 140 kV, corrente de 250 mA e a resolução empregada foi a de 0,650 mm x 0,5 mm x 0,5 mm (profundidade x largura x comprimento), valores limites do equipamento.



Figura 4.6 – Equipamento empregado na execução dos ensaios de tomografia computadorizada.

É importante ressaltar que a execução e análise destes ensaios não integra o escopo principal desta dissertação. Esta técnica foi empregada apenas como forma de análise complementar, visando obter uma simples comprovação das indicações obtidas pela técnica de *phased array*.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS

5.1. Simulações

5.1.1. Traçagem do feixe

A traçagem do feixe cumpre dois objetivos principais: o primeiro, estabelecer o valor de coluna d'água ideal para as inspeções; o segundo, determinar qual seria o passo de varredura circunferencial, de forma a garantir a inspeção de 100% da junta inspecionada. A partir destes resultados, foi assumida uma relação de compromisso tendo em vista permitir a aplicação de todas as leis focais simultaneamente.

As simulações demonstraram que com todos os elementos do transdutor ativos, o campo próximo na água tem extensão de aproximadamente 200 mm (Figura 5.2), sendo este o primeiro fator limitante. Leis focais que empregam focalização necessariamente têm de ser calculadas para distâncias menores que a do campo próximo, região onde é possível emitir um feixe convergente. No método de tentativa e erro, foi identificado que a distância ideal para a coluna d'água seria a de 70 mm, sendo esta a escolhida para a condução das inspeções.

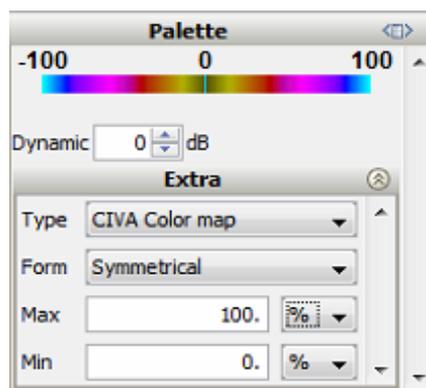


Figura 5.1 – Escala de cores, em valores de amplitude do sinal, para todos os resultados gerados no CIVA.

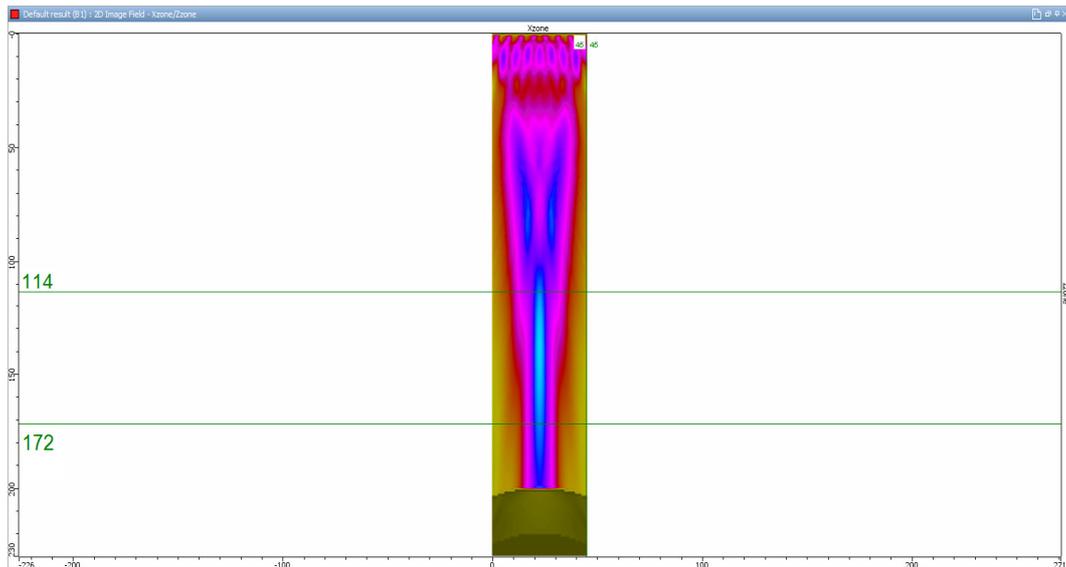


Figura 5.2 – Perfil do feixe sônico na água. A região de maior intensidade do feixe (final do campo próximo) está entre 114 e 172 mm de distância do transdutor.

O valor do passo de varredura foi determinado a partir da abertura do feixe de cada lei focal no momento em que este atinge a superfície da junta. Nas Figuras 5.3 a 5.6 as imagens apresentadas ao lado direito mostram a morfologia do feixe de cada lei focal ao atingir a superfície do material. Para o cálculo do valor de abertura foi realizada a queda de 6 dB em comparação ao ponto de maior intensidade do feixe (cor azul clara nas imagens). Com este parâmetro, a menor abertura apontada pelo CIVA foi para a lei focal *Several Depths Focus*, aproximadamente 7 mm, valor a ser adotado como passo de varredura circunferencial da junta.

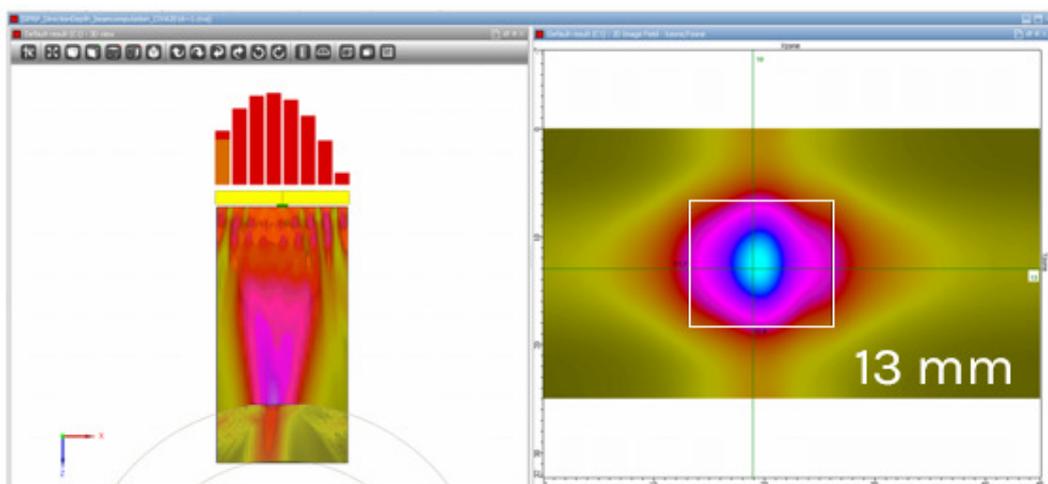


Figura 5.3 - Traçagem do feixe para a lei focal *Direction and Depth*.

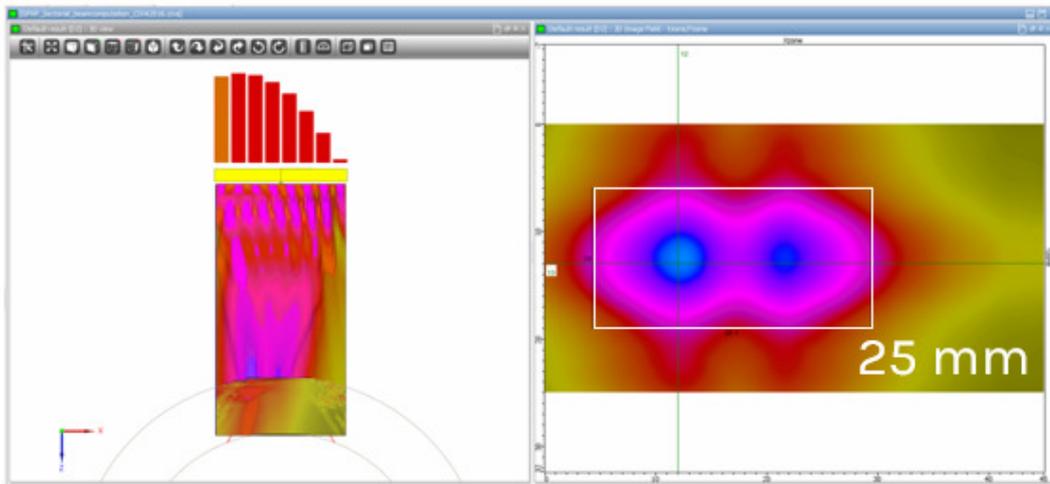


Figura 5.4 - Traçagem do feixe para a lei focal *Setorial*.

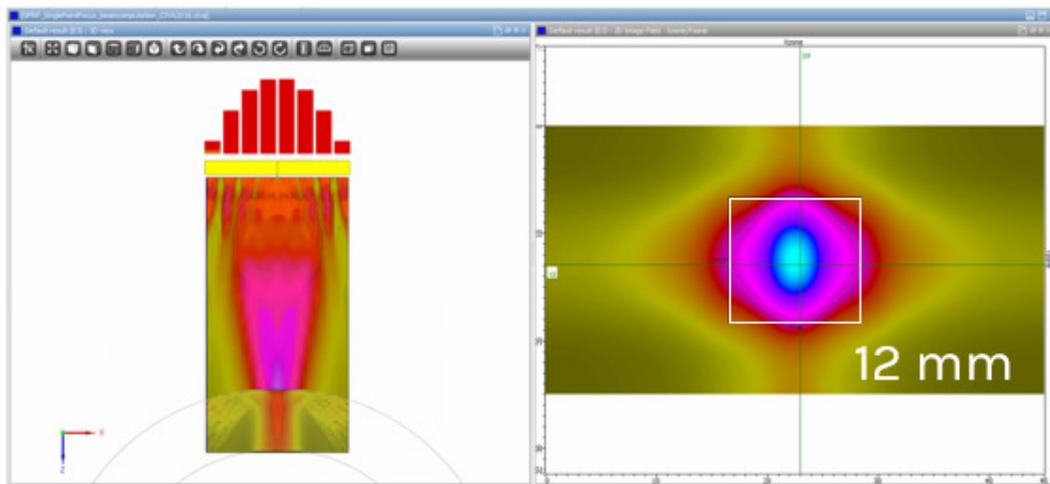


Figura 5.5 - Traçagem do feixe para a lei focal *Single Point Focus*.

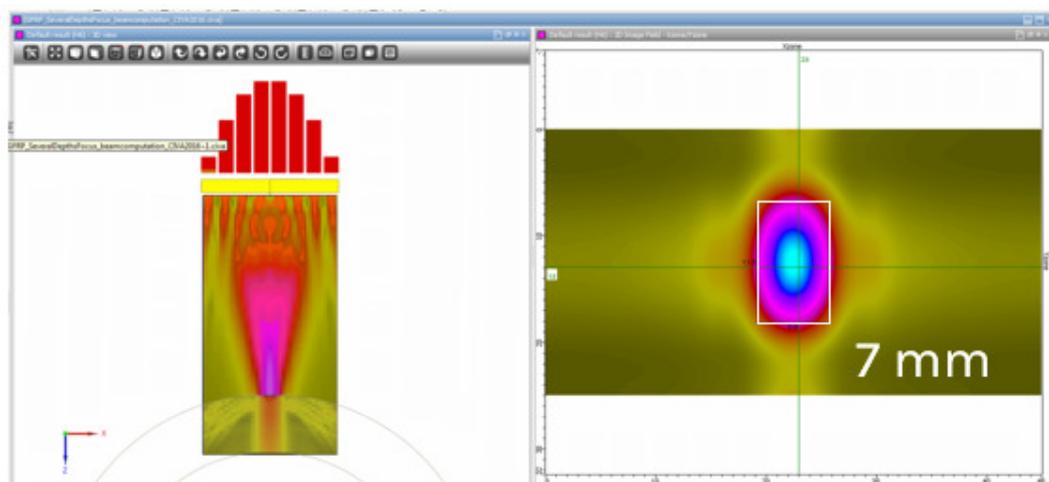


Figura 5.6 - Traçagem do feixe para a lei focal *Several Depths Focus*.

5.1.2. Detecção de defeitos

A detecção de defeitos também foi estudada através de simulação no CIVA, conforme exposto na seção 4.2 deste trabalho. As Figuras 5.7 a 5.10 apresentam os resultados obtidos para as 4 leis focais avaliadas. Em todas estas imagens é possível verificar 3 indicações de alta amplitude nas regiões em que os defeitos foram simulados, indicando que todas as leis focais são capazes de detectar tais defeitos, justificando o seu emprego na avaliação experimental.

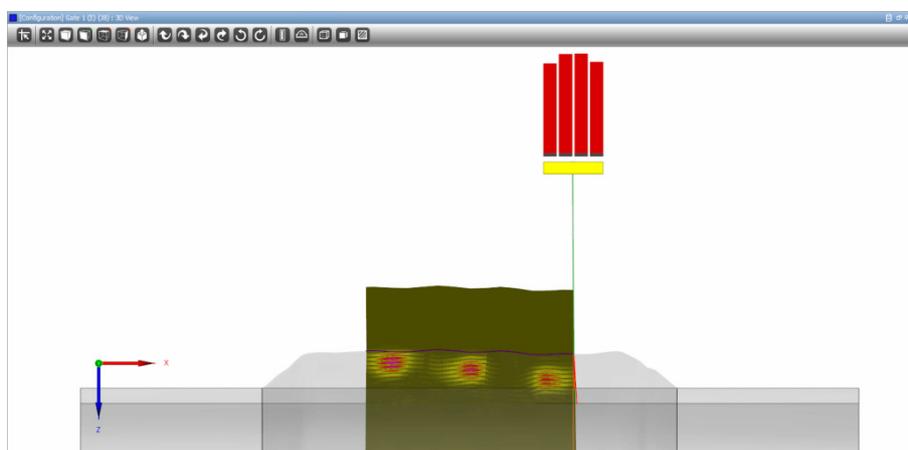


Figura 5.7 – Resultado de inspeção (B-scan) na simulação realizada no CIVA para a lei focal *Direction and Depth*.

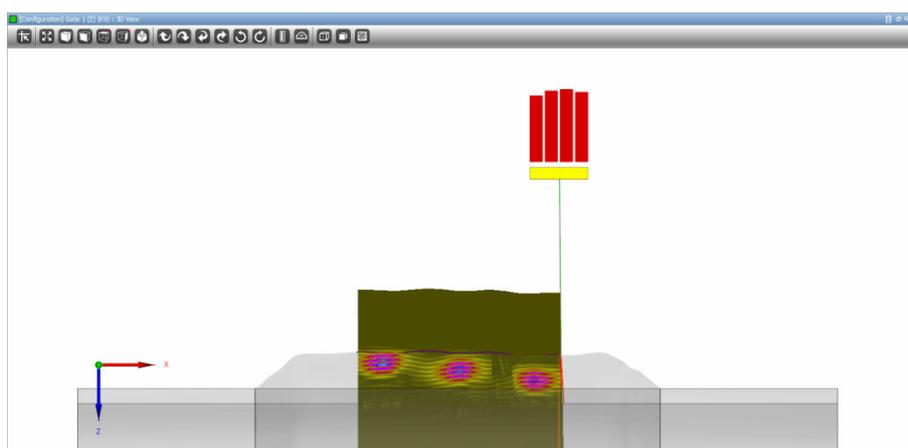


Figura 5.8 - Resultado de inspeção (B-scan) na simulação realizada no CIVA para a lei focal *Setorial*.

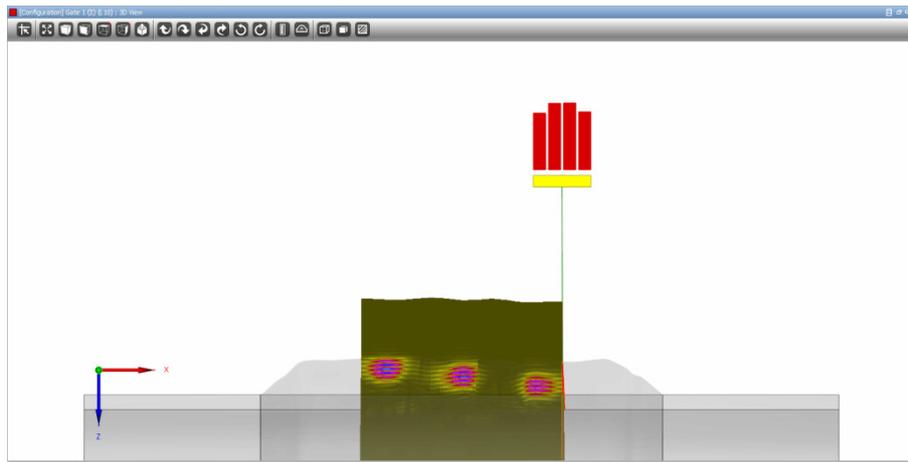


Figura 5.9 - Resultado de inspeção (B-scan) na simulação realizada no CIVA para a lei focal *Single Point Focus*.

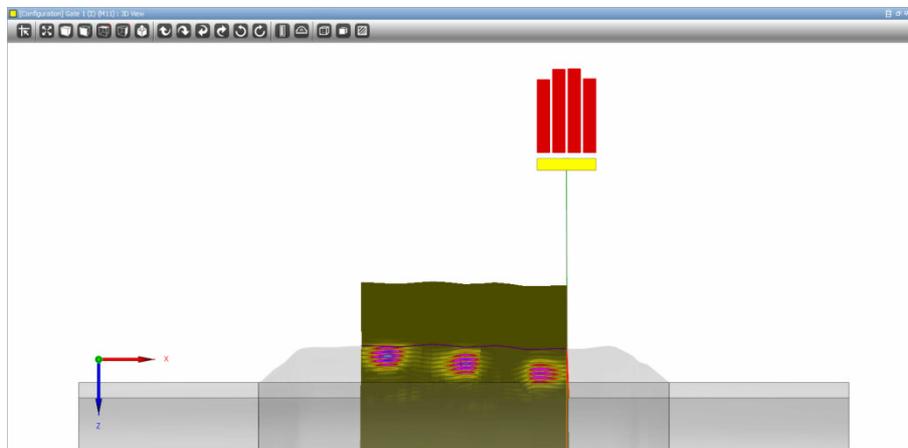


Figura 5.10 - Resultado de inspeção (B-scan) na simulação realizada no CIVA para a lei focal *Several Depths Focus*.

5.2. Inspeções

As inspeções foram realizadas a partir dos parâmetros estabelecidos por simulação. A calibração foi realizada nas próprias juntas, na região onde não há camadas de laminação, conforme a Figura 5.11. O sinal A-scan desta região foi elevado a 80% da tela e o ganho para tal porcentagem foi conservado durante a inspeção. O critério de aceitação empregado nas inspeções, em termos de amplitude de sinal, foi:

- Amplitudes abaixo de 60%: regiões não defeituosas (cor verde/azul nas imagens geradas)
- Amplitudes entre 60% e 80%: áreas de transição (cor amarela nas imagens geradas)
- Amplitudes acima de 80%: regiões defeituosas (cor vermelha nas imagens geradas)

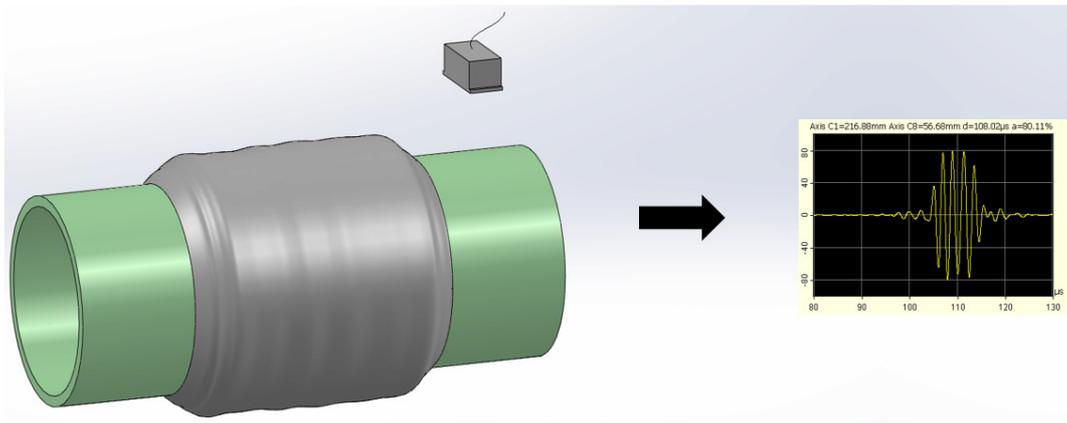


Figura 5.11 – Calibração dos ensaios realizados: posição do transdutor na parede do duto (região verde) e A-scan desta região, elevado a 80% da tela.

Em adição ao A-scan, os resultados também foram avaliados através de imagens B-scan e C-scan, cuja codificação de cores seguiu o exposto no critério de aceitação. Estes resultados foram comparados ao gabarito do corpo de prova, gerado durante a fabricação das juntas através do monitoramento da posição dos defeitos, e aos resultados obtidos por tomografia, que serão apresentados em seções posteriores.

Regiões onde era esperada a ausência de defeito apresentam resultados similares à Figura 5.13. Nesta figura, são apresentados os B-scans de uma linha de varredura (*i.e.*, uma seção transversal da junta - Figura 5.12) para cada lei focal aplicada. Nota-se que não há qualquer indicativo ultrassônico em nenhuma das 4 leis focais que caracterize a presença de alguma descontinuidade neste ponto do material.

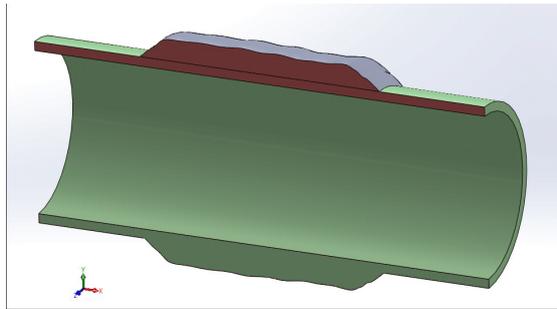


Figura 5.12 - Em marrom a região que representa esquematicamente os B-scans doravante apresentados.

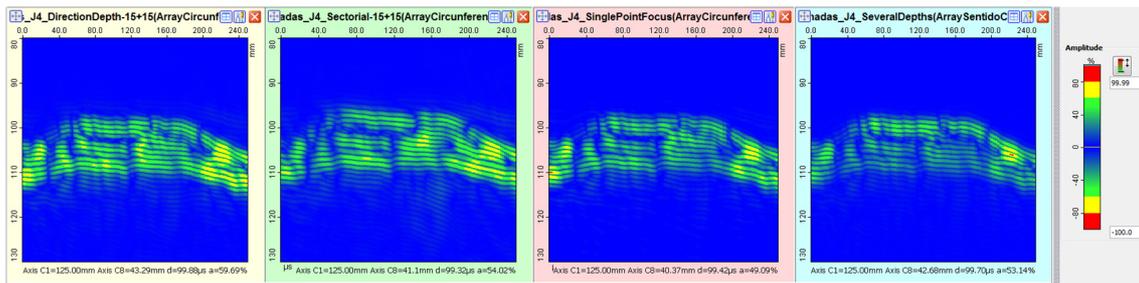


Figura 5.13 – B-scans para uma região sem defeito do material. Da esquerda para a direita: *Direction and Depth*, *Setorial*, *Single Point Focus* e *Several Depths Focus*.

Regiões defeituosas, por sua vez, apresentam aumento significativo de amplitude do sinal ultrassônico, representado pela cor vermelha, conforme Figura 5.14. Este aumento de amplitude é relacionado à presença de um corpo estranho no interior do material que impede a passagem do som por toda a espessura da junta. Aliado a este aumento de refletividade, também é possível observar que o eco de fundo apresenta-se atenuado em algumas destas regiões, outro fator que indica a presença de um defeito na localidade avaliada.

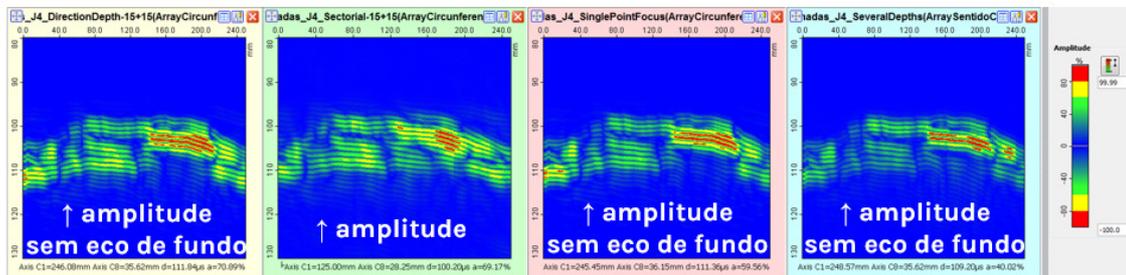


Figura 5.14 - B-scans para uma região com defeito do material. Da esquerda para a direita: *Direction and Depth*, *Setorial*, *Single Point Focus* e *Several Depths Focus*.

5.2.1. Detecção

5.2.1.1. Resultados Junta 1

Conforme previamente exposto na seção 4.1, a J1 é uma junta laminada de 4 polegadas de diâmetro na qual nenhum defeito foi intencionalmente inserido. A Figura 5.15 ilustra um esquema para orientação do leitor na interpretação dos *C-scans* planejados apresentados neste trabalho. A Figura 5.16 apresenta os mapas *C-scan* planejados para as 4 leis focais utilizadas na inspeção deste corpo de prova.

Nenhuma das 4 leis focais apontou a presença de defeito no interior das camadas de laminação deste corpo de prova, resultado que condiz com o esperado. Entretanto, é possível observar na Figura 5.16 que há algumas regiões desta junta que apresentaram alta refletividade (cor vermelha). Este comportamento se reproduziu em todas as leis focais e na inspeção de todas as juntas avaliadas neste estudo. Nota-se, entretanto, que as diferentes leis focais possuem sensibilidade distinta a tal comportamento.

A Figura 5.17 apresenta em detalhe os *B-scans* destas áreas. Elas se dividem em dois casos:

- Áreas de alta refletividade restritas à superfície da junta: há duas hipóteses plausíveis para a explicação deste fenômeno: i. um efeito geométrico particular da região ou ii. falha de acabamento na fabricação, causando a presença de microbolhas na região.
- Áreas de alta refletividade restritas ao fundo da junta. Assim como o caso anterior, duas hipóteses foram formuladas para justificar este comportamento: i. um efeito geométrico particular da região ou ii. defeitos desconhecidos no interior dos tubos, já existentes antes da aplicação das camadas de laminação.

A validação das hipóteses supracitadas depende da realização de ensaios complementares, seja por métodos não destrutivos de alta resolução (*e.g.* Microtomografia) ou por métodos destrutivos (*e.g.* "salame" teste). Ambas as abordagens fogem ao escopo do presente trabalho, mas não só podem, como devem

ser desenvolvidas como trabalhos futuros. Dito isto, as regiões que apresentaram tais particularidades não foram consideradas defeituosas no âmbito deste trabalho, uma vez que a comprovação das hipóteses levantadas não é possível neste momento.

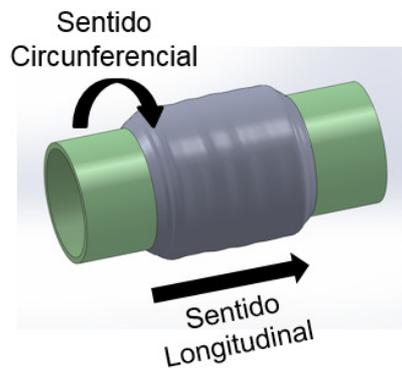


Figura 5.15 – Esquema para auxílio da interpretação dos mapas C-scan planificados.

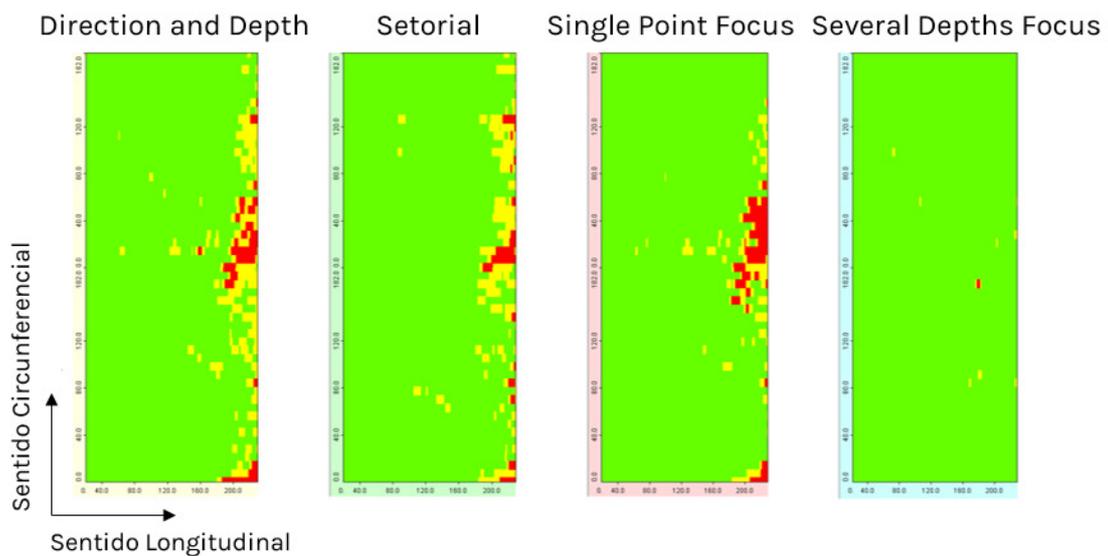


Figura 5.16 - Mapas C-scan planificados para as 4 leis focais utilizadas na inspeção da J1. Da esquerda para a direita: *Direction and Depth*, *Setorial*, *Single Point Focus* e *Several Depths Focus*.

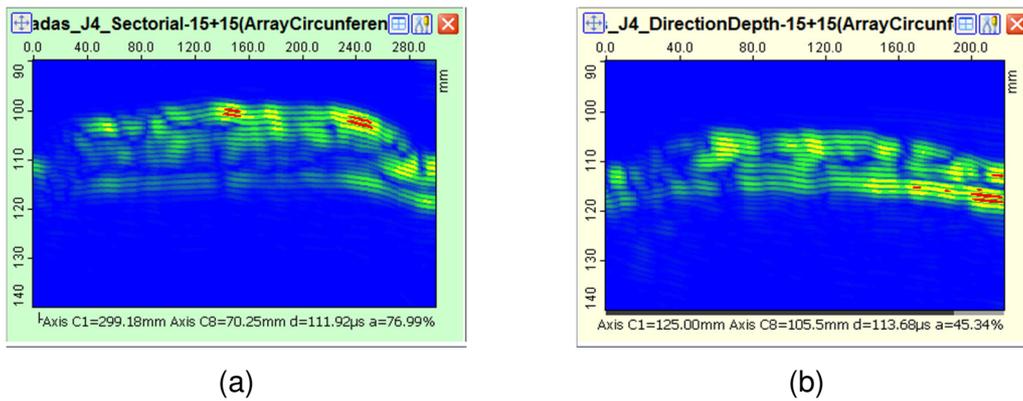


Figura 5.17 - Mapas B-scan de áreas de alta refletividade: (a) áreas localizadas na superfície da junta; (b) áreas localizadas no interior do duto.

5.2.1.2. Resultados Junta 2

Conforme abordado na seção 4.1 desta dissertação, durante a fabricação das juntas, a localização dos defeitos inseridos foi registrada para efeito de comparação com os resultados de inspeção. É importante salientar que os valores fornecidos são aproximados; durante a fabricação das juntas o operador realiza a passagem de um rolo nas camadas de laminado, tendo em vista retirar qualquer bolha de ar que possa estar presente no interior do material. Desta forma, é esperado certo deslocamento entre as posições projetada e real dos defeitos.

A seguir serão apresentados os resultados das inspeções na J2 em formato C-scan planificado. Estes C-scans são comparados à posição projetada dos defeitos para melhor visualização dos dados coletados. Exceto em casos particulares - explicitados ao decorrer do texto - os B-scans que comprovam a detecção dos defeitos mencionados serão apresentados em capítulo anexo (Apêndice 1).

A Figura 5.18 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Direction and Depth* na inspeção da J2. Esta lei focal foi capaz de detectar 10 dos 12 defeitos do tipo delaminação/descolamento, conforme sinalização presente nesta figura. Adicionalmente, em azul, estão realçadas as indicações de duas das quatro bolhas de ar existentes neste corpo de prova: bolha 1 e bolha 3. As bolhas 2 e 4 também foram detectadas, porém, em abordagem diferente. Estas duas bolhas estão localizadas na extremidade do laminado (Figura 4.2 (b)). A sua detecção é caracterizada por uma

descontinuidade do perfil da junta laminada, conforme ilustrado nos B-scans da Figura 5.19.

É possível observar no C-scan exibido na Figura 5.18 que a lei focal *Direction and Depth* apresenta regiões vermelhas que não são relacionadas a nenhum dos defeitos inseridos nos corpos de prova. Todas tratam-se de regiões de alta refletividade como as apresentadas na Figura 5.17, em comportamento análogo ao apresentado pela J1.

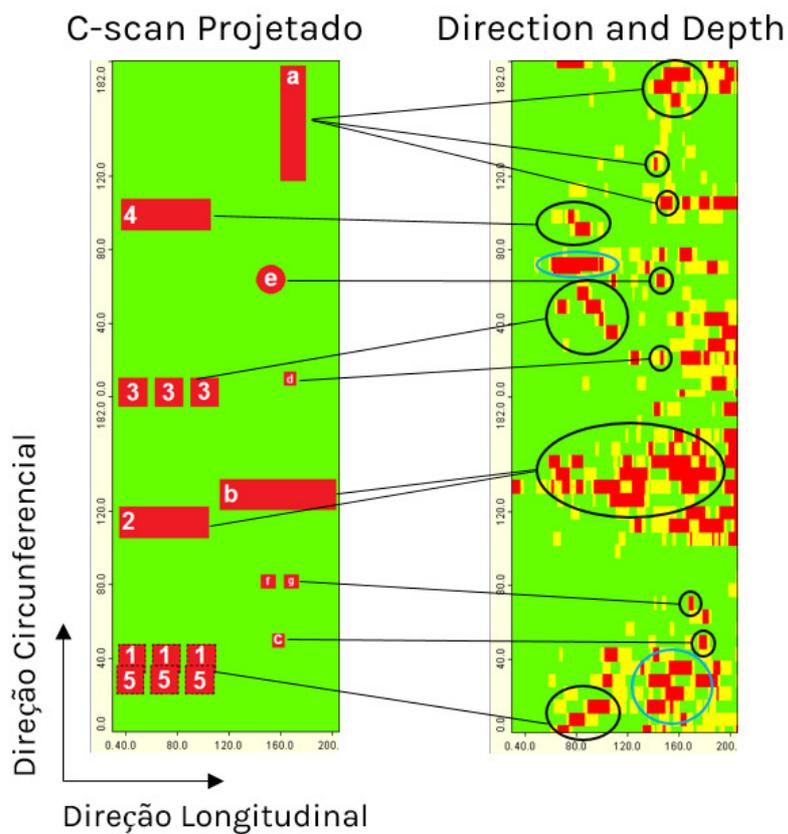
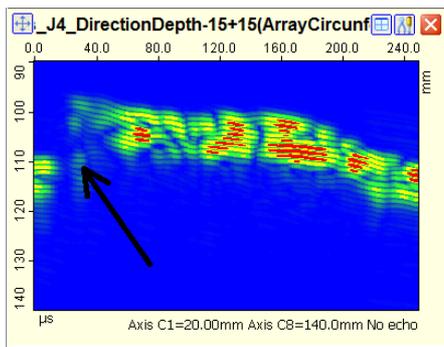
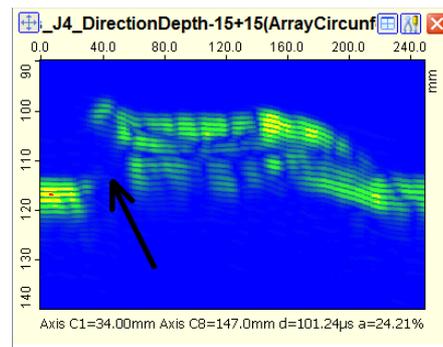


Figura 5.18 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal *Direction and Depth* na inspeção da J2.



(a)



(b)

Figura 5.19 - B-scans representando a detecção de bolhas de ar na J2 com a lei focal *Direction and Depth*: (a) bolha 2 e (b) bolha 4. As setas indicam os pontos de descontinuidade que caracterizam a detecção.

A Figura 5.20 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Setorial* na inspeção da J2. Esta lei focal detectou 6 dos 12 defeitos de delaminação/descolamento inseridos nesta junta, conforme sinalização presente na Figura 5.20. Dentre as 4 bolhas existentes, 3 foram detectadas; a bolha 1 está assinalada no C-scan e as bolhas 2 e 4 estão apresentadas nos B-scans da Figura 5.21.

Assim como na lei focal anterior, é possível observar no C-scan exibido na Figura 5.20 que a lei focal *Setorial* apresenta regiões vermelhas que não são relacionadas a nenhum dos defeitos inseridos nos corpos de prova. Todas tratam-se de regiões de alta refletividade como as apresentadas na Figura 5.17, em comportamento análogo ao apresentado pela J1.

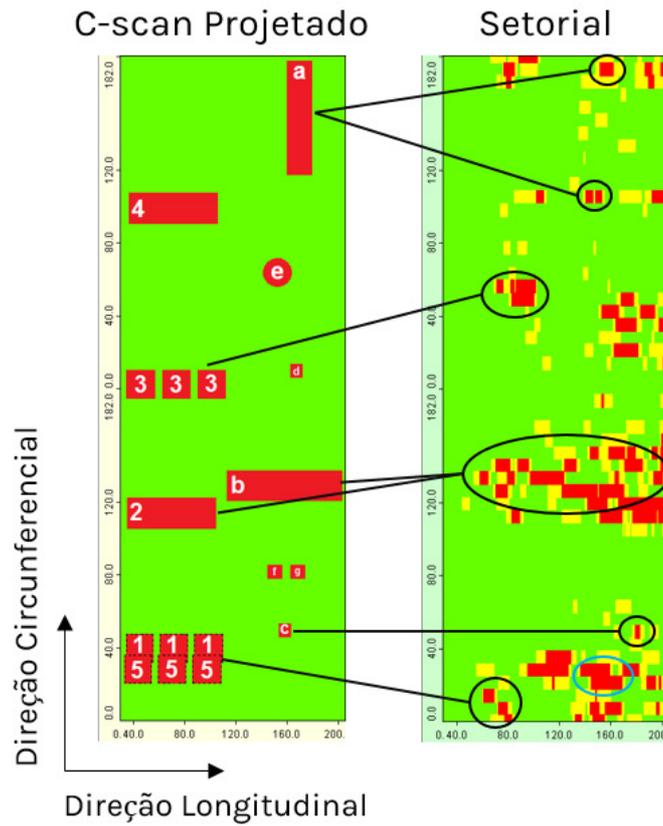


Figura 5.20 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal *Setorial* na inspeção da J2.

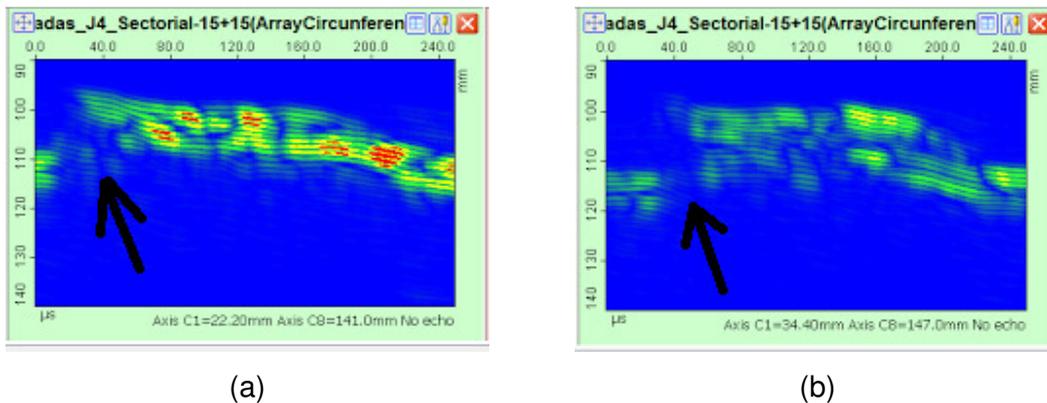


Figura 5.21 - B-scans representando a detecção de bolhas de ar na J2 com a lei focal *Setorial*: (a) bolha 2 e (b) bolha 4. As setas indicam os pontos de descontinuidade que caracterizam a detecção.

A Figura 5.22 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Single Point Focus* na inspeção da J2. Esta lei focal detectou 9 dos 12 defeitos de delaminação/descolamento inseridos nesta junta, conforme sinalização presente nesta figura. As quatro bolhas de ar

existentes neste corpo de prova também foram detectadas: as bolhas 1 e 3 estão realçadas em azul no C-scan da Figura 5.22; as bolhas 2 e 4 estão apresentadas nos B-scans da Figura 5.23.

Single Point Focus, assim como as leis focais anteriores, também apresentou regiões de alta refletividade que não são relacionadas a nenhum dos defeitos inseridos.

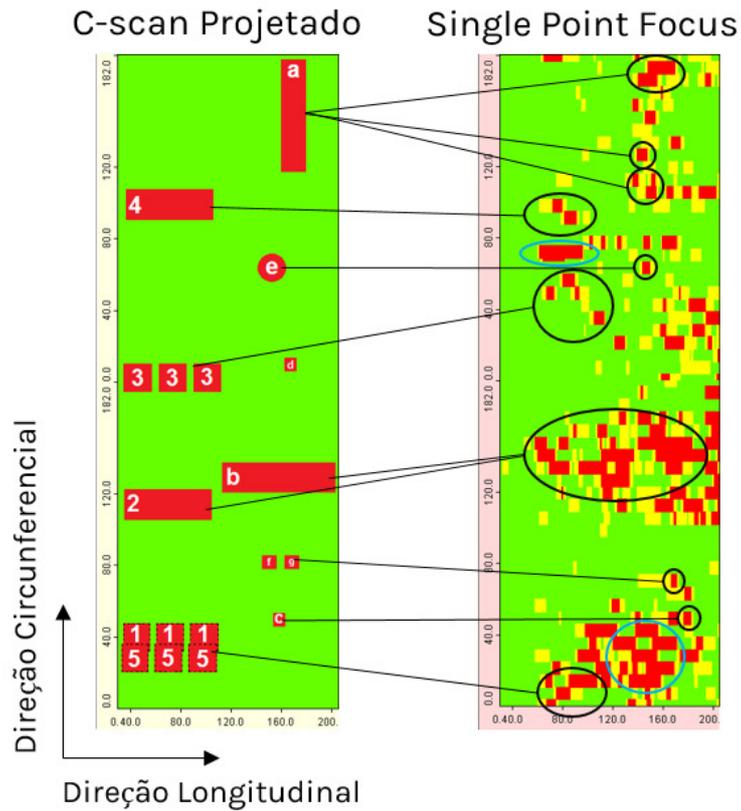
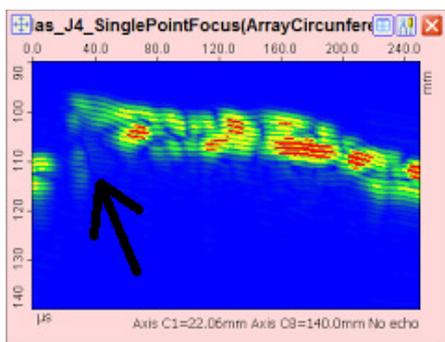
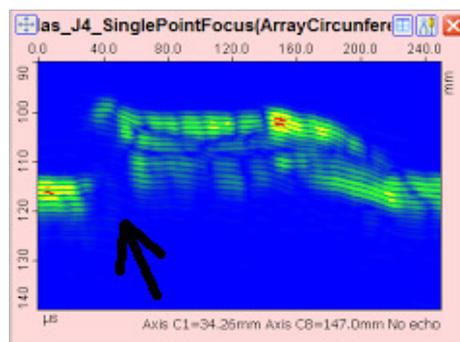


Figura 5.22 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal *Single Point Focus* na inspeção da J2.



(a)



(b)

Figura 5.23 - B-scans representando a detecção de bolhas de ar na J2 com a lei focal *Single Point Focus*: (a) bolha 2 e (b) bolha 4. As setas indicam os pontos de descontinuidade que caracterizam a detecção.

A Figura 5.24 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Several Depths Focus* na inspeção da J2. Esta lei focal detectou apenas 3 dos 12 defeitos de delaminação/descolamento inseridos nesta junta, conforme sinalização presente nesta figura. Já todas as quatro bolhas de ar existentes neste corpo de prova foram detectadas: as bolhas 1 e 3 estão realçadas em azul no C-scan da Figura 5.24; as bolhas 2 e 4 estão apresentadas nos B-scans da Figura 5.25.

Apesar de apresentar o pior desempenho quanto à detecção dos defeitos inseridos, a lei focal *Several Depths Focus* foi a que se mostrou menos susceptível às áreas de alta refletividade, conforme pode ser avaliado na Figura 5.24.

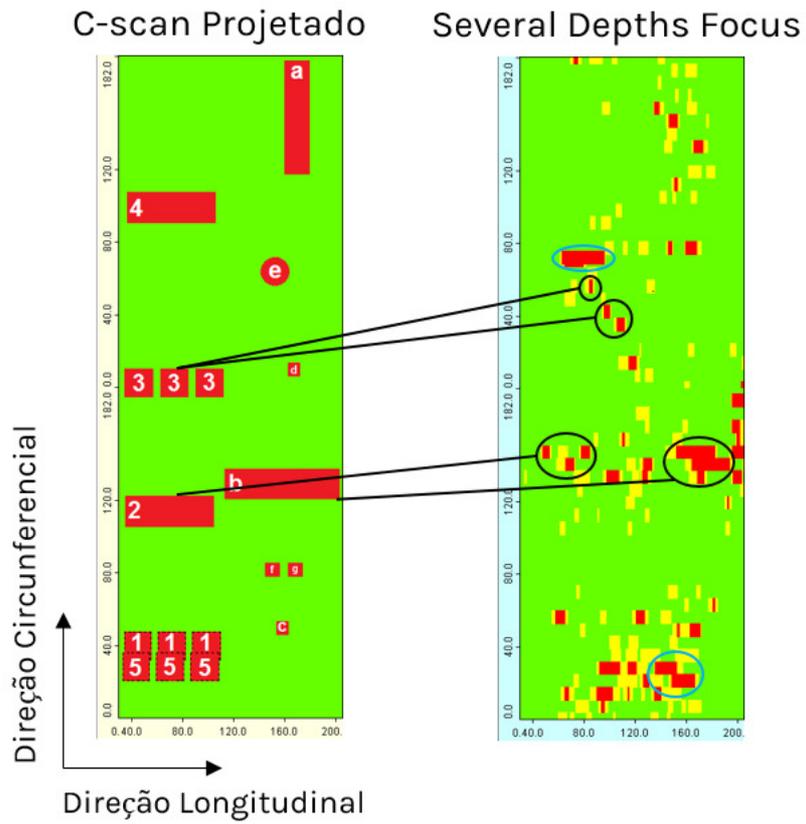


Figura 5.24 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal *Several Depths Focus* na inspeção da J2.

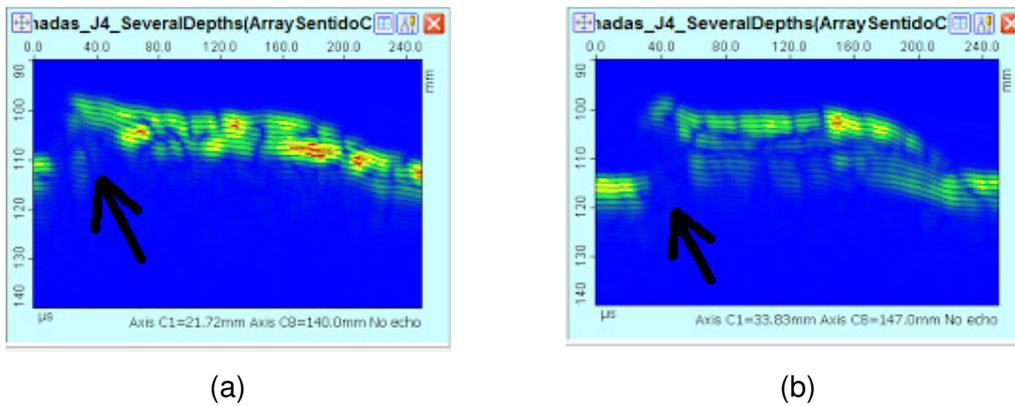


Figura 5.25 - B-scans representando a detecção de bolhas de ar na J2 com a lei focal *Several Depths Focus*: (a) bolha 2 e (b) bolha 4. As setas indicam os pontos de descontinuidade que caracterizam a detecção.

Resultados J2 - Discussão

Após a apresentação de todos os resultados obtidos para a J2, é possível traçar um comparativo entre as leis focais empregadas, assim como comentar sobre algumas particularidades encontradas durante a inspeção desta junta.

A primeira consideração a ser realizada deve-se ao posicionamento dos defeitos 1 e 5. Ambos os defeitos consistem em 3 quadrados de lado aproximado de 20 mm. Durante a deposição das camadas de laminação sobre os dutos, a projeção de posicionamento indica que estes 2 defeitos tornaram-se parcialmente sobrepostos. Os resultados demonstram que houve certo deslocamento destes defeitos para posições mais próximas à origem. Com este deslocamento, foi possível, através dos *B-scans*, separar ambos os defeitos, conforme poderá ser verificado nas imagens apresentadas no Apêndice 1. No *C-scan*, entretanto, ambas as indicações foram agrupadas para a simplificação do resultado.

Todas as leis focais apontam uma extensa região defeituosa próximo à posição circunferencial de 120 mm. Esta região possui 3 defeitos: a bolha 2 e o defeito 2, situados ao lado esquerdo, e o defeito 'b', ao lado direito. Em 3 das leis focais empregadas é impossível separar os 3 defeitos individualmente no *C-scan*, justificando os grandes círculos apresentados nos respectivos mapas. Os mapas *B-scan* que ilustram a seção transversal da junta nesta região estão apresentados no Apêndice 1 desta dissertação.

O defeito 'a', única fita de acetato cuja maior extensão foi situada na direção circunferencial da J2, apresentou comportamento particular: a sua detecção, dentro dos limiares estabelecidos, foi possível apenas em regiões próximas às suas extremidades. Porém, é possível observar nos mapas *C-scan* apresentados que existe um "percurso" em amarelo entre as indicações vermelhas das extremidades. As imagens *B-scan* de um destes pontos amarelos estão apresentadas na Figura 5.26. Nesta figura, é nítida a presença de alguma descontinuidade na região, o que deve ser considerado no cálculo de dimensionamento deste defeito.

A lei focal *Direction and Depth* foi a que exibiu melhores resultados em termos de detecção - apenas o defeito 'f' não apresentou qualquer indicação. O pior desempenho foi o da lei focal *Several Depths Focus*, que detectou apenas 3 dos defeitos inseridos. Entretanto, as duas leis focais que apresentaram as maiores taxas de detecção também foram as que demonstraram maior susceptibilidade às regiões de alta refletividade que, a priori, não são consideradas regiões defeituosas. Conseqüentemente, há um custo-benefício entre a detecção e a clareza de apresentação dos resultados.

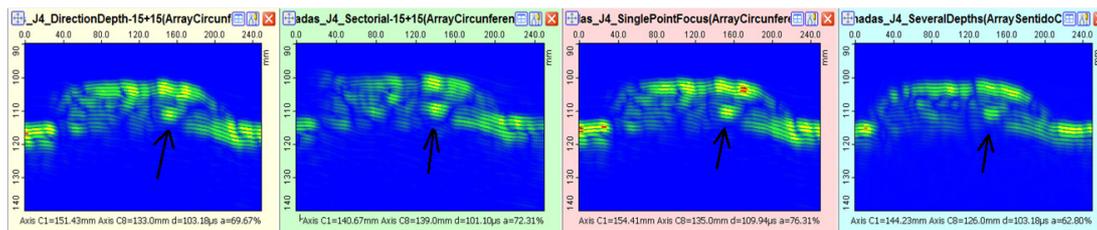


Figura 5.26 – B-scan indicando a existência de uma descontinuidade que não atinge o limiar de defeito estabelecido – defeito a da J2.

5.2.1.3. Resultados Junta 3

A seguir serão apresentados os resultados das inspeções na junta 3 em formato C-scan planejado. Estes C-scans são comparados à posição projetada dos defeitos para melhor visualização dos dados coletados. Exceto em casos particulares - explicitados ao decorrer do texto - os B-scans que comprovam a detecção dos defeitos mencionados serão apresentados em capítulo anexo (Apêndice 1).

A Figura 5.27 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Direction and Depth* na inspeção da J3. É possível observar que todos os 6 defeitos do tipo delaminação/descolamento foram detectados. Esta lei focal também apontou a presença de defeito em outras duas regiões onde nenhuma indicação era esperada. Estas áreas estão assinaladas por círculos cinza no C-scan da Figura 5.27 e apresentadas em detalhe nos B-scans da Figura 5.28.

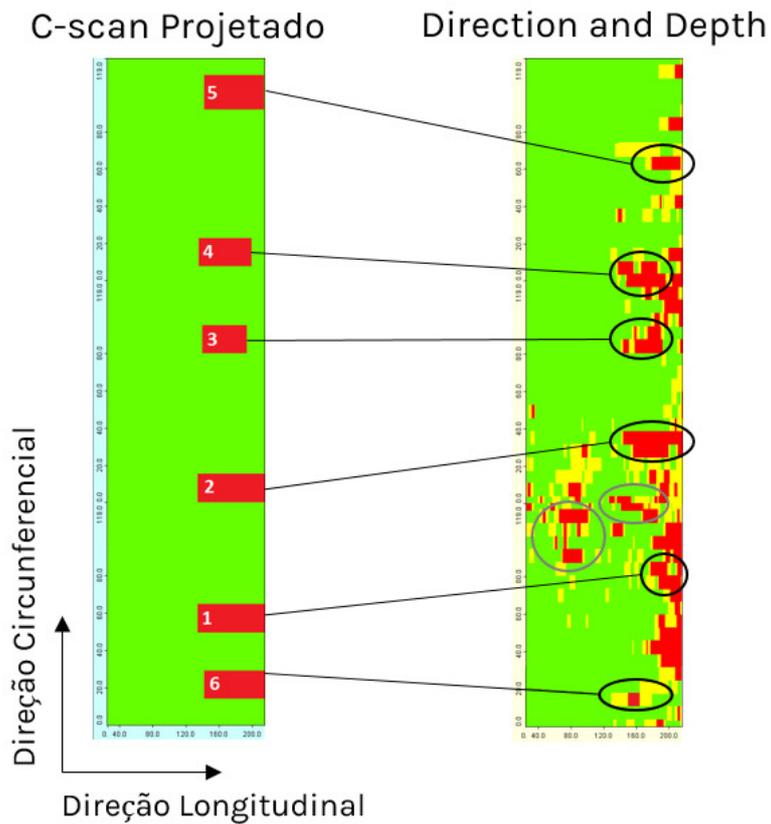


Figura 5.27 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal *Direction and Depth* na inspeção da J3.

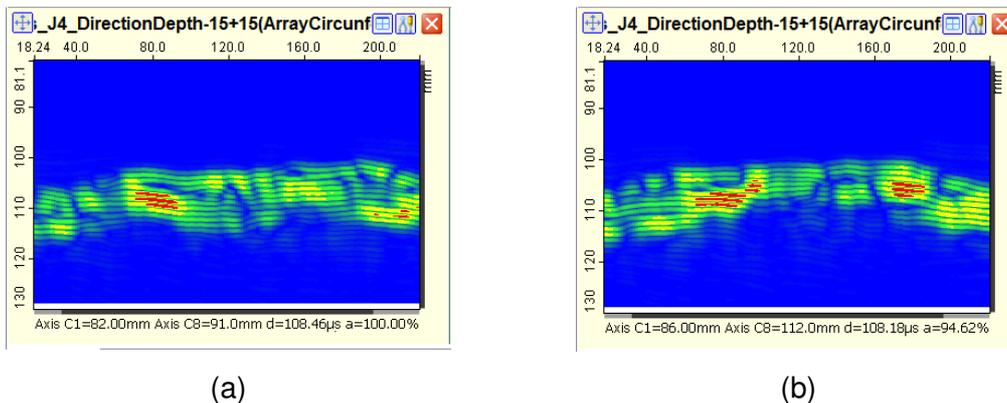


Figura 5.28- B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J3 com a lei focal *Direction and Depth*

A Figura 5.29 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Setorial* na inspeção da junta 3. É possível observar que 4 dos 6 defeitos do tipo delaminação/descolamento foram detectados. Esta lei focal também apontou a presença de defeito em outra região onde

nenhuma indicação era esperada. Esta área está assinalada por um círculo cinza no C-scan da Figura 5.29 e apresentada em detalhe no B-scan da Figura 5.30. Nota-se que esta área coincide com a igualmente apontada pela lei focal anterior, *Direction and Depth*.

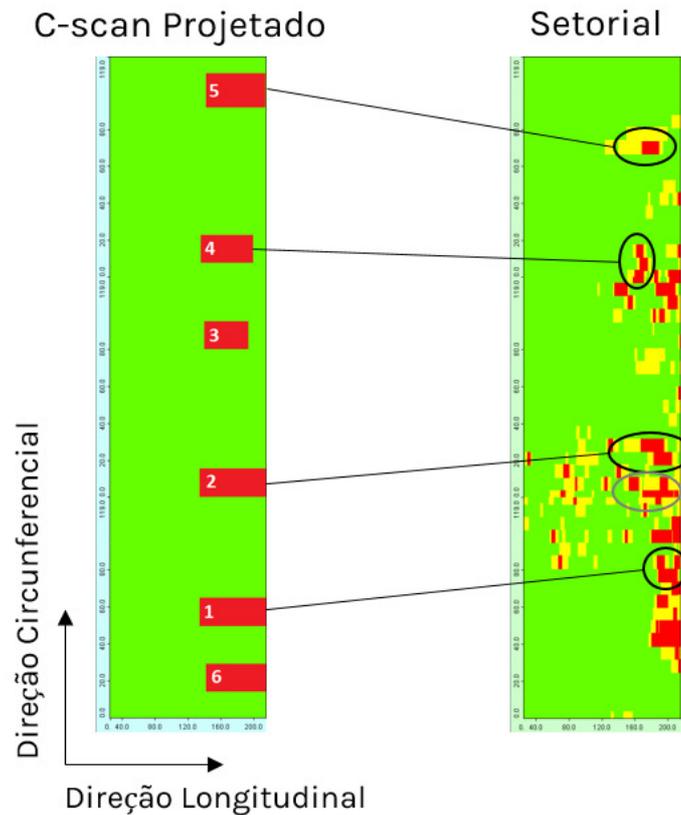


Figura 5.29 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal *Setorial* na inspeção da J3.

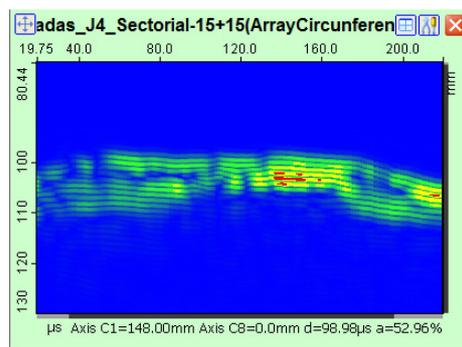


Figura 5.30 -B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J3 com a lei focal *Setorial*

A Figura 5.31 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Single Point Focus* na inspeção da junta 3. É possível observar que todos os 6 defeitos do tipo delaminação/descolamento foram detectados. Assim como nos casos anteriores, esta lei focal também apontou a presença de defeito em outras duas regiões onde nenhuma indicação era esperada. Estas áreas estão assinaladas por círculos cinza no C-scan da Figura 5.31 e apresentadas em detalhe nos B-scans da Figura 5.32.

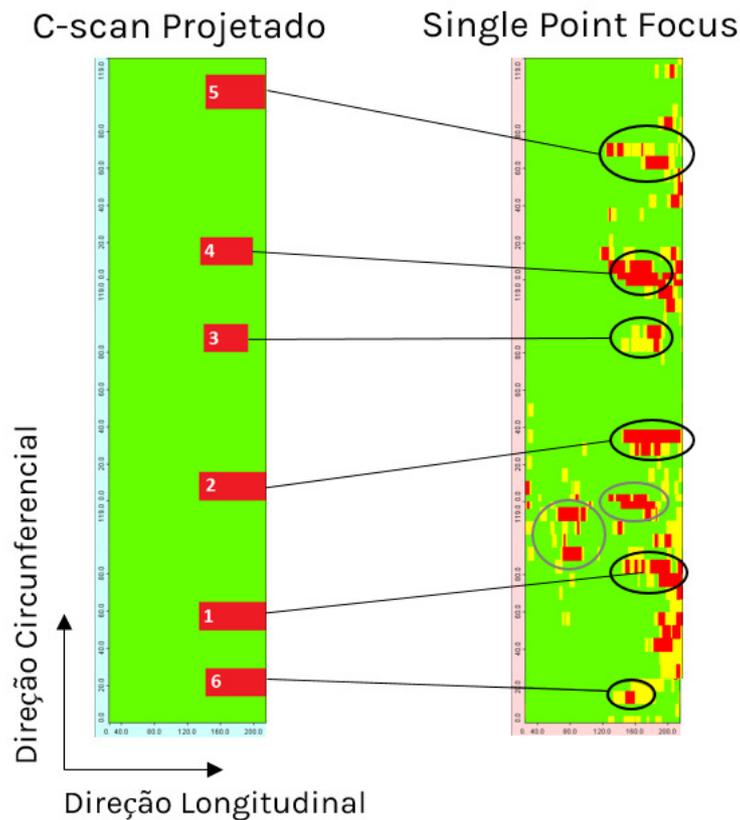
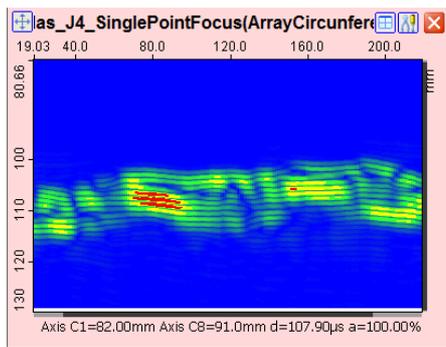
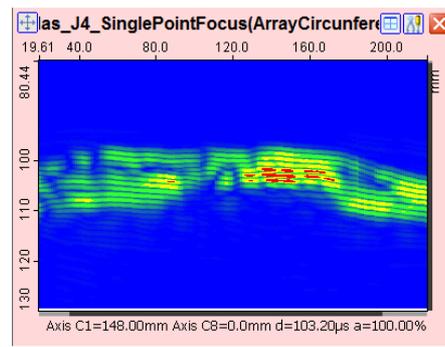


Figura 5.31 -Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal *Single Point Focus* na inspeção da J3.



(a)



(b)

Figura 5.32 -B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J3 com a lei focal *Single Point Focus*

A Figura 5.33 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Several Depths Focus* na inspeção da junta 3. É possível observar que 5 dos 6 defeitos do tipo delaminação/descolamento foram detectados. Esta lei focal também apontou a presença de defeito em uma região onde nenhuma indicação era esperada. Esta área está assinalada por um círculo cinza no C-scan da Figura 5.33 e apresentada em detalhe no B-scan da Figura 5.34. Com este resultado, todas as leis focais apresentaram a presença de tal descontinuidade no corpo de prova J3.

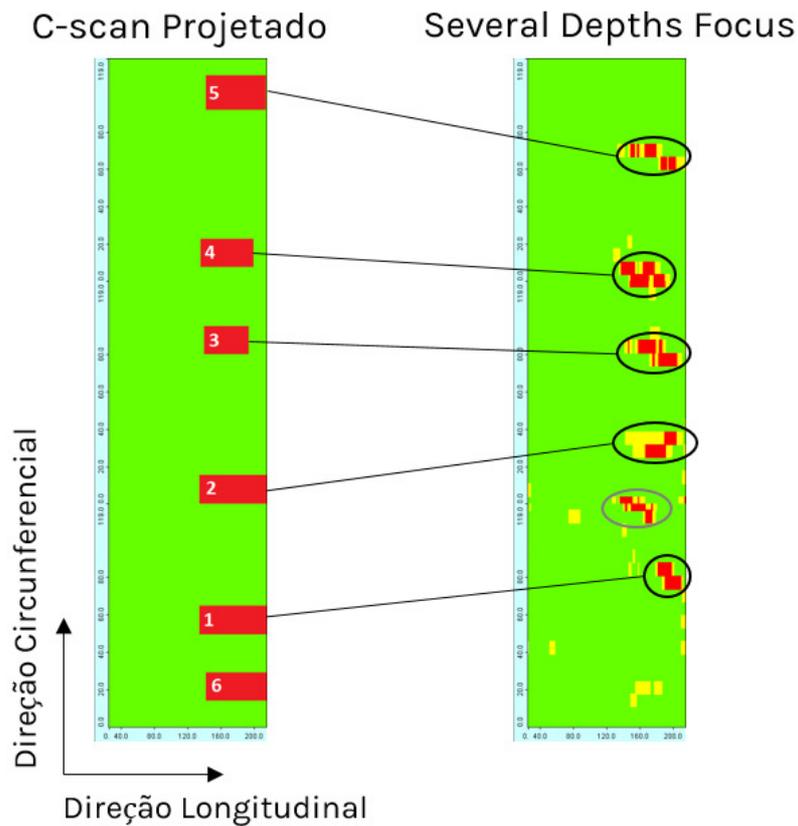


Figura 5.33 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal *Several Depths Focus* na inspeção da J3.

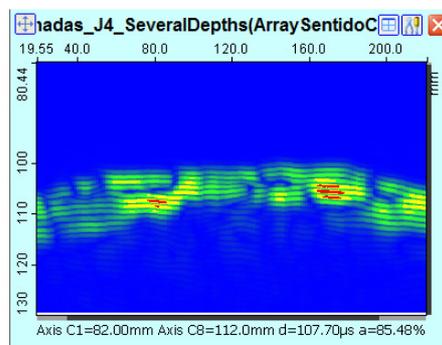


Figura 5.34 - B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J3 com a lei focal *Several Depths Focus*

Resultados J3 - Discussão

As 4 leis focais apresentaram resultados muito próximos na inspeção da J3; *Direction and Depth* e *Single Point Focus* detectaram todos os defeitos inseridos, *Several Depths Focus* detectou 5 dos 6 defeitos (com indicações em amarelo do defeito 6) e *Setorial* detectou 4 dos 6 defeitos existentes (com indicações em amarelo do defeito 3). Assim

como na J2, as leis focais que obtiveram melhor taxa de detecção também foram as que apresentaram maior incidência de áreas não defeituosas com alta refletividade.

Todas as leis focais demonstraram dificuldade para a detecção do defeito 6, o mais próximo à superfície externa dentre todos os existentes. Este é um comportamento surpreendente, uma vez que a menor profundidade deste defeito indica uma situação mais favorável para sua detecção. É possível que durante a fabricação das juntas a passagem do rolo metálico tenha proporcionado um espalhamento uniforme da resina polimérica sobre este defeito, tornando a sua detecção mais difícil.

Todas as leis focais apresentaram a presença de indicações não planejadas na faixa de 80 mm a 140 mm do perímetro da J3, conforme apontado nos mapas *C-scan* apresentados. A recorrência das indicações nas 4 leis focais empregadas, assim como as intensidades destas indicações, sugerem que de fato há algum defeito nesta região do material.

5.2.1.4. Resultados Junta 4

Conforme previamente exposto na seção 4.1, a J4 é uma junta laminada de 6 polegadas de diâmetro na qual nenhum defeito foi intencionalmente inserido. A Figura 5.35 apresenta os mapas *C-scan* planejados para as 4 leis focais utilizadas na inspeção deste corpo de prova.

Nenhuma das 4 leis focais apontou a presença de defeito no interior das camadas de laminação deste corpo de prova, resultado que condiz com o esperado. Entretanto, é possível observar na Figura 5.35 que, assim como em todas as demais juntas apresentadas, há algumas regiões desta junta que apresentaram alta refletividade (cor vermelha nos *C-scans*). Porém, em comportamento distinto das juntas anteriores, todas as leis focais apresentaram comportamento semelhante em relação a este fenômeno.

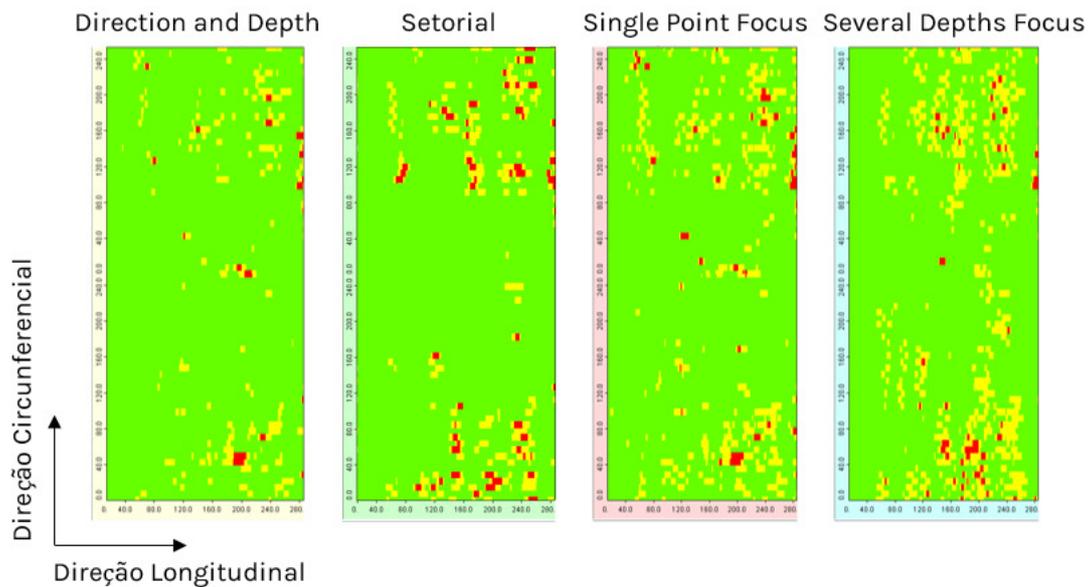


Figura 5.35 - Mapas C-scan planejados para as 4 leis focais utilizadas na inspeção da J1. Da esquerda para a direita: *Direction and Depth*, *Setorial*, *Single Point Focus* e *Several Depths Focus*.

5.2.2. *Phased Array versus Tomografia*

Ensaio com a técnica não destrutiva de tomografia computadorizada (TC) foram realizados com o objetivo de ratificar os resultados obtidos com as inspeções por *phased array*.

Os resultados para esta técnica foram gerados em arquivos de vídeo. A seguir, alguns frames destes vídeos serão exibidos, no intuito de apresentar os defeitos detectados pela técnica de TC e consequente comparação com os resultados obtidos com o *phased array*.

5.2.2.1. Tomografia J2

A Figura 5.36 apresenta a referência para localização dos defeitos na J2 nas imagens de TC. Nesta figura, assim como em todas as imagens tomográficas subsequentes, é possível ver ao lado esquerdo uma vista em perspectiva do corpo de prova inspecionado

e, ao lado direito, a seção transversal de uma fatia da junta. Nos vídeos gerados, a junta apresentada à esquerda é percorrida em sua direção longitudinal e as diversas "fatias" (ou seções transversais) da junta ao longo deste percurso são apresentadas ao lado direito.

A J2 foi dividida em 4 regiões, conforme exposto na Figura 5.36, para permitir a identificação dos defeitos detectados. Para facilitar a localização ao leitor, abaixo são detalhados os pontos circunferenciais a que cada marco se refere:

- Marco 1: posição circunferencial 0 mm;
- Marco 2: posição circunferencial 100 mm;
- Marco 3: posição circunferencial 200 mm;
- Marco 4: posição circunferencial 280 mm.

Adicionalmente, a Figura 5.37 apresenta novamente o *C-scan* projetado para a J2, ou seja, ilustra o posicionamento esperado para os defeitos de acordo com os registros realizados durante a fabricação desta junta. Nesta figura, foram inseridas marcações que permitem a correlação entre os resultados de tomografia e *phased array*.

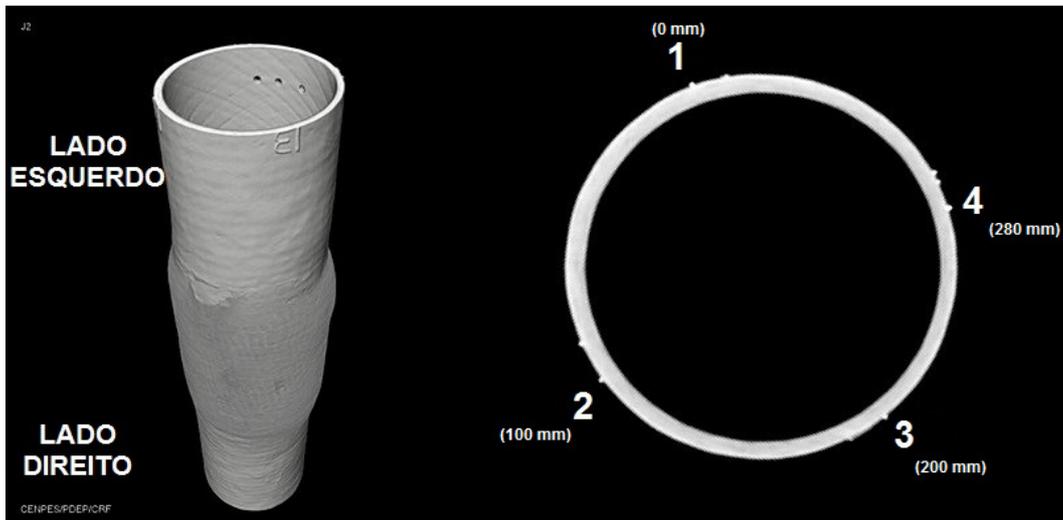


Figura 5.36 - Referência para localização dos defeitos nas imagens tomográficas da J2, com os marcos que possibilitam identificar o posicionamento das indicações.

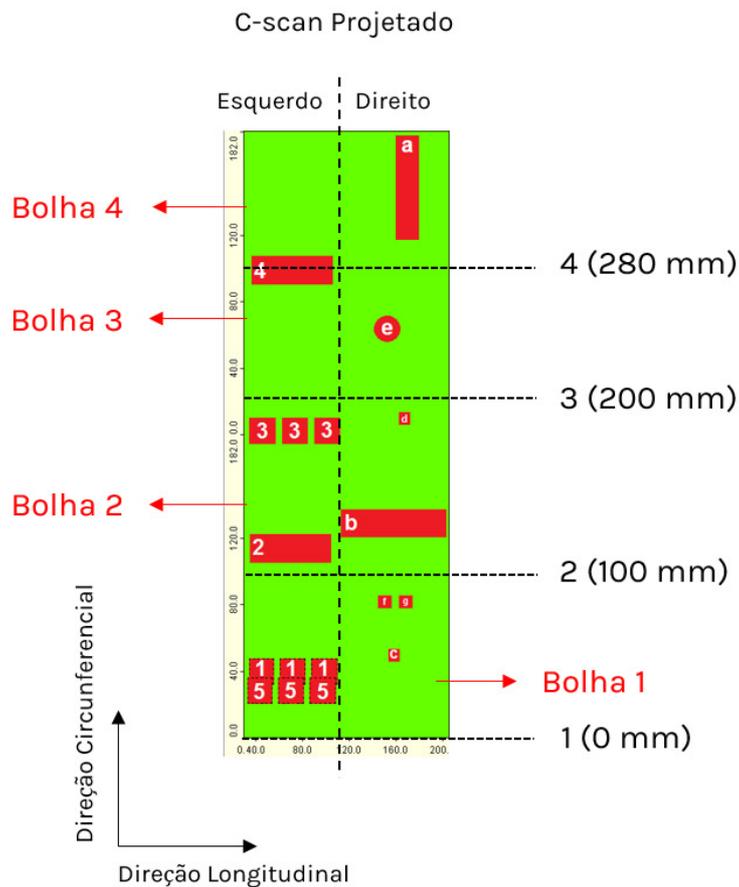


Figura 5.37 – Relação entre o C-scan projetado da J2 e as marcações realizadas nas imagens tomográficas que permitem a identificação dos defeitos detectados e correlação entre resultados de *phased array* e tomografia computadorizada.

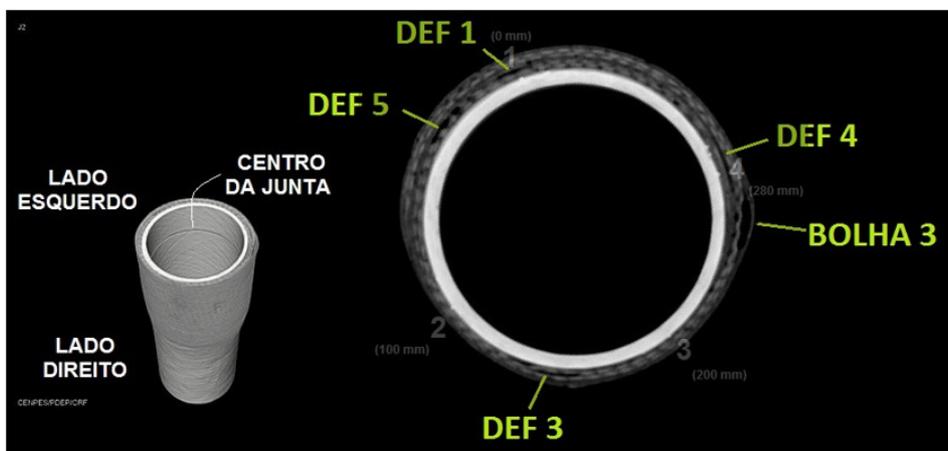
A Figura 5.38 apresenta 3 frames gerados do lado esquerdo da J2. Regiões defeituosas irão se apresentar na cor preta, pois se referem à camada de ar gerada pelas fitas de acetato. O lado esquerdo da J2 contém os defeitos de delaminação entre mantas e 3 bolhas de ar, conforme previamente apresentado na Tabela 4.2 e na Figura 5.37. A Figura 5.38 apresenta 3 frames gerados em diferentes regiões do lado esquerdo da J2. Nesta figura, é demonstrado que todas as 5 delaminações entre mantas foram inseridas com sucesso. As 3 bolhas de ar existentes neste lado também foram apontadas pela técnica. Há ainda a presença de um defeito não planejado, entre os marcos 1 e 2, que não foi identificado pela técnica de *phased array*. Entretanto, em nova análise dos resultados para esta junta, é possível verificar que as leis focais *Direction and Depth* e *Single Point Focus* apontaram presença de descontinuidade nesta área, porém, esta não pôde ser considerada defeito dentro dos critérios de aceitação adotados. Os B-scans da Figura 5.39 demonstram a indicação citada.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.38 - Imagens tomográficas da J2: (a), (b) e (c) representam cortes transversais em diferentes regiões do lado esquerdo do corpo de prova. Os defeitos detectados estão identificados.

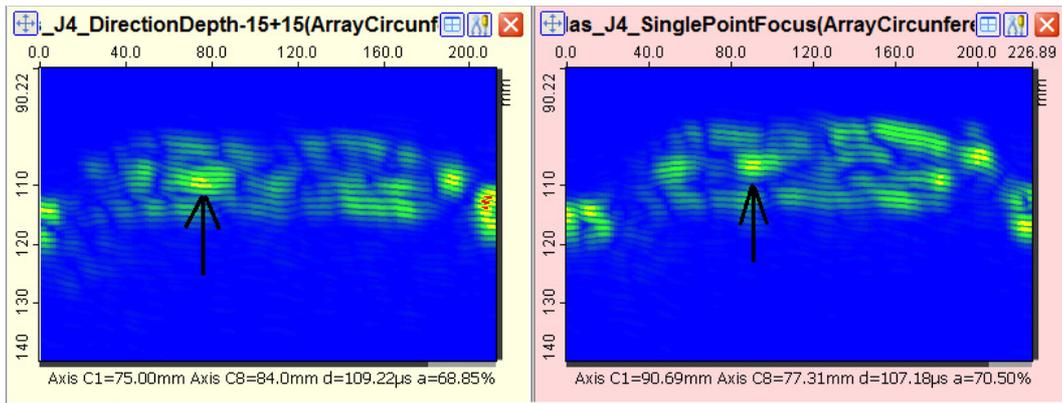
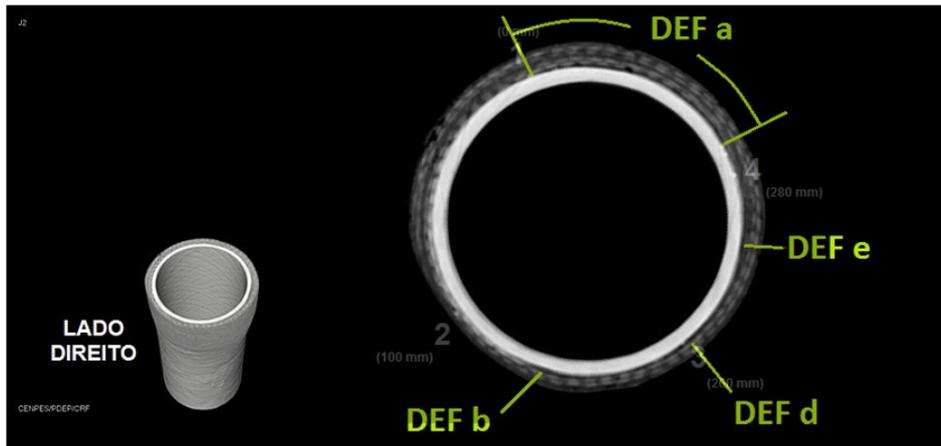
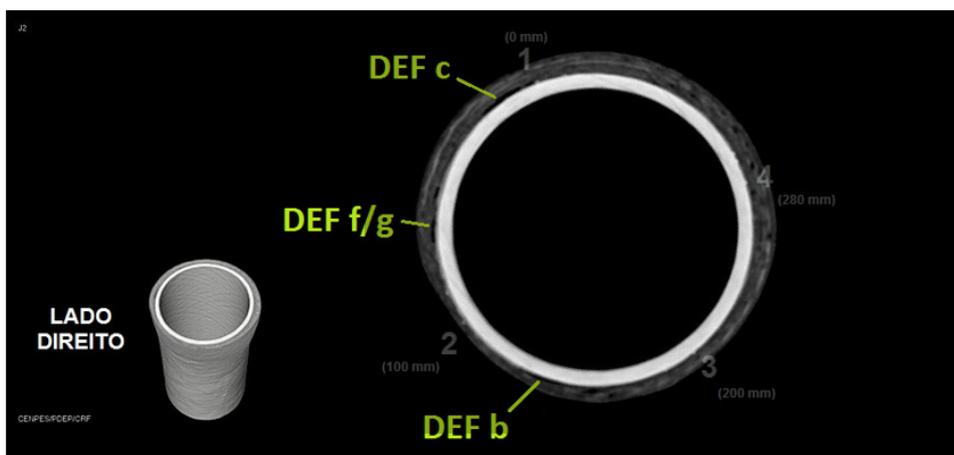


Figura 5.39 – B-scans para as leis focais *Direction and Depth* (posição 84 mm circunferencial) e *Single Point Focus* (posição 77 mm circunferencial), com indicação abaixo do limiar estabelecido para o defeito apontado pela tomografia.

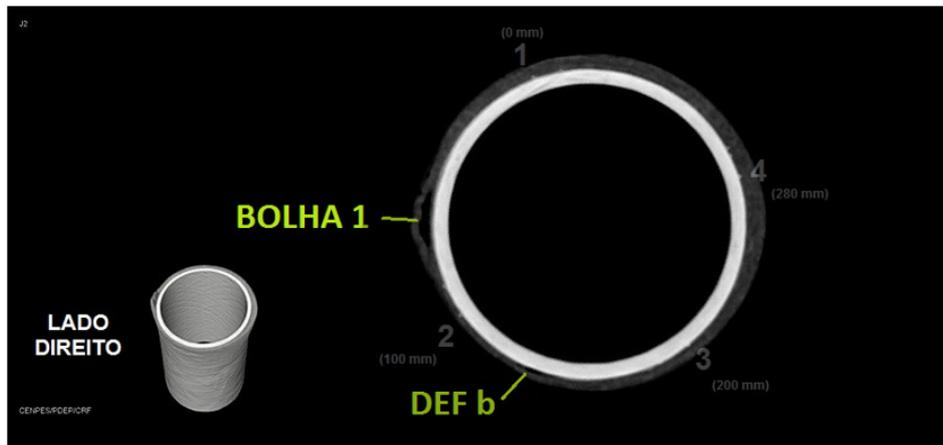
A Figura 5.40 apresenta 3 frames gerados do lado direito da J2. O lado direito da J2 contém os defeitos de descolamento manta-duto e uma bolha de ar, conforme apresentado na Tabela 4.2 e na Figura 5.37. Algumas das indicações do descolamento manta-duto se apresentam de forma extremamente tênue nas tomografias, mas ainda assim é possível identificá-las. A Figura 5.40 demonstra que todos os 7 defeitos de descolamento manta-duto foram inseridos com sucesso. A bolha de ar existente neste lado da junta também foi apontada pela técnica.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.40 - Imagens tomográficas da J2: (a), (b) e (c) representam cortes transversais em diferentes pontos do lado direito do corpo de prova. Os defeitos detectados estão identificados.

5.2.2.2. Tomografia J3

A Figura 5.41 apresenta a referência para localização dos defeitos nas imagens tomográficas da J3. Esta junta foi dividida em 6 regiões, conforme exposto nesta figura, para permitir a identificação dos defeitos detectados. Abaixo são detalhados os pontos circunferenciais a que cada marco se refere:

- Marco 1: posição circunferencial 0 mm;
- Marco 2: posição circunferencial 70 mm;
- Marco 3: posição circunferencial 120 mm;
- Marco 4: posição circunferencial 190 mm;
- Marco 5: posição circunferencial 245 mm;
- Marco 6: posição circunferencial 300 mm.

A Figura 5.42 reapresenta o *C-scan* projetado para a J3, ou seja, ilustra o posicionamento esperado para os defeitos de acordo com os registros realizados durante a fabricação desta junta. Nesta figura, foram inseridas marcações para a correlação entre os resultados de tomografia e *phased array*.

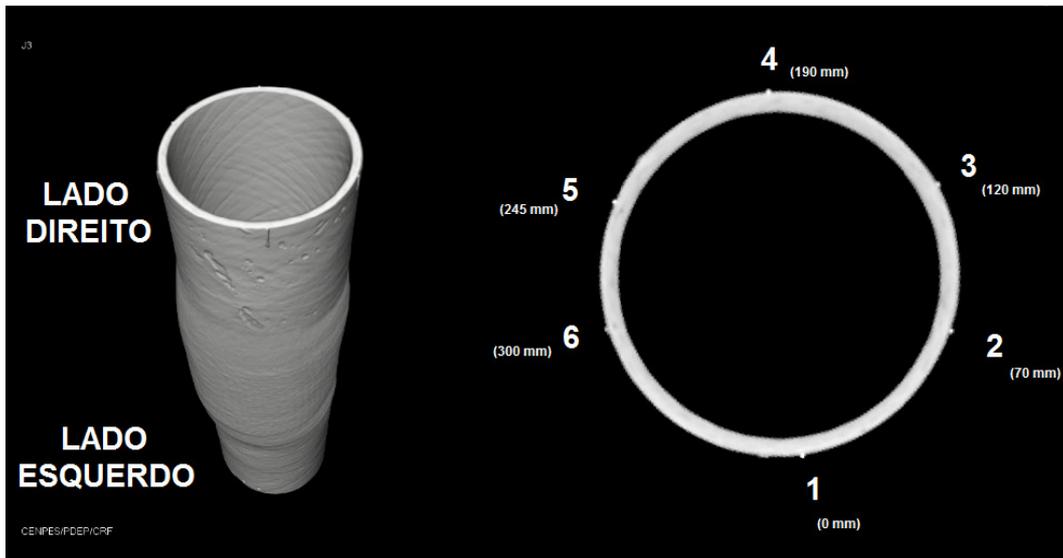


Figura 5.41 - Referência para localização dos defeitos nas imagens tomográficas da J3.

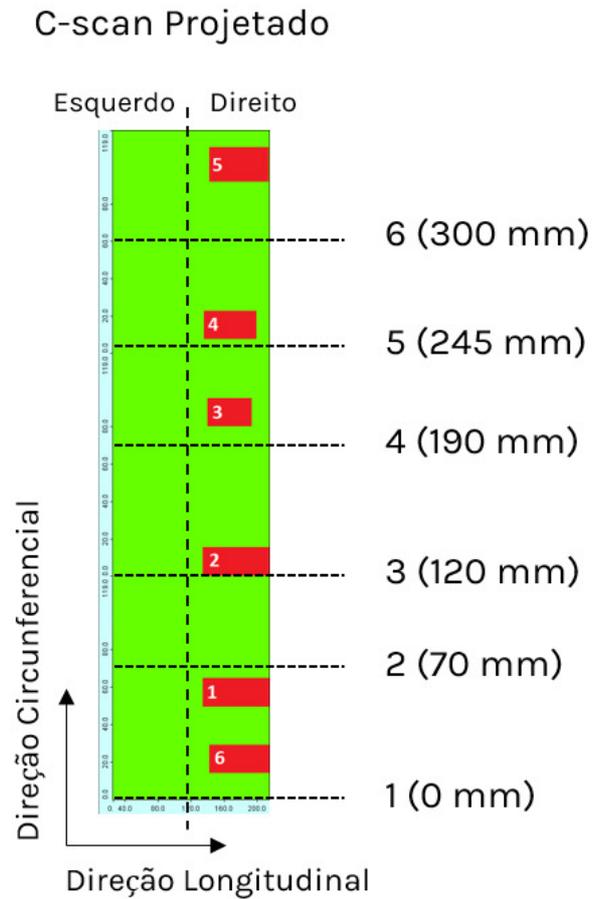


Figura 5.42 - Relação entre o C-scan projetado da J3 e as marcações realizadas nas imagens tomográficas que permitem a identificação dos defeitos detectados e correlação entre resultados de *phased array* e tomografia computadorizada.

A Figura 5.43 apresenta 1 frame gerado do lado direito da J3. Nesta imagem, é possível observar a existência de todos os 6 defeitos de delaminação entre mantas inseridos neste corpo de prova. Um defeito não previsto também é indicado pela tomografia, conforme sinalização na figura. Este defeito foi detectado por todas as leis focais empregadas no *phased array*, conforme detalhado na seção 5.2.1.3.



Figura 5.43 - Imagem tomográfica da J3: seção transversal em um ponto do lado direito do corpo de prova, comprovando a detecção de todos os defeitos inseridos. Adicionalmente, há indicação de um defeito não planejado.

A Figura 5.44 apresenta 1 frame gerado do lado esquerdo da J3. Durante a fabricação, nenhum defeito foi intencionalmente inserido neste lado da J3, entretanto, é possível observar na tomografia uma indicação clara de defeito neste lado da junta. Este defeito foi igualmente detectado nas inspeções por *phased array*, conforme apresentado em detalhe na seção 5.2.1.3.

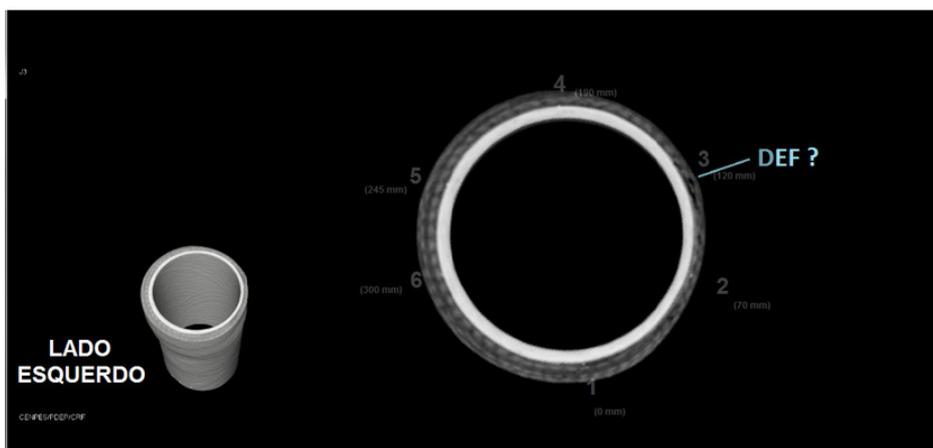


Figura 5.44 - Imagem tomográfica da J3: seção transversal em um ponto do lado esquerdo do corpo de prova, comprovando a presença de defeito não-intencional.

5.2.2.3. Tomografias - Comentários

As tomografias apresentadas nos itens anteriores permitem traçar um paralelo entre os resultados obtidos por duas inspeções não-destrutivas distintas. Até o presente momento, esta abordagem pode apenas ser realizada de forma qualitativa, pois os vídeos gerados pela TC não possuem escala que permita dimensionar os defeitos detectados com precisão. Assim, as comparações com a técnica de *phased array* limitar-se-ão a confrontar a detecção e localização das indicações encontradas em ambas as técnicas.

Todos os defeitos simulados puderam ser identificados nas imagens tomográficas. A TC demonstrou que de fato houve um deslocamento aparente entre a posição projetada e a posição real dos defeitos inseridos entre mantas. Desta forma, fica comprovado que as indicações obtidas pelo *phased array* realmente se referem aos defeitos artificialmente inseridos, ainda que estas indicações estejam levemente deslocadas da posição originalmente esperada.

Particularmente na J3, a TC comprovou presença de defeito próximo ao marco 3 (ou a 120 mm do perímetro da junta), conforme previamente apontado pela inspeção por *phased array*. Trata-se de um defeito não planejado, que ocupa ambos os lados da J3, de acordo com os resultados gerados por ambas as técnicas. De acordo com a imagem

tomográfica, tal defeito aparenta ser uma retenção de ar, indicando que houve alguma falha durante a execução da fabricação da junta. A presença de um defeito não-planejado reforça a importância da aplicação da técnica de *phased array* já na etapa de fabricação, uma vez que esta técnica se mostrou capaz de detectar este tipo de defeito.

A TC comprovou que alguns dos defeitos de descolamento manta/duto são extremamente tênues, de identificação complexa inclusive por uma técnica que apresenta alto poder de resolução. Isto explica a dificuldade apresentada por algumas das leis focais em detectar este tipo de defeito. Duas das leis focais com focalização no fundo da junta (*Direction and Depth* e *Single Point Focus*) apresentaram melhor desempenho na detecção deste tipo de defeito, comprovando que a focalização nesta região é um fator diferencial para a inspeção por *phased array*.

As imagens tomográficas demonstraram que este material possui uma porosidade inerente, conforme pode ser observado na Figura 5.45. Estes pontos de porosidade não possuem relação com os defeitos intencionalmente inseridos e podem estar diretamente ligados às indicações ultrassônicas de alta amplitude citadas nos resultados por *phased array*.



Figura 5.45 - Regiões de porosidade inerentes à estrutura de laminação (realçadas em vermelho).

Considerando os resultados apresentados, é possível afirmar que em desenvolvimentos futuros acerca do assunto abordado, as imagens tomográficas podem servir como referência para a geração de gabaritos dos corpos de prova avaliados. Para tal, é imprescindível a criação de uma escala nas imagens geradas que permita realizar medições com maior exatidão.

5.2.3. Dimensionamento e Profundidade

Todos os defeitos detectados por *phased array* foram dimensionados tendo em vista obter um comparativo entre as leis focais empregadas. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.4, nas quais as leis focais foram individualmente separadas e seus resultados globais foram avaliados.

O dimensionamento da extensão dos defeitos para ambas as direções (longitudinal e circunferencial) foi realizado segundo uma queda de 3 dBs. A queda de 6 dBs se mostrou inapropriada para as inspeções realizadas, pois os sinais da junta dificilmente decaem a menos de 50% do valor de maior amplitude.

Nas tabelas apresentadas, é possível verificar que todas as leis focais apresentaram tendência ao subdimensionamento dos defeitos detectados. Qualitativamente, os resultados foram equivalentes, com todas as leis focais apresentando erros na faixa de 35% a 40% para o dimensionamento.

A grande magnitude dos erros apresentada não pode ser negligenciada. Entretanto, é necessária uma avaliação complementar para verificar se este comportamento é de fato um erro inerente ao ensaio por *phased array*. É possível que em alguns pontos das fitas de acetato tenha havido perfeita aderência entre a fita e a matriz polimérica do laminado. Desta forma, a camada de ar necessária para a simulação de um defeito de delaminação não teria sido gerada, justificando os resultados obtidos.

Esta avaliação poderá ser realizada futuramente a partir das imagens tomográficas, quando estas possuírem escala que permita tal medição. Porém, sem a comprovação da hipótese levantada, faz-se necessário concluir que o *phased array*, através das leis

focais aplicadas, obteve sucesso na detecção dos defeitos, porém, não demonstrou bom desempenho no dimensionamento de acordo com o critério adotado.

Tabela 5.1 – Dimensionamento e erro empregando a lei focal *Direction and Depth*.

<i>DIRECTION AND DEPTH</i>							
J 2	Defeito	Extensão Long. PA (mm)	Ext. Long. Real (mm)	Erro	Extensão Circ. PA (mm)	Ext. Circ. Real (mm)	Erro
	1	35	70	-50,00%	14	20	-30,00%
	2	68	70	-2,86%	14	16	-12,50%
	3	35	70	-50,00%	21	20	5,00%
	4	15	71	-78,87%	7	16	-56,25%
	5	24	70	-65,71%	7	20	-65,00%
	A	26	18	44,44%	70	80	-12,50%
	B	54	105	-48,57%	28	18	55,56%
	C	16	18	-11,11%	7	13	-46,15%
	D	7	18	-61,11%	7	14	-50,00%
	E	11	18	-38,89%	7	18	-61,11%
F - G	9	11	-18,18%	7	11	-36,36%	
J 3	Defeito	Extensão Long. PA (mm)	Ext. Long. Real (mm)	Erro	Extensão Circ. PA (mm)	Ext. Circ. Real (mm)	Erro
	1	41	80	-48,75%	14	17	-18%
	2	76	80	-5,00%	14	17	-18%
	3	48	49	-2,04%	14	16	-13%
	4	73	66	10,61%	14	17	-18%
	5	41	75	-45,33%	7	19	-63%
	6	15	67	-77,61%	7	18	-61%
MÉDIA (abs)			39%	MÉDIA (abs)		36%	

Tabela 5.2 - Dimensionamento e erro empregando a lei focal *Setorial*.

SETORIAL							
	Defeito	Extensão Long. PA (mm)	Ext. Long. Real (mm)	Erro	Extensão Circ. PA (mm)	Ext. Circ. Real (mm)	Erro
J 2	1	13	70	-81%	7	20	-65,00%
	2	29	70	-59%	14	16	-12,50%
	3	36	70	-49%	14	20	-30,00%
	4		-		-	-	-
	5		-		-	-	-
	A	19	18	6%	70	80	-12,50%
	B	69	105	-34%	28	18	55,56%
	C	12	18	-33%	7	13	-46,15%
	D		-		-	-	-
	E		-		-	-	-
F - G		-		-	-	-	
J 3	Defeito	Extensão Long. PA (mm)	Ext. Long. Real (mm)	Erro	Extensão Circ. PA (mm)	Ext. Circ. Real (mm)	Erro
	1	26	30	-62,50%	7	17	-58,8%
	2	58	62	-22,50%	21	17	23,5%
	3	-			-	-	-
	4	37	41	-37,88%	21	17	23,5%
	5	21	25	-66,67%	7	19	-63,2%
	6						
MÉDIA (abs)			45%	MÉDIA (abs)		39%	

Tabela 5.3 - Dimensionamento e erro empregando a lei focal *Single Point Focus*.

SINGLE POINT FOCUS							
J 2	Defeito	Extensão Long. PA (mm)	Ext. Long. Real (mm)	Erro	Extensão Circ. PA (mm)	Ext. Circ. Real (mm)	Erro
		1	25	70	-64,29%	14	20
	2	61	70	-12,86%	21	16	31,25%
	3	51	70	-27,14%	21	20	5,00%
	4	24	71	-66,20%	14	16	-12,50%
	5	16	70	-77,14%	7	20	-65,00%
	A	31	18	72,22%	77	80	-3,75%
	B	62	105	-40,95%	28	18	55,56%
	C	11	18	-38,89%	7	13	-46,15%
	D		-		-	-	-
	E	11	18	-38,89%	7	18	-61%
	F - G	8	11	-27,27%	7	11	-36,36%
J 3	Defeito	Extensão Long. PA (mm)	Ext. Long. Real (mm)	Erro	Extensão Circ. PA (mm)	Ext. Circ. Real (mm)	Erro
		1	31	80	-61,25%	14	17
	2	74	80	-7,50%	7	17	-58,8%
	3	20	49	-59,18%	7	16	-56,3%
	4	83	66	25,76%	21	17	23,5%
	5	79	75	5,33%	14	19	-26,3%
	6	12	67	-82,09%	7	18	-61,1%
MÉDIA (abs)				42%	MÉDIA (abs)		35%

Tabela 5.4 - Dimensionamento e erro empregando a lei focal *Several Depths Focus*.

SEVERAL DEPTHS FOCUS							
	Defeito	Extensão Long. PA (mm)	Ext. Long. Real (mm)	Erro	Extensão Circ. PA (mm)	Ext. Circ. Real (mm)	Erro
J 2	1		-		-	-	-
	2	40	70	-42,86%	14	16	-12,50%
	3	32	70	-54,29%	21	20	5,00%
	4		-		-	-	-
	5		-		-	-	-
	A		-		-	-	-
	B	46	105	-56,19%	14	18	-22,22%
	C		-		-	-	-
	D		-		-	-	-
	E		-		-	-	-
F - G		-		-	-	-	
J 3	Defeito	Extensão Longitudinal PA	Ext. Long. Real	Erro	Extensão Circunferencial PA	Ext. Circ. Real	Erro
	1	35	80	-56,25%	14	17	-17,6%
	2	48	80	-40,00%	14	17	-17,6%
	3	48	49	-2,04%	14	16	-12,5%
	4	64	66	-3,03%	14	17	-17,6%
	5	66	75	-12,00%	14	19	-26,3%
	6	41	67	-38,81%	7	18	-61,1%
MÉDIA (abs)			34%	MÉDIA (abs)		21%	

Durante a fabricação das juntas, a profundidade dos defeitos foi medida indiretamente, através do registro do posicionamento entre camadas de cada defeito. O conhecimento da profundidade exata não é possível, pois o método de fabricação das juntas é manual e não há controle sobre a espessura final do compósito; isto foi evidenciado na Tabela 4.1, na qual é possível observar que o perfil de espessura para uma mesma junta pode variar em mais de 10 mm em diferentes pontos.

O parâmetro para a medição da profundidade foi estabelecido como a posição do sinal *A-scan* de maior amplitude retornado pelo defeito. A Figura 5.46 ilustra esta situação a título de exemplo; nesta figura, o sinal de maior amplitude (-92,33%) está localizado a 108,2 μ s de tempo de voo, valor referência para determinar sua posição no eixo da profundidade.

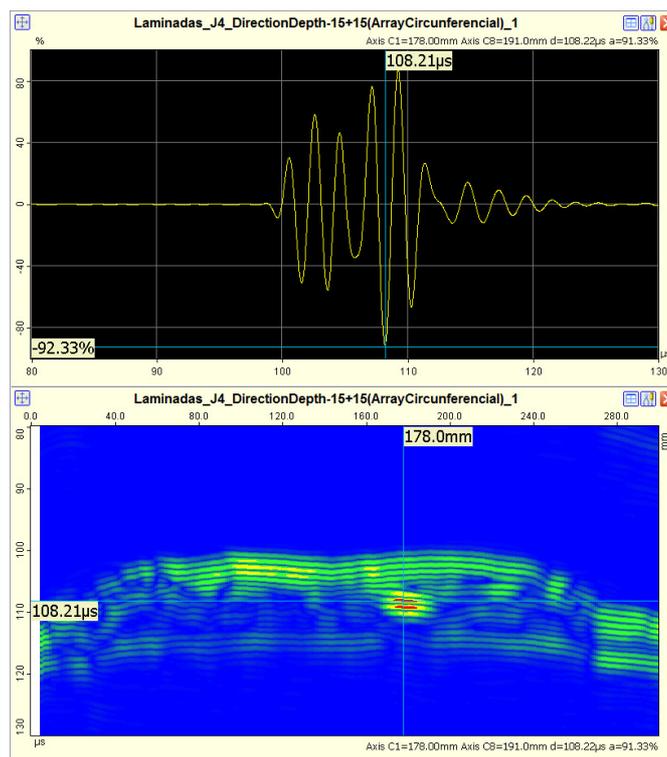


Figura 5.46 – Sinal de maior amplitude retornado por um defeito e tomado como referência para medição da profundidade.

As Tabelas 5.5 e 5.6 demonstram os resultados obtidos. Nestas tabelas, os defeitos estão apresentados na ordem na qual foram inseridos nas juntas e na ordem apontada por cada lei focal empregada. É possível observar que não há correlação entre a ordem esperada e a ordem apontada pelas leis focais em todos os corpos de prova inspecionados. Este já era um resultado esperado em decorrência de dois fatores:

- i. Como previamente exposto, a falta de controle de espessura durante a fabricação das juntas incorre na perda de garantia da profundidade prevista para cada defeito inserido. Em outras palavras: um defeito que originalmente seria esperado em uma posição menos profunda pode estar localizado em uma camada mais compactada durante a fabricação das juntas, ocasionando o seu deslocamento para posições mais profundas.
- ii. A frequência empregada (500 kHz) oferece baixa resolução para diferenciar com precisão as profundidades avaliadas. Porém, este é um custo que deve ser assumido em função do benefício desta frequência proporcionar o poder de penetração necessário para que toda a espessura do material seja atingida.

O fator i , em carácter particular, pode ser comprovado através de nova avaliação das imagens tomográficas. A Figura 5.47 apresenta uma imagem gerada para a J3, a título de exemplo. Nesta figura, é possível observar que a profundidade aparente de alguns dos defeitos não corresponde à profundidade esperada, considerando a ordem em que estes defeitos foram inseridos: os defeitos 1 e 2, inseridos em camadas mais internas que o defeito 6, estão, aparentemente, à mesma distância da superfície externa que o último.

Tabela 5. 5 – Ordem correta e ordem de detecção para cada lei focal empregada na inspeção da J2

	Ordem Correta	<i>Direction and Depth</i>	<i>Setorial</i>	<i>Single Point Focus</i>	<i>Several Depths Focus</i>
Mais profundo	1	4	3	4	3
	2	3	1	3	2
	3	1	2	1	-
	4	5	-	5	-
Menos profundo	5	2	-	2	-

Tabela 5. 6 - Ordem correta e ordem de detecção para cada lei focal empregada na inspeção da J3

	Ordem Correta	<i>Direction and Depth</i>	<i>Setorial</i>	<i>Single Point Focus</i>	<i>Several Depths Focus</i>
Mais profundo	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2
	3	3	5	6	6
	4	6	4	3	3
	5	5	-	4	5
Menos profundo	6	4	-	5	4

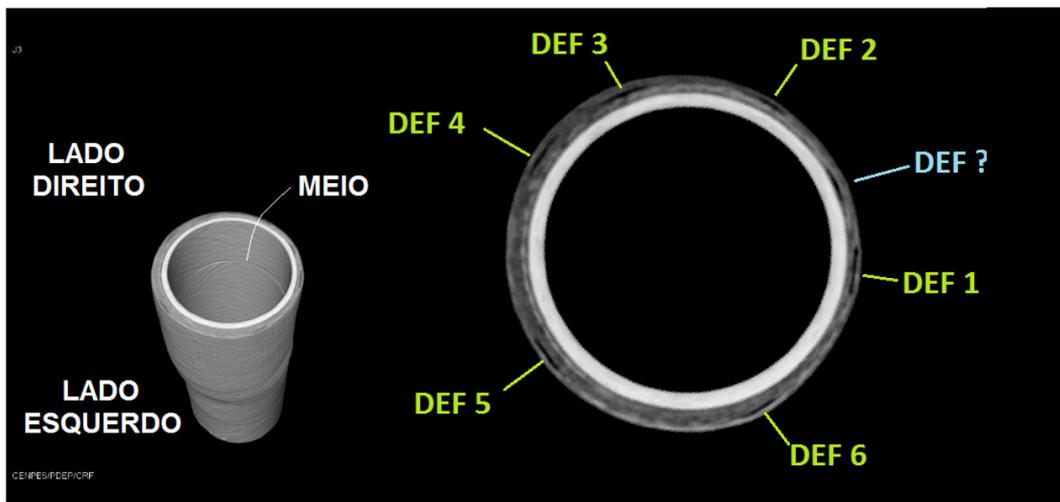


Figura 5.47 - Imagem tomográfica da J3, sem diferenciação aparente entre a profundidade de alguns dos defeitos inseridos.

CAPITULO 6 – CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a avaliar o desempenho da técnica de *phased array* na inspeção de juntas laminadas em material plástico reforçado por fibra de vidro. Para tal, 4 corpos de prova foram avaliados, dentre os quais 2 possuíam defeitos artificialmente inseridos; tais defeitos são representativos de situações encontradas em campo: delaminação entre mantas, descolamento duto/laminado e presença de bolhas de ar no laminado.

Os resultados obtidos comprovaram que a aplicação desta técnica em um material de tamanha anisotropia realmente se constitui um desafio. Entretanto, é possível afirmar que o *phased array* se mostrou adequado para a detecção dos defeitos avaliados: dos 22 defeitos inseridos, 20 foram detectados. Houve ainda a detecção de um defeito não projetado, cuja existência foi posteriormente comprovada pela inspeção por tomografia computadorizada.

Quatro leis focais foram abordadas em ambiente de simulação e posteriormente empregadas nos ensaios experimentais: *Direction and Depth*, *Setorial*, *Single Point Focus* e *Several Depths Focus*. A simulação foi empregada em abordagem qualitativa uma vez que as propriedades sônicas inseridas no *software* foram teóricas, com o objetivo de apontar alguns parâmetros de ensaio para economia de tempo experimental.

Duas das leis focais se destacaram durante a execução dos ensaios: *Direction and Depth* e *Single Point Focus*, cada qual detectando, respectivamente, 20 e 19 defeitos dentre os 22 inseridos. Estas leis focais apresentaram bom desempenho inclusive nos defeitos de descolamento manta/duto, que ofereceram maiores dificuldades quanto à detecção. Este resultado demonstra que a focalização do feixe ultrassônico no fundo da junta é um grande diferencial e possui influência direta no poder de detecção da técnica nesta região.

A tomografia computadorizada foi empregada como técnica não destrutiva complementar no intuito de corroborar os resultados obtidos por *phased array*. Foi possível identificar uma alta correlação entre ambos os resultados, porém, a comparação foi apenas qualitativa uma vez que os dados de tomografia não foram

gerados com escala que permitisse comparações mais detalhadas. A grande contribuição da tomografia para este trabalho foi a comprovação de que houve certo deslocamento entre a posição projetada e a posição real dos defeitos inseridos. Este deslocamento foi provocado durante o processo de fabricação, evidenciado nos ensaios por *phased array* e comprovado nos resultados tomográficos.

O *phased array*, a princípio, não apresentou resultados satisfatórios no que tange o dimensionamento dos defeitos inseridos, apresentado erros na faixa de 30% a 40% em comparação ao tamanho esperado. Entretanto, a dimensão real destes defeitos deve ser verificada por uma técnica complementar de alta resolução que permita apontar se eventualmente houve perfeita aderência entre a fita de acetato e a matriz polimérica do laminado. Isto será possível futuramente com a inserção de uma escala nas imagens tomográficas.

Também é necessária análise complementar referente à localização dos defeitos em relação à profundidade. Para a inspeção de um material anisotrópico de alta espessura, é necessário assumir uma razão de compromisso entre penetração e resolução. Para atingir o fundo da junta, foi necessário o emprego de um transdutor *array* de 500 kHz de frequência, extremamente baixa, prejudicando, portanto, a precisão na medição da profundidade dos defeitos detectados.

É importante destacar que não foi identificado nenhum falso positivo por nenhuma das leis focais empregadas e em nenhum dos corpos de prova inspecionados, isto é, não houve indicação de defeito em regiões íntegras em nenhum momento deste estudo. Algumas regiões das juntas inspecionadas retornaram sinais ultrassônicos de alta intensidade, mas que não foram considerados defeitos por serem de pequena extensão e estarem restritas à superfície da junta. É possível que estas regiões estejam diretamente ligadas à porosidade inerente do material avaliado, conforme apontado nas imagens geradas por tomografia computadorizada.

CAPÍTULO 7 - SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes tópicos são sugeridos para a continuidade da pesquisa desenvolvida na presente dissertação:

- Geração de novas tomografias com escala para o dimensionamento: As imagens tomográficas demonstraram ser indicadas para a geração de gabaritos para os corpos de prova analisados; a geração de novas imagens com escala que permita realizar com precisão o dimensionamento dos defeitos detectados é altamente indicada para analisar o desempenho do *phased array* no dimensionamento dos defeitos inseridos.
- Processamento de sinais visando focalização: Conforme indicado pelos resultados, a focalização no fundo da junta contribuiu para a detecção de defeitos localizados na interface duto/laminado. Esta focalização pode ser aplicada na junta como um todo, através de ferramentas avançadas de processamento de sinais, como o *Total Focusing Method*, apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho.
- Desenvolvimento de sapata ou protótipo para inspeção por contato: Visando as inspeções em campo, o ambiente de imersão se torna impeditivo para a aplicação da técnica. Portanto, é indicado o desenvolvimento de uma sapata ou protótipo que permita a manutenção de uma lâmina d'água durante a inspeção por *phased array* deste tipo de material.
- Geração de novos corpos de prova com defeitos em Teflon ou similar: Caso haja a possibilidade de geração de novos corpos de prova com defeitos artificiais, indica-se criar os defeitos com diferentes materiais, como, por exemplo, o Teflon, que é amplamente empregado em estudos de inspeção de materiais compósitos.
- Inspeção de corpos de prova com defeitos reais: A inspeção de corpos de prova obtidos em campo, com defeitos reais, permitirá realizar uma avaliação mais profunda da técnica.

- Levantamento de propriedades sônicas da fibra/matriz para melhor correlação entre simulação e experimento: Para validar as simulações e não apenas realizar análises qualitativas, é necessário que todas as propriedades sônicas sejam levantadas de forma independente, permitindo a criação de um sólido virtual que reproduza de forma fiel o material estudado.

CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R.D., CAWLEY, P. “A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints.” **NDT International**, v. 21 (4), pp. 208-222, 1988

BOERI, D. V. **Caracterização de Materiais Compostos por Ultrassom**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

BROTHERHOOD, C.J., DRINKWATER, B.W., FREEMANTLE, R.J., “An ultrasonic wheel-*array* sensor and its application to aerospace structures.” **Insight**, vol. 45 (11), pp. 729-734, 2003

CHUNG, D. D. L. **Composite Materials: Science and Applications**. 2nd ed. New York: Springer, 2010.

FARO, A. A. D. S. **Desenvolvimento de tubos compósitos produzidos por enrolamento filamentar para possíveis aplicações como risers rígidos**. M.Sc. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

FONSECA, S. C. D. **Materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras usados na engenharia civil: Características e aplicações**. 1^a. ed., 2006.

FORTUNKO, C.M., FITTING, D.W. “Appropriate ultrasonic system components for NDE of thick polymer composites.” In: **Proceedings of review of progress in QNDE**, v. 10B, pp. 2105–2112, La Jolla, 1991

GIBSON, R. F. **Principles of Composites Material Mechanics**. 1st ed. New York: McGraw-Hill, 1994

HABERMEHL, J., LAMARRE, A., ROACH, D. “Ultrasonic phased *array* tools for large area composite inspection during maintenance and manufacturing.” In: **Proceedings of review of progress in QNDE**, v. 28A, pp. 832–839, Kingston, 2009

HOPKINS, D., NEAU, G., LE BER, L. “Advanced phased *array* technologies for ultrasonic inspection of complex composite parts.” In: **Proceedings of Smart Materials, Structures & Ndt in Aerospace**, Montreal, QUEBEC, 2011

HSU, D.K., MINACHI, A. “Defect characterization in thick composites by ultrasound.” In: **Proceedings of review of progress in QNDE**, v. 9, p. 1481–1488, Brunswick, 1990

HUANG, W., ROKHLIN, S. I. , WANG, Y. J. “Effect of fibre-matrix interphase on wave propagation along, and scattering from, multilayered fibres in composites.” Transfer matrix approach. **Ultrasonics**, v. 33(5), p. 365-375, 1995

ISHAI, O., Daniel, I. M. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1994

KRAUTKRÄMER, J. KRAUTKRÄMER, K. **Ultrasonic Testing of Materials**, 2nd edition, New York, Springer, 1969

KREUTZBRUCK, M., BRACKROCK, D., BREKOW, G., MONTAG, H.-J., BOEHM, R. ILLERHAUS, B. “Matrix phased *arrays* for the inspection of CFRP-components.” In: **Proceedings of review of progress in QNDE**, v. 33A, p. 108–115, Baltimore, 2014

KRÜGER, S. E. **Caracterização microestrutural de ferros fundidos por ultra-som**, Tese de D.Sc.; COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2000

LETHIECQ, M., PEJOT, C., BERSON, M., GUILLEMET, P., RONCIN, A. “An ultrasonic *array*-based system for real-time inspection of carbon-epoxy composite plates.” **NDT&E International**, v. 27 (6), p. 311-315, 1994

LI, C., PAIN, D., WILCOX, P.D., DRINKWATER, B.W. "Imaging composite material using ultrasonic *arrays*." **NDT&E International**, v. 53, p. 8–17, 2013

LIONETTO, F., MAFFEZZOLI, A. "Monitoring the cure state of thermosetting resins by ultrasound." **Materials**, v. 6 (9), p. 3783-3804, 2013

MARKHAM, M.F. "Measurements of the elastic constants of fibre composites by ultrasonics" **Composites**, v. 1 (3), p. 145-149, 1970

MARTIN, C.C., **Ultrassom**, 1ª edição, São Paulo, Abendi, 2012

MASON, W.P. **Physical Acoustics – Principles and Methods**, Vol. 1(A), New York and London, Academic Press, 1964

MEOLA, C., BOCCARDI, S., CARLOMAGNO, G.M., BOFFA, N.D., MONACO, E., RICCI, F. "Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics." **Composite Structures**, v. 134, p. 845–853, 2015

MOURITZ, A.P., TOWNSEND, C., SHAH KHAN, M.Z. "Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics." **Composites Science and Technology**, v. 60, p. 23-32, 2000

MURRI, W.J., SERMON, B.W., ANDERSEN, R.N., MARTINEZ, L.A., VANDERHEIDEN, E.J., GARNER, C.A. "Defects in thick composites and some methods to locate them." In: **Proceedings of review of progress in QNDE**, v. 10B, p. 1583–1590, La Jolla, 1991

NAGESWARAN, C., BIRD, C.R., TAKAHASHI, R. "Phased *array scanning* of artificial and impact damage in carbon fibre reinforced plastic (CFRP)." **Insight**, v. 48 (3), pp. 155-159, 2006

NDT Resource Center. Disponível em:<<http://www.ndt-ed.org>>. Acesso em: 05 mai.

OLYMPUS NDT, **Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline**, 3rd edition, Canada, Olympus NDT, 2007

OLYMPUS NDT, **Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications**, 1st edition, Canada, Olympus NDT, 2007

OLYMPUS NDT, **Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications**, Second Edition, Canada, Olympus NDT, 2012

OTA, W. N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional**. M.Sc. Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2004.

PINTO, K. N. C. **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro**. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. M.Sc. São Paulo, 2002

SANTIN, J. L. **Ultra-som: Técnica e Aplicação**. 2ª Edição, Erechim, Editora São Cristóvão, 2003

TEAGLE, P.R., "The quality control and non-destructive evaluation of composite aerospace components." **Composites**, v. 14 (2), p. 115-128, 1983

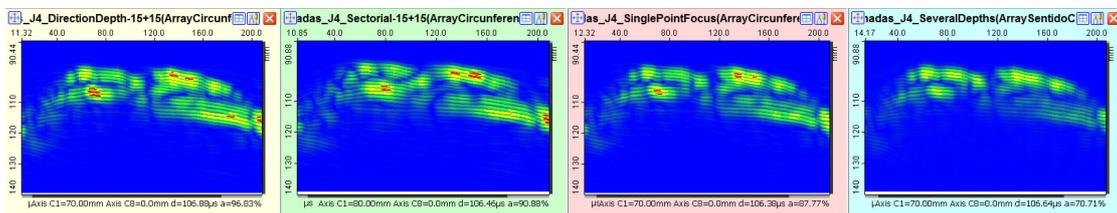
APÊNDICE 1 – Mapas B-scan dos defeitos detectados

A seguir serão apresentados os mapas B-scan que comprovam a detecção dos defeitos citados ao longo desta dissertação para os corpos de prova J2 e J3.

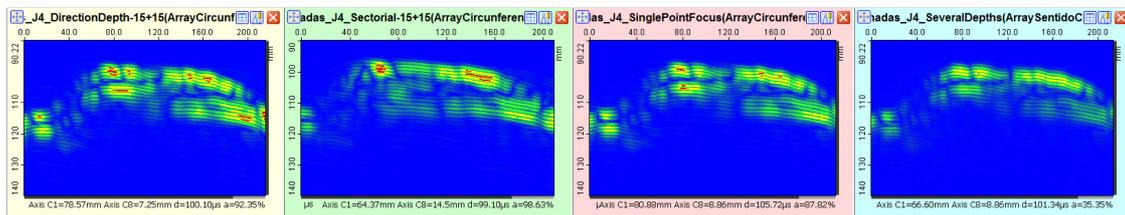
A ordem dos B-scans, da esquerda para a direita, sempre será:

<i>Direction and Depth (DD)</i>	<i>Setorial (SET)</i>	<i>Single Point Focus (SPF)</i>	<i>Several Depths Focus (SDF)</i>
---------------------------------	-----------------------	---------------------------------	-----------------------------------

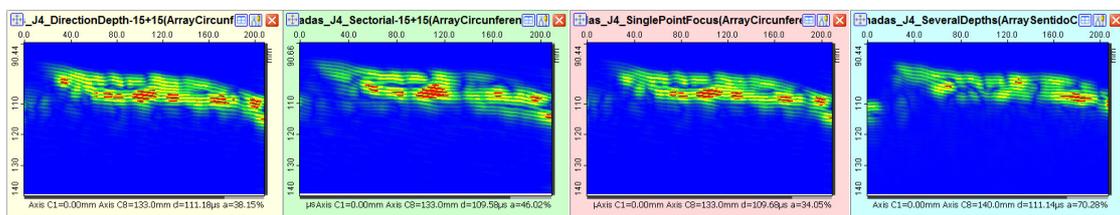
Junta 2



B-scans para o defeito 1 da J2, localizado ao lado esquerdo e detectado a 0 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET, SPF.

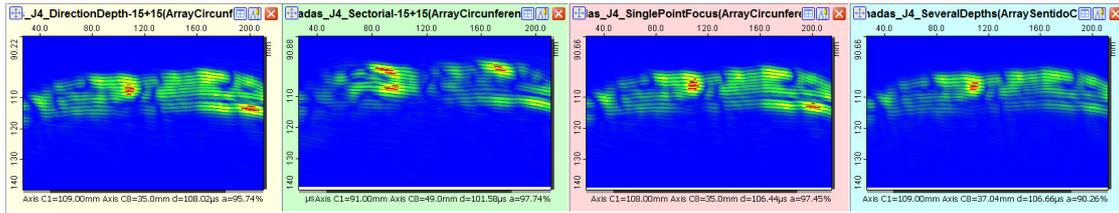


B-scans para o defeito 5 da J2, localizado ao lado superior esquerdo e detectado a 14 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET e SPF. Nesta imagem, também estão visíveis, ao lado esquerdo, o defeito 1 (DD e SPF) e, ao lado direito, a Bolha 2 (DD, SET e SPF).

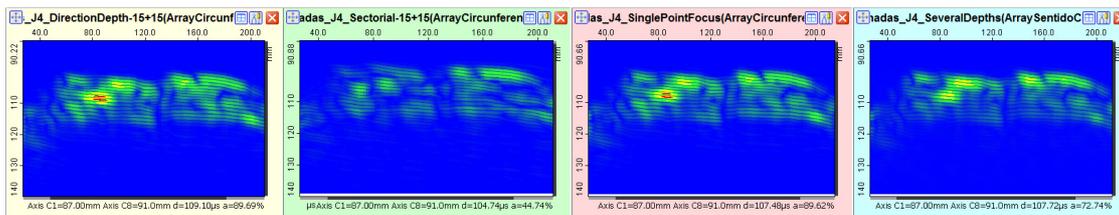


B-scans para os defeitos 2 (lado esquerdo) e 'b' (lado direito) da J2, detectados a 133 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET, SPF e SDF(140mm).

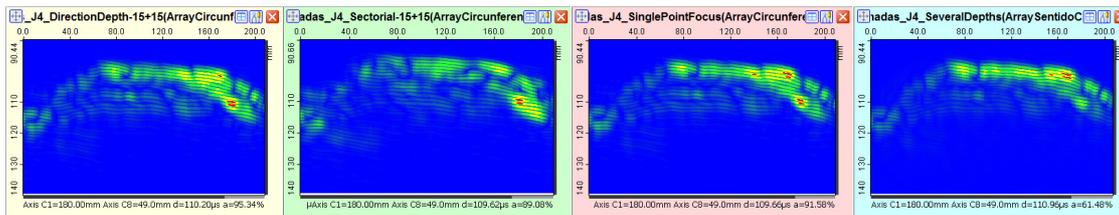
<i>Direction and Depth (DD)</i>	<i>Setorial (SET)</i>	<i>Single Point Focus (SPF)</i>	<i>Several Depths Focus (SDF)</i>
---------------------------------	-----------------------	---------------------------------	-----------------------------------



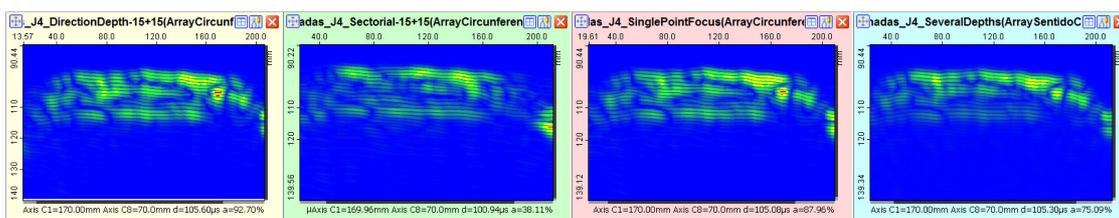
B-scans para o defeito 3 da J2, localizado ao lado esquerdo e detectado a 217 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET, SPF e SDF.



B-scans para o defeito 4 da J2, localizado ao lado esquerdo e detectado a 273 mm do perímetro pelas leis focais: DD, e SPF.

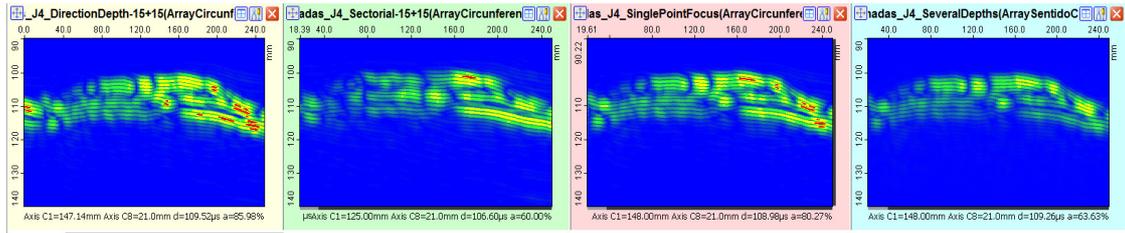


B-scans para o defeito 'c' da J2, localizado ao lado direito e detectado a 49 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET, SPF.

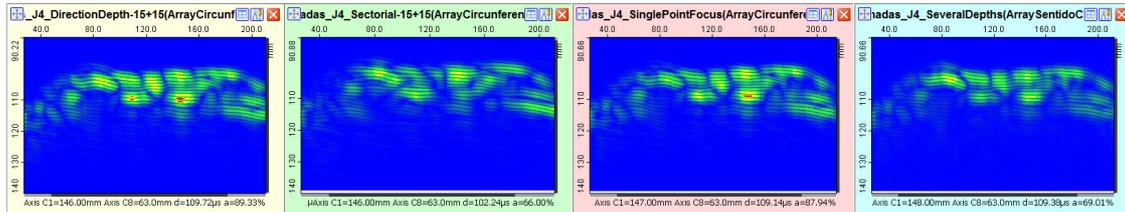


B-scans para o defeito 'f/g' da J2, localizado ao lado direito e detectado a 70 mm do perímetro pelas leis focais: DD e SPF.

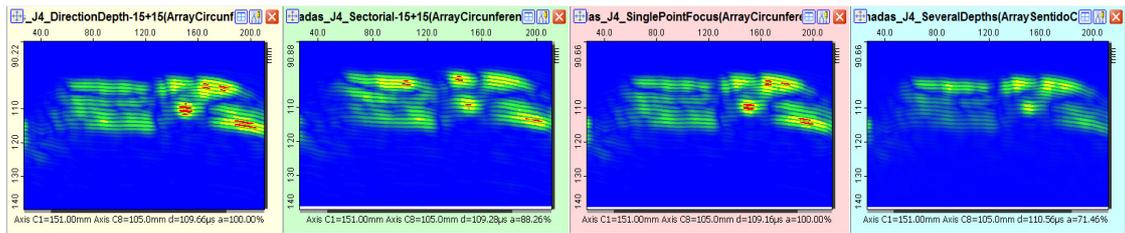
<i>Direction and Depth (DD)</i>	<i>Setorial (SET)</i>	<i>Single Point Focus (SPF)</i>	<i>Several Depths Focus (SDF)</i>
---------------------------------	-----------------------	---------------------------------	-----------------------------------



B-scans para o defeito 'd' da J2, localizado ao lado direito e detectado a 203 mm do perímetro pela lei focal: DD.



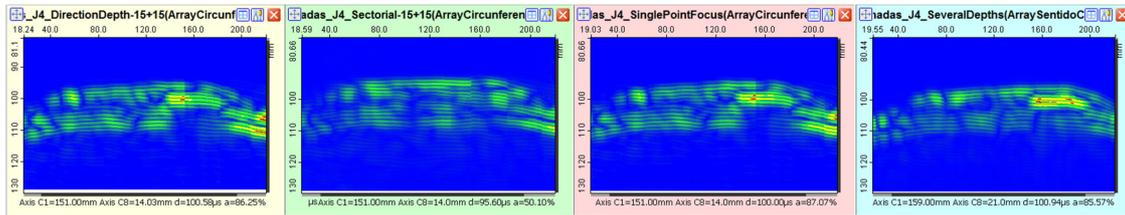
B-scans para o defeito 'e' da J2, localizado ao lado direito e detectado a 245 mm do perímetro pelas leis focais: DD e SPF.



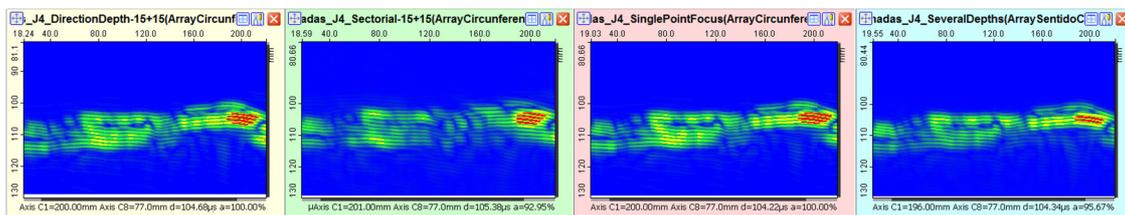
B-scans para o defeito 'a' da J2, localizado ao lado direito e detectado a 287 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET e SPF.

Junta 3

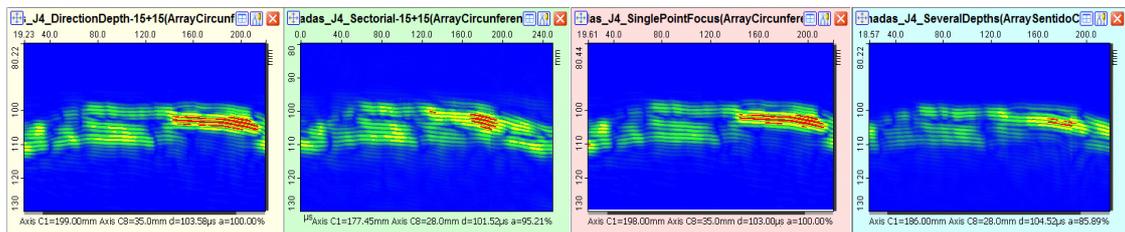
Direction and Depth (DD)	Setorial (SET)	Single Point Focus (SPF)	Several Depths Focus (SDF)
--------------------------	----------------	--------------------------	----------------------------



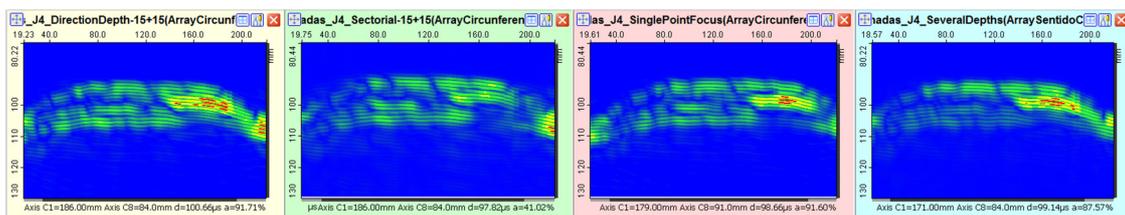
B-scans para o defeito 6 da J3, localizado ao lado direito e detectado a 14 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SPF e SDF.



B-scans para o defeito 1 da J3, localizado ao lado direito e detectado a 77 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET, SPF e SDF.

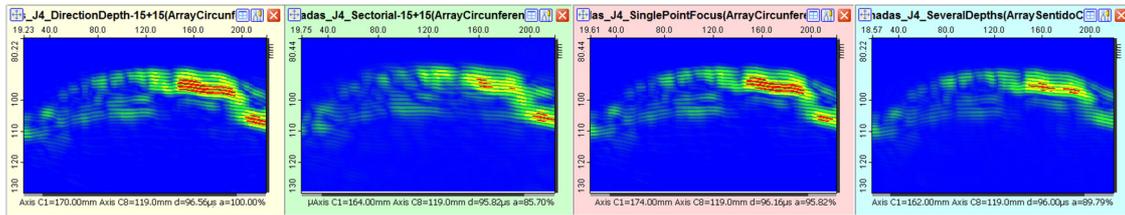


B-scans para o defeito 2 da J3, localizado ao lado direito e detectado a 147 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET(133), SPF e SDF.

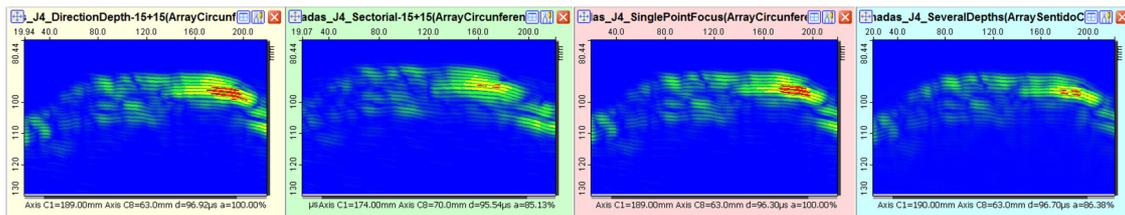


B-scans para o defeito 3 da J3, localizado ao lado direito e detectado a 203 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SPF e SDF.

<i>Direction and Depth (DD)</i>	<i>Setorial (SET)</i>	<i>Single Point Focus (SPF)</i>	<i>Several Depths Focus (SDF)</i>
---------------------------------	-----------------------	---------------------------------	-----------------------------------



B-scans para o defeito 4 da J3, localizado ao lado direito e detectado a 238 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET(231), SPF e SDF.



B-scans para o defeito 5 da J3, localizado ao lado direito e detectado a 301 mm do perímetro pelas leis focais: DD, SET, SPF e SDF.