

DETECÇÃO DE DEFEITOS EM JUNTAS LAMINADAS DE POLÍMERO REFORÇADO POR FIBRA DE VIDRO PELA TÉCNICA DE PHASED ARRAY*

Priscila Duarte de Almeida¹
Gabriela Ribeiro Pereira²

Resumo

A avaliação da integridade estrutural de materiais compósitos através da aplicação de métodos não destrutivos é preocupação corrente, uma vez que tais materiais têm sido progressivamente mais aplicados em ambientes agressivos. Este trabalho avalia a detecção, localização e dimensionamento de defeitos tipicamente apresentados por juntas laminadas em material plástico reforçado por fibra de vidro (PRFV) através da inspeção por phased array. Corpos de prova com defeitos artificiais representando delaminações entre mantas e descolamento duto/laminado foram investigados neste estudo. Diversas leis focais foram avaliadas nas inspeções por phased array, através do uso de um transdutor matricial de 32 elementos e 500 kHz de frequência em um equipamento de 64 canais paralelos. 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.

Palavras-chave: Phased array; PRFV; Inspeção não-destrutiva

PHASED ARRAY INSPECTION OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMERS PIPELINE JOINTS

Abstract

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..

Keywords: Phased array; GFRP; Non-destructive inspection.

¹ Engenheira de Materiais, M.Sc., Engenheira Pesquisadora, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/UFRJ-COPPE, LNDC-Laboratório de Ensaios Não Destrutivos Corrosão e Soldagem, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

² Física, D.Sc., Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Compósitos de matriz polimérica unem propriedades como alta resistência à corrosão e baixo peso específico, tornando-os uma opção atrativa para aplicação em instalações onshore ou offshore da indústria de petróleo e gás, tanto em termos técnicos quanto em termos econômicos (1).

A integridade de equipamentos e/ou estruturas aplicadas nestas instalações é frequentemente realizada através da aplicação de ensaios não destrutivos (ENDs). Uma das abordagens possíveis é a inspeção por phased array, uma técnica derivada dos mesmos princípios físicos do ultrassom convencional, porém, de maior sofisticação, flexibilidade e complexidade.

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 (2,3):

- 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.

A inspeção por ultrassom vem sendo objeto de estudo de diversos autores durante os últimos anos, tendo em vista permitir a inspeção de componentes em material compósito, apesar da existência de todas as dificuldades supracitadas (4-7).

Este trabalho avalia a detecção, localização e dimensionamento de defeitos tipicamente apresentados por juntas laminadas em material plástico reforçado por fibra de vidro (PRFV) através da inspeção por phased array. Corpos de prova com defeitos artificiais representando delaminações entre mantas e descolamento duto/laminado foram investigados neste estudo. Diversas leis focais foram avaliadas nas inspeções por phased array, através do uso de um transdutor matricial de 32 elementos e 500 kHz de frequência em um equipamento de 64 canais paralelos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma junta laminada PRFV sem defeitos e outra com defeitos artificiais inseridos foram investigadas. A Figura 1 apresenta uma fotografia dos corpos de prova e a Tabela 1 apresenta suas identificações e parâmetros geométricos.



Figura 1 – Corpos de prova inspecionados

Tabela 1 – Identificação dos corpos de prova

Identificação	Diâmetro (mm)	Espessura mínima (mm)	Espessura máxima (mm)	Presença de defeitos
J1	101,6 (4")	13	27	Não
J2	101,6 (4")	10	30	Sim

Os defeitos foram simulados através da inserção de fitas de acetato entre as diferentes camadas de mantas, a fim de criar delaminações artificiais. A Figura 2 apresenta um exemplo de uma das fitas inseridas na J2. A Tabela 2 apresenta a descrição de todos os defeitos inseridos neste corpo de prova.

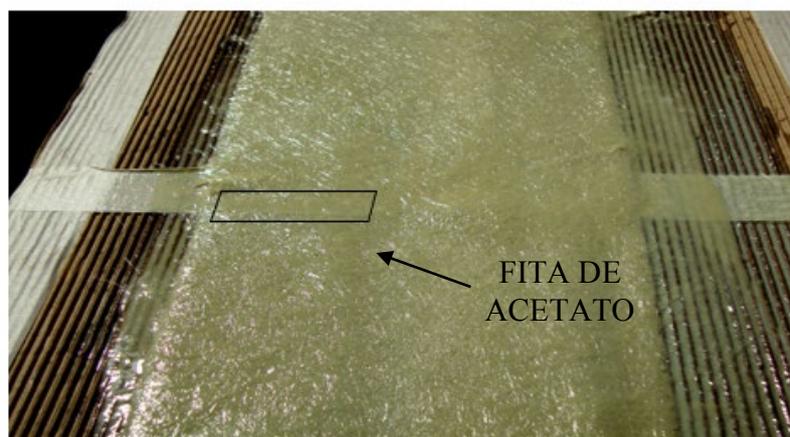


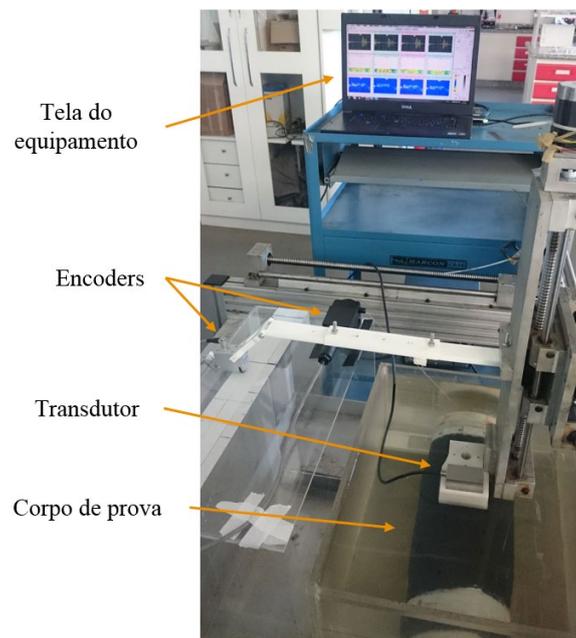
Figura 2 - Defeitos inseridos na superfície do duto e entre as mantas de fibra de vidro. Fitas de acetato simulam o descolamento e a delaminação entre mantas.

Tabela 2 - Fitas de acetato inseridas no corpo de prova J2

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

Um sensor phased array matricial 2D de 500 kHz, com 32 elementos (4x8), 6 mm de pitch, da fabricante Imasonic foi utilizado. O equipamento utilizado foi o M2M MultiX++ e as inspeções foram realizadas em tanque de imersão em água.

A Figura 3 apresenta o aparato experimental empregado nos ensaios.

**Figura 3** – Aparato utilizado para os ensaios por *phased array*.

Foram selecionadas 4 leis focais para avaliação neste estudo: *Setorial*, *Direction and Depth*, *Single Point Focus* e *Several Depths Focus*, que foram disparadas simultaneamente em uma única varredura. A escolha das leis focais teve como objetivo avaliar a influência da deflexão angular e a focalização no poder de detecção da técnica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 5 apresenta esquematicamente a seção transversal das juntas examinadas. Regiões sem defeito apresentam resultados similares à Figura 6, na qual são apresentados os B-scans de uma linha de varredura 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 nesta região do material.

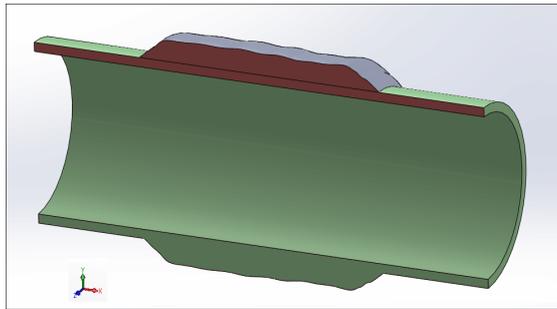


Figura 5 - Em marrom a região referente aos B-scans doravante apresentados.

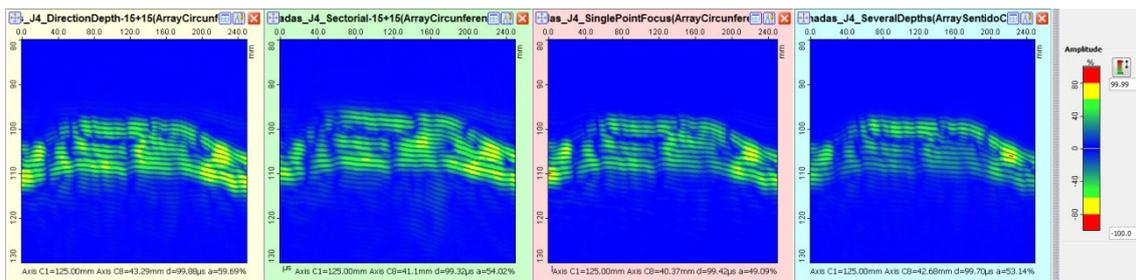


Figura 6 – B-scans para uma região sem defeito do material. Da esquerda para a direita: *Direction and Depth*, *Setorial*, *Single Point Focus* e *Several Depths Focus*.

Regiões defeituosas, por sua vez, apresentam aumento significativo de amplitude do sinal ultrassônico, representado pela cor vermelha, conforme Figura 7. 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.

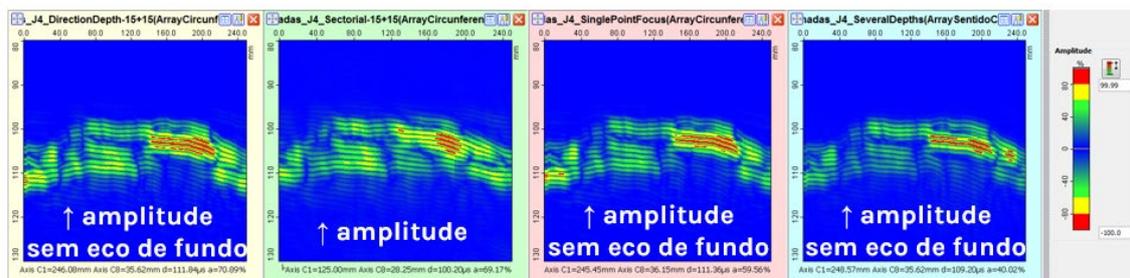


Figura 7 - B-scans para uma região com defeito do material. Da esquerda para a direita: *Direction and Depth*, *Setorial*, *Single Point Focus* e *Several Depths Focus*.

3.1. Resultados J1

A Figura 8 ilustra um esquema para orientação do leitor na interpretação dos C-scans planejados apresentados neste trabalho. A Figura 9 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 deste corpo de prova, resultado que condiz com o esperado. Entretanto, é possível observar na Figura 9 regiões de alta refletividade nesta junta (cor vermelha). Este comportamento se reproduziu em todas as leis focais (a diferentes níveis de sensibilidade) e na inspeção de todas as juntas avaliadas neste estudo.

A Figura 10 apresenta em detalhe os B-scans destas áreas. Elas se dividem em dois casos:

- Áreas de alta refletividade na 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.

Ensaio por técnicas complementares (destrutivas ou não) serão realizados em trabalhos futuros tendo em vista maior entendimento destas regiões. Neste trabalho estas regiões não foram consideradas defeituosas, uma vez que a comprovação das hipóteses levantadas não é possível neste momento.

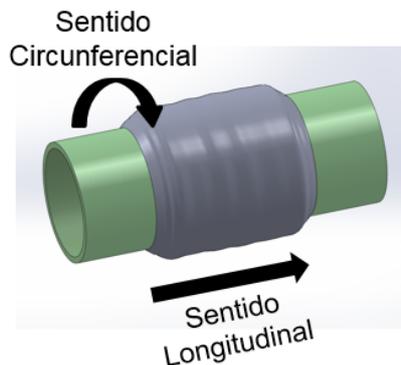


Figura 8 – Esquema para auxílio da interpretação dos mapas C-scan planejados.

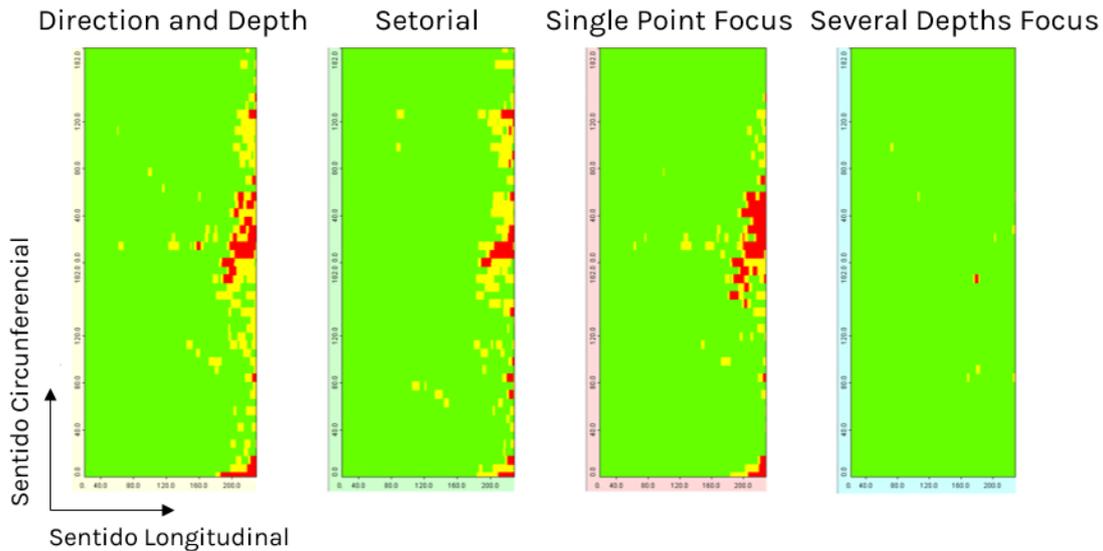


Figura 9 - Mapas C-scan planejados para as 4 leis focais utilizadas na inspeção da J1. Da esquerda para a direita: *Direction and Depth*, *Sectorial*, *Single Point Focus* e *Several Depths Focus*.

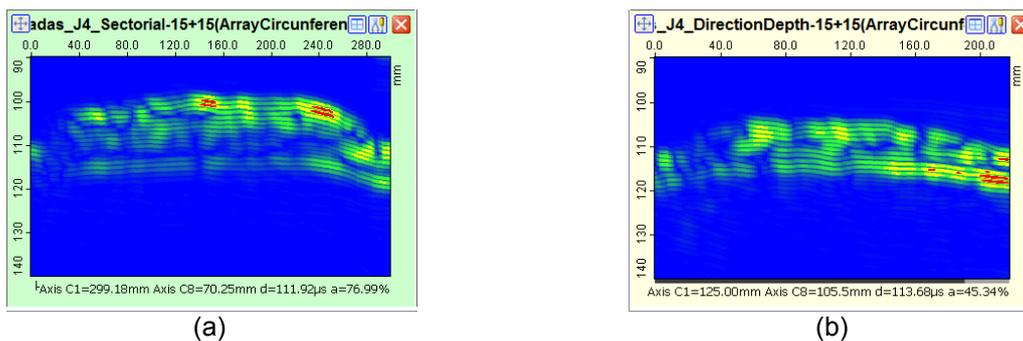


Figura 10 - Mapas B-scan de áreas de alta refletividade: (a) áreas localizadas na superfície da junta; (b) áreas localizadas no interior do duto.

3.2. Resultados J2

A seguir serão apresentados os resultados das inspeções na junta 3 em formato C-scan planejado, que serão comparados à posição projetada dos defeitos para melhor visualização dos dados coletados.

A Figura 11 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Direction and Depth* na inspeção da J2. Todos os 6 defeitos do tipo delaminação/descolamento foram detectados; em adição, observa-se 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 11 e apresentadas em detalhe nos B-scans da Figura 12.

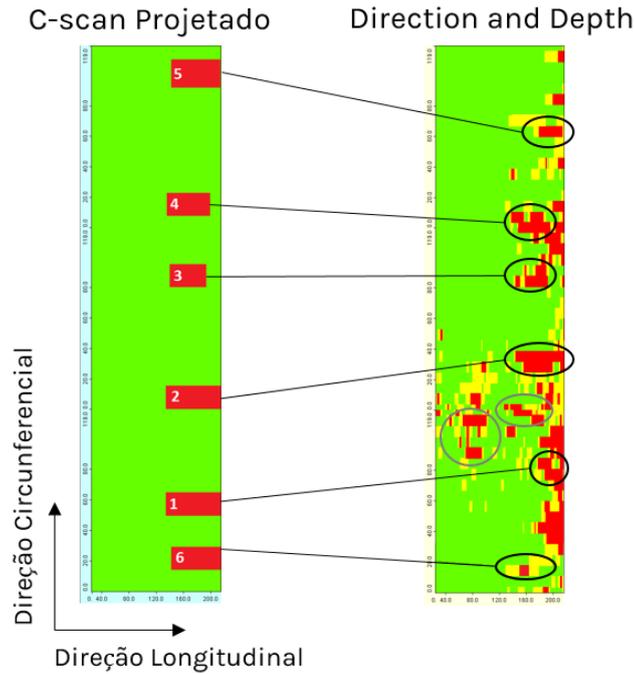


Figura 11 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal *Direction and Depth* na inspeção da J2.

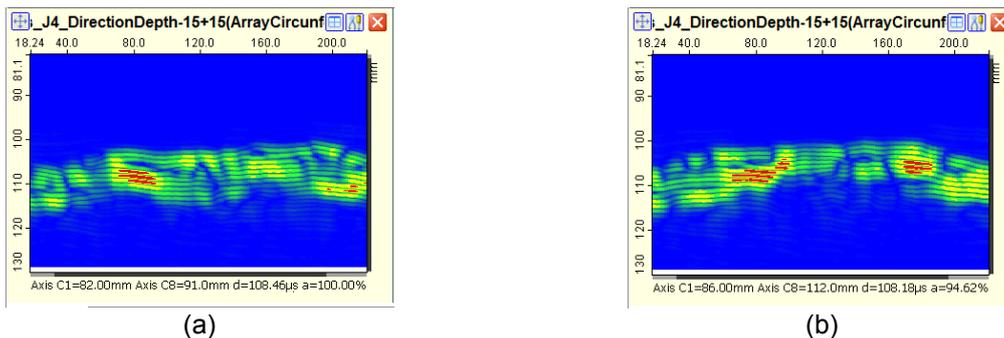


Figura 12 - B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J2 com a lei focal *Direction and Depth*

A Figura 13 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Setorial* na inspeção da J2. Dos 6 defeitos inseridos, 4 foram detectados; adicionalmente, foi identificada 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 13 e apresentada em detalhe no B-scan da Figura 14. Nota-se que esta área coincide com a igualmente apontada pela lei focal anterior, *Direction and Depth*.

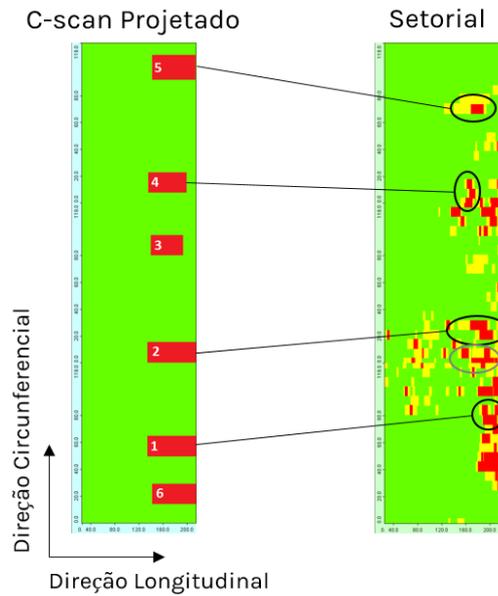


Figura 13 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal Setorial na inspeção da J2.

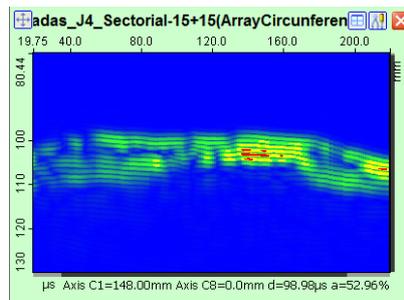


Figura 14 - B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J2 com a lei focal Setorial.

A Figura 15 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Single Point Focus* na inspeção da J2. Todos os 6 defeitos do tipo delaminação/descolamento foram detectados; em adição, observa-se 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 15 e apresentadas em detalhe nos B-scans da Figura 16.

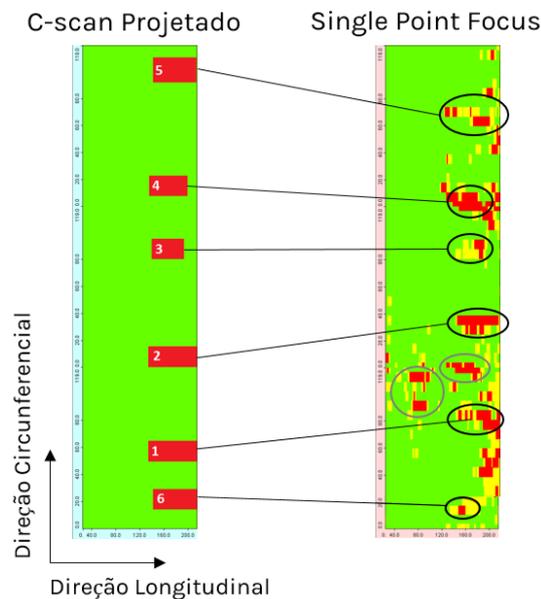


Figura 15 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal Single Point Focus na inspeção da J2.

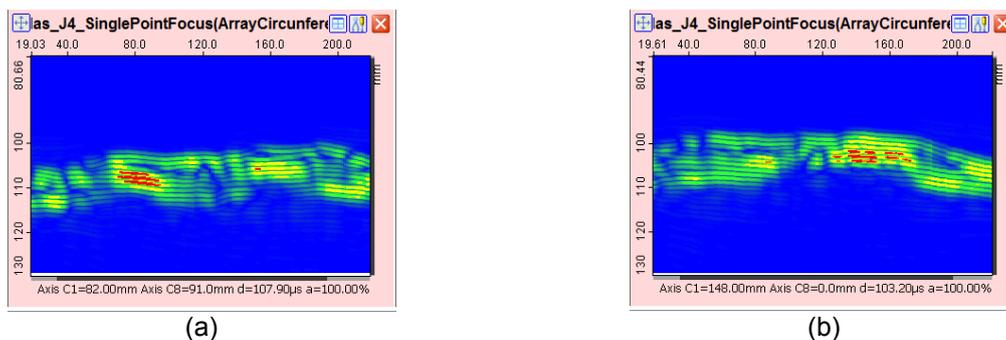


Figura 16 - B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J2 com a lei focal Single Point Focus.

A Figura 17 apresenta o C-scan obtido com a lei focal *Several Depths Focus* na inspeção da J2. Dos 6 defeitos inseridos, 5 foram detectados; adicionalmente, foi identificada 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 17 e apresentada em detalhe no B-scan da Figura 18. Com este resultado, todas as leis focais apresentaram a presença de tal descontinuidade no corpo de prova J2.

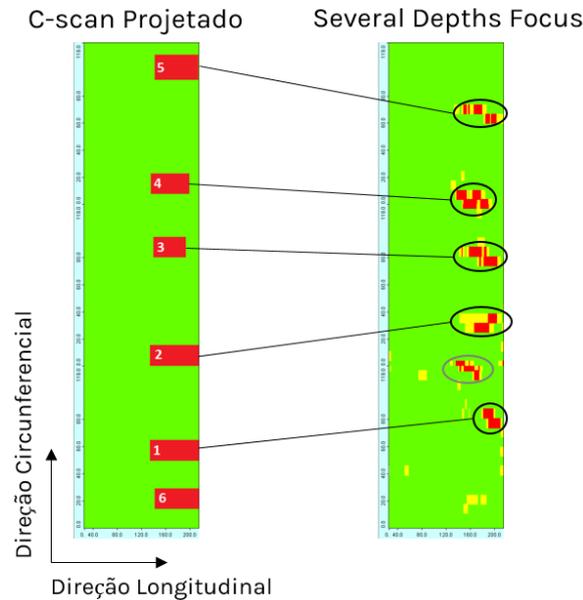


Figura 17 - Comparativo entre a posição projetada dos defeitos e o C-scan obtido para a lei focal Several Depths Focus na inspeção da J2.

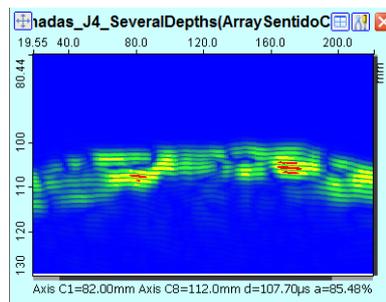


Figura 18 - B-scans representando a detecção de defeitos não esperados na J2 com a lei focal Several Depths Focus.

3.2.1. Resultados J2 - Discussão

Todas as leis focais apresentaram a presença de indicações não planejadas na faixa de 80 mm a 140 mm do perímetro da J2. A recorrência destas indicações de alta intensidade nas 4 leis focais empregadas sugere que de fato há algum defeito não planejado nesta região do material.

Todas as leis focais demonstraram dificuldade para a detecção do defeito 6, o mais próximo à superfície externa dentre todos os inseridos. 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.

Conforme apresentado na seção anterior, as leis focais *Direction and Depth* e *Single Point Focus* detectaram todos os defeitos inseridos, *Several Depths Focus* detectou 5 dos 6 defeitos (com indicações de média refletividade do defeito 6) e *Setorial* detectou 4 dos 6 defeitos existentes (com indicações de média refletividade do defeito 3). Desta forma, é possível afirmar que as 4 leis focais apresentaram resultados convergentes na inspeção da J2.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho investigou a aplicação do phased array na detecção de defeitos tipicamente encontrados em juntas PRFV. Todos os defeitos inseridos foram detectados, indicando que a técnica é adequada para este tipo de inspeção.

As leis focais Direction and Depth e Single Point Focus detectaram todos os defeitos inseridos, indicando que a focalização do feixe ultrassônico no fundo da junta é um grande diferencial e possui influência direta no poder de detecção da técnica.

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, o que poderá ser comprovado futuramente em avaliação detalhada das imagens geradas por técnicas complementares, como a tomografia computadorizada.

REFERÊNCIAS

- (1) CHUNG, D. D. L. “Composite Materials: Science and Applications” 2nd ed, New York, Springer, 2010.
- (2) MASON, W.P. “Physical Acoustics – Principles and Methods”, Vol. 1(A), New York and London, Academic Press, 1964.
- (3) LIONETTO, F., MAFFEZZOLI, A. “Monitoring the cure state of thermosetting resins by ultrasound.” *Materials*, v. 6 (9), p. 3783-3804, 2013.
- (4) 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, p. 832–839, Kingston, 2009.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.