CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM *PHASED ARRAY* NA INSPEÇÃO DE SOLDAS CIRCUNFERENCIAIS DE INCONEL® 625 EM TUBULAÇÕES DE AÇO API 5L X70 REVESTIDAS

Daniel Drumond Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores: Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.
Maurício Saldanha Motta, D.Sc.

Rio de Janeiro-RJ
Maio de 2017

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM *PHASED ARRAY* NA INSPEÇÃO DE SOLDAS CIRCUNFERENCIAIS DE INCONEL® 625 EM TUBULAÇÕES DE AÇO API 5L X70 REVESTIDAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Daniel Drumond Santos

Aprovada por:

Prof. Luis Felipe Guimarães de Souza, D.Sc. (orientador)

Prof. Mauricio Saldanha Motta, D.Sc. (coorientador)

Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D.Sc.

Prof. Leonardo Sales Araújo, D.Sc.

Eng. Marcio Humberto Silva Siqueira, D.Sc.

Rio de Janeiro-RJ
Maio de 2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S237 Santos, Daniel Drumond
Avaliação da técnica de ultrassom *Phased Array* na inspeção de soldas circunferenciais de Inconel® 625 em tubulações de aço API 5L X70 revestidas / Daniel Drumond Santos.—2017.
134f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.
Bibliografia : f. 130-134
Orientadores : Luís Felipe Guimarães de Souza
Maurício Saldanha Motta

1. Testes de ultrassom. 2. Soldagem. 3. Liga de níquel. 4. Tubulação. 5. Revestimento em metal. I. Souza, Luís Felipe Guimarães de (Orient.). II. Motta, Maurício Saldanha (Orient.). III. Título.

CDD 620.11274

Dedico aos meus pais, Geraldo e Tânia,
e à minha irmã Viviane
por todo o carinho e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me capacitado para mais esta etapa em minha vida.

Aos professores do CEFET-RJ, que muito contribuíram para a minha formação pessoal e acadêmica.

Aos Professores Luís Felipe Guimarães de Souza e Maurício Saldanha Motta pela orientação ao meu projeto.

Ao coordenador do PPEMM, professor Silvio Romero de Barros, pelo inestimável apoio sempre que foi solicitado.

Ao Instituto SENAI de Tecnologia Solda, a Coordenadora Suzana Bottega Peripolli, o Gerente Lincoln Silva Gomes, o Eng. Ramon Fonseca Ferreira e aos colegas de trabalho do setor de Serviços Tecnológicos pelo incentivo e apoio durante a realização do trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

“Posso todas as coisas naquele que me fortalece.”
Filipenses 4:13 (BÍBLIA SHEDD, 1998, p.1669).

RESUMO

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSOM *PHASED ARRAY* NA INSPEÇÃO DE SOLDAS CIRCUNFERENCIAIS DE INCONEL® 625 EM TUBULAÇÕES DE AÇO API 5L X70 REVESTIDAS

Daniel Drumond Santos

Orientadores: Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.
Maurício Saldanha Motta, D.Sc.

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

A soldagem dissimilar é um grande desafio para inspeções ultrassônicas, devido à grande atenuação que o feixe sônico sofre devido a microestrutura anisotrópica do material. No caso de tubos cladeados a interface entre dois materiais diferentes, corresponde a uma diferença de impedância acústica entre eles. A detecção de defeitos é dificultada pela fraca relação sinal-ruído recebida, o que prejudica a interpretação dos resultados. Este trabalho tem por objetivo estudar a propagação do feixe sônico em soldas circunferenciais de Inconel® 625 em tubos de aço API 5L X70 com 8" de diâmetro, revestidos com Inconel® 625, analisando a capacidade de detecção e dimensionamento de descontinuidades internas pela utilização da técnica de inspeção por ultrassom *Phased Array*. Para este estudo foi confeccionada uma junta soldada com 5 descontinuidades. Foram avaliadas as microestruturas resultantes do processo de soldagem, atenuação, relação sinal/ruído e velocidade sônica no material determinando a melhor condição de propagação do feixe sônico no metal de solda. Os parâmetros de inspeção foram avaliados por simulações computacionais no software CIVA. Análises metalográficas foram realizadas para determinar o dimensionamento real das descontinuidades. Os testes realizados demonstraram que para a detecção de descontinuidades o transdutor de 2,25MHz se apresentou com um melhor desempenho. Para a inspeção do metal de solda o modo de propagação por ondas longitudinais com ângulo de 50º apresenta melhores resultados. O dimensionamento da altura das descontinuidades foi mais preciso utilizando o transdutor com frequência de 5MHz.

Palavras-Chave:

Ultrassom *Phased Array;* Inconel® 625; Soldagem dissimilar

Rio de Janeiro-RJ
Maio de 2017

ABSTRACT

TECHNICAL EVALUATION OF *PHASED ARRAY* ULTRASOUND IN GIRTH WELDS OF INCONEL® 625 IN STEEL PIPES API 5L X70 WITH LAYER

Daniel Drumond Santos

Advisor(s): Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.
Maurício Saldanha Motta, D.Sc.

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engeneering and Materials Technology.

The dissimilar welding is a great challenge for ultrasonic inspections due to the great attenuation that the sonic beam suffers due to the anisotropic microstructure of the material. In the case of cladded pipes the interface between two different materials corresponds to a difference of acoustic impedance between them. Detection of defects is hampered by the poor signal-to-noise ratio received, which impairs the interpretation of results. This work aims to study the propagation of the sonic beam in girth welds of Inconel® 625 in API 5L X70 steel tubes with 8 inches of diameter, coated with Inconel® 625, analyzing the capacity of detection and dimensioning of internal discontinuities by the use of *Phased Array* ultrasonic inspection technique. For this study a welded joint with 5 discontinuities was produced. The microstructures resulting from the welding process, attenuation, signal-to-noise ratio and sonic velocity in the material were evaluated, determining the best sonic beam propagation condition in the weld metal. The inspection parameters were evaluated by computational simulations in the CIVA software. Metallographic analyzes were performed to determine the real size of the discontinuities. The tests demonstrated that for the detection of discontinuities the 2.25MHz transducer presented with better performance. For inspection of the weld metal the mode of propagation by longitudinal waves with angle of 50º presents better results. The dimensioning of the height of the discontinuities was more accurate using the transducer with frequency of 5MHz.

Keywords:

Ultrasound *Phased Array;* Inconel® 625; Dissimilar welding

Rio de Janeiro-RJ
May, 2017

SUMÁRIO

Introdução 23
Capítulo 1 – Revisão Bibliográfica 25
1.1 Ondas Ultrassônicas 25
1.1.1 Propagação das Ondas Ultrassônicas 25
1.1.2 Efeitos da Interface entre Diferentes Materiais 27
1.1.3 Feixe Sônico 29
1.1.4 Atenuação Sônica 30
1.2 Ultrassom *Phased Array* 33
1.2.1 Formação do Feixe *Phased Array* 33
1.2.2 Tipos de Varredura *Phased Array* 34
1.2.3 Tipos de Transdutores *Phased Array* para Aplicação Industrial 36
1.2.4 Sapatas Phased Array para Aplicação Industrial 39
1.2.5 Formas de Visualização dos Sinais Ultrassônicos 39
1.3 Soldas e Revestimentos em Tubulações com Ligas Resistentes a Corrosão . 41
1.4 Inspeção por Ultrassom em Soldas Austeníticas 43
Capítulo 2 – Materiais e Métodos 47
2.1 Fabricação dos Corpos de Prova 47
2.1.1 Elaboração da Junta Soldada 47
2.1.2 Procedimento de Soldagem e Usinagem dos Corpos de Prova 47
2.2 Ensaios Metalográficos 52
2.2.1 Macrografia 53
2.2.2 Micrografia 53
2.2.3 Medição do Tamanho de Grão 53
2.3 Ensaio de Dureza Vickers 53
2.4 Análise Química 53
2.5 Ensaio Radiográfico 54
2.6 Simulação Computacional pelo software CIVA 54
2.7 Verificação da Atenuação e Velocidade Sônica 56
2.8 Verificação da Relação Sinal/Ruído 57
2.9 Ensaio por Ultrassom através da Técnica *Phased Array* 58
2.9.1 Equipamentos, Acessórios e Blocos 58
2.9.2 Definição do Planejamento de Inspeção 60
2.9.3 Ajuste do Equipamento 64
2.9.4 Execução da Inspeção 65
2.9.5 Dimensionamento das Descontinuidades 66
2.10 Macrografia das Descontinuidades 64
Capítulo 3 – Resultados 67
3.1 Caracterização da Junta Soldada 67
3.1.1 Ensaio Macrográfico 67
3.1.2 Ensaio Micrográfico 67
3.1.3 Medição do Tamanho de Grão 71
3.2 Ensaio de Dureza Vickers 72
3.3 Análise Química 72
3.4 Ensaio Radiográfico 73

3.5 Simulação Computacional pelo software CIVA 74
3.6 Atenuação e Velocidade de Propagação do Feixe Sônico 77
3.7 Relação Sinal/Ruído 79
3.8 Ensaio por Ultrassom através da Técnica *Phased Array* 82
3.9 Macrografia para Dimensionamento Real das Descontinuidades 105
Capítulo 4 – Discussão 109
4.1 Avaliação dos resultados dos ensaios para caracterização metalográfica, análise química e dureza vickers da junta soldada 109
4.2 Avaliação da Medição do Tamanho de Grão 109
4.3 Avaliação do Ensaio Radiográfico 111
4.4 Avaliação da Simulação Computacional pelo software CIVA 111
4.5 Avaliação da Atenuação e da Velocidade Sônica nos Materiais 112
4.6 Avaliação da Relação Sinal/Ruído 113
4.7 Avaliação da Inspeção por Ultrassom através da Técnica *Phased Array* 113
4.7.1 Inspeções US-PA com Transdutor de 5MHz – Varredura Linear: 55º com Onda Transversal 116
4.7.2 Inspeção US-PA com Transdutor de 5MHz – Varredura Setorial: 35º a 70º com Onda Longitudinal 116
4.7.3 Inspeções US-PA com Transdutores de 2,25MHz e 5MHz – Varredura Linear: 50º e 55º com Onda Longitudinal 116
4.7.4 Inspeção US-PA com Transdutor de 5MHz – Varredura Linear: 0º com Onda Longitudinal 118
4.8 Avaliação da Detecção e Dimensionamento das Descontinuidades 119
Conclusão 128
Sugestão Para Trabalhos Futuros 129
Referências Bibliográficas 130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Amplitude relativa do modo de onda 28
Figura 1.2: Regiões do Feixe Sônico 29
Figura 1.3: Direção dos ângulos refratados no CIVA. a) Orientação do grão: 0º e ângulo de incidência 0º, b) Orientação do grão: 30º e ângulo de incidência 0º, c) Orientação do grão: 0º e ângulo de incidência 5º, d) Orientação do grão: 30º e ângulo de incidência 5º 32
Figura 1.4: Variação da atenuação em função da frequência. a) Soldagem manual por arco elétrico (MMA). b) Soldagem TIG. Preto: Metal de base. Vermelho e Azul: Zona de fusão em duas posições ao longo da solda 32
Figura 1.5: Princípio de funcionamento do controle eletrônico para formação do feixe com transdutor multi-elementos 33
Figura 1.6: Valores de atraso e princípios de profundidade de varredura para transdutor linear de 32 elementos focalizado a 15, 30 e 60 mm de profundidade utilizando onda longitudinal 34
Figura 1.7: Controle eletrônico para formação de Onda Linear 35
Figura 1.8: Controle eletrônico para formação de Onda Angular 35
Figura 1.9: Controle eletrônico para formação da Onda Focalizada 35
Figura 1.10: Configurações de varredura a partir das defasagens nas emissões de cada elemento 36
Figura 1.11: Parâmetros dimensionais de um arranjo linear 36
Figura 1.12: Transdutor *Phased Array* 1-D circular 37
Figura 1.13: Transdutor *Phased Array* anular de superfícies Fresnel iguais 37
Figura 1.14: Transdutor *Phased Array* matricial. (a) 1.5-D matriz. (b) 2-D matriz .. 38
Figura 1.15: Transdutor *dual linear array* 38
Figura 1.16: Transdutores *dual matrix array* 39
Figura 1.17: Sapatas padrões utilizadas na inspeção por ultrassom Phased Array 39
Figura 1.18: Visualizações Ultrassônicas B-scan, C-scan e D-scan 40
Figura 1.19: Principais visualizações do aparelho de ultrassom *Phased Array* Omniscan MX2. (a) A-scan. (b) S-scan. (c) C-scan. (d) B-scan. *Tomoview* 2.10® 41
Figura 1.20: Tipos de Revestimento. a) Ligação Metalúrgica (Clad). B) Ligação Mecânica (Lined) 42
Figura 1.21: Dispersão do feixe sônico nos contornos de grão 43
Figura 1.22: Varredura sobre a solda utilizando uma sapata (“*Water Wedge*”) 45
Figura 2.1: Detalhe do Dimensional da Junta 47
Figura 2.2: Região de retirada dos corpos de prova 49
Figura 2.3: Bloco padrão A com solda - Furos centralizados 50
Figura 2.4: Bloco padrão B com solda - Furos na linha de fusão 50
Figura 2.5: Bloco padrão curvo. (a) Visualização do entalhe superior com 6,4 mm de largura, 25 mm de comprimento e profundidade de 2,4 mm. (b) Visualização do entalhe inferior com 6,4 mm de largura, 25 mm de comprimento e profundidade de 6,4 mm 51
Figura 2.6: Detalhe do tubo revestido com Inconel® 625 e material base API 5L X70 52
Figura 2.7: Perfil de Dureza Vickers 53

Figura 2.8: Modelo da junta soldada para simulação. (a) Macrografia evidenciando os passes de raiz e enchimento. (b) Definição dos passes após soldagem 54
Figura 2.9: Orientação dos grãos das regiões definidas como anisotrópicas. CIVA 11.0® 55
Figura 2.10: Tela da função *Probe* para definição dos dados do transdutor. CIVA 11.0® 55
Figura 2.11: Tela da função *Array* Settings para definição dos parâmetros de inspeção. CIVA 11.0® 56
Figura 2.12: Verificação da atenuação do feixe sônico no metal de base revestido utilizando transdutor normal de onda longitudinal. Primeiro eco maximizado a 80,2% de amplitude da tela com um ganho equivalente de 47,7 dB 57
Figura 2.13: Verificação da relação sinal/ruído na região central da solda. (a) Verificação do ganho referente ao sinal proveniente do 3º refletor do bloco padrão A com solda maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Verificação do ganho referente ao sinal proveniente do ruído maximizado a 80% da altura total da tela utilizando o bloco padrão curvo 58
Figura 2.14: Bloco Padrão Tipo IIW 59
Figura 2.15: Bloco Padrão Tipo IIW2 60
Figura 2.16: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas transversais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. Varredura linear (azul): 55º; Elementos ativos: 16; 1º elemento: 1. (a) Index: -12 mm. (b) Index: -35 mm. ESBeamTools 4.0® 60
Figura 2.17: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura setorial (azul): 35º-70º (Step: 1º); Elementos ativos: 32; 1º elemento: 33. Varredura setorial (vermelho); Ângulo: 39º-70º (Step: 1º); Elementos ativos: 16. 1º elemento: 33. (a) Index: -1 mm. (b) Index: 10 mm. (c) Index: 20 mm. (d) Index: 30 mm. ESBeamTools 4.0® 61
Figura 2.18: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura linear (azul): 50º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 5 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 25 mm. ESBeamTools 4.0® 62
Figura 2.19: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura linear (azul): 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 0 mm. (b) Index: 17 mm. (c) Index: 35 mm. ESBeamTools 4.0® 62
Figura 2.20: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Varredura linear (azul): 50º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 10 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 40 mm. ESBeamTools 4.0® 63
Figura 2.21: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Varredura linear (azul): 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 5 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 38 mm. ESBeamTools 4.0® 63

Figura 2.22: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L. Varredura linear (azul): 0º; Elementos ativos: 16; 1º elemento: 1. (a) Index: 19 mm. (b) Index: 29 mm. (c) Index: 39 mm. ESBeamTools 4.0® 64
Figura 2.23: Varredura realizada pela técnica de Ultrassom *Phased Array* (US-PA) 66
Figura 2.24: Amostras cortadas para dimensionamento real das descontinuidades 66
Figura 3.1: Macrografia da junta soldada evidenciando grãos colunares no metal de solda. Ataque químico: Água régia 67
Figura 3.2: Aspecto microestrutural por microscopia óptica do metal de base API 5L X70. (a) Aumento: 1000x. (b) Aumento: 500x. Ataque: nital 2% 68
Figura 3.3: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região do revestimento ("*Lined*"). (a) Aumento: 200x. (b) Aumento: 500x. Ataque: Água régia 68
Figura 3.4: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região da ZTA próximo ao reforço. (a) Aumento: 1000x. (b) Aumento: 500x. Ataque: nital 2% 69
Figura 3.5: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região da ZTA próximo à raiz. (a) Aumento: 1000x. (b) Aumento: 500x. Ataque: nital 2% 69
Figura 3.6: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região da interface metal de solda e revestimento ("Lined"). (a) Aumento: 200x. (b) Aumento: 100x. Ataque: Água régia 70
Figura 3.7: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da interface entre o metal de solda da raiz e o metal de solda de enchimento. (a) Aumento: 200x. Ataque: Água régia 70
Figura 3.8: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região do metal de solda. (a) Aumento: 100x. (b) Aumento: 200x. Ataque: Água régia 71
Figura 3.9: Gráfico de dureza vickers da amostra 72
Figura 3.10: Indicação de descontinuidades identificadas pelo ensaio radiográfico. a) Falta de Fusão (FF), Porosidade (PO). b) Porosidade (PO). c) Falta de Fusão (FF), Falta de Penetração (FP), Inclusão de Escória (IE) 73
Figura 3.11: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas transversais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. Varredura linear: 55º; Elementos ativos: 16; 1º elemento: 1. (a) Index: -12 mm. (b) Index: -35 mm. CIVA 11.0® 74
Figura 3.12: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura setorial: 35º-70º (Step: 1º); Elementos ativos: 32; 1º elemento: 33. (a) Index: -1 mm. (b) Index: 10 mm. (c) Index: 20 mm. (d) Index: 30 mm. CIVA 11.0® 74
Figura 3.13: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura linear: 50º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 5 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 25 mm. CIVA 11.0® 75
Figura 3.14: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura linear: 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 0 mm. (b) Index: 17 mm. (c) Index: 35 mm. CIVA 11.0® 75

Figura 3.15: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Varredura linear: 50º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 10 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 40 mm. CIVA 11.0® 76
Figura 3.16: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Varredura linear: 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 5 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 38 mm. CIVA 11.0® 76
Figura 3.17: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L. Varredura linear: 0º; Elementos ativos: 16; 1º elemento: 1. Index: 29 mm. CIVA 11.0® 77
Figura 3.18: Atenuação da Onda Longitudinal na Região MB/*Lined* - Verificação da diferença de amplitude dos dois primeiros ecos por controle de ganho. (a) Primeira reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude. (b) Segunda reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude 77
Figura 3.19: Atenuação da Onda Longitudinal na Região Solda/*Lined* - Verificação da diferença de amplitude dos dois primeiros ecos por controle de ganho. (a) Primeira reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude. (b) Segunda reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude 78
Figura 3.20: Atenuação da Onda Transversal na Região MB/*Lined* - Verificação da diferença de amplitude dos dois primeiros ecos por controle de ganho. (a) Primeira reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude. (b) Segunda reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude 78
Figura 3.21: Atenuação da Onda Transversal na Região da Solda - Verificação da diferença de amplitude dos dois primeiros ecos por controle de ganho. (a) Primeira reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude. (b) Segunda reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude 78
Figura 3.22: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 0º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-0L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela 79
Figura 3.23: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 35º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela 80
Figura 3.24: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 40º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela 80
Figura 3.25: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 45º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela 80

Figura 3.26: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 50º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela 81
Figura 3.27: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 55º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela 81
Figura 3.28: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 60º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela 81
Figura 3.29: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 65º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela 82
Figura 3.30: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 70º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela 82
Figura 3.31: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Transversais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 83
Figura 3.32: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Transversais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 84
Figura 3.33: Descontinuidade 5. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Transversais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 85
Figura 3.34: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Setorial com Ondas Longitudinais. Ângulo de 35º a 70º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 86
Figura 3.35: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Setorial com Ondas Longitudinais. Ângulo de 35º a 70º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 87
Figura 3.36: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 88

Figura 3.37: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 89
Figura 3.38: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 90
Figura 3.39: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 91
Figura 3.40: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 92
Figura 3.41: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 93
Figura 3.42: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 94
Figura 3.43: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 95
Figura 3.44: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 96
Figura 3.45: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 97
Figura 3.46: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 98
Figura 3.47: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 99
Figura 3.48: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 100

Figura 3.49: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 101
Figura 3.50: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 102
Figura 3.51: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10® 103
Figura 3.52: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 0º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L. (a) Medição do Comprimento. (b) Amplitude. (c) Região de maior profundidade. Tomoview 2.10® 104
Figura 3.53: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 0º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L. (a) Medição do Comprimento. (b) Amplitude. (c) Região de maior profundidade. Tomoview 2.10® 105
Figura 3.54: Macrografia da Descontinuidade 1. Dimensionamento de Altura e Profundidade 106
Figura 3.55: Macrografia da Descontinuidade 2. Dimensionamento de Altura e Profundidade 106
Figura 3.56: Macrografia da Descontinuidade 3. Dimensionamento de Altura e Profundidade. (a) Profundidade Mínima. (b) Profundidade Máxima 107
Figura 3.57: Macrografia da Descontinuidade 4. Dimensionamento de Altura 108
Figura 3.58: Macrografia da Descontinuidade 5. Dimensionamento de Altura e Profundidade 108
Figura 4.1: Simulação de inspeção por US-PA em Material Isotrópico. Ondas transversais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. Varredura linear: 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. Index: -35 mm. CIVA 11.0® 112
Figura 4.2: Verificação do Eco de Interface na Região MB/Lined. (a) Utilização de Onda Longitudinal. (b) Utilização de Onda Transversal 114
Figura 4.3: Indicação do eco de fundo do tubo. Profundidade de 24 mm. Tomoview 2.10® 115
Figura 4.4: Zona morta de 4 mm na região superior da solda. Inspeção por US-PA. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Tomoview 2.10® 117
Figura 4.5: Zona morta de 4 mm na região superior da solda. Inspeção por US-PA. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Tomoview 2.10® 117
Figura 4.6: Zona morta de 4 mm na região superior da solda. Inspeção por US-PA. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Tomoview 2.10® 117
Figura 4.7: Zona morta de 6 mm na região superior da solda. Inspeção por US-PA. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Tomoview 2.10® 117
Figura 4.8: Visualização do padrão de reflexão de raiz. Tomoview 2.10® 118
Figura 4.9: Distribuição dos Dados. Comprimento das Descontinuidades 123

Figura 4.10: Distribuição dos Dados. Altura das Descontinuidades 124
Figura 4.11: Distribuição dos Dados. Profundidade das Descontinuidades 124
Figura 4.12: Distribuição dos Dados. Amplitude apresentada pelas Descontinuidades 125
Figura 4.13: Relação de Dimensionamento Real x Medido por US PA – Comprimento 126
Figura 4.14: Relação de Dimensionamento Real x Medido por US PA – Altura 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Massa Específica ou Densidade, Velocidades e Impedância Acústica de alguns Materiais 26
Tabela 2.1 – Parâmetros adotados para a soldagem 48
Tabela 2.2 – Distribuição das descontinuidades na solda circunferencial do tubo 52
Tabela 2.3 – Transdutores Normais para avaliação da atenuação 57
Tabela 2.4 – Aparelho de Ultrassom *Phased Array* 59
Tabela 2.5 – Transdutores de Ultrassom *Phased Array* 59
Tabela 2.6 – Sapatas de Ultrassom *Phased Array* 59
Tabela 2.7 – Encoder para Ultrassom *Phased Array* 59
Tabela 2.8 – Software de Análise de Resultados 59
Tabela 2.9 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 5MHz – Varredura Linear. Onda Transversal 60
Tabela 2.10 – Plano de Inspeção US-PA 5MHz – Varredura Setorial. Onda Longitudinal 61
Tabela 2.11 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 5MHz – Varredura Linear: 50º. Onda Longitudinal 62
Tabela 2.12 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 5MHz – Varredura Linear: 55º. Onda Longitudinal 62
Tabela 2.13 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 2,25MHz – Varredura Linear: 50º. Onda Longitudinal 63
Tabela 2.14 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 2,25MHz – Varredura Linear: 55º. Onda Longitudinal 63
Tabela 2.15 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 5MHz – Varredura Linear: 0º. Onda Longitudinal 64
Tabela 3.1 – Valores de tamanho de grão para as regiões analisadas 71
Tabela 3.2 – Especificação da Composição Química para o Aço API 5L X70 72
Tabela 3.3 – Especificação da Composição Química para o consumível ER-NiCrMo-3 72
Tabela 3.4 – Especificação da Composição Química para o consumível ENiCrMo3T-1/4 72
Tabela 3.5 – Composição Química especificada para o Metal Base API 5L X70 .. 73
Tabela 3.6 – Composição Química do metal de adição Inconel® 625 73
Tabela 3.7 – Composição Química do Revestimento (“*Lined*”) Inconel® 625 73
Tabela 3.8 – Valores medidos de Velocidade e Atenuação Sônica 77
Tabela 3.9 – Valores obtidos para a relação Sinal/Ruído 79
Tabela 3.10 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Transversal. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S 83
Tabela 3.11 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Transversal. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S 84
Tabela 3.12 – Descontinuidade 5. Varredura Linear com Ondas Transversal. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S 85
Tabela 3.13 – Descontinuidade 3. Varredura Setorial com Ondas Longitudinais. Ângulos de 35º a 70º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 86
Tabela 3.14 – Descontinuidade 4. Varredura Setorial com Ondas Longitudinais. Ângulos de 35º a 70º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 87
Tabela 3.15 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 88

Tabela 3.16 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 89
Tabela 3.17 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 90
Tabela 3.18 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 91
Tabela 3.19 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 92
Tabela 3.20 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 93
Tabela 3.21 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 94
Tabela 3.22 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L 95
Tabela 3.23 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64 96
Tabela 3.24 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64 97
Tabela 3.25 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64 98
Tabela 3.26 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64 99
Tabela 3.27 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64 100
Tabela 3.28 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64 101
Tabela 3.29 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64 102
Tabela 3.30 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64 103
Tabela 3.31 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Onda Longitudinais. Ângulo de 0º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L 104
Tabela 3.32 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 0º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L 105
Tabela 3.33 – Dimensionamento Real das Descontinuidades 105
Tabela 4.1 – Comprimento de Onda para a Frequência de 4 MHz 110
Tabela 4.2 – Comprimento de Onda para a Frequência de 2,25 MHz 110
Tabela 4.3 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom Phased Array - Descontinuidade 01 119
Tabela 4.4 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom Phased Array - Descontinuidade 02 119
Tabela 4.5 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom Phased Array - Descontinuidade 03 120
Tabela 4.6 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom Phased Array - Descontinuidade 04 120
Tabela 4.7 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom Phased Array - Descontinuidade 05 121
Tabela 4.8 – Melhores Configurações de Inspeção por Ultrassom Phased Array . 122

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ø Grão - Tamanho de Grão
α - Ângulo do feixe incidente - meio 1
α - Fator de Atenuação
β - Ângulo do feixe refletido ou refratado - meio 2
γ - Ângulo de Divergência
ΔV_g - Diferença de Amplitude dos dois Primeiros Ecos obtidos pelo Controle do Ganho
λ - Comprimento de Onda
μ - Coeficiente de Poisson
µm - Micrómetro (Unidade de Medida)
ρ - Massa específica

A - Abertura Ativa
API - American Petroleum Institute
ASME Section V - American Society of Mechanical Engineers – Section V
A_{TT} - Atenuação
AUT - Automatic Ultrasound, Ultrassom Automático
CP - Corpo de Prova
CRA - Corrosion Resistant Alloys, Ligas Resistentes à Corrosão
d - Distância Percorrida pelo Som
dB - Decibel (Unidade Logarítmica)
DDF - Dynamic Depth Focusing, Focalização Dinâmica na Profundidade
Def - Diâmetro Efetivo do Cristal
DIN - Deutsches Institut für Normung, Instituto Alemão para Normatização
DLA - Dual Linear Array
DMA - Dual Matrix Array
E - Módulo de Elasticidade
e - Largura do Cristal
f - Frequência
FCAW - Flux-Cored Arc Welding, Arame Tubular
FF - Falta de Fusão
FP - Falta de Penetração
G - Módulo de Rigidez
g - Espaço entre os Elementos (Largura do isolamento acústico entre dois elementos adjacentes
GTAW - Gas-Shielded Tungsten Arc Welding
Hz - Hertz (Unidade de Medida)
IE - Inclusão de Escória
IIW - International Institute of Welding
Ii - Intensidade do Feixe Incidente
IQI - Indicador de Qualidade de Imagem
Ir - Intensidade do Feixe Refletido
It - Intensidade do Feixe Transmitido
ITER - International Thermonuclear Experimental Reactor
IZFP - Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren
$K_{absorção}$ - Constante de Absorção
$K_{espalhmento}$ - Constante de Espalhamento
kHz - Quilohertz (Unidade de Medida)

K_1 - Constante para Cálculo de Divergência do Feixe - Cristal Circular
K_2 - Constante para Cálculo de Divergência do Feixe - Cristal Quadrado
MB - Metal de Base
Mef - Metade do Comprimento Efetivo do Lado Maior do Cristal Retangular
MHz - Megahertz (Unidade de Medida)
Mm - Milímetro (Unidade de Medida)
MMA - Manual Metal Arc, Soldagem Manual por Arco Elétrico
MSc. - Master of Science, Mestre em Ciências
N - Campo Próximo
n - Numero de Elementos
p - Pitch (Distância entre os Centros de Dois Elementos Adjacentes)
PO - Porosidade
POD - Probability of Detection, Probabilidade de Detecção
R - Coeficiente de Reflexão
T - Coeficiente de Transmissão
TCG - Time Corrected Gain
TIG - Tungsten Inert Gas
TRL - Transmit Receive Longitudinal, Transdutor Transmissor Receptor de Onda Longitudinal
US-PA - Ultrassom Phased Array
V - Velocidade da Onda Sonora
V_L - Velocidade de Fase da Onda Longitudinal
V_S - Velocidade de Fase da Onda Superficial
V_T - Velocidade de Fase da Onda Transversal
V_1 - Velocidade da Onda Incidente - Meio 1
V_2 - Velocidade da Onda Refratada - Meio 2
W - Eixo Passivo
Z - Impedância Acústica Característica do Meio
ZTA - Zona Termicamente Afetada
Z_1 - Impedância Acústica do Meio 1
Z_2 - Impedância Acústica do Meio 2

Introdução

"Risers" rígidos produzidos a partir de tubos de aço C-Mn com revestimento interno a base de ligas níquel estão sendo adotados como solução economicamente viável no setor "*offshore"*, uma vez que restringem a utilização de materiais nobres somente às regiões que demandam melhores propriedades, em particular uma maior resistência a corrosão em meios agressivos, nesse caso, à superfície interna dos tubos. Neste aspecto, a liga Inconel® 625 se mostra a mais adequada, por apresentar uma ótima combinação de elevada resistência mecânica e a corrosão. (KEJELIN *et al*, s.d.) (WELDING HANDBOOK – MATERIALS AND APLICATIONS – PART 2, 1998)

A utilização destes materiais mais nobres impõe limitações à aplicação da técnica de inspeção por ultrassom. Isto ocorre devido as diferentes propriedades elásticas dos materiais constituintes na junta, que acarretam variações de velocidade e amplitude da onda conforme a direção de propagação do feixe sônico (SCHUBERT *et al*, 2012).

Para a inspeção de componentes revestidos, os ensaios por radiografia, ultrassom convencional e *Phased Array* podem ser aplicados. No entanto, a radiografia é menos sensível a alguns tipos de defeitos que o ultrassom (SILK; STONEHAM; TEMPLE, 1987), porém, o feixe ultrassônico pode sofrer interferências entre as regiões de interface: revestimento, metal depositado e metal base (HUDGELL, 1994) (NAGESWARAN; TAT-HEAN GAN, 2015). Desta forma, analisar a sensibilidade do ensaio nestas condições é fundamental para a garantia da confiabilidade do resultado da inspeção.

O ultrassom *Phased Array* tem sido cada vez mais empregado em diferentes segmentos da indústria, devido as suas vantagens quanto a segurança, resolução e velocidade, comparados a outras metodologias de inspeção como o ultrassom convencional e a radiografia. O *Phased Array* pode substituir o ultrassom convencional com a vantagem de registro de 100% da inspeção, inspeciona soldas com vários ângulos a partir de uma única varredura, possibilita maior precisão na identificação de defeitos, aumento na confiabilidade e redução dos tempos de inspeção.

Este estudo se justifica pela grande aplicação de tubos revestidos com Inconel® 625 no campo offshore. As técnicas de inspeção por ultrassom, quando aplicadas em materiais austeníticos encontram dificuldades devido à grande atenuação e espalhamento do feixe sônico, o que dificulta a detecção de defeitos pela baixa relação sinal-ruído recebida.

O presente trabalho, através do estudo da propagação do feixe sônico em soldas circunferenciais de Inconel® 625 em tubos de aço API 5L X70, teve por objetivo analisar a capacidade de detecção e dimensionamento de descontinuidades internas pela utilização da técnica de inspeção por ultrassom *Phased Array* buscando um melhor entendimento das vantagens e limitações do método.

Os testes realizados demonstraram que para a detecção de descontinuidades o transdutor de 2,25MHz se apresentou com um melhor desempenho. Para a inspeção do metal de solda o modo de propagação por ondas longitudinais com ângulo de 50º apresenta melhores resultados. O dimensionamento da altura das descontinuidades foi mais preciso utilizando o transdutor com frequência de 5MHz.

Capítulo 1 – Revisão Bibliográfica

1.1 Ondas Ultrassônicas

Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que consistem na oscilação de partículas atômicas ou moleculares de uma substância, em torno de sua posição de equilíbrio (ASM METALS HANDBOOK, 1997). Se estas vibrações se repetem periodicamente durante certo tempo, o som pode ser classificado em infrassom (abaixo de 20 Hz), som audível (entre 20 Hz e 20 kHz) e ultrassom (acima de 20 kHz).

1.1.1 Propagação das Ondas Ultrassônicas

A velocidade da onda sonora é uma característica específica de cada tipo de material pois cada um apresenta um módulo de elasticidade e densidade determinado.

As ondas são classificadas de acordo com sentido de vibração das partículas, podendo ser: ondas longitudinais ou ondas de compressão, ondas transversais ou ondas de cisalhamento, ondas superficiais ou rayleigh e ondas de lamb ou ondas de chapas. As equações 1, 2 e 3 descrevem a velocidade do som em função de variáveis elásticas no material para as ondas longitudinais, transversais e superficiais, respectivamente (GOLIS, 1992) (COPPEN, 2012). A Tabela 1.1 exibe propriedades de diferentes materiais utilizados em diversos segmentos da indústria.

$$V_L = \sqrt{\frac{E\,(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \qquad \text{Equação 1}$$

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}\,x\,V_L} \qquad \text{Equação 2}$$

$$V_S = 0{,}9\;x\;V_T \qquad \text{Equação 3}$$

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/m^2];

μ = Coeficiente de Poisson, definido pela relação adimensional: ((E – 2G) / 2G);

G = Módulo de rigidez [N/m^2];

ρ = Massa específica [kg/m^3].

Tabela 1.1 - Massa Específica ou Densidade, Velocidades e Impedância Acústica de alguns Materiais (OLYMPUS, 2010)

Material	Massa Específica ou Densidade (kg/m^3)	Velocidade Transversal (m/s)	Velocidade Longitudinal (m/s)	Impedância Acústica (10^6 kg/m^2s)
Aço (Baixa Liga)	7850	3250	5940	46,62
Aço Inox Austenítico	8030	3120	5660	45,5
Aço Inox Martensítico	7670	2990	7390	56,7
Acrílico	1180	1430	2730	3,22
Água	1000	-	1480	1,48
Alumínio	2700	3130	6320	17,06
Ar	1,3	-	330	0,43
Bronze	8560	2030	4280	36,64
Cobre	8930	2260	4660	41,61
Ferro Fundido	6900	2200	5300	24,15
Ferro Fundido Cinzento	7200	2650	4600	33,12
Glicerina	1300	-	1920	2,49
Inconel® 625	8500	3020	5820	49,47
Monel	8830	2720	5350	47,24
Níquel	8800	2960	5630	49,54
Óleo	870	-	1740	1,514
Ouro	19320	1200	3240	62,6
Quartzo	2650	-	5760	15,26
Titanato de Bário	5400	-	5000	27
Titânio	4500	3110	6070	27,32
Tungstênio	19250	2870	5180	99,72
Zircaloy	6500	2360	4686	30,46

O comprimento de onda pode ser calculado pela razão entre a velocidade de propagação da onda no material e a frequência adotada.

$$\lambda = \frac{V}{f} \qquad \text{Equação 4}$$

Onde:

λ = Comprimento de onda [m];

V = Velocidade da onda sonora [m/s];

f = Frequência [Hz];

1.1.2 Efeitos da Interface entre Diferentes Materiais

A onda ultrassônica se propaga em meios distintos até penetrar no material a ser inspecionado. Ao atingir uma interface, parte da energia acústica é refletida e parte atravessa para o segundo meio. A impedância acústica é definida como o produto da massa específica pela velocidade da onda de propagação, como mostrado na equação 5 (GOLIS, 1992) (COPPEN, 2012).

$$Z = \rho \times V \qquad \text{Equação 5}$$

Onde,

Z = Impedância acústica característica do meio (kg/m^{2}s);

ρ = Massa específica [kg/m^3];

V = Velocidade do som [m/s].

A quantidade de energia sônica que é transmitida e refletida através de uma interface é expressa pelas equações 6 e 7. Os coeficientes de reflexão e transmissão não consideram perdas de energia sofridas durante a propagação do som ou condições superficiais (COPPEN, 2012).

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \qquad \text{Equação 6}$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4\,x\,(Z_2 \times Z_1)}{(Z_2 + Z_1)^2} \qquad \text{Equação 7}$$

Um dos coeficientes pode ser obtido através da equação 8.

$$R + T = 1 \qquad \text{Equação 8}$$

Onde,

R = Coeficiente de reflexão;

T = Coeficiente de transmissão;

I_i = Intensidade do feixe incidente;

I_r = Intensidade do feixe refletido;

I_t = Intensidade do feixe transmitido;

Z_1= Impedância acústica do meio 1 (kg/m^{2}s);

Z_2= Impedância acústica do meio 2 (kg/m^{2}s);

O coeficiente de reflexão tende a resultados próximos de zero quando a impedância acústica dos meios é similar, como é o caso de tubos cladeados onde temos o aço carbono no meio 1 e o Inconel® 625 no meio 2.

Quando uma onda se propaga com um ângulo diferente de zero em materiais distintos, uma porção da energia da onda é refletida com um ângulo igual ao ângulo de incidência e outra porção da onda sofre refração ao ser transmitida para o segundo meio. Calculam-se os ângulos das direções de propagação das ondas através da Lei de Snell que estabelece que a razão entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração é igual a razão da velocidade de cada onda em seu meio.

$$\frac{sen\ \alpha}{sen\ \beta} = \frac{V_1}{V_2} \qquad \text{Equação 9}$$

Onde,

α = Ângulo do feixe incidente - meio 1;

β = Ângulo do feixe refletido ou refratado - meio 2;

V_1= Velocidade da onda incidente - meio 1 [m/s];

V_2= Velocidade da onda refratada - meio 2 [m/s].

Caso o ângulo de incidência seja aumentado gradativamente, ocorrerá uma aproximação da onda longitudinal refratada à interface, até que, para um ângulo de incidência próximo de 27,36º, a onda longitudinal refratada no sistema acrílico/aço fará um ângulo de 90° com a normal, como mostrado na Figura 1.1. Este ângulo de incidência é denominado de primeiro ângulo crítico. Se o ângulo de incidência for maior que 57,14º, a onda transversal refratada no aço formará um ângulo de 90° com a normal, se propagando paralelamente a superfície. Este ângulo de incidência é denominado de segundo ângulo crítico (SANTIN, 2003).

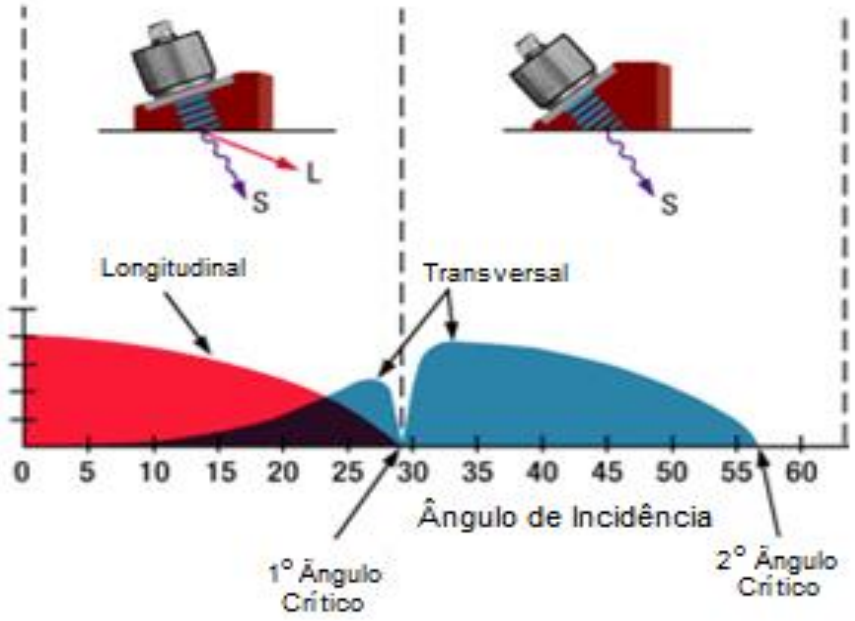


Figura 1.1: Amplitude relativa do modo de onda (OLYMPUS, 2010).

1.1.3 Feixe Sônico

O campo sônico de um transdutor é dividido em duas zonas, o campo próximo ou zona de Fresnel e o campo distante ou zona de Fraunhofer, mostrado na Figura 1.2.

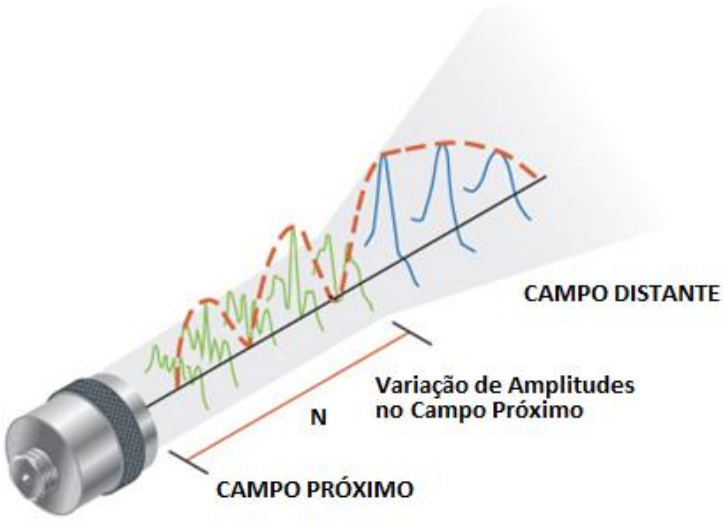


Figura 1.2: Regiões do Feixe Sônico (OLYMPUS, 2010).

O campo próximo (N) é a região próxima ao transdutor onde a pressão sônica passa por uma série de máximos e mínimos. A focalização natural do transdutor se encontra próxima a esta região. As equações 10 e 11 são usadas para calcular o comprimento do campo próximo (OLYMPUS, 2010).

Cristal Circular:

$$N = \frac{D_{ef}^2 \, x \, f}{4 \, V} \qquad \text{Equação 10}$$

Cristal Quadrado ou Cristal Retangular (com diferença entre lados de até 12%):

$$N = 1{,}3 \, \frac{M_{ef}^2 \, x \, f}{V} \qquad \text{Equação 11}$$

Onde,

N = Campo próximo

V = Velocidade do som

f = Frequência

Def = Diâmetro efetivo do cristal = 0,97 x diâmetro real do cristal

Mef = Metade do comprimento efetivo do lado maior do cristal retangular

Comprimento efetivo = 0,97 x comprimento real

A partir da distância de três campos próximos (3N), o ângulo de divergência passa a ser constante e a pressão sônica varia de modo inversamente proporcional ao quadrado da distância. Esta é a região do campo distante. As equações 12 e 13 são usadas para calcular o ângulo de divergência do feixe sônico no campo distante (SANTIN, 2003).

Cristal Circular:

$$Sen\,\gamma = K_1 \frac{V}{D_{ef}\,\mathrm{x}\,\mathrm{f}} \qquad \text{Equação 12}$$

Cristal Quadrado ou Cristal Retangular (com diferença entre lados de até 12%):

$$\mathrm{Sen}\,\gamma = K_2 \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{M_{ef}\,x\,f}} \qquad \text{Equação 13}$$

Onde,
γ = Ângulo de divergência
V = Velocidade do som
f = Frequência
Def = Diâmetro efetivo do cristal = 0,97 x diâmetro real do cristal
Mef = Metade do comprimento efetivo do lado maior do cristal retangular
Comprimento efetivo = 0,97 x comprimento real
K1 = 0,51 para divergência no limite de - 6 dB
K1 = 0,87 para divergência no limite de - 20 dB
K1 = 1,08 para divergência no limite de - 30 dB
K2 = 0,44 para divergência no limite de - 6 dB
K2 = 0,74 para divergência no limite de - 20 dB

No ensaio por ultrassom *Phased Array* é comum trabalhar dentro da região do campo próximo, diferentemente do ensaio por ultrassom convencional. Técnicas baseadas em amplitude apresentam dificuldade para avaliação de falhas dentro desta região devido as variações de pressão sonora que ocorrem (SIQUEIRA, 2014).

1.1.4 Atenuação Sônica

As ondas sonoras diminuem de intensidade à medida que se propagam pelo material, devido ao espalhamento geométrico, dispersão e absorção. A atenuação depende da frequência (f), tamanho de grão (ø grão), tipo de onda, e coeficiente de anisotropia.

$$A_{TT} = K_{absorção}\, x\, f + K_{espalhmento}\, x\, f^4 \qquad \text{Equação 14}$$

Onde:

A_{TT} = Atenuação;

$K_{absorção}$ = Constante de absorção;

$K_{espalhmento}$ = Constante de espalhamento;

f = Frequência.

A atenuação própria é um mecanismo difícil de qualificar e ainda mais difícil de quantificar. O valor da atenuação depende do tamanho, forma, distribuição das orientações e anisotropia dos grãos (PLOIX *et al*, 2006). Em materiais anisotrópicos, a velocidade é alterada dependendo da direção de propagação do feixe sônico (AIZPURUA *et al*, 2014) (TURNER, 1999).

Na prática, o fator de atenuação de um material pode ser determinado acoplando-se um transdutor de feixe reto sobre a superfície da peça e medindo a diferença de amplitude dos dois primeiros ecos através do controle de ganho do equipamento. De acordo com a equação 15, o fator de atenuação é a razão entre a diferença de amplitude dos dois primeiros ecos e a distância percorrida pelo som (COPPEN, 2012).

$$\alpha = \frac{\Delta V_g}{2d} \qquad \text{Equação 15}$$

Onde:

α = Fator de atenuação [dB/mm];

ΔV_g= Diferença de amplitude dos dois primeiros ecos obtidos pelo controle do ganho [dB];

d = Distância percorrida pelo som [mm].

O espalhamento depende da relação entre o tamanho de grão e o comprimento de onda (PAPADAKIS, 1965):

- Para ø grão < λ: Espalhamento Rayleigh;
- Para ø grão = λ: Espalhamento Estocástico;
- Para ø grão > λ: Espalhamento Difuso.

Materiais soldados, como o Inconel® 625, que exibem característica anisotrópica diminuem a energia da onda ultrassônica devido ao espalhamento. O espalhamento exerce influência na atenuação quando o tamanho de grão é da ordem de 1/10 do comprimento de onda, pois causa interferência no feixe ultrassônico gerando dispersão (CARPENTIER; NAGESWARAN; TSE, 2010) (NAGESWARAN; TAT-HEAN GAN, 2015).

Em uma mesma frequência, o comprimento de onda (λ) de ondas longitudinais é geralmente duas vezes maior ao das ondas transversais. Desta forma, as ondas longitudinais são menos sensíveis à microestrutura do material e, portanto, sofrem menos atenuação e influência do ruído (FEUILLY et al, 2013).

AIZPURUA, I. *et al* (2014), demostrou através de simulações utilizando o software CIVA que a orientação dos grãos em soldas austeníticas influencia na propagação do feixe ultrassônico, conforme mostrado na Figura 1.3.

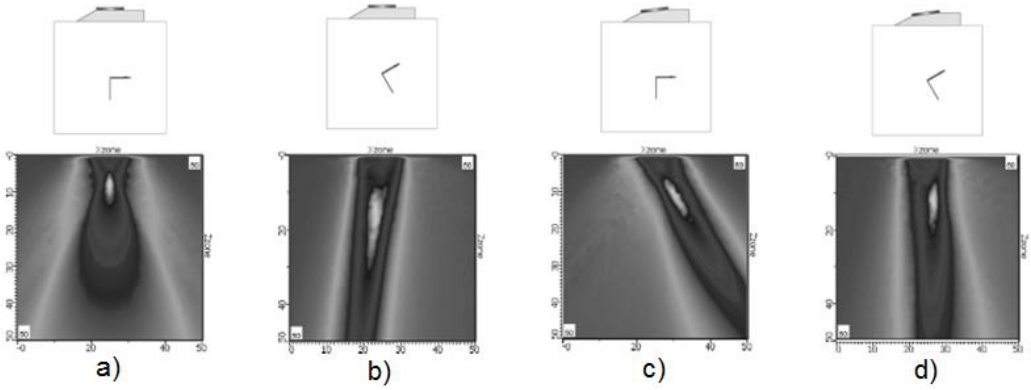


Figura 1.3: Direção dos ângulos refratados no CIVA. a) Orientação do grão: 0º e ângulo de incidência 0º, b) Orientação do grão: 30º e ângulo de incidência 0º, c) Orientação do grão: 0º e ângulo de incidência 5º, d) Orientação do grão: 30º e ângulo de incidência 5º (AIZPURUA *et al*, 2014).

O Instituto Francês de Soldagem realizou, de 1992 a 1995, juntamente com a IZFP em Saarbrücken, um programa de investigação da atenuação em inspeções por ultrassom em soldas austeníticas. No caso da soldagem do aço 316L, os ensaios demonstraram que na soldagem manual por arco elétrico (MMA), a atenuação não aumenta regularmente com a frequência, conforme mostrado na Figura 1.4.

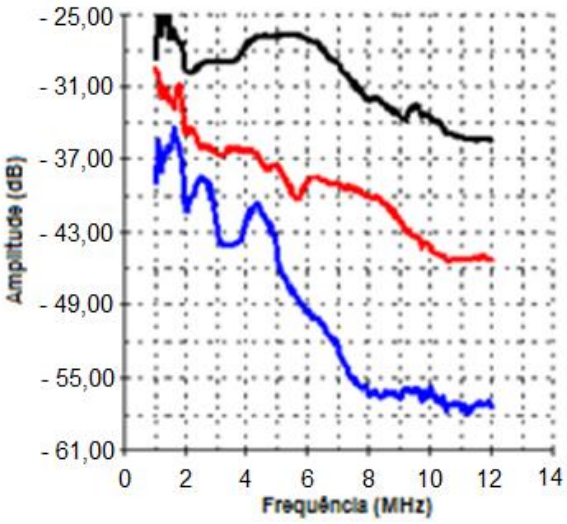


Figura 1.4: Variação da atenuação em função da frequência. Curvas obtidas com onda longitudinal com ângulo de 45º se propagando no aço 316L. Soldagem manual por arco elétrico (MMA). Preto: Metal de base. Vermelho e Azul: Zona de fusão em duas posições ao longo da solda (FLOTTÉ; CHAUVEAU, 2000).

1.2 Ultrassom *Phased Array*

A tecnologia de ultrassom *Phased Array* foi implantada na área industrial a partir dos anos 80, com o desenvolvimento de materiais piezo-compósitos permitindo a fabricação de sondas de matriz de transdutores com forma complexa.

Nos anos 90, a partir de avanços na micro-eletrônica, micro-usinagem e capacidade de processamento dos equipamentos, o ultrassom *Phased Array* foi incorporado como um novo método de inspeção não destrutiva (GINZEL, 2003).

O *Phased Array* pode substituir o ultrassom convencional com a vantagem de registro de 100% da inspeção, inspeciona soldas com vários ângulos a partir de uma única varredura, possibilita maior precisão na identificação de defeitos, aumento na confiabilidade e redução dos tempos de inspeção. Como limitações a tecnologia apresenta: maior tempo para domínio da técnica, custo relativamente elevado para implementação, parametrização do ensaio mais complexa comparada ao convencional.

1.2.1 Formação do Feixe *Phased Array*

Utilizando um transdutor multi-elementos a técnica por ultrassom *Phased Array* é capaz de controlar a direção do feixe e ponto focal em diferentes regiões da junta, a partir do controle eletrônico dos pulsos de excitação de cada elemento. Imagens em tempo real (A-scan, B-scan, C-scan e D-scan) são obtidas a partir do controle eletrônico dos pulsos de excitação de cada elemento. Este método tem apresentado resultados satisfatórios nas inspeções realizadas em soldas austeníticas (HIRASAWA; FUKUTOMI, 2010).

Para a geração do feixe em fase e com uma interferência construtiva, os vários elementos de um transdutor multi-elementos são pulsados em tempos levemente diferentes, como mostrado na Figura 1.5.

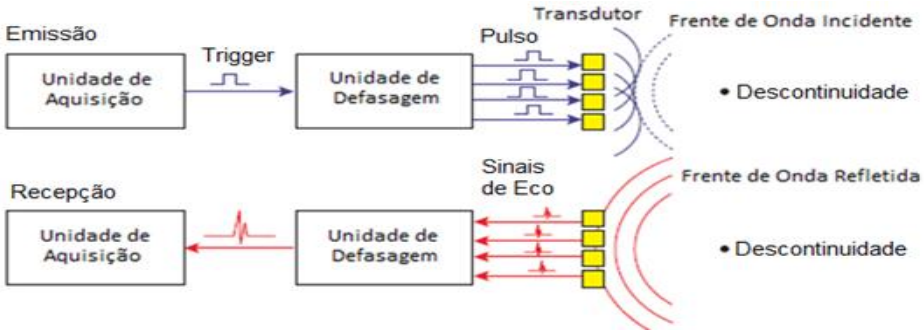


Figura 1.5: Princípio de funcionamento do controle eletrônico para formação do feixe com transdutor multi-elementos (COPPEN, 2012).

Durante a transmissão, o instrumento *Phased Array* pulsa os canais individuais com atrasos de tempo, conforme especificado na lei focal, para formar uma frente de onda pré-calculada. Na recepção o equipamento executa o inverso, recebe os pulsos com atrasos de tempo pré-calculados, para em seguida, somá-los formando um único pulso ultrassônico que é enviado para a unidade de aquisição (R/D TECH, 2004) (ASNT HANDBOOK, 1991).

Nem todos os cristais são utilizados simultaneamente. Nestes casos o aparelho utiliza uma multiplexação dinâmica para selecionar os cristais ativos dentre os cristais do transdutor, possibilitando alterações no feixe sônico. Normalmente os pulsos são gerados em grupos de 4 ou 32 elementos para aumentar ou reduzir a abertura do feixe, melhorar a sensibilidade e permitir uma nítida focalização.

O formato do gráfico de atraso da lei focal é parabólico devido à profundidade do foco. A Figura 1.6 mostra três curvas de atraso para um transdutor com 32 elementos focalizado a 15, 30 e 60 mm de profundidade. Observa-se que o atraso aumenta no sentido dos elementos centrais.

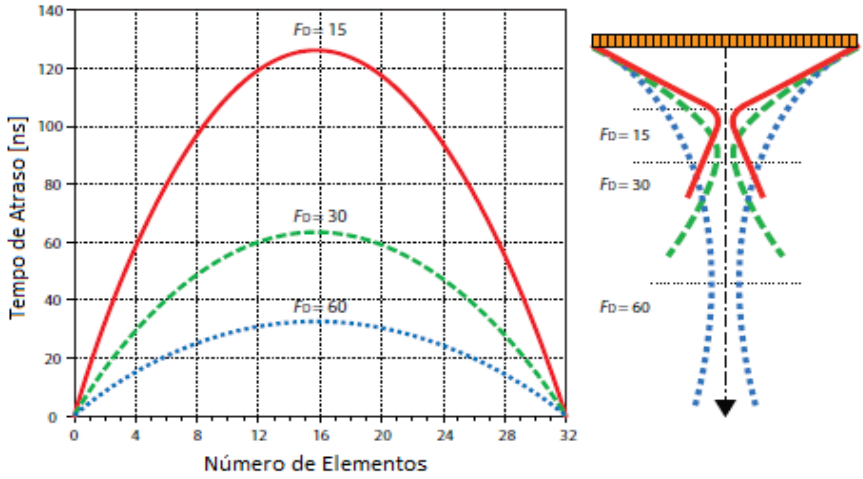


Figura 1.6: Valores de atraso e princípios de profundidade de varredura para transdutor linear de 32 elementos focalizado a 15, 30 e 60 mm de profundidade utilizando onda longitudinal (OLYMPUS, 2010).

A utilização do ultrassom pela técnica *Phased Array* proporciona aumento na confiabilidade da inspeção, com redução da subjetividade da inspeção com ultrassom manual. Os tempos de inspeção são reduzidos ao se comparar a técnica com o ultrassom convencional e a radiografia. Proporciona o aumento da probabilidade de detecção (POD) de descontinuidades, devido a capacidade de inspecionar soldas com vários ângulos a partir de uma única varredura. A possibilidade de focalização do feixe melhora a capacidade de dimensionamento dos defeitos críticos das inspeções volumétricas e a relação sinal ruído. Toda a extensão da solda inspecionada é registrada automaticamente (COPPEN, 2012).

1.2.2 Tipos de Varredura *Phased Array*

As varreduras são controladas eletronicamente através do ajuste dos parâmetros no equipamento. A varredura linear consiste na movimentação do feixe sônico com um ângulo fixo ao longo do comprimento do transdutor por um grupo de elementos ativos, como mostra a Figura 1.7. É também chamada de varredura eletrônica linear ou E-scan (R/D TECH, 2004).

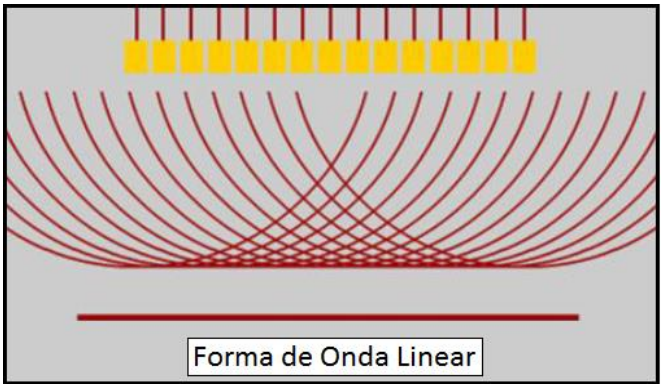


Figura 1.7: Controle eletrônico para formação de Onda Linear (OLYMPUS, 2010).

Na varredura setorial o feixe é emitido em uma determinada faixa de ângulos para uma profundidade focal específica. A movimentação do feixe é realizada pela aplicação de defasagens entre os elementos a cada nova lei focal, como mostra a Figura 1.8. É também chamada de varredura azimutal ou S-scan (R/D TECH, 2004).

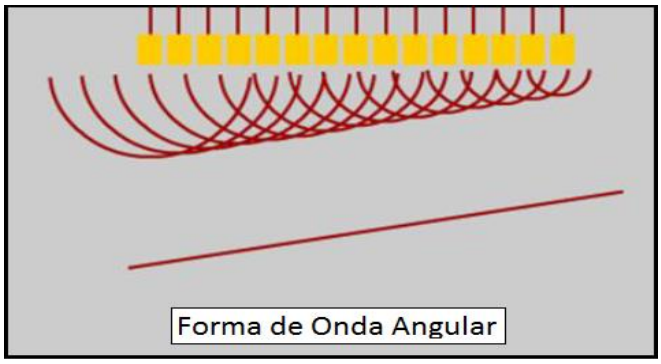


Figura 1.8: Controle eletrônico para formação de Onda Angular (OLYMPUS, 2010).

A varredura para a focalização dinâmica na profundidade (DDF - Dynamic Depth Focusing) é realizada com diferentes profundidades focais. Um único pulso focalizado é emitido, e a focalização é obtida na recepção para todas as profundidades programadas, como mostra a Figura 1.9 (R/D TECH, 2004). O foco eletrônico permite otimizar a forma e o tamanho do feixe, bem como otimizar a probabilidade de detecção (GHAEMI, 2014).

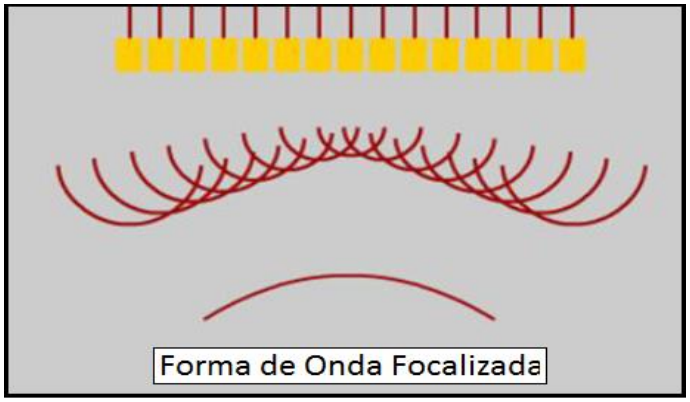


Figura 1.9: Controle eletrônico para formação da Onda Focalizada (OLYMPUS, 2010).

A partir da criação das leis focais é possível criar uma variedade de tipos de varredura como ilustrado na Figura 1.10.

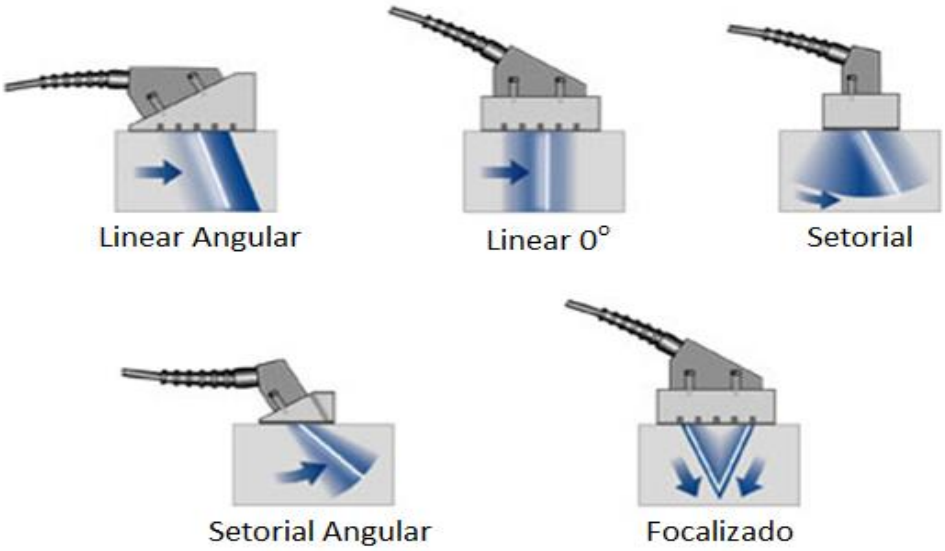


Figura 1.10: Configurações de varredura a partir das defasagens nas emissões de cada elemento (OLYMPUS, 2010).

1.2.3 Tipos de Transdutores *Phased Array* para Aplicação Industrial

Transdutores *Phased Array* são fabricados em uma variedade de formas e tamanhos para diferentes aplicações. Em geral usam-se matrizes variando de 1,5 MHz a 10 MHz, com até 128 elementos. Matrizes fora do padrão podem ser fabricadas mediante solicitação.

Transdutores com arranjo linear são construídos com um conjunto de cristais alinhados em um eixo. Isto permite ao feixe sônico ser movimentado, focalizado e defletido ao longo de um plano. Os parâmetros dimensionais de um arranjo linear são definidos conforme Figura 1.11.

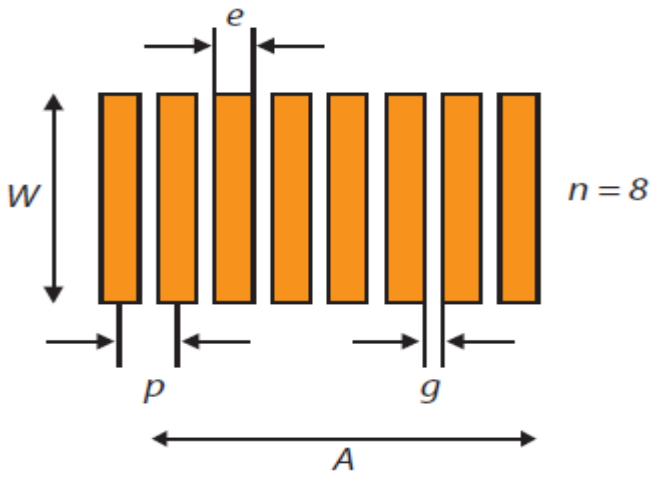


Figura 1.11: Parâmetros dimensionais de um arranjo linear (OLYMPUS, 2010).

Onde:

A = Abertura Ativa. Área total dos cristais ativos. Calcula-se pela equação:

$$A = (n\ x\ e) + g\ x\ (n - 1) \qquad \text{Equação 16}$$

n = Numero de Elementos;

p = Pitch (Distância entre os centros de dois elementos adjacentes);

e = Largura do cristal;

g = Espaço entre os elementos (Largura do isolamento acústico entre dois elementos adjacentes.

W = Eixo passivo (Não permite alterações neste eixo);

Os transdutores com arranjo circular são construídos com um conjunto de elementos dispostos em um círculo, que podem ser direcionados para o interior ou para o exterior ou ao longo de um eixo de simetria ao círculo, como mostrado na Figura 1.12.

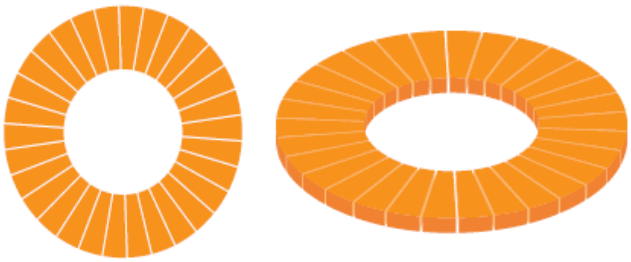


Figura 1.12: Transdutor *Phased Array* 1-D circular (OLYMPUS, 2010).

Transdutores com arranjo anular são construídos com uma série de anéis concêntricos, permitindo ao feixe sônico ser focalizado em diferentes profundidades ao longo de um eixo. A superfície dos anéis é na maioria dos casos constante, o que implica no uso de diferentes larguras para os anéis, como mostrado na Figura 1.13.

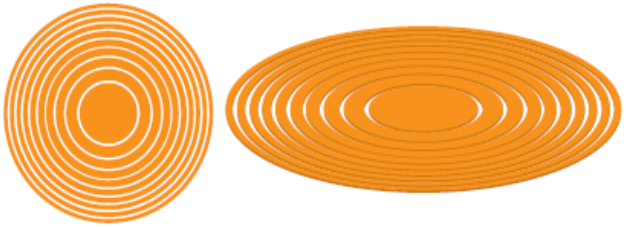


Figura 1.13: Transdutor *Phased Array* anular de superfícies Fresnel iguais (OLYMPUS, 2010).

Transdutores matriciais têm uma área ativa dividida em duas dimensões em diferentes cristais que permitem ao feixe sônico ser direcionado em 3 dimensões, pela combinação da focalização e angulação eletrônica. A Figura 1.14 ilustra transdutores de 1.5-D matriz e 2-D matriz.

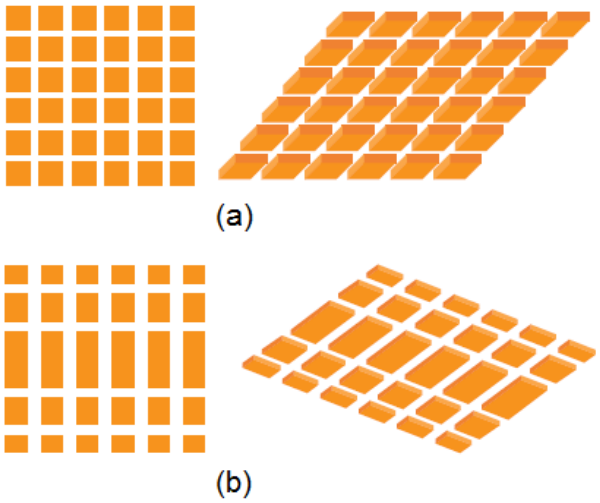


Figura 1.14: Transdutor *Phased Array* matricial. (a) 1.5-D matriz. (b) 2-D matriz (OLYMPUS, 2010).

O transdutor dual linear array (DLA) possui um array linear para transmissão e outro para recepção, separados por um isolamento acústico, como ilustrado na Figura 1.15. A concepção do transdutor é baseada no conceito de transdutores de transmissão e recepção de ondas longitudinais (TRL - Transmit Receive Longitudinal) (RAVICHANDRAN *et al*, 2015). Esta configuração dupla elimina ecos de interface, zonas mortas resultantes da sapata, gera mais energia e menos ruído nos dados de inspeção. Este transdutor realiza varreduras com ondas longitudinais variando de 30 a 80º (LAMARRE, 2016).



Figura 1.15: Transdutor dual linear array (OLYMPUS, 2016).

Os transdutores Dual Matrix Array (DMA) se diferenciam dos DLA pelo fato que os emissores e os receptores são array de matrizes ao invés de array lineares. Tem a capacidade de focar eletronicamente em profundidades diferentes e também para realizar ângulos de inclinação à procura de falhas oblíquas. Apresenta uma excelente relação sinal ruído. Transdutores DMA são capazes de gerar ondas de superfície para detecção de defeitos superficiais, o que é uma grande vantagem quando a peça é cladeada ou o material da solda é altamente atenuante, já que pode não ser possível detectar o eco de retorno a partir da parede interna da peça. A Figura 1.16 mostra transdutores dual matrix array (LAMARRE, 2016).

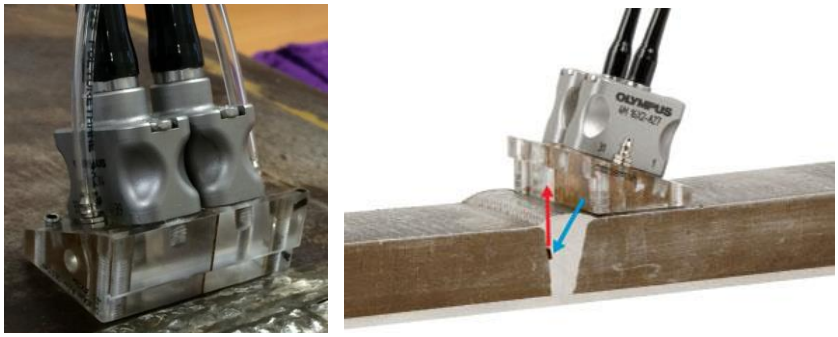


Figura 1.16: Transdutores dual matrix array (LAMARRE, 2016).

1.2.4 Sapatas *Phased Array* para Aplicação Industrial

Conceitualmente, os transdutores *Phased Array* podem gerar quaisquer ângulos sem a necessidade do uso de sapatas. Na prática a geração de ângulos extremos é dificultada, sendo aconselhável o uso de sapatas tanto para ondas longitudinais quanto para ondas transversais (SIQUEIRA, 2014).

Sapatas *Phased Array* estão disponíveis com ângulos padrões de refração de 0º, 55º e 60º em aço, para inspeção com uma faixa de ângulos variando de 30º a 70º com ondas transversais e longitudinais. Sapatas fora do padrão podem ser personalizadas para criação com diferentes formas e ângulos refratados. A Figura 1.17 mostra algumas sapatas padrões utilizadas nas inspeções com transdutores *Phased Array* (OLYMPUS, 2010).

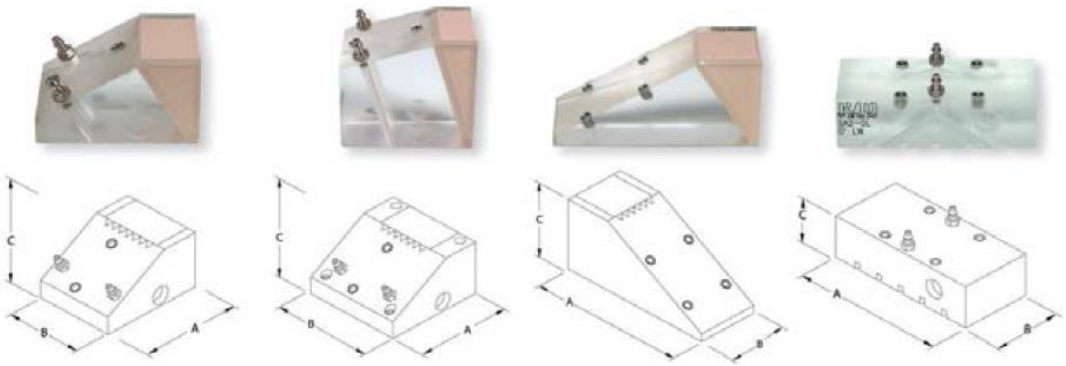


Figura 1.17: Sapatas padrões utilizadas na inspeção por ultrassom *Phased Array* (OLYMPUS, 2010).

1.2.5 Formas de Visualização dos Sinais Ultrassônicos

As informações obtidas nos sistemas de inspeção *Phased Array* podem ser apresentadas por várias formas de visualização simultaneamente com o uso do indicador de posição "*encoder*". De acordo com o modelo utilizado, pode apresentar as visualizações tipo A-scan, B-scan, C-scan, D-Scan e S-scan. A Figura 1.18 mostra os planos acumulados provenientes das visualizações B-scan, C-scan e D-scan.

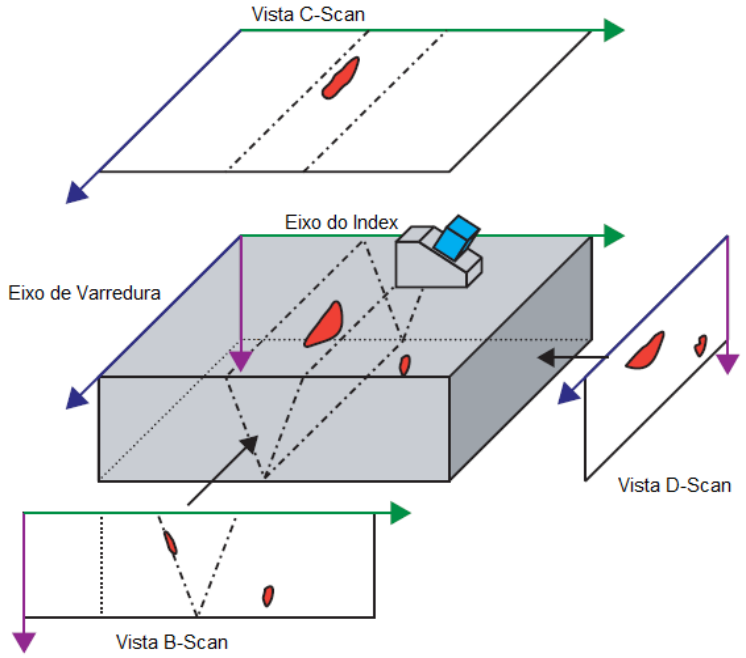


Figura 1.18: Visualizações Ultrassônicas B-scan, C-scan e D-scan (OLYMPUS, 2010).

A visualização A-scan, exibida na Figura 1.19a, é a forma primária de visualização. Representa a amplitude do sinal ultrassônico (eixo vertical) em função do percurso sônico (eixo horizontal).

Na visualização D-scan, exibida na Figura 1.19d, o eixo vertical corresponde ao percurso sônico enquanto o eixo horizontal representa a posição do transdutor.

A visualização C-scan, exibida na Figura 1.19c, apresenta os resultados de uma vista superior da peça com o plano de imagem paralelo a superfície de teste. O eixo vertical é o de digitalização e o eixo horizontal é o de posição. A posição dos dados exibidos está relacionada com as posições do encoder durante a aquisição (OLYMPUS, 2010).

A visualização S-scan, exibida na Figura 1.19b, representa uma vista em corte transversal da peça, originada de uma série de apresentações A-scan obtidas com base no ângulo refratado e tempo de atraso "*delay*". Neste tipo de apresentação o eixo horizontal corresponde à largura da peça e o eixo vertical, a profundidade. A varredura executada por uma série de ângulos gera uma imagem aproximada em forma de cone, em corte transversal (COPPEN, 2012).

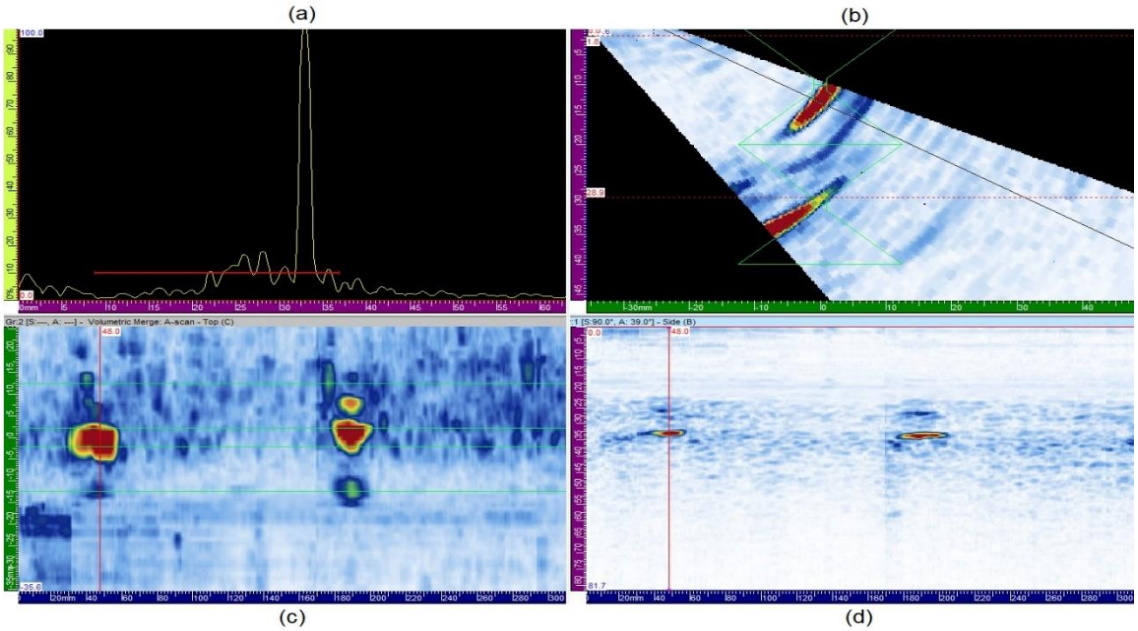


Figura 1.19: Principais visualizações do aparelho de ultrassom *Phased Array* Omniscan MX2. (a) A-scan. (b) S-scan. (c) C-scan. (d) D-scan. Tomoview 2.10®.

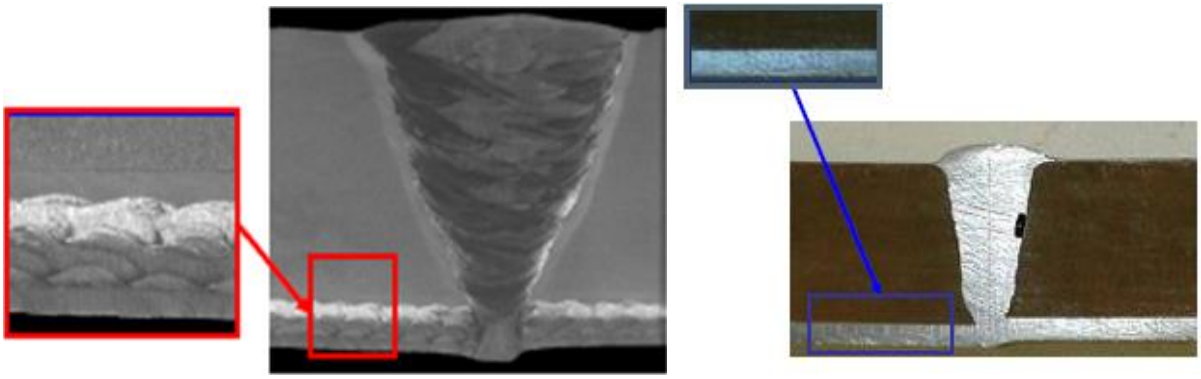
1.3 Soldas e Revestimentos em Tubulações com Ligas Resistentes a Corrosão

As ligas resistentes à corrosão são muito eficazes, mas tem alto custo para implementação. Por isso, apenas a parede interna dos tubos é revestida com uma camada de material resistente a corrosão em linhas de tubulações (LAMARRE, 2016) (SCHNAUT, 2009).

As ligas resistentes à corrosão mais utilizadas para revestimento de tubulações são Inconel® 625 ou 825; Aço inoxidável 316; Aços Duplex ou Super Duplex. A espessura de camada aplicada varia de 2,5 a 5mm e reveste a superfície interna de um tubo de aço carbono para melhorar a resistência à corrosão (FEUILLY *et al*, 2013) (VAN DER ENT *et al*, 2006).

A liga resistente à corrosão pode ser aplicada ao interior do tubo utilizando-se um processo metalúrgico (“clad”) ou mecânico (“*lined*”). A Figura 1.20 mostra o aspecto macrográfico destes modos de aplicação. No caso dos processos denominados de metalúrgicos, predomina a aplicação por soldagem onde são comumente empregados os processos de soldagem ao arco elétrico (“*weld overlay*”), que envolvem a fusão da liga resistente a corrosão sobre o metal de base. No caso dos processos denominados de mecânicos, predominam as técnicas que envolvem a união por deformação plástica, similar à soldagem por pressão, que consiste em obter a união dos componentes no estado sólido, desta forma, a ligação entre dois metais diferentes pode ser obtida por co-laminação a quente (“*hot rolling bonding*”); explosão (“*explosive welding*”) e, coextrusão (“*coextrusion*”). Na fabricação de tubos revestidos em particular, a união entre os diferentes metais pode ser obtida de duas formas:

1) Por expansão (“*expanded lined*”), onde um tubo de material resistente a corrosão sem costura é inserido dentro de um tubo de aço carbono, seguido de um processo de expansão. 2) Por laminação (“*rolled lined steel pipe*”), onde uma chapa de aço carbono e uma chapa de liga resistente a corrosão são conformadas sobre um cilindro, seguido de uma soldagem longitudinal das bordas para formar uma costura) (SCHNAUT, 2009).



(a) (b)

Figura 1.20: Tipos de Revestimento. a) Ligação Metalúrgica (Clad). B) Ligação Mecânica (Lined) (MAGRUDER, 2014).

Na solda circunferencial que une as tubulações para construção de uma linha, a mesma liga resistente à corrosão também é usada (LAMARRE, 2016). Nas soldas multipasse, os mecanismos de crescimento cristalino que atuam durante a solidificação da solda conduzem a uma textura macroscópica com grãos colunares e preferencialmente orientados (MOYSAN *et al*, 2003) (PLOIX *et al*, 2006).

A microestrutura da solda é muito mais grosseira do que na região do revestimento ou no metal base podendo fazer com que uma onda ultrassônica que se propaga através do material pode ser desviada ou fortemente atenuada (NAGESWARAN; TAT-HEAN GAN, 2015).

A dispersão das ondas ultrassônicas nos materiais é geralmente devido a interações com: contornos de grão, inclusões, trincas e vazios (GREEN, 1980). A dispersão nos contornos de grãos surge porque os grãos adjacentes geralmente terão diferentes orientações cristalográficas, como mostrado na Figura 1.21. Estes contornos de grão causam uma reflexão parcial do feixe sônico que alteram a velocidade da onda de propagação (THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 1994).

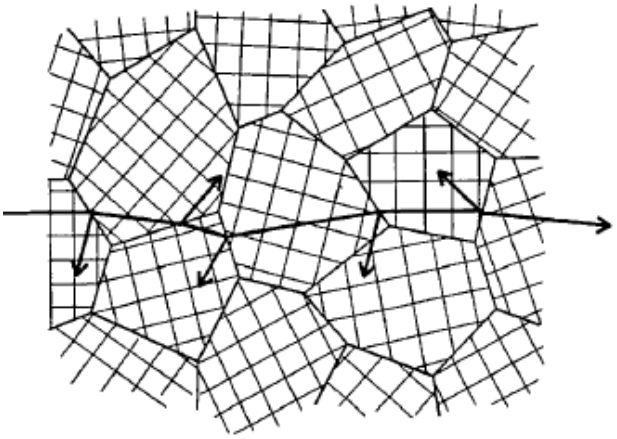


Figura 1.21: Dispersão do feixe sônico nos contornos de grão (THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 1994)

No caso de metais de solda, a forma alongada e orientação dos grãos estão diretamente relacionadas com a direção de solidificação do metal de solda. Um metal de solda austenítico com estrutura de grãos grosseiros apresenta uma dificuldade para a realização da inspeção por ultrassom, devido ao aumento da dispersão do feixe e distorção do campo sônico que ocorre neste caso (NAGESWARAN; TAT-HEAN GAN, 2015) (RANDLE, 1992).

CARPENTIER e NAGESWARAN (2010), SCHUBERT *et al* (2012), HIRASAWA e FUKUTOMI (2010) e BIυTH, FABBRI e MONJARET (s.d.) estudaram a influência da microestrutura de soldas ou revestimentos austeníticos no ensaio ultrassônico. SCHUBERT *et al* (2012) concluíram que as posições das indicações inseridas não estavam exatamente conforme as posições reais. Isto foi devido à diferença de velocidade da onda nas diferentes regiões da solda penetradas pelo feixe acústico. No estudo foi desenvolvido um sistema *Phased Array* automatizado para inspeção das soldas dissimilares capaz de realizar medições reais da propagação do feixe sônico na solda. Com estas informações pôde ser obtida uma melhor configuração para a propagação do feixe levando a resultados mais precisos na localização dos defeitos.

1.4 Inspeção por Ultrassom em Soldas Austeníticas

As técnicas ultrassônicas que utilizam ondas transversais "*full skip"* não proporcionam resultados satisfatórios quando aplicadas em soldas austeníticas ou tubos revestidos. A microestrutura anisotrópica do metal de solda gera espalhamento da onda ultrassônica, atenuação e a dispersão do feixe (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1986) (OGILVY, 1986) (DUCHARME *et al*, 2016).

As ondas longitudinais sofrem menos com esses fenômenos do que as ondas transversais, o que determina o uso de transdutores de ondas longitudinais focalizados e transdutores de ondas superficiais (VAN DER ENT *et al*, 2006).

Esta variação de velocidade de acordo com a direção de crescimento do grão é prejudicial a detecção e dimensionamento de defeitos em materiais anisotrópicos, já que antes do início da inspeção a velocidade é calibrada para percorrer um meio isotrópico, ou seja, ela é constante. Conforme a frente de onda percorre o interior do metal de solda austenítico, ela passa por grãos com diferentes orientações e consequentemente a onda terá uma velocidade diferente no interior de cada um desses grãos, o que pode causar o seu atraso ou adiantamento frente ao inicialmente calibrado. Este fenômeno causa uma imprecisão no cálculo do percurso sônico, limitando a acurácia da localização de uma descontinuidade (WAGNER *et al*, 2012).

A Absolute NDE (2016) desenvolveu uma metodologia para inspeção de soldas circunferenciais revestidas com ligas resistentes a corrosão, utilizando o ultrassom automático. O estudo propõe a divisão da região da solda em 3 áreas, sendo reforço; enchimento e raiz. Cada área é inspecionada com diferentes sondas e configurações de leis focais envolvendo apenas a incidência direta. A área do reforço é inspecionada com transdutores de ondas de "*creeping"*. A região do enchimento é inspecionada com transdutor "*dual linear array"* empregando varredura setorial. A região da raiz é inspecionada com varredura setorial focalizada utilizando também o transdutor "*dual linear array"* (DUCHARME *et al*, 2016).

De modo similar, André LAMARRE (2016) apresentou um estudo na 19th World Conference on Non-Destructive Testing mostrando os resultados da utilização de transdutores "*dual matrix array"* (DMA) e "*dual linear array"* (DLA) para a inspeção de soldas circunferenciais de ligas resistentes a corrosão. A inspeção foi feita na incidência direta com transdutores de baixa frequência (1 a 4 MHz) utilizando ondas longitudinais que favorecem a penetração na solda com maior energia e varredura setorial. A região da solda também foi dividida em 3 áreas, sendo enchimento, raiz e reforço. As duas primeiras são inspecionadas com ondas longitudinais e a última com ondas de superfície. As varreduras ocorreram com o auxílio de um scanner automatizado, o "*PipeWizard*".

FLOTTÉ e BITTENDIEBEL (2016) desenvolveram um estudo para inspeção de soldas de topo de tubos de aço inoxidável 316L com 50 mm de espessura de parede para a construção de um Reator Termonuclear Internacional Experimental (ITER) no Japão. Para a inspeção utilizaram um transdutor *Phased Array* de 2,25 MHz, 32 elementos, "*pitch"* de 1,6 mm e uma sapata otimizada para gerar ondas longitudinais a 55°. O ensaio foi realizado utilizando um braço especial com 3 graus de liberdade para permitir um acúmulo de informações das indicações. A inspeção foi realizada em duas etapas: Para o metal de solda ondas longitudinais e para a superfície utilizou-se um transdutor de ondas de "*creeping"* com remoção do reforço da solda.

FIGUEREDO e AIUB (2016) desenvolveram um procedimento de inspeção pela técnica *Phased Array* com feixes angulares longitudinais e transversais para inspeção de soldas circunferenciais de tubulações com espessuras de 40, 50 e 62,5 mm. Foram inspecionados os seguintes materiais: aço API 5L X65 com revestimento interno de 3mm de Inconel® 625 e metal de solda de Inconel® 625, aço Liga A333 Gr.8 com metal de solda de Inconel® 625, Liga de Níquel Inconel® B444 Gr.1. Para a inspeção foi utilizada uma sapata especial (“*Water Wedge”*) semelhante à mostrada na Figura 1.22, que permitiu a realização do ensaio com ondas longitudinais sobre o cordão de solda sem a remoção do reforço. Neste estudo, os resultados da inspeção por ultrassom *Phased Array* foram equivalentes ou superiores ao da inspeção radiográfica.

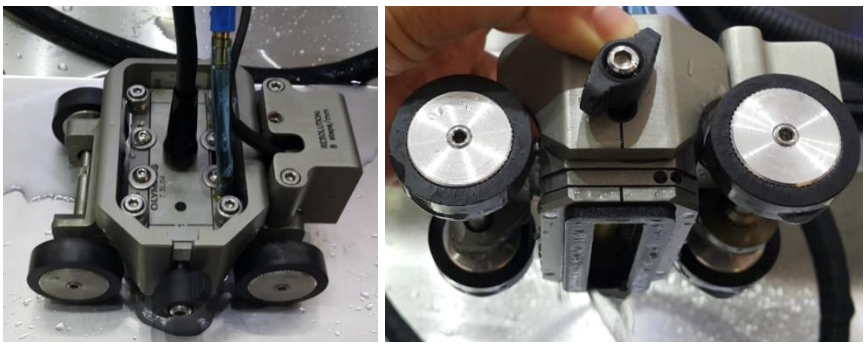


Figura 1.22: Varredura utilizando uma sapata (“*Water Wedge*”)

DUCHARME *et al* (2016), demonstraram uma metodologia de ensaio por ultrassom automático com boa repetibilidade e confiabilidade para inspeção de soldas circunferenciais com ligas resistentes a corrosão de risers. Utilizando-se uma sapata (“W*ater Wedge*”) para a inspeção juntamente com transdutores Phased Array e de ondas de *creeping*. Os primeiros milímetros abaixo da superfície são inspecionados pelo transdutor de ondas de *creeping*. Transdutores *Phased Array* cobrem todo o volume da solda com varredura setorial. A região da raiz é inspecionada somente com varredura linear. Os resultados apresentaram uma probabilidade de detecção de 90% com um nível de confiança de 95%.

CERQUEIRA (2009) elaborou um estudo para avaliação da técnica de ultrassom Phased Array na inspeção de juntas soldadas dissimilares e cladeadas com diferentes espessuras de amanteigamento. Para a inspeção foi utilizado um aparelho da Olympus Omniscan MX32/128, transdutor de 5MHz e sapata de onda transversal. Foram calibrados 6 grupos para verificação da região da raiz e volume da solda utilizando varreduras setoriais e lineares. As varreduras setoriais não foram eficientes para detecção de descontinuidades nos CPs que possuíam amanteigamento no bisel. Foi observado que a capacidade de detecção é reduzida com ondas transversais para avaliação da região de enchimento da solda. A detecção de descontinuidades localizadas nos passes de enchimento depende da sua orientação e localização, sendo que quanto mais próxima do bisel da junta soldada maior é capacidade de detecção do ensaio.

Jan VAN DER ENT *et al.* (2006) mostraram a aplicação da inspeção por ultrassom automático em soldas de tubulações de aço carbono revestidas com ligas resistentes a corrosão. Foi utilizado um transdutor de ondas longitudinais projetado especificamente para a aplicação onde a transmissão e a recepção eram separadas. O equipamento Rotoscan foi adotado com uma adaptação no software para mapeamento de todos os canais. A espessura de parede do tubo foi dividida em várias zonas de profundidade. No período de março de 2005 até o final de julho de 2005 foram inspecionadas 788 soldas com sucesso usando a nova técnica de inspeção denominada então de ultrassom automático de ligas resistentes a corrosão (AUT CRA).

Capítulo 2 – Materiais e Métodos

2.1 Fabricação dos Corpos de Prova

Foram obtidos corpos de prova a partir de juntas soldadas pelos processos TIG e Arame Tubular, com o procedimento comumente utilizado na montagem de risers rígidos descrito a seguir.

2.1.1 Elaboração da Junta Soldada

Para elaboração da junta soldada foram utilizados 2 tubos de aço API 5L X70 revestidos, com diâmetro externo de 8”, 300 mm de comprimento e 22 mm de espessura de parede, sendo 4 mm de espessura devido ao revestimento interno em Inconel® 625. A junta foi soldada com chanfro em V, ângulo do bisel de 35º, abertura de raiz de 3 mm e face (nariz) de 2 mm. O revestimento do tubo utilizado é um “*lined”* fabricado por expansão.

A solda a ser inspecionada está conforme as dimensões definidas na Figura 2.1.

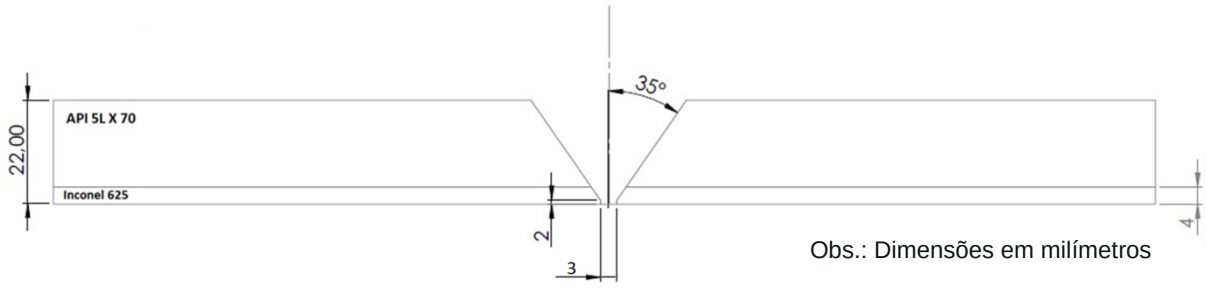


Figura 2.1: Detalhe do Dimensional da Junta.

2.1.2 Procedimento de Soldagem e Usinagem dos Corpos de Prova

Foram soldadas duas juntas para este estudo identificadas como CP01 e CP02. A raiz dos corpos de prova (CPs) foi soldada com o processo TIG (GTAW), que utiliza um eletrodo sólido de tungstênio não consumível. O arco proveniente do processo aquece e funde o material. A soldagem TIG produz uma solda limpa e de alta qualidade (MARQUES *et al*, 2007).

Para o enchimento foi utilizado o processo de soldagem Arame Tubular (FCAW). É um processo de soldagem por fusão onde o calor é gerado através de um arco elétrico estabelecido entre a peça e o arame que é alimentado continuamente. A proteção do arco e do cordão é feita por um fluxo de soldagem contido no interior do arame (MARQUES *et al*, 2007).

Os seguintes equipamentos e consumíveis de soldagem foram utilizados para a fabricação das juntas:

- Máquina de solda Miller Pipe Worx 400
- Vareta TIG (ø 2,5 mm) – Classificação: ER-NiCrMo-3 e Especificação: AWS A5.14
- Arame Tubular (ø 1,2 mm) – Classificação: ENiCrMo3T-1/4 e Especificação: AWS A5.34
- Gás de Proteção: CO_2 e Argônio

A soldagem dos CPs foi realizada conforme especificação de procedimento de soldagem (EPS). A Tabela 2.1 mostra o valor médio dos principais parâmetros em função dos passes de soldagem realizados.

Tabela 2.1 - Parâmetros adotados para a soldagem.

Processo	Parâmetros	
GTAW (Raiz e Passe Quente)	Nº de Passes	2
	Corrente	110 A / CC-
	Tensão	12 V
	Vel. Soldagem	1,07 mm/s
	Vel. de Alimentação	-
	Energia de Soldagem	1,29 (KJ/mm)
	Temperatura de Preaquecimento	> 50 ºC
	Temperatura de Interpasse	< 150 ºC
	Gás de Proteção	Argônio 18 (l/min)
FCAW (Enchimento)	Nº de Passes	20
	Corrente	160 A / CC+
	Tensão	23 V
	Vel. Soldagem	4,3 mm/s
	Vel. de Alimentação	137 mm/s
	Energia de Soldagem	0,88 (KJ/mm)
	Temperatura de Preaquecimento	> 50 ºC
	Temperatura de Interpasse	< 150 ºC
	Gás de Proteção	CO_2 15 (l/min)

O CP01 foi utilizado para a confecção dos corpos de prova para os ensaios metalográficos, dureza, análise química e para a confecção de três blocos padrões para o ensaio por ultrassom *Phased Array*. A Figura 2.2 mostra como as amostras foram retiradas da junta soldada.

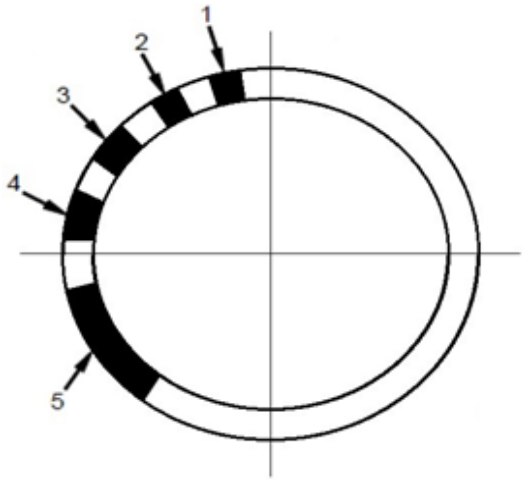


Figura 2.2: Região de retirada dos corpos de prova. (1) Macrografia e dureza vickers. (2) Micrografia, medição do tamanho de grão e análise química. (3) Bloco padrão A com solda – Furos centralizados. (4) Bloco padrão B com solda – Furos na linha de fusão. (5) Bloco padrão curvo.

Foram fabricados dois blocos padrões com solda para o ensaio por ultrassom *Phased Array*. Nestes blocos foi removido o reforço da solda (face e raiz) e foi realizada a usinagem de 03 furos passantes com ø 2,5 mm, em diferentes alturas em relação a superfície da junta, sendo: 6, 12 e 18 mm, em cada um dos blocos. Os furos foram usinados no centro da solda no bloco padrão A (Figura 2.3) e na linha de fusão no bloco padrão B (Figura 2.4), conforme as especificações da norma ASME *Section* V - Artigo 4, T-434.1.2 de 2015. Estes blocos foram utilizados para a calibração da sensibilidade do ensaio e para a avaliação da detecção dos furos e suas relações sinal-ruído na região da solda.

Conforme especificado na norma Petrobras N-1594_F (2004), um procedimento de ensaio por ultrassom é considerado qualificado, quando se detecta e avalia corretamente os furos localizados no metal soldado e na linha de fusão com uma relação sinal-ruído superior a 10%. A norma ASME *Section* V (2015), especifica que os blocos de calibração devem ser usados para calibrar a sensibilidade, qualificar o sistema de inspeção para o campo e monitorar o desempenho do sistema de forma contínua. O bloco de calibração deve ser fabricado a partir de uma seção da tubulação de linha do projeto.

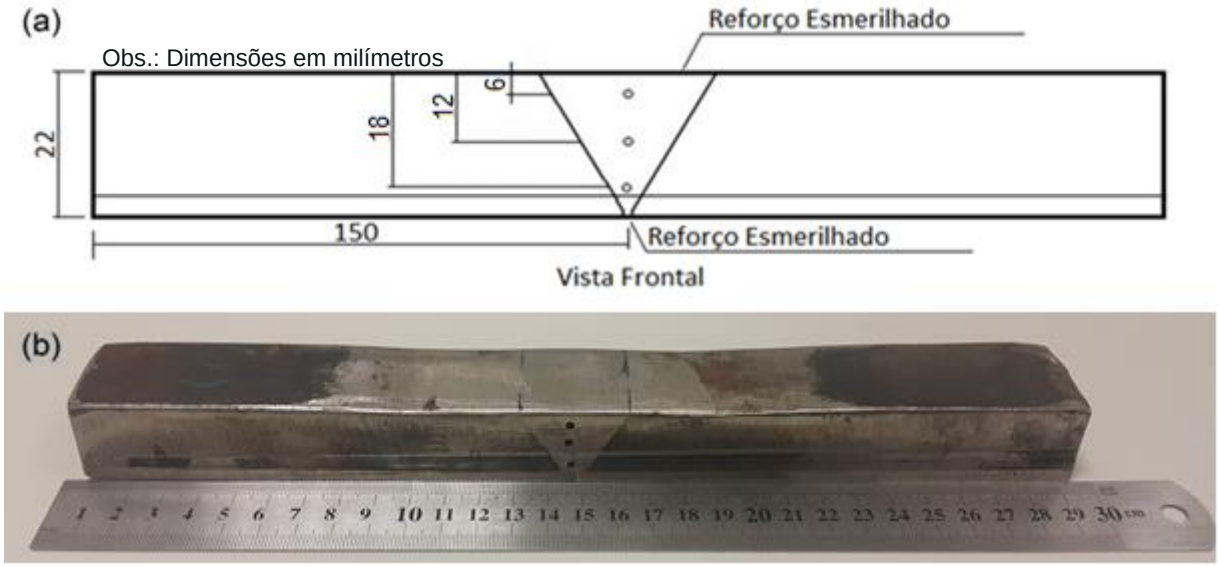


Figura 2.3: Bloco padrão A com solda - Furos centralizados.

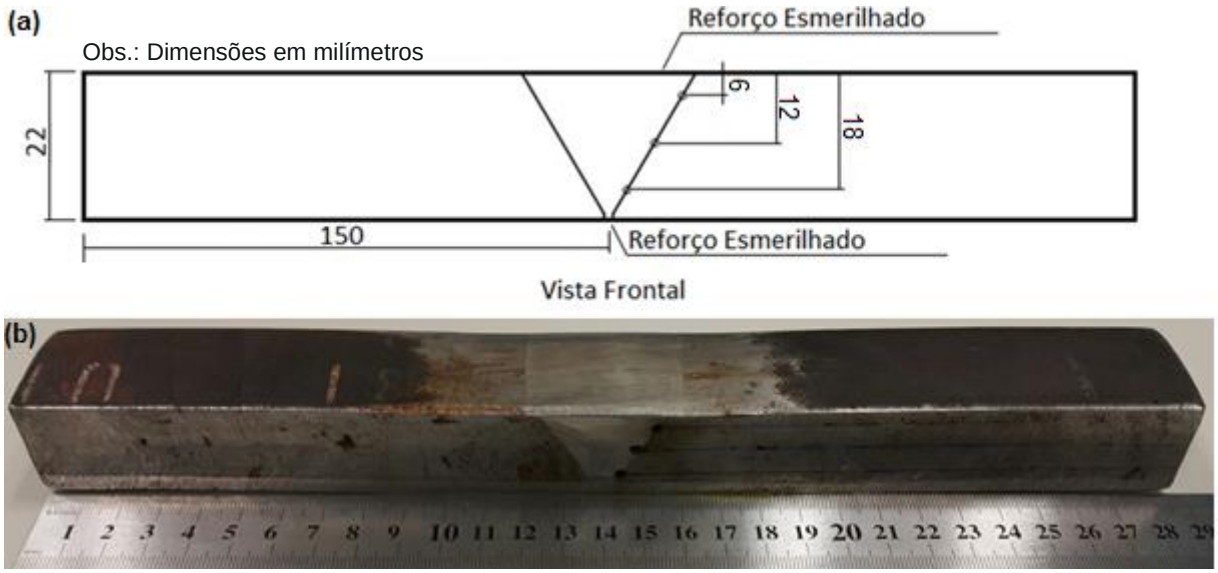


Figura 2.4: Bloco padrão B com solda - Furos na linha de fusão.

Ainda, fabricou-se um bloco padrão curvo para o ensaio por ultrassom *Phased Array*, ilustrado na Figura 2.5. Foi removido o reforço da solda e da raiz e foram usinados dois entalhes a 25 mm da extremidade do bloco, sendo um na superfície superior a 2,4 mm de profundidade e um na superfície inferior a 6,4 mm de profundidade. Conforme as especificações da norma ASME *Section* V - Artigo 4, T-434.3 de 2015, a profundidade dos entalhes deve ser de 8% a 11% da espessura do bloco. Na superfície inferior, a profundidade do entalhe deve ser acrescida da espessura do revestimento. A largura dos entalhes deve ser de no máximo 6,4 mm e o comprimento deve ser de no mínimo 25 mm.

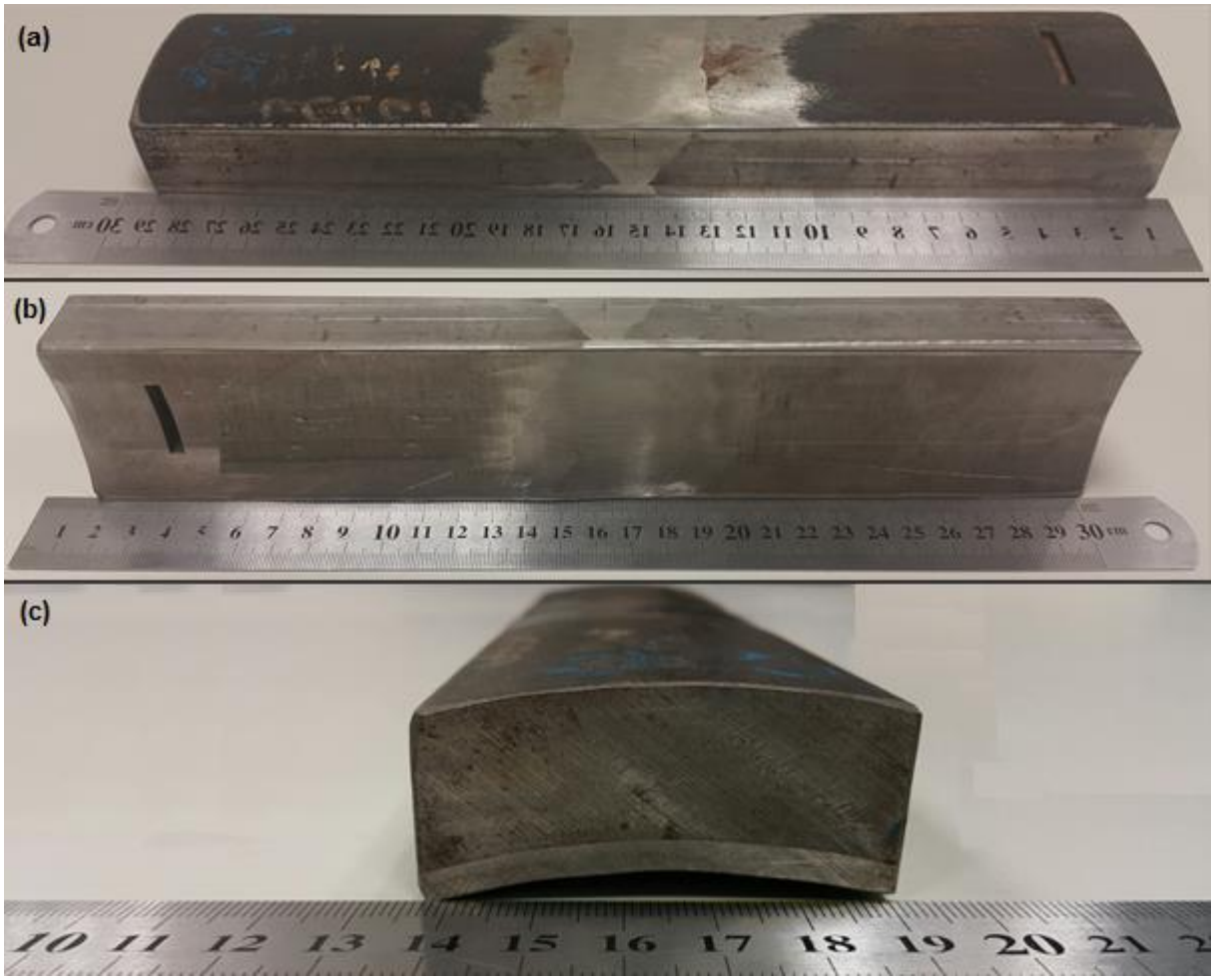


Figura 2.5: Bloco padrão curvo. (a) Visualização do entalhe superior com 6,4 mm de largura, 25 mm de comprimento e profundidade de 2,4 mm. (b) Visualização do entalhe inferior com 6,4 mm de largura, 25 mm de comprimento e profundidade de 6,4 mm. (c) Visualização frontal.

O CP02, mostrado na Figura 2.6, foi utilizado para analisar a capacidade de detecção e dimensionamento de descontinuidades internas pela técnica de inspeção por ultrassom *Phased Array*. Os resultados dos ensaios foram comparados com os resultados obtidos pelo exame radiográfico.

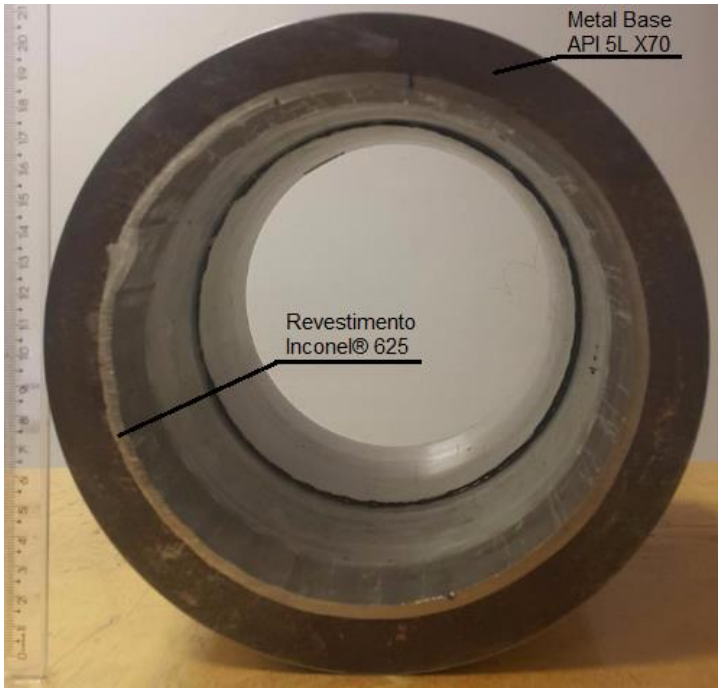


Figura 2.6: Detalhe do tubo revestido com Inconel® 625 e material base API 5L X70

Nesta junta foram propositalmente inseridas 5 descontinuidades com posicionamentos e comprimentos variados. A Tabela 2.2 especifica a localização e o comprimento das descontinuidades inseridas no corpo de prova ao longo do perímetro da solda circunferencial a partir do ponto zero utilizado como referência.

Tabela 2.2 - Distribuição das descontinuidades na solda circunferencial do tubo.

Descontinuidade	Descrição	Posição Inicial (mm)	Comprimento (mm)	Localização
1	Falta de Fusão no Chanfro	27	25	Próxima ao Chanfro
2	Falta de Fusão no Chanfro	275	10	Próxima ao Chanfro
3	Inclusão de Escória	590	35	Centro da Solda
4	Falta de Penetração na Raiz	600	15	Raiz da Solda
5	Falta de Fusão no Chanfro	590	30	Próxima ao Chanfro

2.2 Ensaios Metalográficos

Foram preparadas amostra metalográficas pela técnica convencional de lixamento com papel abrasivo e polimento com pasta de diamante até a granulometria de 1 µm. Posteriormente realizou-se o ataque químico com água régia na região da solda e revestimento (“Lined”) (Inconel® 625) e com nital 2% na região do metal de base (API 5L X70).

2.2.1 Macrografia

Após preparação da amostra, foi realizado o ensaio macrográfico na seção transversal do corpo de prova para caracterização das regiões da junta e visualização do aspecto geral.

2.2.2 Micrografia

Realizou-se a análise por microscopia óptica com um microscópio ótico de platina invertida da marca Olympus, modelo para identificação e caracterização microestrutural das regiões da junta soldada. Os ensaios micrográficos foram executados conforme norma ASTM E3-11 e as imagens foram fotografadas com a ampliação de 100 a 1000 vezes.

2.2.3 Medição do Tamanho de Grão

Foi realizada a medição do tamanho de grão da amostra na seção transversal, por análise digital de imagens em três regiões distintas localizadas no metal de base, na região do revestimento (“Lined”), na zona afetada termicamente próxima a raiz. Os ensaios foram executados conforme norma ASTM E112 utilizando o método do intercepto linear.

2.3 Ensaio de Dureza Vickers

Foi realizado o ensaio de dureza Vickers com carga de 10 kgf nas regiões do metal de base - MB, na zona termicamente afetada - ZTA e na zona fundida – ZF, de acordo com o perfil de dureza da Figura 2.7, utilizando um durômetro digital da marca Emcotest, modelo DV300.

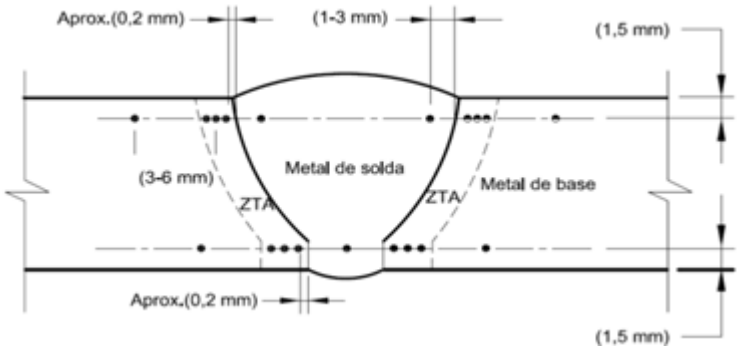


Figura 2.7: Perfil de Dureza Vickers (PETROBRAS, 2015)

2.4 Análise Química

Foi realizada análise química no metal de base API 5L X70 e nas regiões de Inconel® 625 na solda e revestimento (“Lined”), por espectrometria de emissão óptica em aparelho da marca Oxford, modelo Foundry-Master Pro.

2.5 Ensaio Radiográfico

O CP02 foi inspecionado por radiografia industrial utilizando aparelho de raios gama com uma fonte de Irídio 192. A técnica de exposição foi a parede dupla vista simples. Foram empregados 6 filmes Fuji tipo 2 e o tempo de revelação foi de 5 minutos. A sensibilidade da técnica foi verificada pelo uso de IQI DIN posicionado do lado do filme. O ensaio foi realizado e os resultados analisados por um inspetor com qualificação nível II nesta técnica. Ao final da inspeção os filmes foram digitalizados.

2.6 Simulação Computacional pelo software CIVA

O CIVA é um software avançado de simulação de ensaios não destrutivos desenvolvido pela Comissão Francesa de Energia Atômica e Energias Alternativas. É dedicado para modelagem de ultrassom, inspeção radiográfica e correntes parasitas (ROTH, D; SCHUMACHER, E, 2016).

Utilizando o software de simulação CIVA é possível avaliar a possibilidade de execução do ensaio, caracterizar o campo acústico para a configuração *Phased Array*, determinar limites de resolução, avaliar a sensibilidade para os parâmetros de inspeção estabelecidos e determinar o tamanho mínimo de um defeito detectável (CARNEVAL *et al*., 2016) (NEAU, G. HOPKINS, D., 2015).

A criação do modelo foi realizada na função *Specimen* do software. Para avaliação da anisotropia, a região da solda foi dividida manualmente após revelação dos passes de raiz e enchimento da macrografia da junta soldada, como mostrado na Figura 2.8.

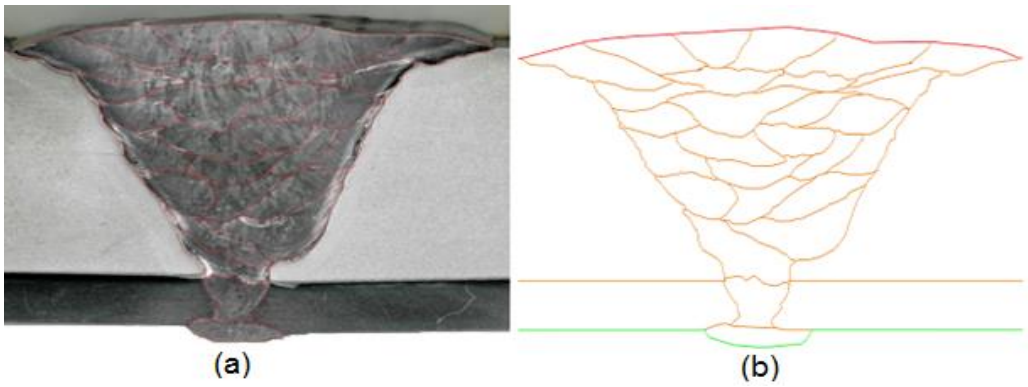


Figura 2.8: Modelo da junta soldada para simulação. (a) Macrografia evidenciando os passes de raiz e enchimento. (b) Definição dos passes após soldagem.

Para avaliação do efeito da anisotropia, a orientação dos grãos da junta soldada foi inserida manualmente após observação da macrografia e definição dos passes de soldagem, como exibido na Figura 2.9. As regiões do metal de base, revestimento (“Lined”) e passe de raiz foram definidas como isotrópicas devido à observação de uma microscópica homogênea. As regiões dos passes de enchimento foram definidas como anisotrópicas devido à observação de grãos grosseiros que foram orientados de acordo com as condições de resfriamento da junta. As propriedades do material foram obtidas no próprio aplicativo.

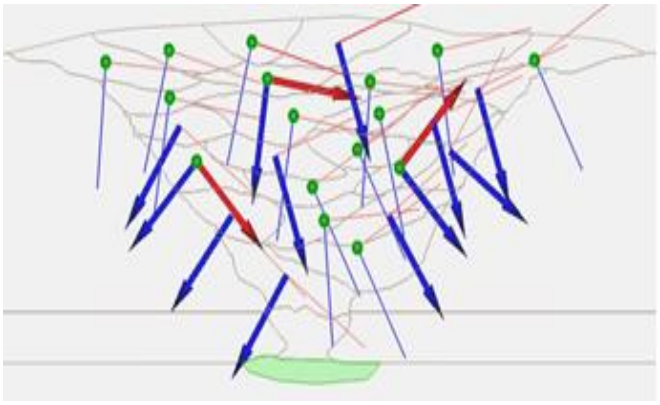


Figura 2.9: Orientação dos grãos das regiões definidas como anisotrópicas. CIVA 11.0®.

Os dados dos transdutores 5L64-A12, 2,25L64-A2 e das sapatas SA12-N55S, SA12-N60L, SA12-0L e SA2N45L-2L64 foram inseridos na função *Probe* do software para realização das simulações, como mostra a Figura 2.10.

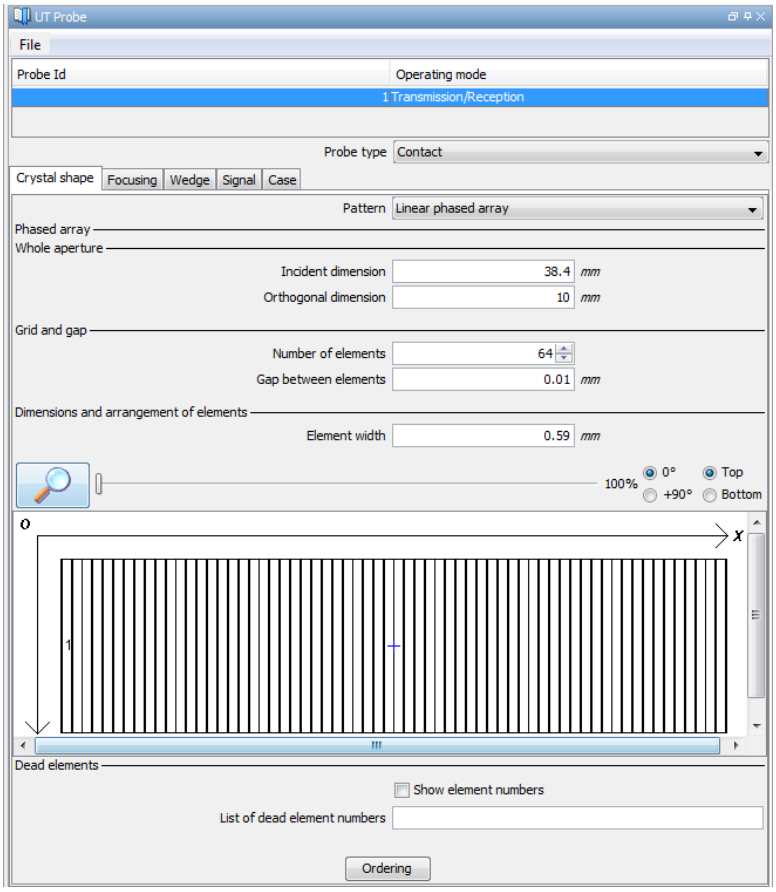


Figura 2.10: Tela da função *Probe* para definição dos dados do transdutor. CIVA 11.0®.

Os parâmetros de varredura foram inseridos na função *Inspection* do software, onde foram definidos os index (distância da frente da sapata ao centro da solda) dos transdutores e a direção de varredura.

As leis focais foram inseridas na função *Array Settings* do software (Figura 2.11), onde foram simuladas as seguintes variáveis:

- Tipo de varredura (setorial e linear);
- Tipo de onda (longitudinal e transversal);
- Quantidade de elementos excitados nos transdutores (16 e 32 elementos);
- Ângulos de 0º, 50º e 55º para varredura linear ou faixa de ângulos de 35º a 70º para varredura setorial;
- Profundidade focal (sendo a espessura total de 22mm).

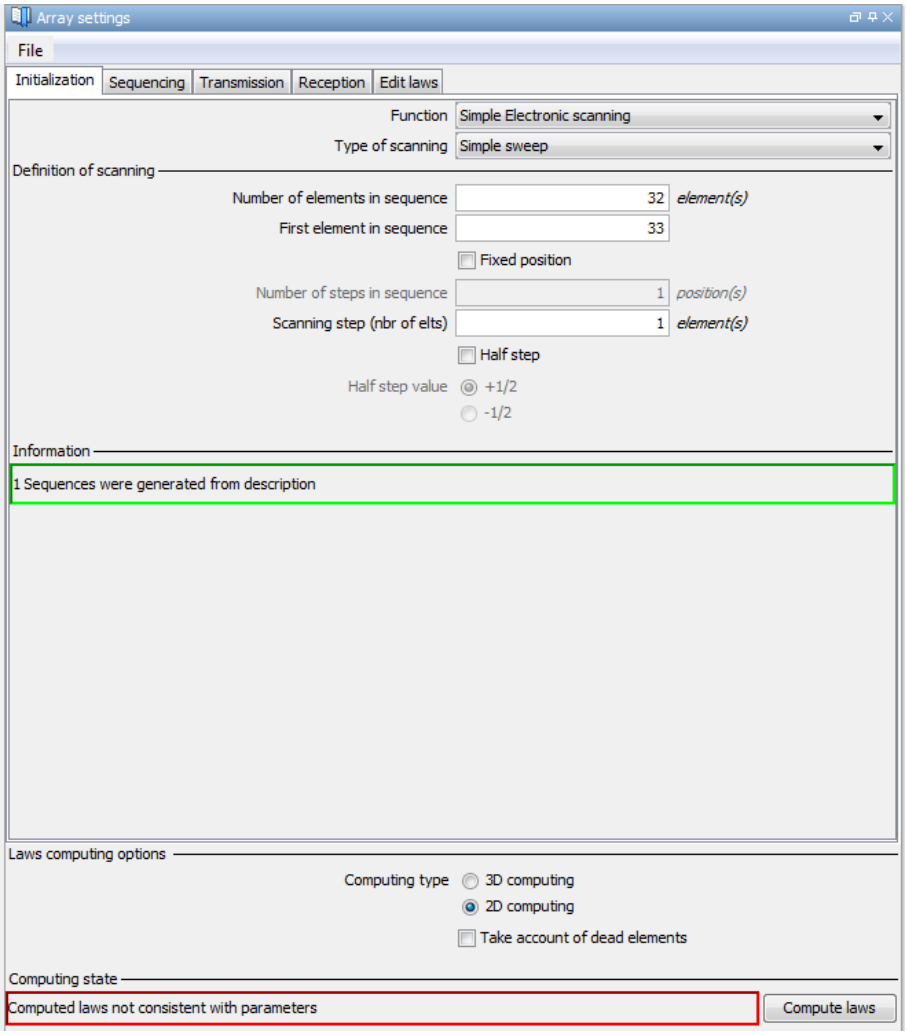


Figura 2.11: Tela da função *Array Settings* para definição dos parâmetros de inspeção. CIVA 11.0®.

2.7 Verificação da Atenuação e Velocidade Sônica

A atenuação e velocidade sônica do material foi obtida a partir de medições realizadas no bloco padrão curvo (Figura 2.5) com transdutores de incidência normal de onda longitudinal e transversal, listados na Tabela 2.3. As medições foram realizadas na região central da solda e no metal de base revestido.

Tabela 2.3 – Transdutores Normais para avaliação da atenuação

Fabricante	Modelo	Tipo de Onda	Dimensões do Cristal (mm)	Ângulo (°)	Frequência (MHz)
Olympus	MB4S	Longitudinal	ø10	0	4
GE	MB4Y	Transversal	ø10	0	4

Para as medições realizadas com o transdutor MB4Y de ondas transversais, o acoplamento foi feito com acoplante Sonotech Shear Gel, específico para esta aplicação.

A velocidade sônica do material foi obtida posicionando-se o transdutor sobre a região analisada e ajustando a velocidade no equipamento até a convergência da espessura real. A espessura do bloco padrão curvo foi confirmada com um paquímetro digital.

Para a verificação da atenuação, foi acoplado o transdutor sobre o bloco padrão curvo e verificado o ganho correspondente ao primeiro e segundo eco proveniente da reflexão de fundo do bloco maximizado a 80% de amplitude da tela. Utilizando a equação 15 foi calculado o fator de atenuação para as regiões analisadas. Para manter a pressão constante durante o acoplamento, foi posicionado um bloco tipo IIW2 sobre o transdutor, como mostrado na Figura 2.12.

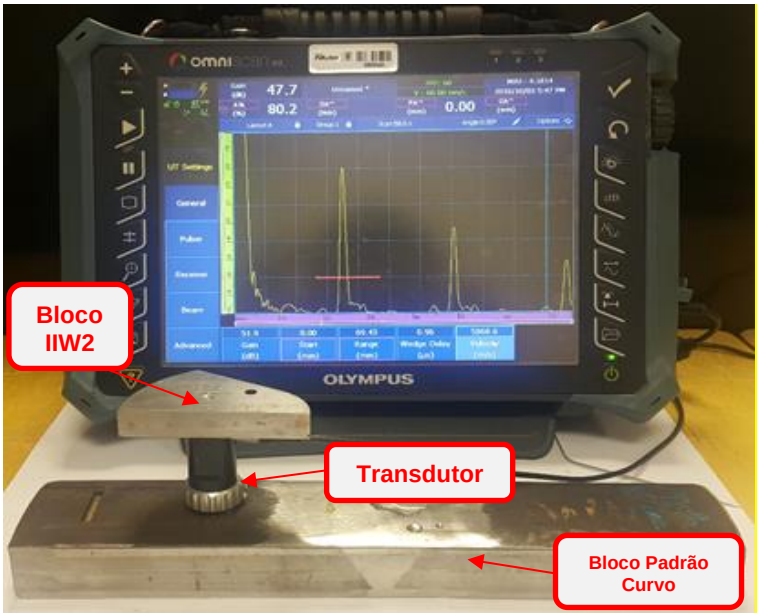


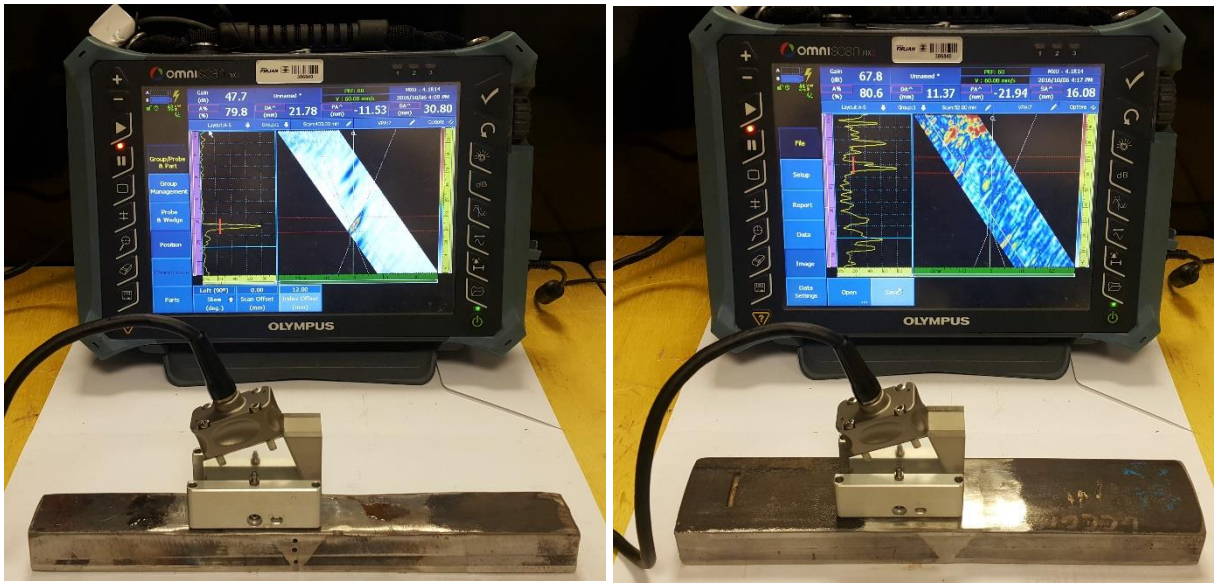
Figura 2.12: Verificação da atenuação do feixe sônico no metal de base revestido utilizando transdutor normal de onda longitudinal. Primeiro eco maximizado a 80,2% de amplitude da tela com um ganho equivalente de 47,7 dB.

2.8 Verificação da Relação Sinal/Ruído

A relação sinal/ruído do material foi avaliada na região central da solda. Foi utilizado o transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal para avaliação dos ângulos de 35º, 40º, 45º, 50º, 55º, 60º, 65º e 70º, como mostrado na Figura 2.13. Com a sapata SA12-0L com varredura linear e onda longitudinal foi avaliado o ângulo de 0º.

O transdutor 5L64A12 montado com a sapata SA12-N60L foi posicionado sobre o bloco padrão A com solda (ver Figura 2.3), de forma que o feixe sônico incida sobre o 3º furo, mais próximo a raiz da solda. O eco foi maximizado a 80% da altura total da tela e o ganho foi registrado. Logo após, o transdutor foi posicionado sobre o bloco padrão curvo (ver Figura 2.5) na mesma distância em que o sinal do furo foi detectado anteriormente a partir do centro da solda. O ganho foi novamente aumentado até os sinais de ruído atingirem 80% da altura total da tela e registrado. A diferença entre o primeiro e o segundo ganho é a relação sinal/ruído. Para a avaliação do ângulo de 0º utilizando a sapata SA12-0L o mesmo procedimento foi realizado utilizando o bloco padrão B com solda (ver Figura 2.4)

A relação sinal/ruído é considerada satisfatória se o ganho referente ao sinal proveniente do ruído for, pelo menos, 20dB maior que o ganho referente ao sinal proveniente do refletor.



(a) (b)

Figura 2.13: Verificação da relação sinal/ruído na região central da solda. (a) Verificação do ganho referente ao sinal proveniente do 3º refletor do bloco padrão A com solda maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Verificação do ganho referente ao sinal proveniente do ruído maximizado a 80% da altura total da tela utilizando o bloco padrão curvo.

2.9 Ensaio por Ultrassom através da Técnica *Phased Array*

2.9.1 Equipamentos, Acessórios e Blocos

Para a realização das análises por ultrassom *Phased Array*, foram utilizados os equipamentos e acessórios listados nas Tabelas 2.4 a 2.8.

Tabela 2.4 – Aparelho de Ultrassom *Phased Array.*

Fabricante	Modelo
Olympus	Omniscan MX2 32-128

Tabela 2.5 – Transdutores de Ultrassom *Phased Array.*

Fabricante	Modelo	Quantidade de Elementos	Frequência (MHz)	Dimensões do Elemento (mm)
Olympus	2L64-A2	64	2,25	0,6 x 10
Olympus	5L64-A12	64	5	0,6 x 10

Tabela 2.6 – Sapatas de Ultrassom *Phased Array.*

Fabricante	Modelo	Dimensões LxWxH (mm)	Ângulo Nominal da Onda Refratada no Aço (°)
Olympus	SA2-N45L-2L64	66x40x34	45° LW
Olympus	SA12-0L	62x40x20	0° LW
Olympus	SA12-N55S	73x40x45	55° SW
Olympus	SA12-N60L	61x40x53	60° LW

Tabela 2.7 – Encoder para Ultrassom *Phased Array.*

Fabricante	Modelo	Resolução
Olympus	ENC 1-2.5-DE	12 steps por mm

Tabela 2.8 – Software de Análise de Resultados.

Fabricante	Modelo	Versão
Olympus	TomoView	2.10 R5

Além dos blocos padrão A e B com solda (Figuras 2.3 e 2.4) e do bloco curvo (Figura 2.5), foram utilizados os blocos padrões Tipo IIW e IIW2 para calibração, exibidos nas Figuras 2.14 e 2.15.

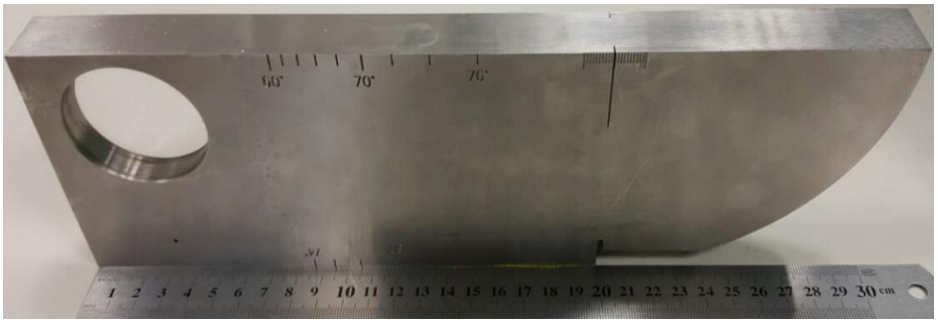


Figura 2.14: Bloco Padrão Tipo IIW

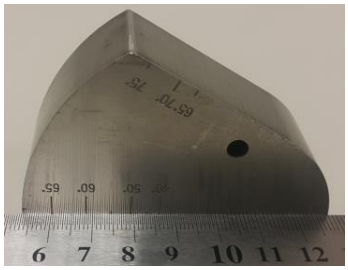


Figura 2.15: Bloco Padrão Tipo IIW2

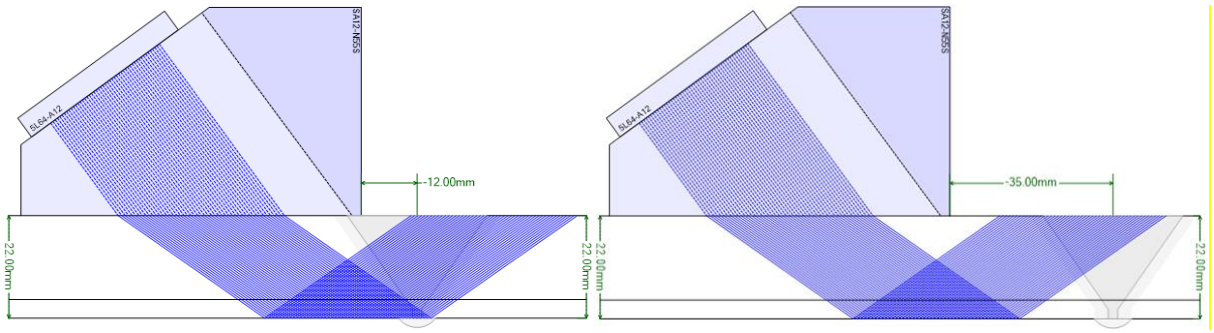
2.9.2 Definição do Planejamento de Inspeção

Os parâmetros de inspeção foram simulados no software ESBeamTools, a fim de verificar se a varredura do feixe sônico planejada irá contemplar toda a região de interesse que é: solda e ZTA. Com este software, a abertura do feixe sônico de cada ângulo é projetada sobre a seção transversal da solda, conforme ilustrado nas Figuras 2.16 a 2.22. As Tabelas 2.9 a 2.15 exibem os planos de inspeção empregados.

Para algumas inspeções, tanto na varredura eletrônica setorial, quanto na linear, não foi possível cobrir todo o volume, considerando a solda e a ZTA com apenas uma varredura. Desta forma foram utilizados 2, 3 ou 4 index (distância da frente da sapata ao centro da solda) diferentes.

Tabela 2.9 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 5MHz – Varredura Linear. Onda Transversal

Espessura (mm)	Grupo	Técnica	Transdutor	Sapata	Elemento Inicial	Quantidade Elementos	Ângulo (°)	Prof. Focal (mm)	Skew	Index (mm)
22,0	1	PA	5L64A12	SA12N55S	1	16	55	-	90-270	-12 -35



(a) (b)

Figura 2.16: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas transversais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. Varredura linear (azul): 55º; Elementos ativos: 16; 1º elemento: 1. (a) Index: -12 mm. (b) Index: -35 mm. ESBeamTools 4.0®.

Tabela 2.10 – Plano de Inspeção US-PA 5MHz – Varredura Setorial. Onda Longitudinal

Espessura (mm)	Grupo	Técnica	Transdutor	Sapata	Elemento Inicial	Quantidade Elementos	Ângulo (°)	Prof. Focal (mm)	Skew	Index (mm)
22,0	1	PA	5L64A12	SA12N60L	33	32	35 a 70	-	90-270	-1 10 20 30
	2				33	32	39 a 70	-		
	3				33	32	35 a 70	22		
	4				33	32	39 a 70	22		

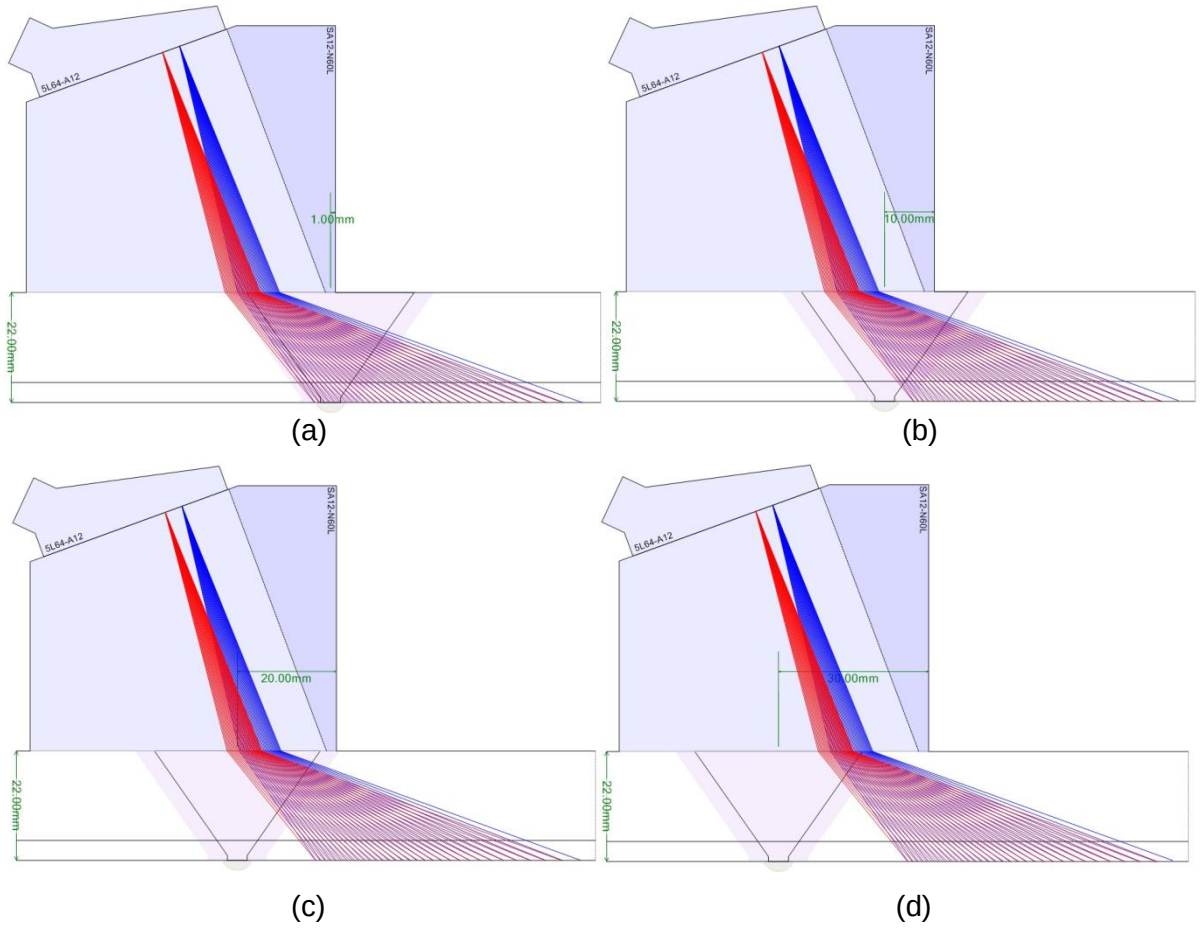


Figura 2.17: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura setorial (azul): 35º-70º (Step: 1º); Elementos ativos: 32; 1º elemento: 33. Varredura setorial (vermelho); Ângulo: 39º-70º (Step: 1º); Elementos ativos: 16. 1º elemento: 33. (a) Index: -1 mm. (b) Index: 10 mm. (c) Index: 20 mm. (d) Index: 30 mm. ESBeamTools 4.0®.

Tabela 2.11 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 5MHz – Varredura Linear: 50º.

Onda Longitudinal

Espessura (mm)	Grupo	Técnica	Transdutor	Sapata	Elemento Inicial	Quantidade Elementos	Ângulo (º)	Prof. Focal (mm)	Skew	Index (mm)
22,0	1	PA	5L64A12	SA12N60L	1	32	50	-	90-270	5
	2				1	32	50	22		20 35



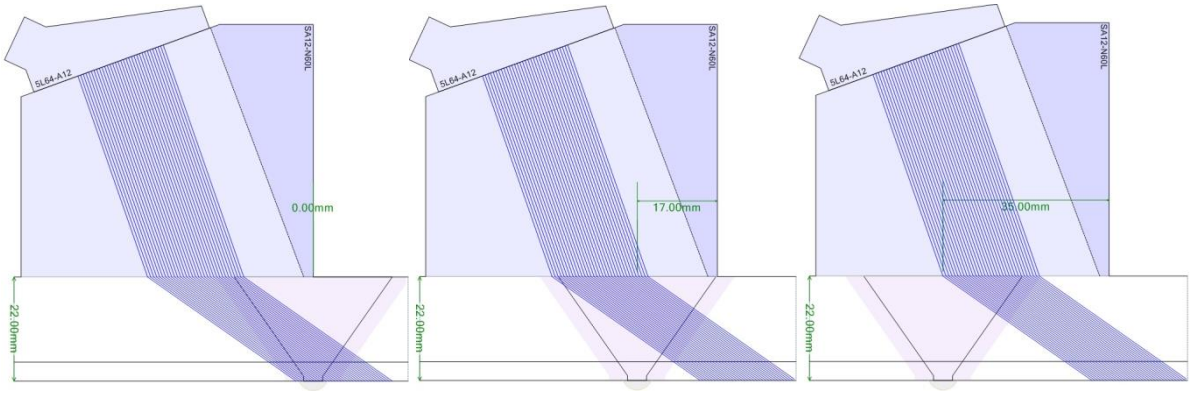
(a) (b) (c)

Figura 2.18: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura linear (azul): 50º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 5 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 25 mm. ESBeamTools 4.0®.

Tabela 2.12 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 5MHz – Varredura Linear: 55º.

Onda Longitudinal

Espessura (mm)	Grupo	Técnica	Transdutor	Sapata	Elemento Inicial	Quantidade Elementos	Ângulo (º)	Prof. Focal (mm)	Skew	Index (mm)
22,0	1	PA	5L64A12	SA12N60L	1	32	55	-	90-270	0
	2				1	32	55	22		17 35

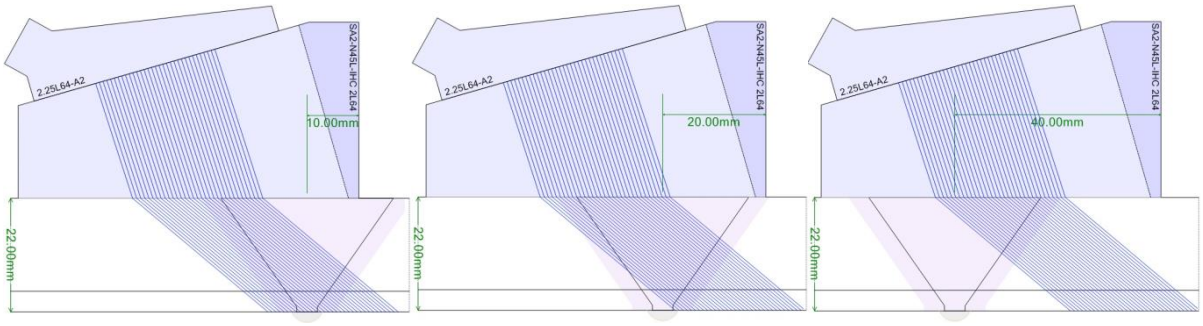


(a) (b) (c)

Figura 2.19: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura linear (azul): 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 0 mm. (b) Index: 17 mm. (c) Index: 35 mm. ESBeamTools 4.0®.

Tabela 2.13 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 2,25MHz – Varredura Linear: 50º. Onda Longitudinal

Espessura (mm)	Grupo	Técnica	Transdutor	Sapata	Elemento Inicial	Quantidade Elementos	Ângulo (°)	Prof. Focal (mm)	Skew	Index (mm)
22,0	1	PA	2,25L64A2	SA2N45L-2L64	1	32	50	-	90-270	10 20 40

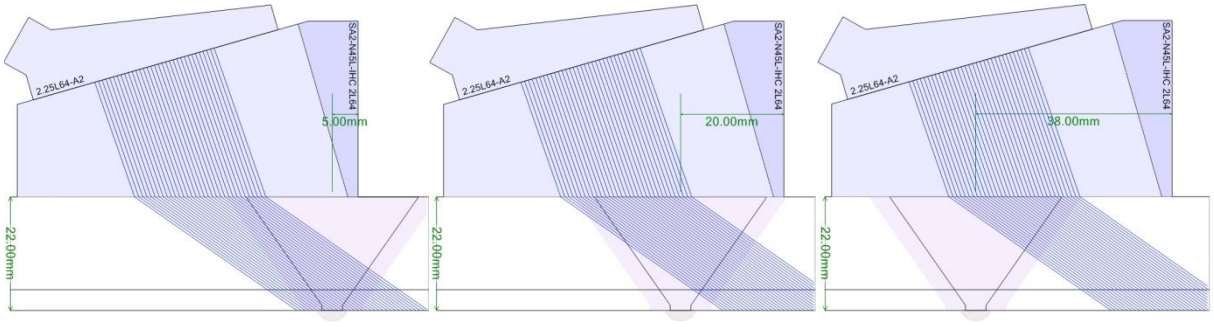


(a) (b) (c)

Figura 2.20: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Varredura linear (azul): 50º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 10 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 40 mm. ESBeamTools 4.0®.

Tabela 2.14 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 2,25MHz – Varredura Linear: 55º. Onda Longitudinal

Espessura (mm)	Grupo	Técnica	Transdutor	Sapata	Elemento Inicial	Quantidade Elementos	Ângulo (°)	Prof. Focal (mm)	Skew	Index (mm)
22,0	1	PA	2,25L64A2	SA2N45L-2L64	1	32	55	-	90-270	5 20 38

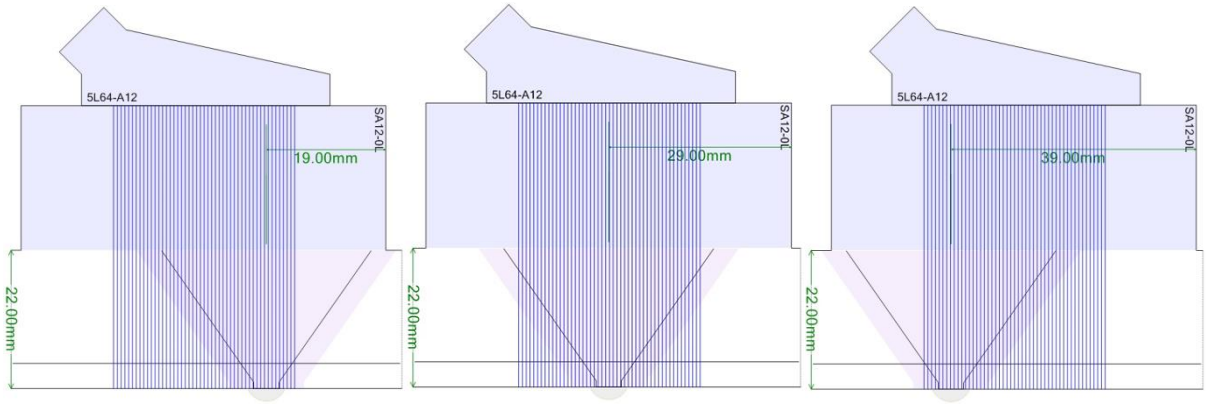


(a) (b) (c)

Figura 2.21: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Varredura linear (azul): 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 5 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 38 mm. ESBeamTools 4.0®.

Tabela 2.15 – Plano de Inspeção Ultrassom *Phased Array* 5MHz – Varredura Linear: 0º. Onda Longitudinal

Espessura (mm)	Grupo	Técnica	Cabeçote	Sapata	Elemento Inicial	Quantidade Elementos	Ângulo (º)	Profundidade Focal (mm)	Skew	Index (mm)
22,0	1	PA	5L64A12	SA12-0L	1	16	0	-	90-270	19 29 39



(a) (b) (c)

Figura 2.22: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L. Varredura linear (azul): 0º; Elementos ativos: 16; 1º elemento: 1. (a) Index: 19 mm. (b) Index: 29 mm. (c) Index: 39 mm. ESBeamTools 4.0®.

2.9.3 Ajuste do Equipamento

A calibração do aparelho, transdutores, escala e sensibilidade foi realizada com base nos requisitos da norma ASME *Section* V – Artigo 4 (2015).

O ajuste da velocidade foi realizada através do ajuste da velocidade de propagação da onda sônica no material conforme tipo de onda empregada, como especificado no item 2.7.

Devido à variação da distância percorrida dos feixes sônicos na sapata, o equipamento deve ser calibrado para que todos os feixes atinjam uma mesma profundidade determinada. O atraso sônico da sapata (“*wedge delay*”) foi realizado utilizando o raio de 100mm do bloco Tipo IIW para varreduras angulares e para a varredura 0º o bloco foi posicionado na posição horizontal para calibração utilizando a espessura de 25 mm.

Para que a sensibilidade de todas as leis focais seja equalizada em um determinado refletor, foi realizada a calibração da sensibilidade (“*sensitivity*”) utilizando o terceiro furo de 2,5 mm do bloco padrão A com furos centralizados na solda ilustrado na Figura 2.3. Esta calibração normaliza o ganho para todas as leis focais assegurando que todas produzam um sinal de amplitude semelhante em um determinado refletor.

O ajuste da TCG (“*Time Corrected Gain”*) é realizada para que a sensibilidade de todas as leis focais seja equalizada em refletores de profundidades diferentes, compensando a atenuação no material, na sapata e no direcionamento do feixe. A TCG é corrigida no tempo para que os refletores tenham respostas de amplitude iguais para todas as distâncias no caminho sônico.

Para o ajuste da TCG utilizando sapata de onda transversal SA12-N55S, foi utilizado o bloco padrão A com furos centralizados na solda ilustrado na Figura 2.3. O ganho no primeiro furo foi ajustado a 80% da altura total da tela, sendo este o GP. O transdutor foi afastado para a realização do mesmo processo nos furos subsequentes. A TCG foi traçada na extensão necessária para o ensaio de 100% do volume da junta, com 3 pontos. O GP foi corrigido posicionando-se o transdutor de forma a maximizar a 80% da altura total da tela a reflexão proveniente do entalhe inferior do bloco padrão curvo (Figura 2.5).

Para o ajuste da TCG utilizando as sapatas de onda longitudinal SA12-N60L, SA2N45L-2L64 e SA12-0L, foi utilizado o bloco padrão B com solda e furos na linha de fusão ilustrado na Figura 2.4. O ganho no primeiro furo foi ajustado a 80% da altura total da tela, sendo este o GP. O transdutor foi afastado para a realização do mesmo processo nos furos subsequentes. A TCG foi traçada na extensão necessária para o ensaio de 100% do volume da junta, com 3 pontos.

2.9.4 Execução da Inspeção

Para a execução da inspeção foi removido o reforço da solda. A superfície de contato entre o transdutor e a peça foi limpa, estando livre de irregularidades que possam interferir no acoplamento e movimentação do transdutor, tais como rugosidade excessiva, carepas, respingos, tintas, etc.

O acoplante utilizado durante a inspeção foi água potável. A inspeção por ultrassom *Phased Array* foi realizada empregando-se ondas transversais com feixe rebatido (“full skip”) para verificação de descontinuidades do tipo falta de fusão no chanfro e empregando-se ondas longitudinais com incidência direta (“half skip”) sobre o metal de solda para verificação de defeitos internos na solda. Cada varredura foi realizada paralelamente ao eixo central do cordão de solda a uma distância fixa, utilizando um guia de referência, ilustrado na Figura 2.23.

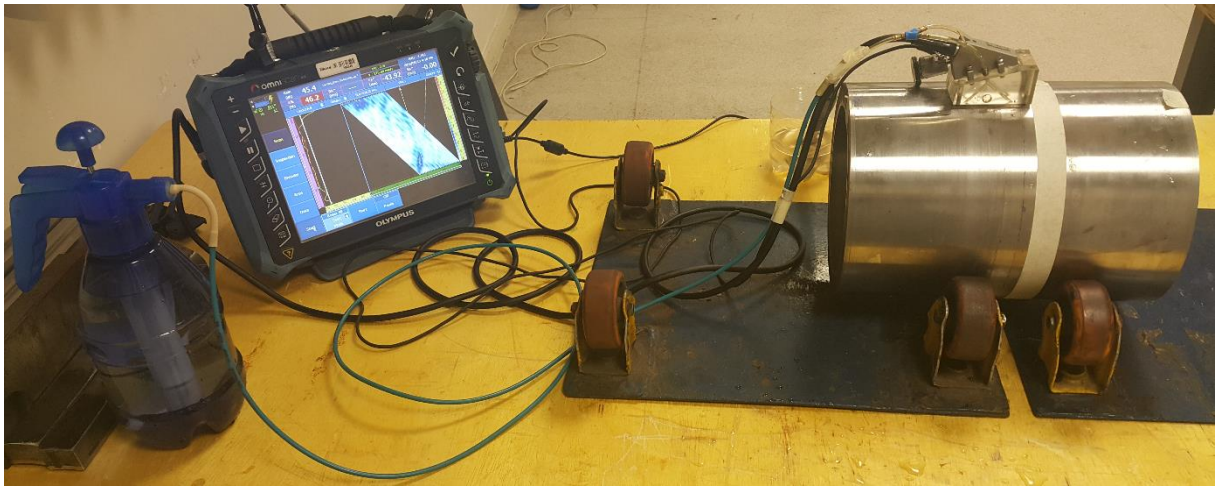


Figura 2.23: Varredura realizada pela técnica de Ultrassom *Phased Array* (US-PA)

As inspeções foram realizadas com o intuito de avaliar a sensibilidade do ensaio para detecção e dimensionamento das descontinuidades.

2.9.5 Dimensionamento das Descontinuidades

A análise das imagens obtidas foi realizada no software de análise "TomoView" Versão 2.10 R5. Para o dimensionamento do comprimento das descontinuidades foi utilizada a técnica da queda dos 6dB nos extremos das descontinuidades. Para dimensionamento da altura das descontinuidades foi utilizada a técnica da queda dos 3 dB. No caso de uma descontinuidade apresentar variação de altura ao longo do seu comprimento, a altura considerada foi o maior valor encontrado.

2.10 Macrografia das Descontinuidades

Foram retiradas amostras transversais ao cordão de solda na região onde se localizava a maior reflexão de amplitude das 5 descontinuidades para a realização de macrografias. Esta etapa tem por objetivo dimensionar a altura e profundidade real das descontinuidades com o auxílio de microscópio óptico. As amostras foram cortadas inicialmente em uma serra fita e posteriormente seccionadas transversalmente em uma cortadeira metalográfica, como mostra a Figura 2.24.

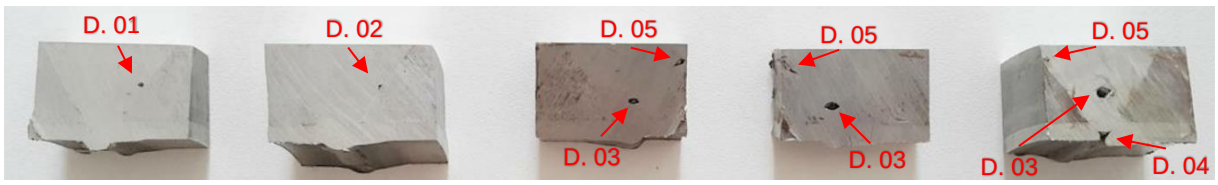


Figura 2.24: Amostras cortadas para dimensionamento real das descontinuidades

Capítulo 3 - Resultados

3.1 Caracterização da Junta Soldada

3.1.1 Ensaio Macrográfico

A Figura 3.1 exibe a macrografia da junta soldada mostrando uma estrutura mais refinada no passe de raiz e grãos colunares nos passes de enchimento e acabamento. Excetuando-se o passe de raiz, pode ser observado que a orientação dos grãos colunares da zona de fusão se mantém mesmo com os sucessivos passes de enchimento.

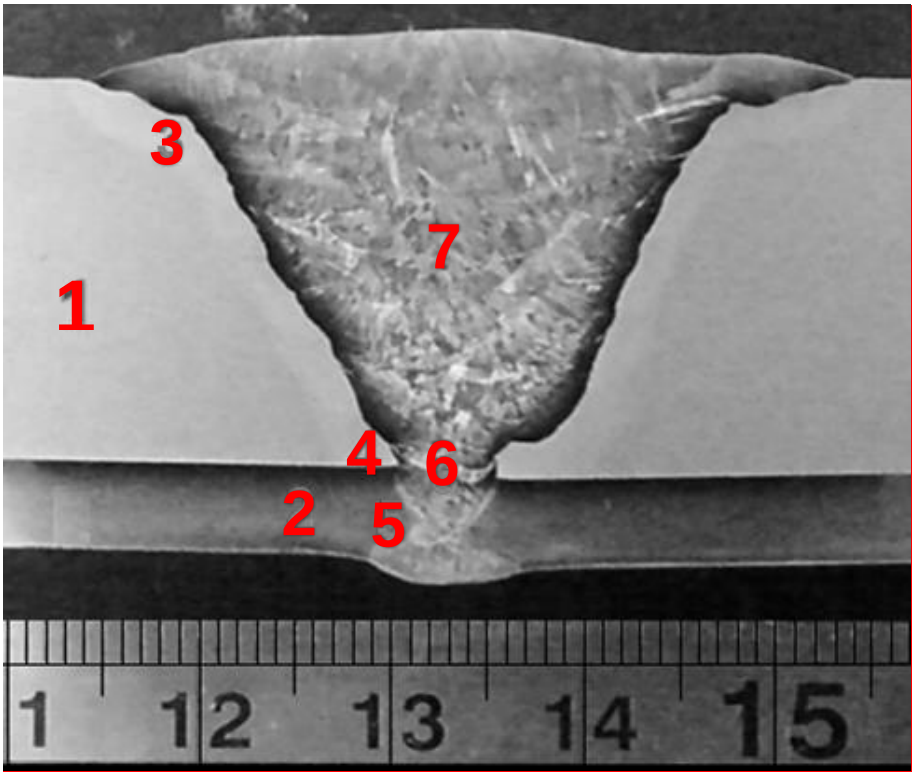


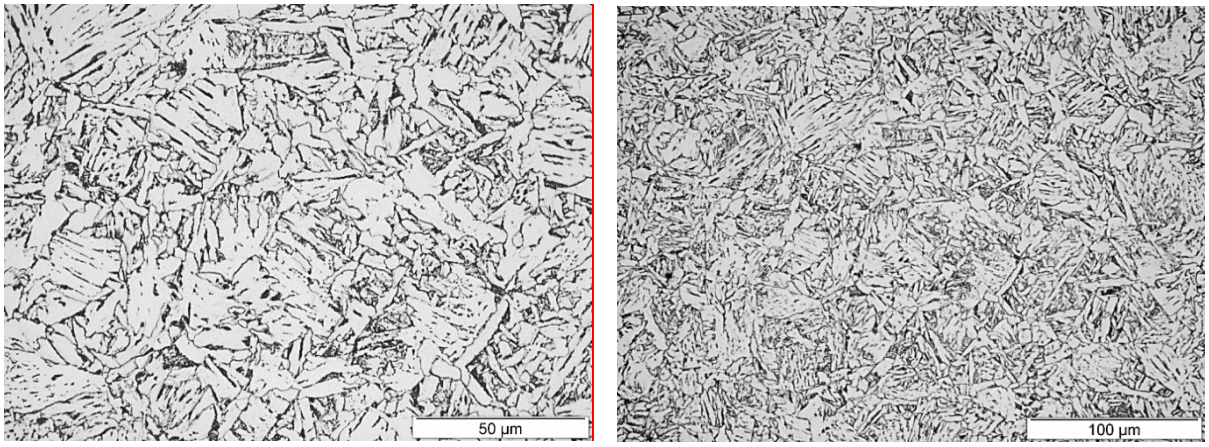
Figura 3.1: Macrografia da junta soldada evidenciando grãos colunares no metal de solda. Ataque químico: Água régia.

3.1.2 Ensaio Micrográfico

O principal objetivo desta análise foi evidenciar os efeitos do processo de soldagem na microestrutura do material. Abaixo seguem as microestruturas obtidas e suas respectivas interpretações.

Micrografia: Metal de Base – Ponto 1:

A Figura 3.2 evidencia a microestrutura do metal de base (MB), predominantemente bainítica.

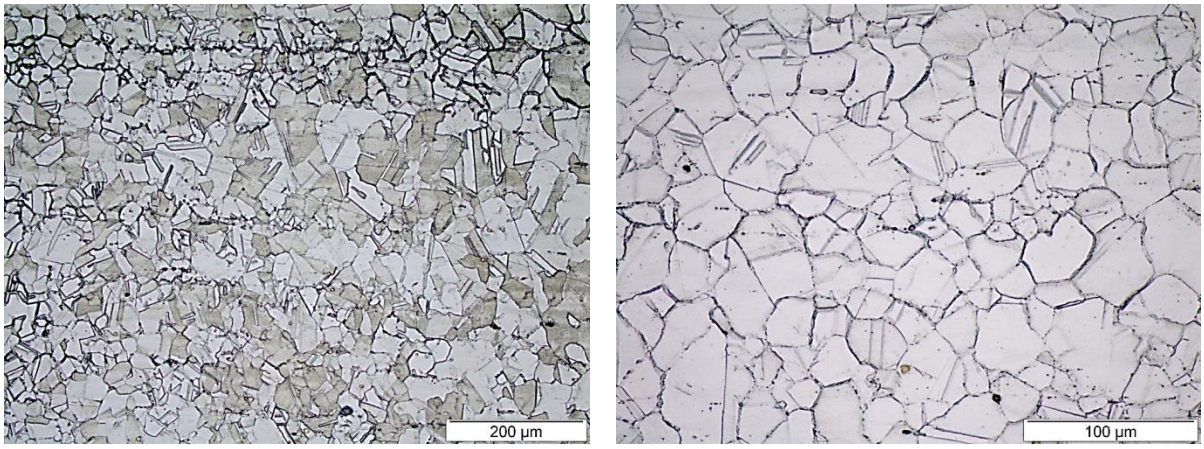


(a) (b)

Figura 3.2: Aspecto microestrutural por microscopia óptica do metal de base API 5L X70. Microestrutura: predominantemente bainítica. (a) Aumento: 1000x. (b) Aumento: 500x. Ataque: nital 2%.

Micrografia: Região do Lined – Ponto 2:

A Figura 3.3 mostra a região do revestimento (“Lined”) de Inconel® 625.

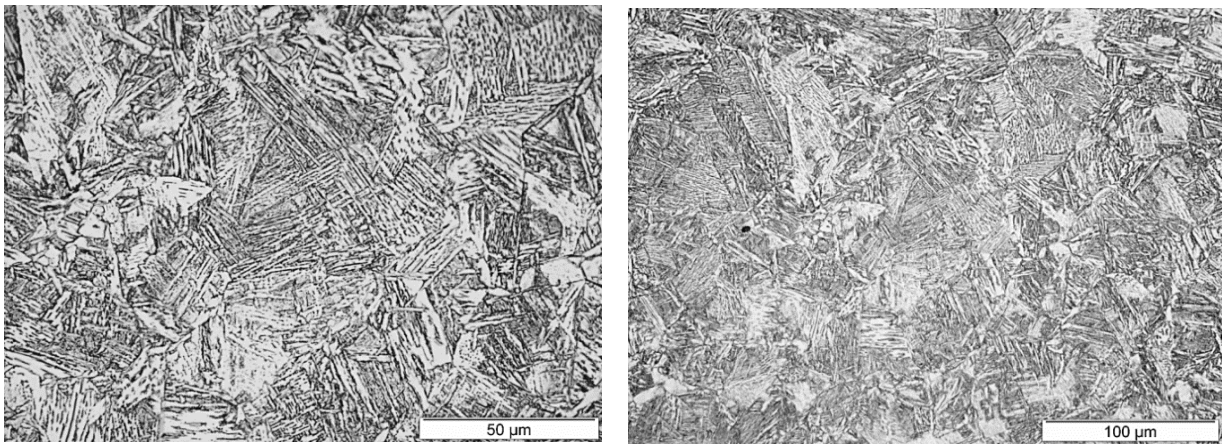


(a) (b)

Figura 3.3: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região do revestimento (“Lined”). (a) Aumento: 200x. (b) Aumento: 500x. Ataque: Água régia.

Micrografia: Região da ZTA próxima ao Reforço – Ponto 3:

A Figura 3.4 mostra a micrografia da ZTA próximo ao reforço. Esta região apresenta uma mistura de bainita e martensita decorrente do ciclo térmico da soldagem sobre o metal base.

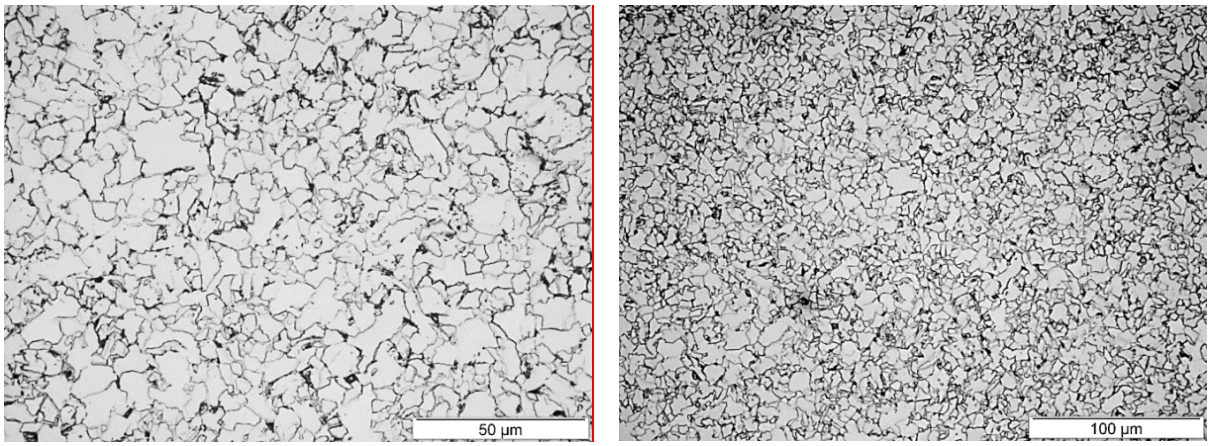


(a) (b)

Figura 3.4: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região da ZTA próximo ao reforço. Microestrutura: bainita e martensita. (a) Aumento: 1000x. (b) Aumento: 500x. Ataque: nital 2%.

Micrografia: Região da ZTA próxima a Raiz – Ponto 4:

A Figura 3.5 mostra a região da ZTA próximo à raiz. Esta região é formada por grãos poligonais de ferrita e algumas pequenas ilhas de perlita nos contornos de grão.

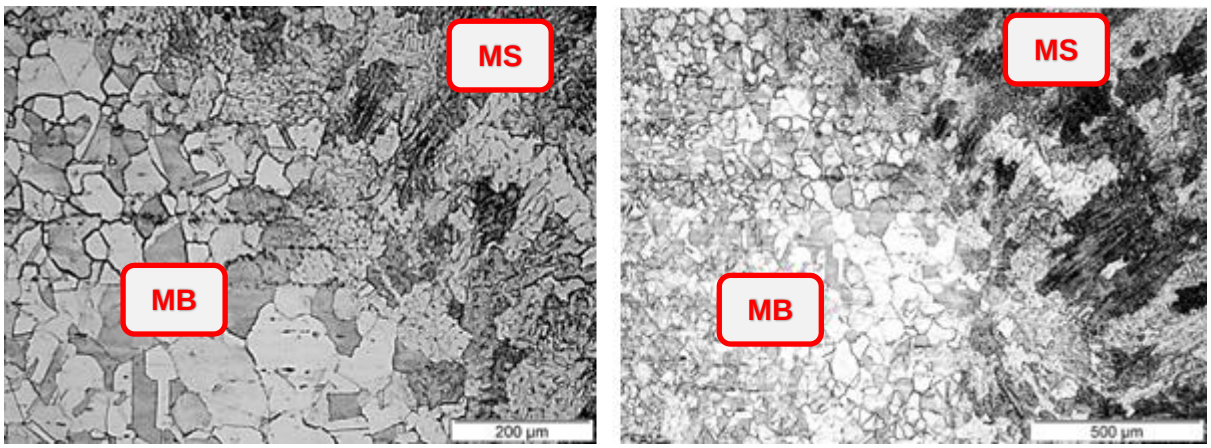


(a) (b)

Figura 3.5: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região da ZTA próximo à raiz. Microestrutura: grãos poligonais de ferrita e algumas pequenas ilhas de perlita. (a) Aumento: 1000x. (b) Aumento: 500x. Ataque: nital 2%.

Micrografia: Interface Metal de Solda e Revestimento (“Lined”) – Ponto 5:

A Figura 3.6 mostra a região da interface entre o metal de solda (MS) e o revestimento (“Lined”).

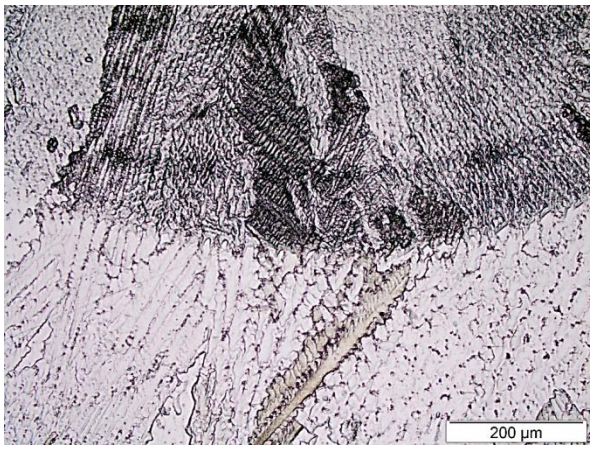


(a) (b)

Figura 3.6: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região da interface metal de solda e revestimento (“Lined”). (a) Aumento: 200x. (b) Aumento: 100x. Ataque: Água régia.

Micrografia: Interface Raiz e Enchimento – Ponto 6:

A Figura 3.7 mostra a interface entre a raiz e o enchimento no metal de solda. A microestrutura apresenta um padrão colunar dendrítico para solidificação do metal de solda.

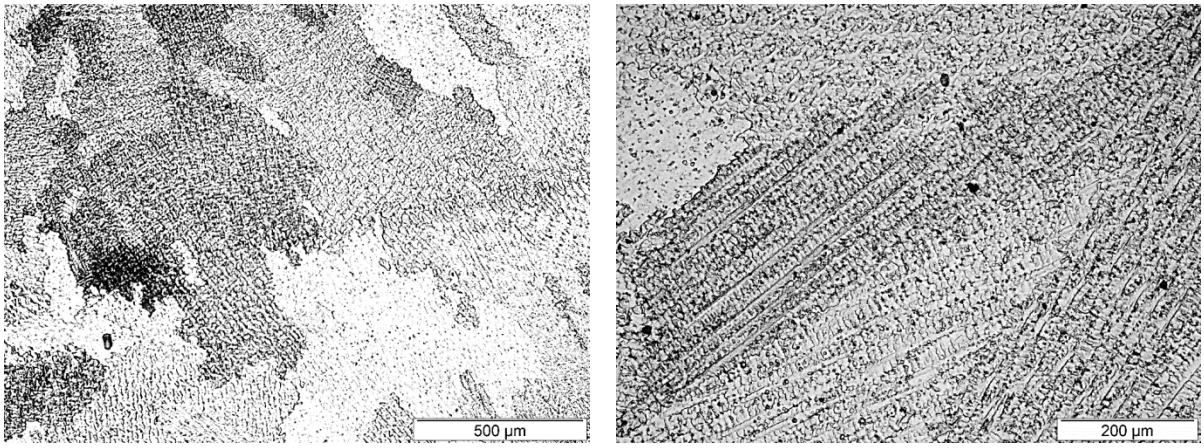


(a)

Figura 3.7: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da interface entre o metal de solda da raiz e o metal de solda de enchimento. Microestrutura: padrão colunar dendrítico. (a) Aumento: 200x. Ataque: Água régia.

Micrografia: Passes de Enchimento no Metal de Solda – Ponto 7:

A Figura 3.8 mostra os passes de enchimento na região do metal de solda. A microestrutura apresenta dendritas de solidificação.



(a) (b)

Figura 3.8: Aspecto microestrutural por microscopia óptica da região do metal de solda. Microestrutura: dendritas de solidificação (a) Aumento: 100x. (b) Aumento: 200x. Ataque: Água régia.

3.1.3 Medição do Tamanho de Grão

Esta análise foi realizada para avaliar se o tamanho de grão (TG) da microestrutura influencia na propagação do feixe sônico no material. A Tabela 3.1 mostra os valores encontrados para as regiões do metal de base (MB), revestimento (“Lined”) e para a ZTA próxima a raiz da solda.

Tabela 3.1 – Valores de tamanho de grão para as regiões analisadas

Região	Comprimento Médio do Intercepto (mm)	TG (ASTM)
MB	0,0073 mm	11
Revestimento	0,0249 mm	7,5
ZTA (Raiz)	0,0057 mm	11,5

3.2 Ensaio de Dureza Vickers

O ensaio de dureza vickers foi realizado sobre a seção transversal do corpo de prova e foi gerado o gráfico representado na Figura 3.9.

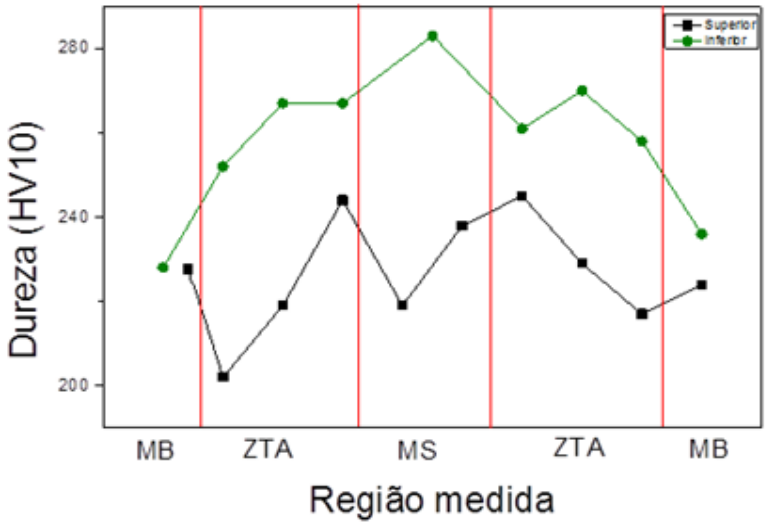


Figura 3.9: Gráfico de dureza vickers da amostra

3.3 Análise Química

As Tabelas 3.2 a 3.4 exibem as composições químicas especificadas para o metal de base API 5L X70 e para os consumíveis TIG (ER-NiCrMo-3) e Arame Tubular (ENiCrMo3T-1/4).

Tabela 3.2 – Especificação da Composição Química para o Aço API 5L X70 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2004)

Substrato	Composição Química para o Aço API 5L X70 (% em Peso)					
	C	Mn	P	S	Cr	Outros (Nb, V, Ti)
API 5L X70	≤ 0,26	≤ 1,65	≤ 0,025	≤ 0,015	≤ 0,2	≤ 0,15

Tabela 3.3 – Especificação da Composição Química para o consumível ER-NiCrMo-3 (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2005)

Composição Química para o Consumível ER-NiCrMo-3 (% em Peso)												
Ni	Fe	Mo	Cu	C	Cr	Mn	Nb (Cb)	Si	P	S	Ti	Al
>58	5,0	8,0-10	0,50	0,10	20-23	0,50	3,15-4,15	0,50	0,02	0,015	0,40	0,40

Tabela 3.4 – Especificação da Composição Química para o consumível ENiCrMo3T-1/4 (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2007)

Composição Química para o Consumível ENiCrMo3T-1/4 (% em Peso)											
Ni	Fe	Mo	Cu	C	Cr	Mn	Nb (Cb)	Si	P	S	Ti
>58	5,0	8,0-10	0,50	0,10	20-23	0,50	3,15-4,15	0,50	0,02	0,015	0,40

A composição química do metal de base, metal de adição e revestimento (“Lined”) foi caracterizada através do equipamento de espectrômetria de emissão óptica, e os resultados se encontram nas Tabelas 3.5 a 3.7.

Tabela 3.5 – Composição Química especificada para o Metal de Base API 5L X70

Substrato	Composição Química do Aço Carbono Microligado (% em Peso)						
	Fe	C	Mn	P	S	Cr	Outros (Nb, V, Ti)
API 5L X70	97,5	0,0913	1,37	0,0074	0,002	0,0219	0,0601

Tabela 3.6 – Composição Química especificada para o metal de adição Inconel® 625

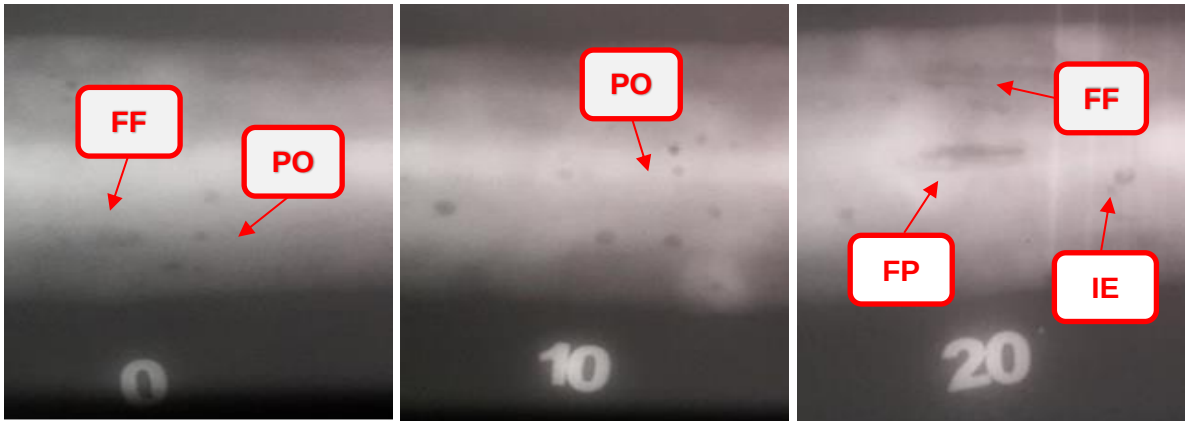
Metal de Adição	(% em Peso)											
	Ni	Cr	Mo	Si	C	Fe	P	Nb	S	Mn	Ti	Cu
Inconel® 625	64	19,5	9,69	0,491	0,0451	1,68	<0,0003	3,56	0,0051	0,225	0,268	0,0074

Tabela 3.7 – Composição Química especificada para o Revestimento (“Lined”) Inconel® 625

Revestimento	(% em Peso)											
	Ni	Cr	Mo	Si	C	Fe	P	Nb	S	Mn	Ti	Cu
Inconel® 625	61,8	19,9	9,38	0,222	0,0172	4,52	<0,0003	3,15	0,003	0,143	0,245	0,109

3.4 Ensaio Radiográfico

A Figura 3.10 exibe a radiografia das descontinuidades consideradas neste estudo.



(a) (b) (c)

Figura 3.10: Indicação de descontinuidades identificadas pelo ensaio radiográfico. a) Falta de Fusão (FF), Porosidade (PO). b) Porosidade (PO). c) Falta de Fusão (FF), Falta de Penetração (FP), Inclusão de Escória (IE).

3.5 Simulação Computacional pelo software CIVA

As Figuras 3.11 a 3.17 exibem as simulações da propagação do feixe sônico no material austenítico com os diferentes parâmetros e leis focais adotadas para este estudo.

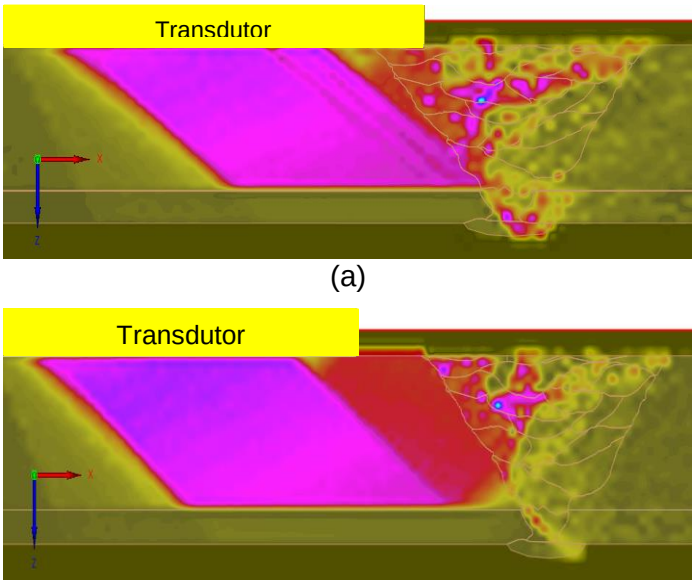


Figura 3.11: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas transversais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. Varredura linear: 55º; Elementos ativos: 16; 1º elemento: 1. (a) Index: -12 mm. (b) Index: -35 mm. CIVA 11.0®.

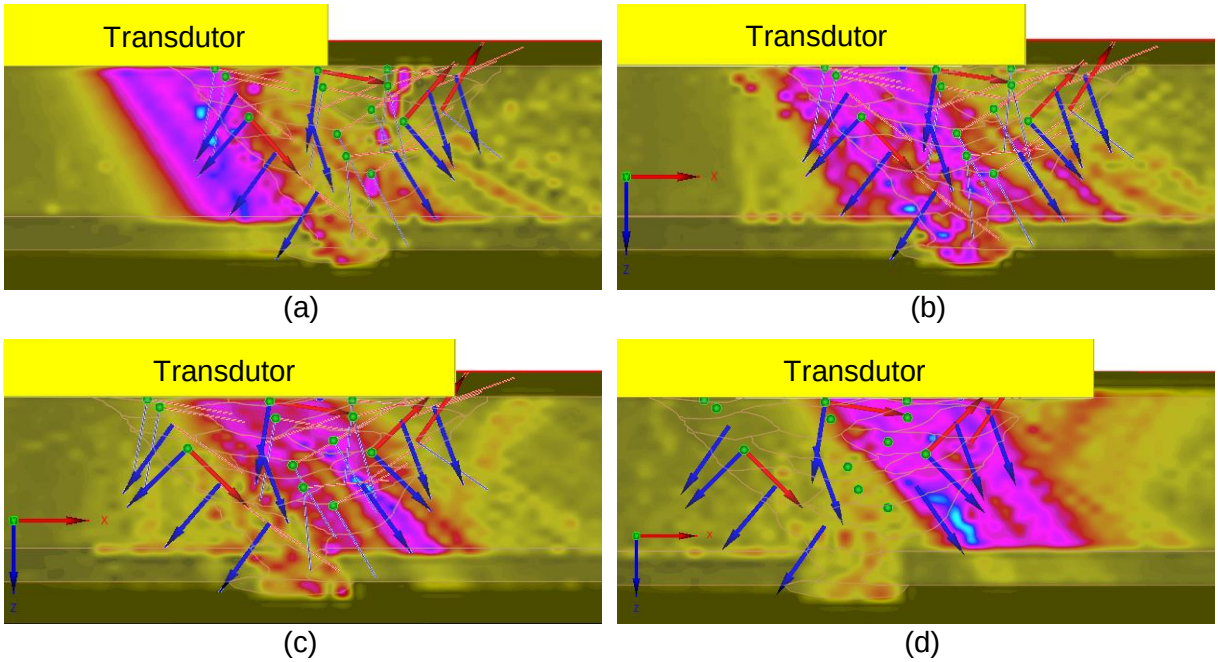


Figura 3.12: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura setorial: 35º-70º (Step: 1º); Elementos ativos: 32; 1º elemento: 33. (a) Index: -1 mm. (b) Index: 10 mm. (c) Index: 20 mm. (d) Index: 30 mm. CIVA 11.0®.

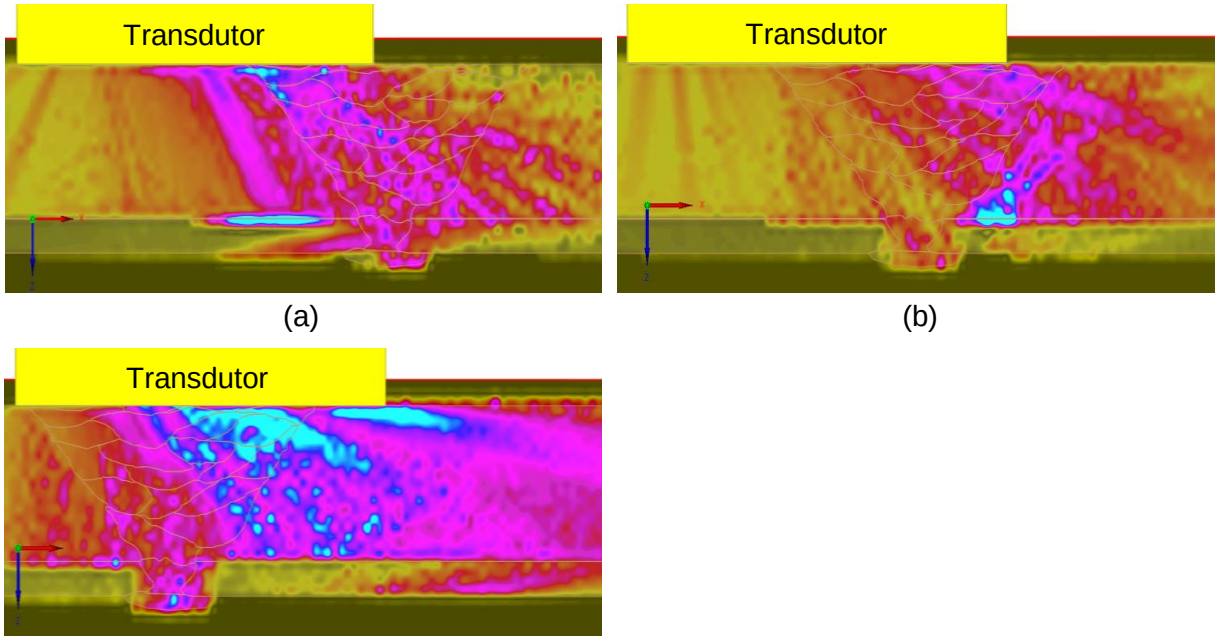


Figura 3.13: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura linear: 50º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 5 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 25 mm. CIVA 11.0®.

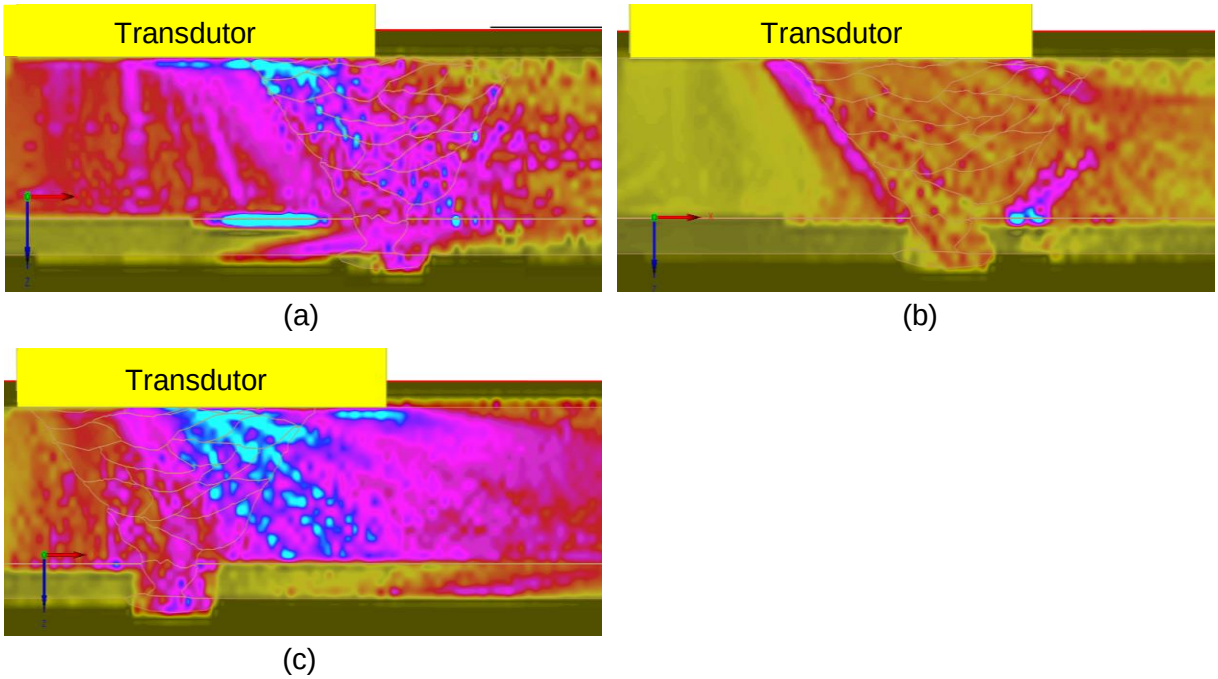
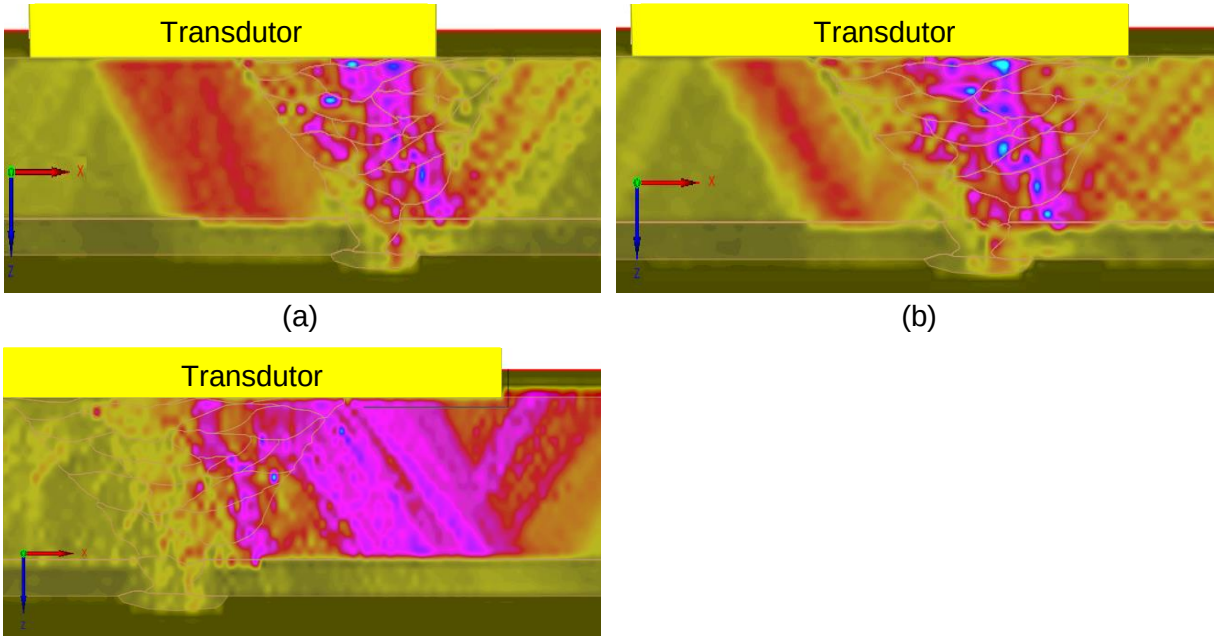


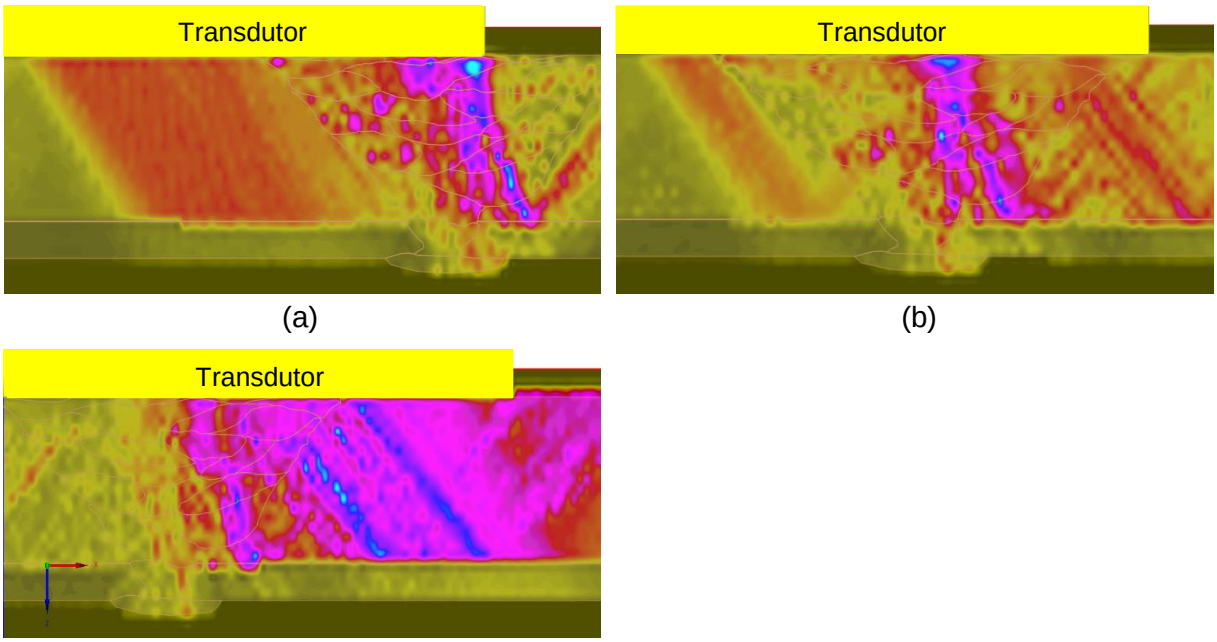
Figura 3.14: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Varredura linear: 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 0 mm. (b) Index: 17 mm. (c) Index: 35 mm. CIVA 11.0®.



(a) (b)

(c)

Figura 3.15: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Varredura linear: 50º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 10 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 40 mm. CIVA 11.0®.



(a) (b)

(c)

Figura 3.16: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Varredura linear: 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. (a) Index: 5 mm. (b) Index: 20 mm. (c) Index: 38 mm. CIVA 11.0®.

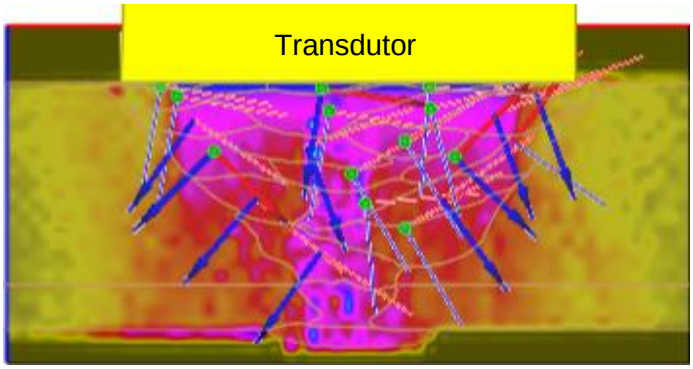


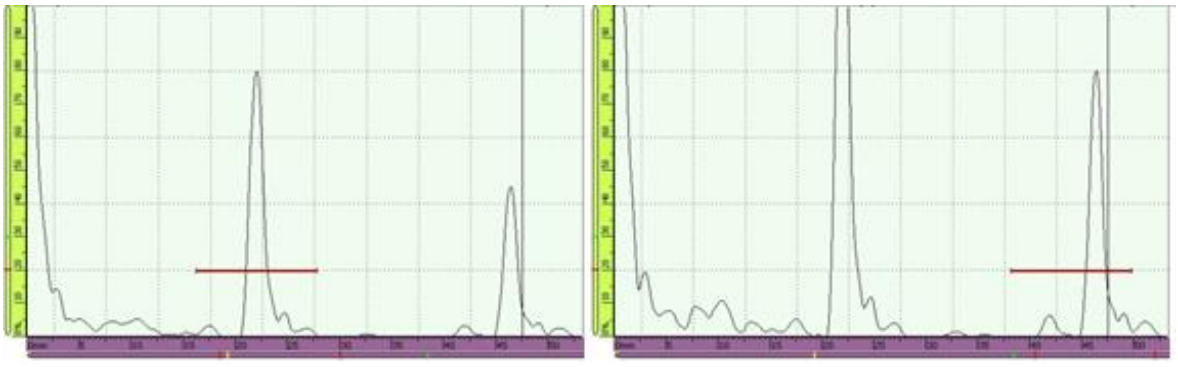
Figura 3.17: Simulação de inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Ondas longitudinais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L. Varredura linear: 0º; Elementos ativos: 16; 1º elemento: 1. Index: 29 mm. CIVA 11.0®.

3.6 Atenuação e Velocidade de Propagação do Feixe Sônico

A atenuação e velocidade sônica das ondas longitudinais e transversais foram verificadas em cada região. A Tabela 3.8 mostra os valores encontrados para as regiões: metal de base (MB)/revestimento ("Lined") e para a solda. As Figuras 3.18 a 3.21 mostram a atenuação das ondas nas regiões analisadas.

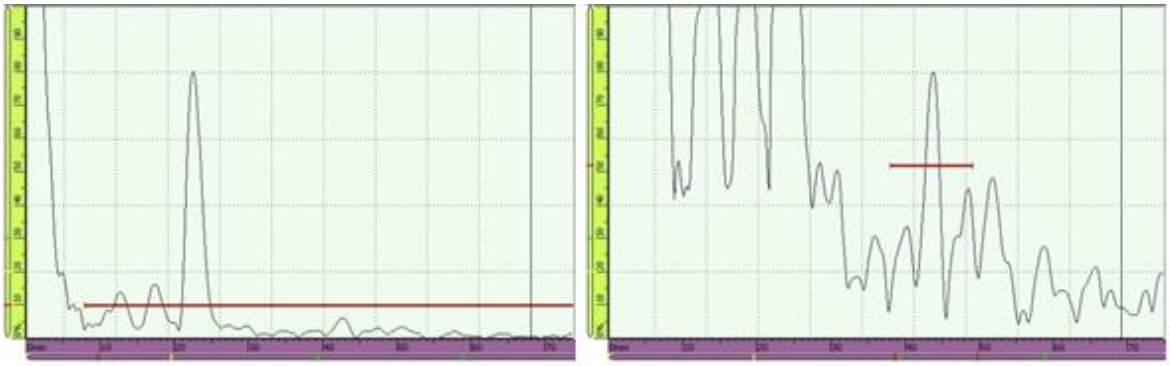
Tabela 3.8 – Valores medidos de Velocidade e Atenuação Sônica

Parâmetros	Tipo de Onda	Região MB/Revestimento	Região da Solda
Velocidade (m/s)	Longitudinal	5793,6	5911,6
	Transversal	3264,6	2944,6
Atenuação (dB/mm)	Longitudinal	0,10	0,44
	Transversal	0,12	0,26



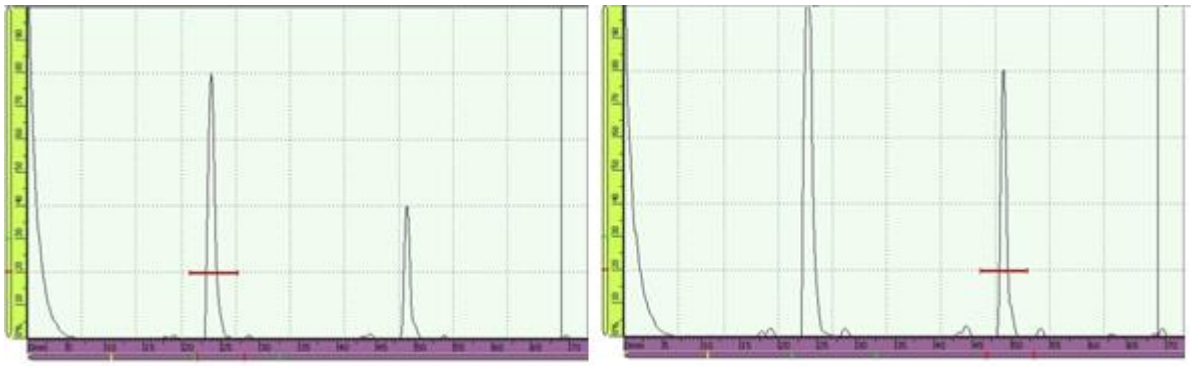
(a) (b)

Figura 3.18: Atenuação da Onda Longitudinal na Região MB/Lined - Verificação da diferença de amplitude dos dois primeiros ecos por controle de ganho. (a) Primeira reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude. (b) Segunda reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude.



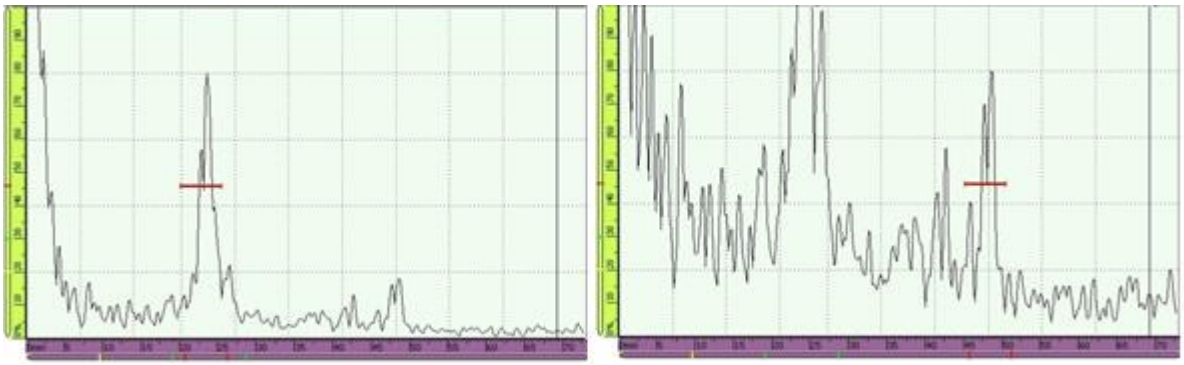
(a) (b)

Figura 3.19: Atenuação da Onda Longitudinal na Região Solda/Lined - Verificação da diferença de amplitude dos dois primeiros ecos por controle de ganho. (a) Primeira reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude. (b) Segunda reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude.



(a) (b)

Figura 3.20: Atenuação da Onda Transversal na Região MB/Lined - Verificação da diferença de amplitude dos dois primeiros ecos por controle de ganho. (a) Primeira reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude. (b) Segunda reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude.



(a) (b)

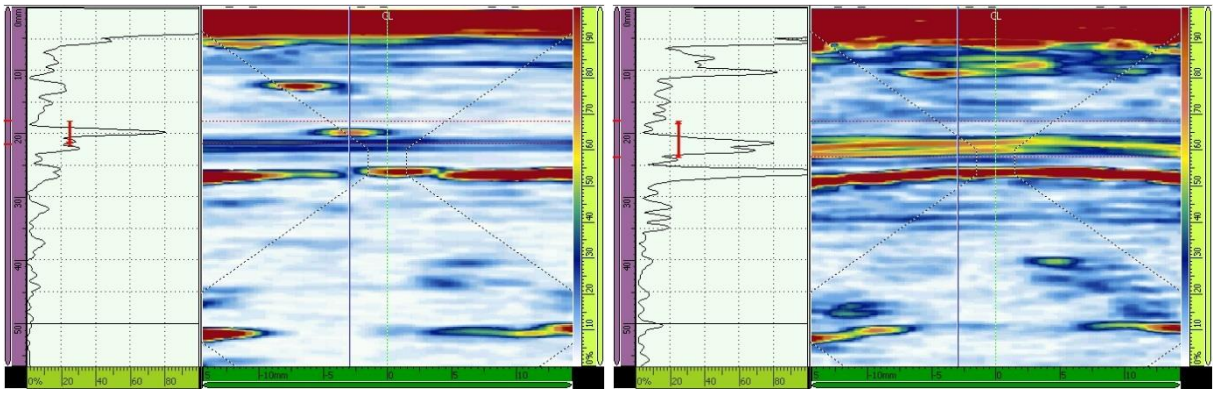
Figura 3.21: Atenuação da Onda Transversal na Região da Solda - Verificação da diferença de amplitude dos dois primeiros ecos por controle de ganho. (a) Primeira reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude. (b) Segunda reflexão do eco de fundo maximizada a 80% de amplitude.

3.7 Relação Sinal/Ruído

A Tabela 3.9 mostra os resultados obtidos para a relação sinal/ruído com diferentes orientações do feixe sônico se propagando no material e as Figuras 3.22 a 3.30 mostram os A-Scans analisados.

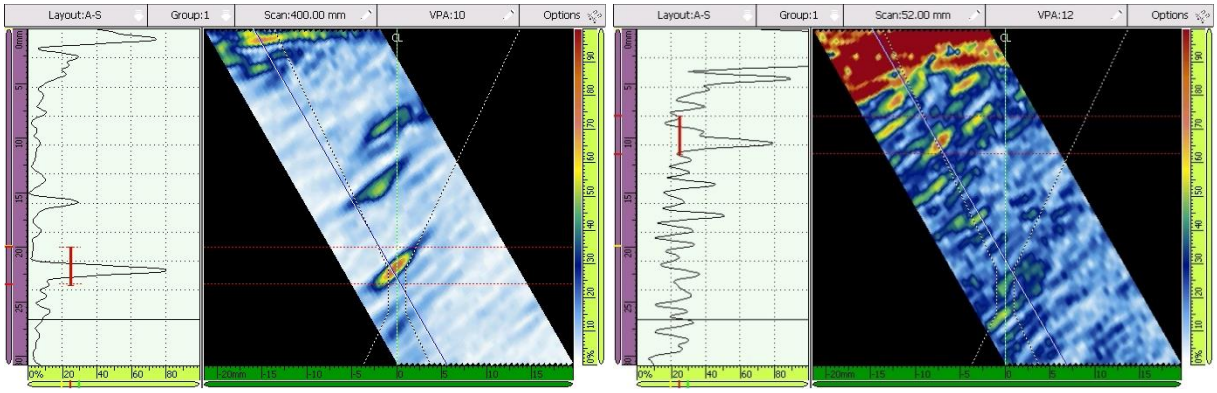
Tabela 3.9 – Valores obtidos para a relação Sinal/Ruído

Ângulo (°)	Index (mm)	Relação Sinal/Ruído (dB)
0	29	7,5
35	18	13,8
40	12	13,2
45	9	10
50	3	21,7
55	12	20,1
60	-12	18,3
65	-22	19,2
70	-37	10,4



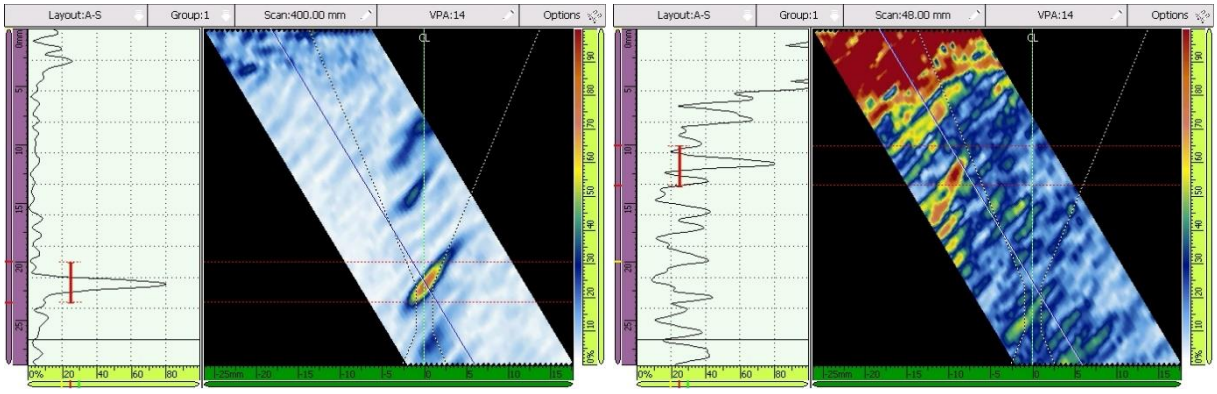
(a) (b)

Figura 3.22: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 0º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-0L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela.



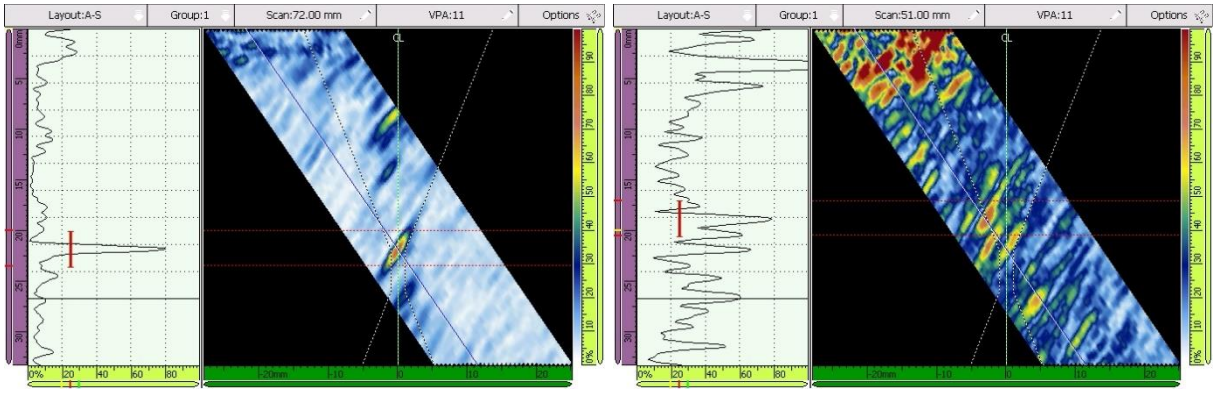
(a) (b)

Figura 3.23: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 35º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela.



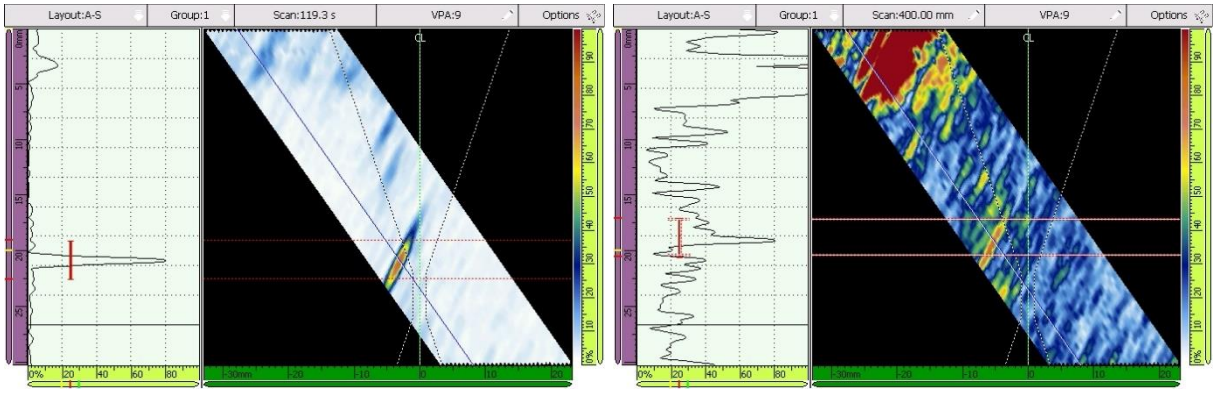
(a) (b)

Figura 3.24: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 40º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela.



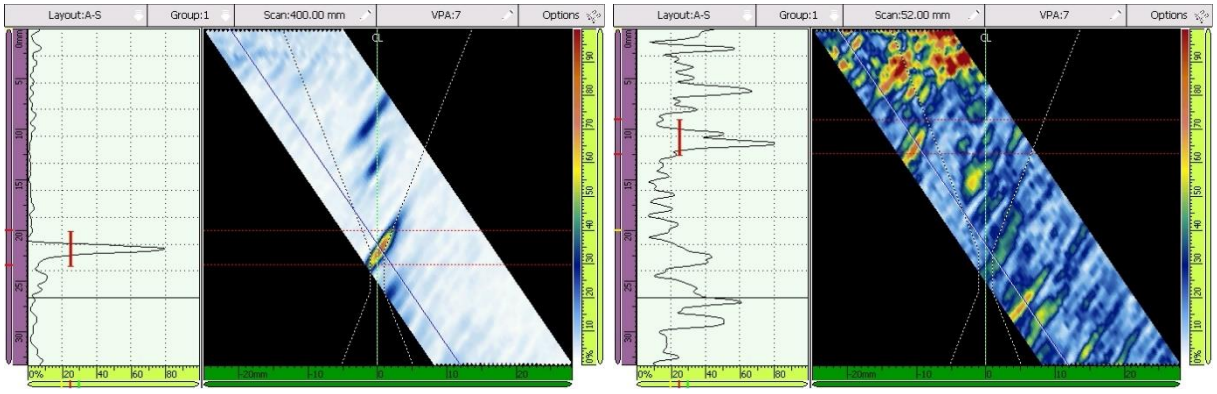
(a) (b)

Figura 3.25: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 45º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela.



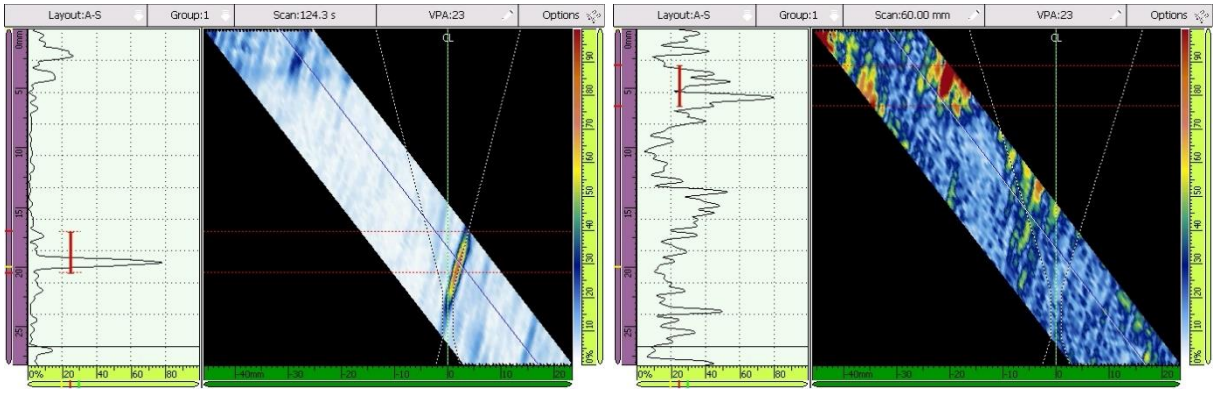
(a) (b)

Figura 3.26: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 50º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela.



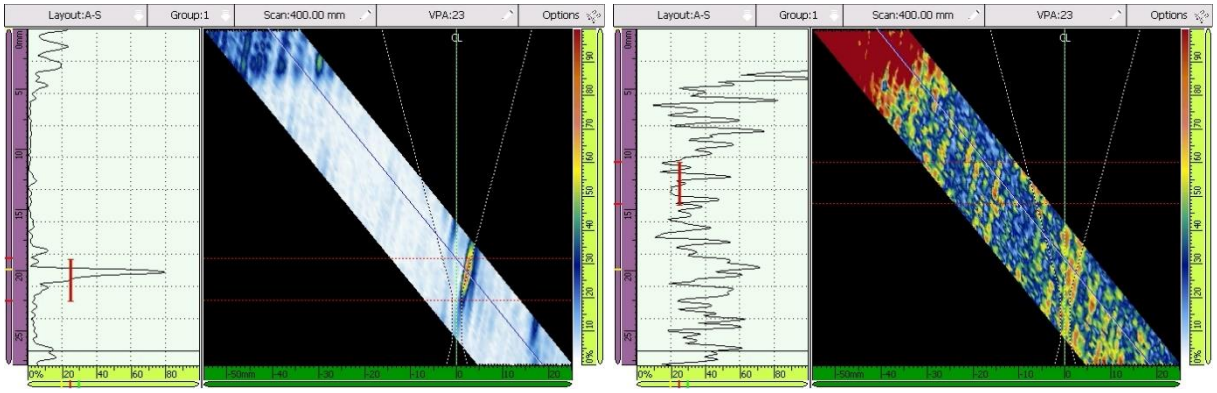
(a) (b)

Figura 3.27: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 55º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela.



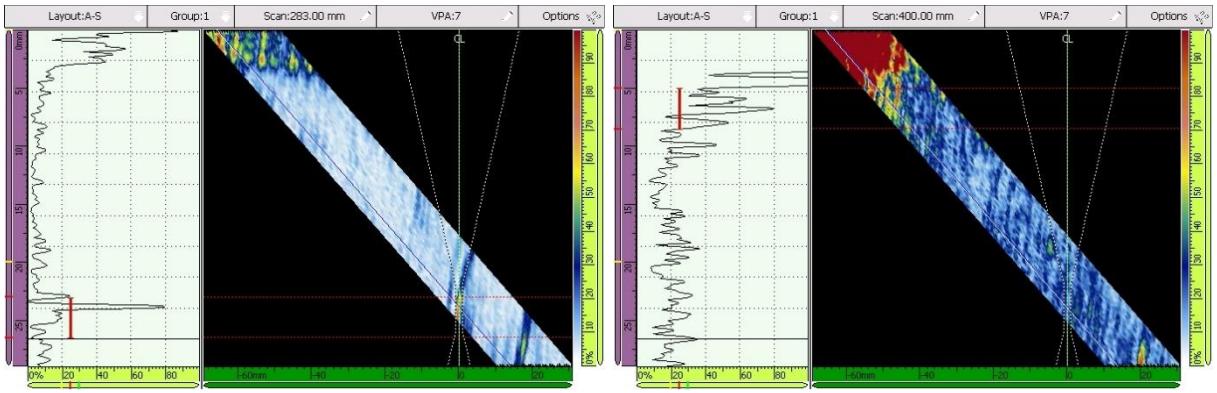
(a) (b)

Figura 3.28: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 60º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela.



(a) (b)

Figura 3.29: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 65º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela.



(a) (b)

Figura 3.30: Verificação da Relação Sinal/Ruído para o Ângulo de propagação de 70º. Transdutor *Phased Array* 5L64A12 e a sapata SA12-N60L com varredura linear e onda longitudinal. (a) Eco referente ao 3º furo do bloco maximizado a 80% da altura total da tela. (b) Eco referente ao sinal de ruído maximizado a 80% da altura total da tela.

3.8 Ensaio por Ultrassom através da Técnica *Phased Array*

A análise dos dados coletados durante a inspeção foi realizada utilizando o software TomoView Versão 2.10 R5. Durante a análise das descontinuidades foram registrados os seguintes parâmetros: amplitude, localização, comprimento, profundidade e altura. Para visualização foram utilizadas as vistas A-scan, B-scan, C-scan e S-scan.

Inspeção Ultrassom *Phased Array* com Transdutor de 5MHz – Varredura Linear: 55º com Onda Transversal

Foram identificadas as seguintes descontinuidades durante a inspeção, conforme informações das Tabelas 3.10 a 3.12 e Figuras 3.31 a 3.33.

Tabela 3.10 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Transversal. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
1	1	55	87,8	27	27	14,3	3,1	90	-12

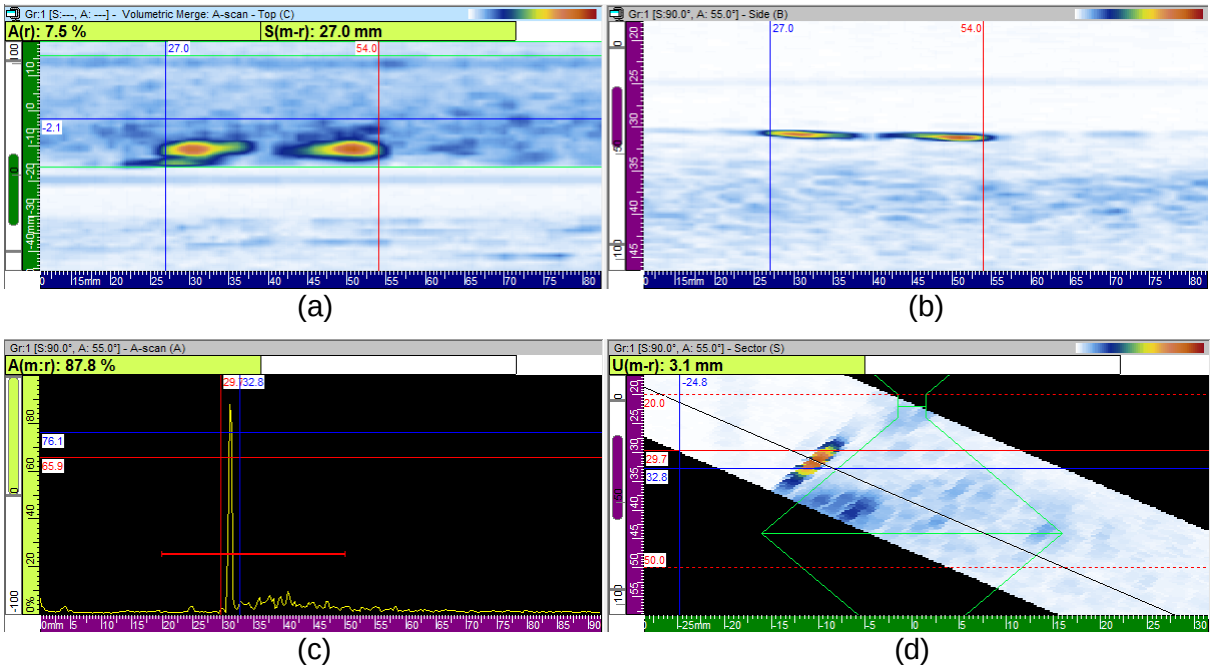
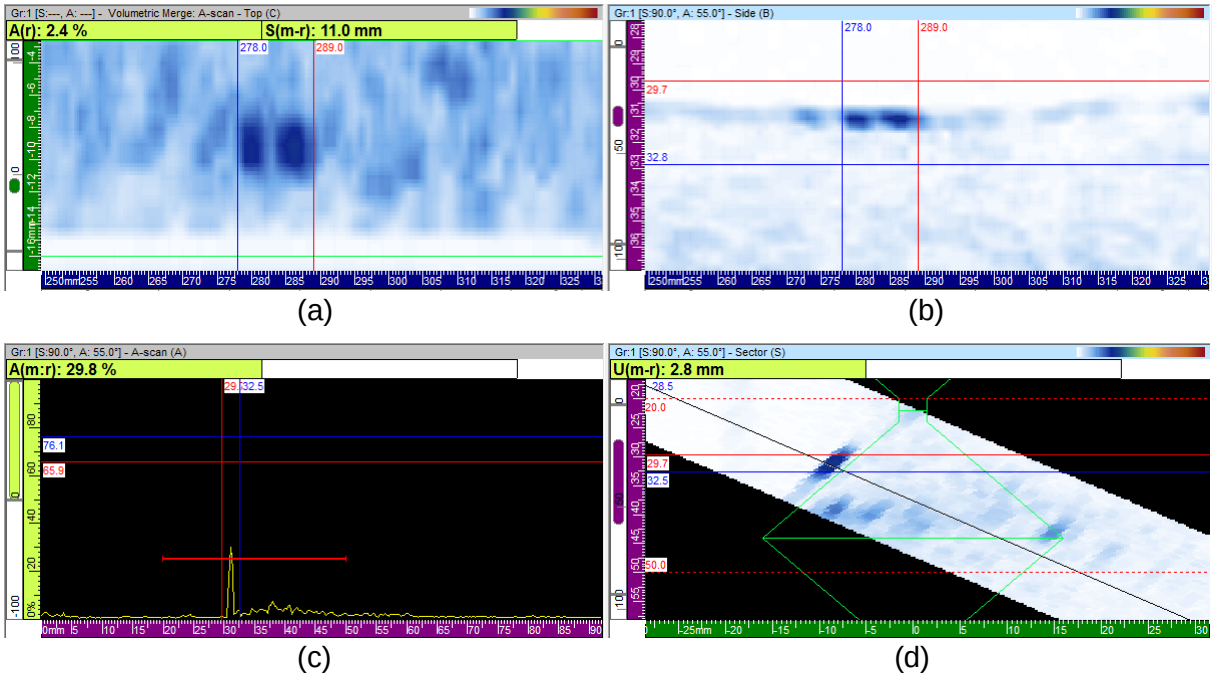


Figura 3.31: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Transversais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.11 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Transversal. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
2	1	55	29,8	278	11	14,3	2,8	90	-12



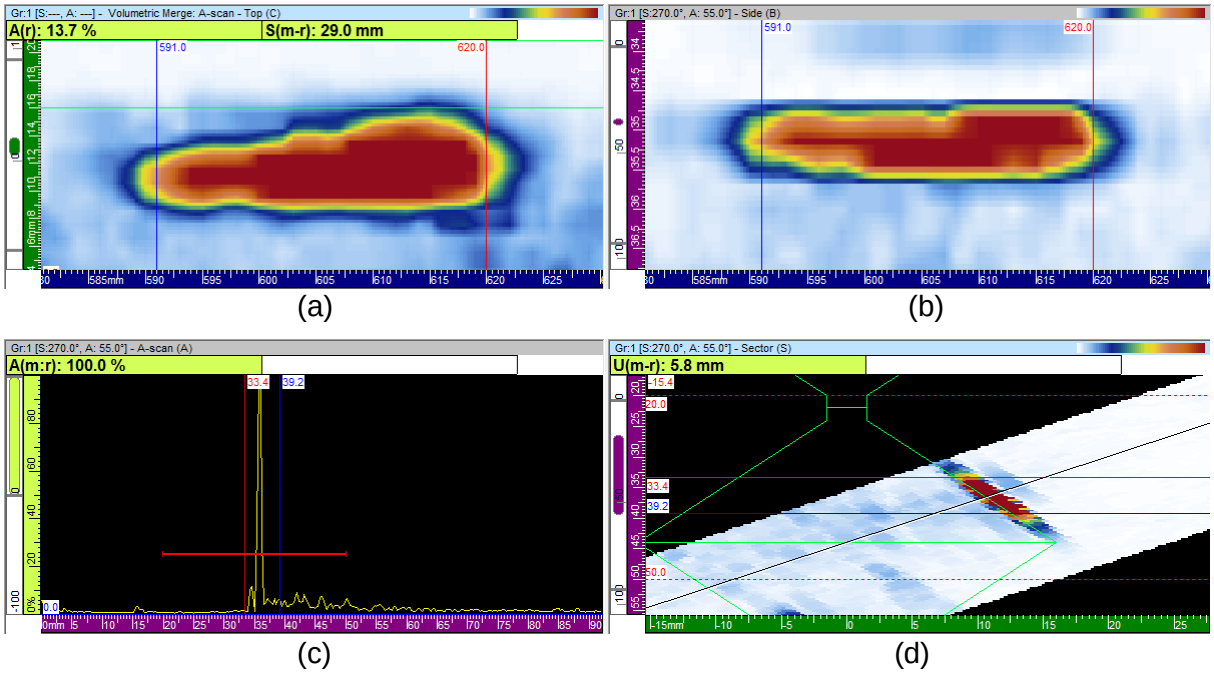
(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.32: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Transversais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.12 – Descontinuidade 5. Varredura Linear com Ondas Transversal. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
5	1	55	>100	591	29	10,6	5,8	270	-35



(a) (b)

(c) (d)

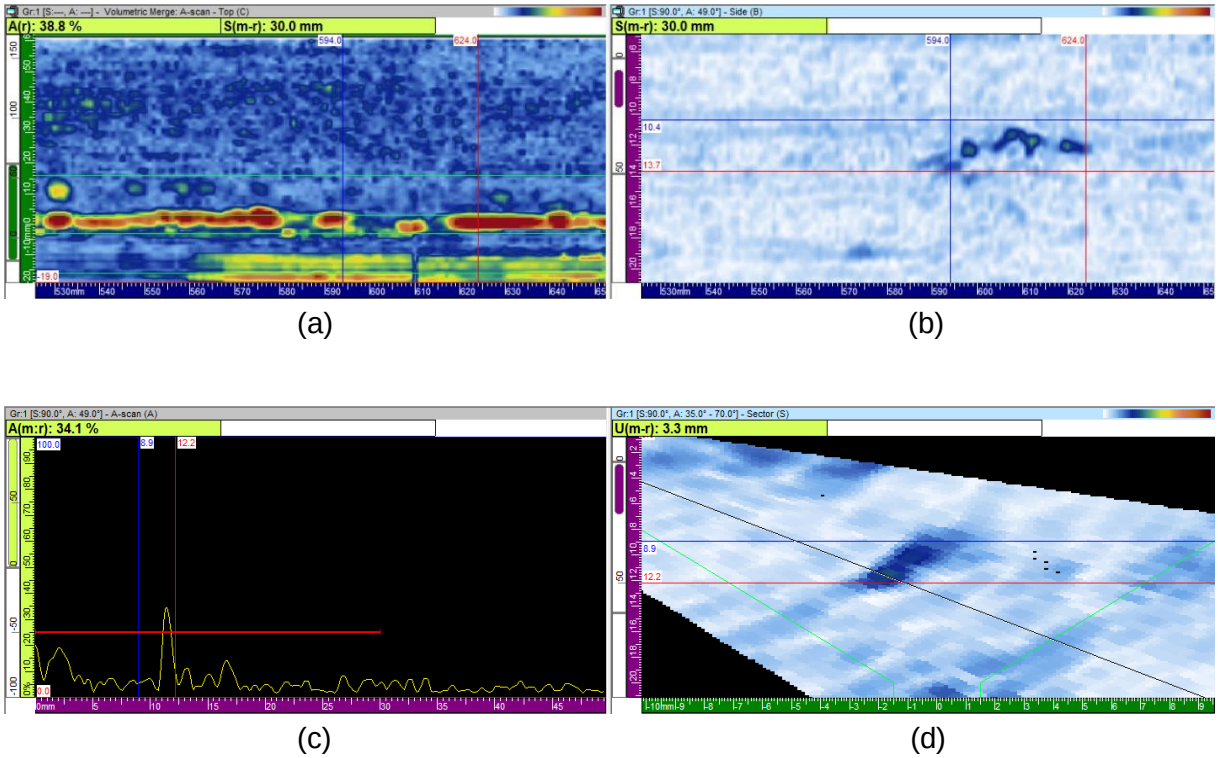
Figura 3.33: Descontinuidade 5. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Transversais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Inspeção Ultrassom *Phased Array* com Transdutor de 5MHz – Varredura Setorial: 35º a 70º com Onda Longitudinal

Foram identificadas as seguintes descontinuidades durante a inspeção, conforme informações das Tabelas 3.13 e 3.14 e Figuras 3.34 a 3.35.

Tabela 3.13 – Descontinuidade 3. Varredura Setorial com Ondas Longitudinais. Ângulos de 35º a 70º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
3	1	49	42	594	30	12,2	3,3	90	-1



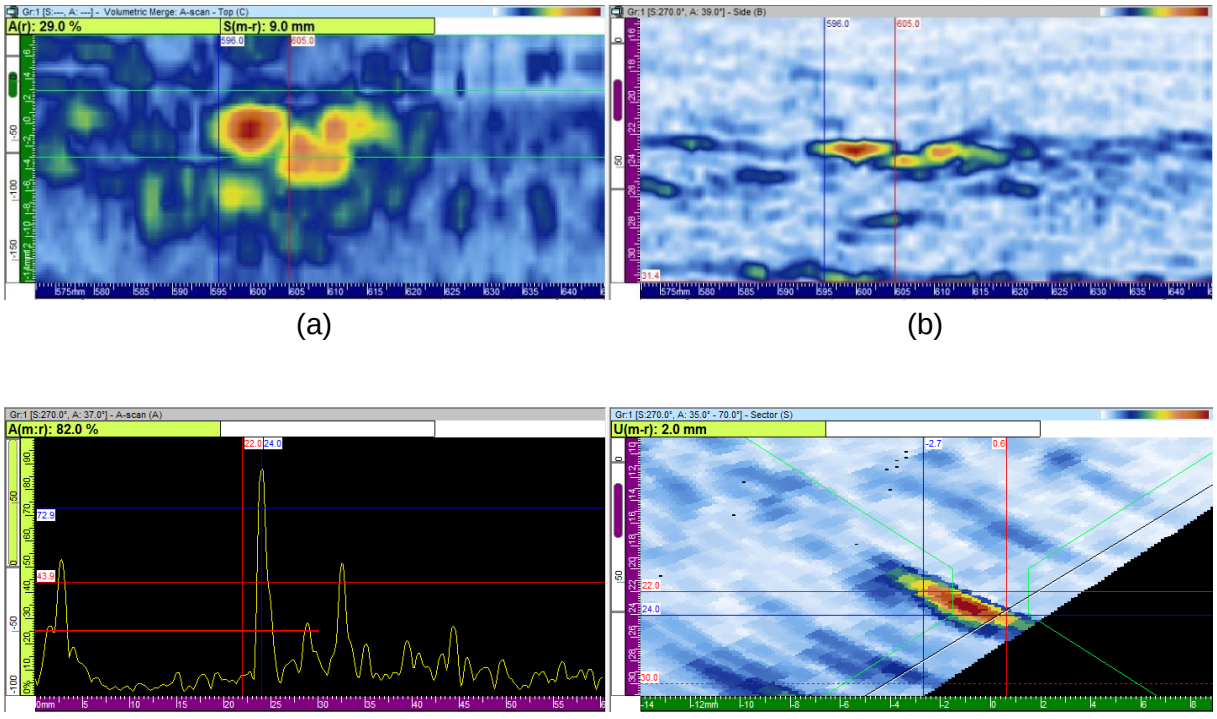
(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.34: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Setorial com Ondas Longitudinais. Ângulo de 35º a 70º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.14 – Descontinuidade 4. Varredura Setorial com Ondas Longitudinais. Ângulos de 35º a 70º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
4	1	39	>100	596	9	22	2	270	1



(a) (b)

(c) (d)

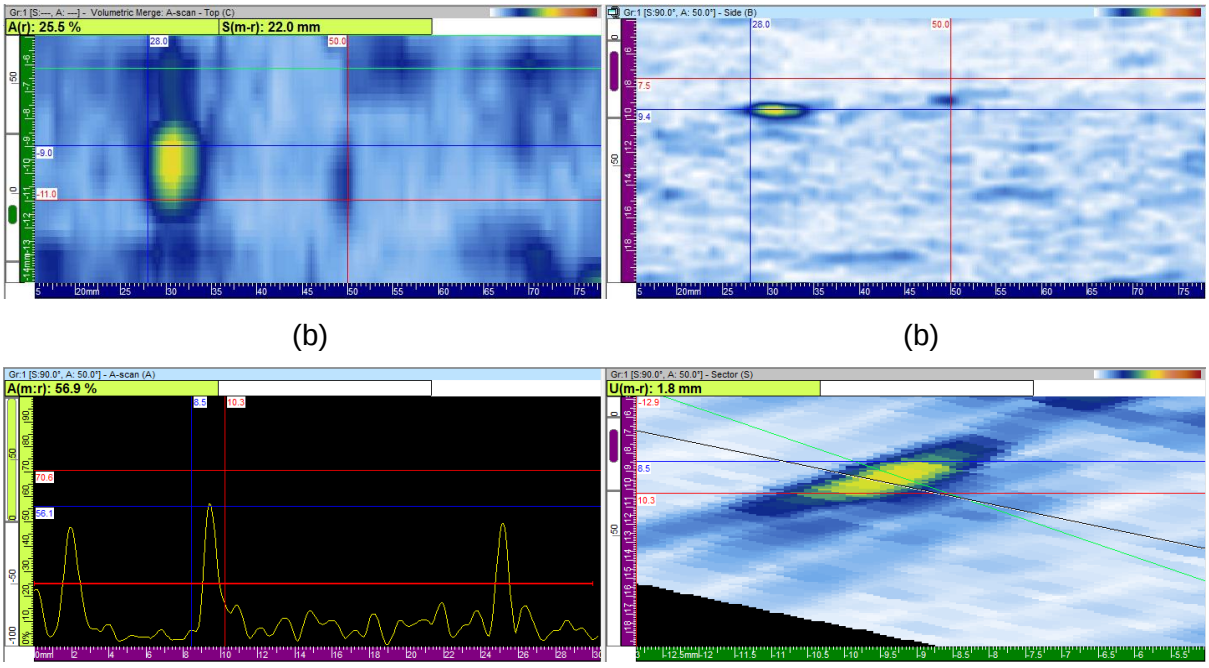
Figura 3.35: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Setorial com Ondas Longitudinais. Ângulo de 35º a 70º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Inspeção Ultrassom *Phased Array* com Transdutor de 5MHz – Varredura Linear: 50º com Onda Longitudinal

Foram identificadas as seguintes descontinuidades durante a inspeção, conforme informações das Tabelas 3.15 a 3.18 e Figuras 3.36 a 3.39.

Tabela 3.15 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
1	2	50	56,9	28	22	10,3	1,8	90	5



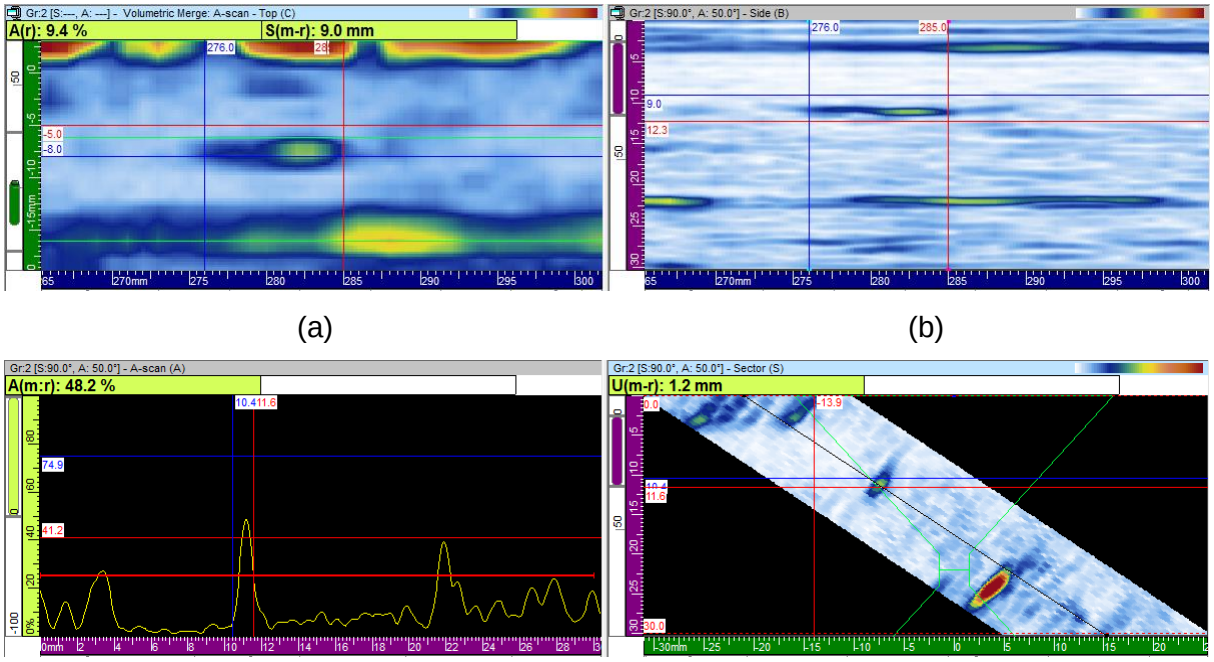
(b) (b)

(c) (d)

Figura 3.36: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.16 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
2	2	50	48,2	276	9	11,6	1,2	90	5



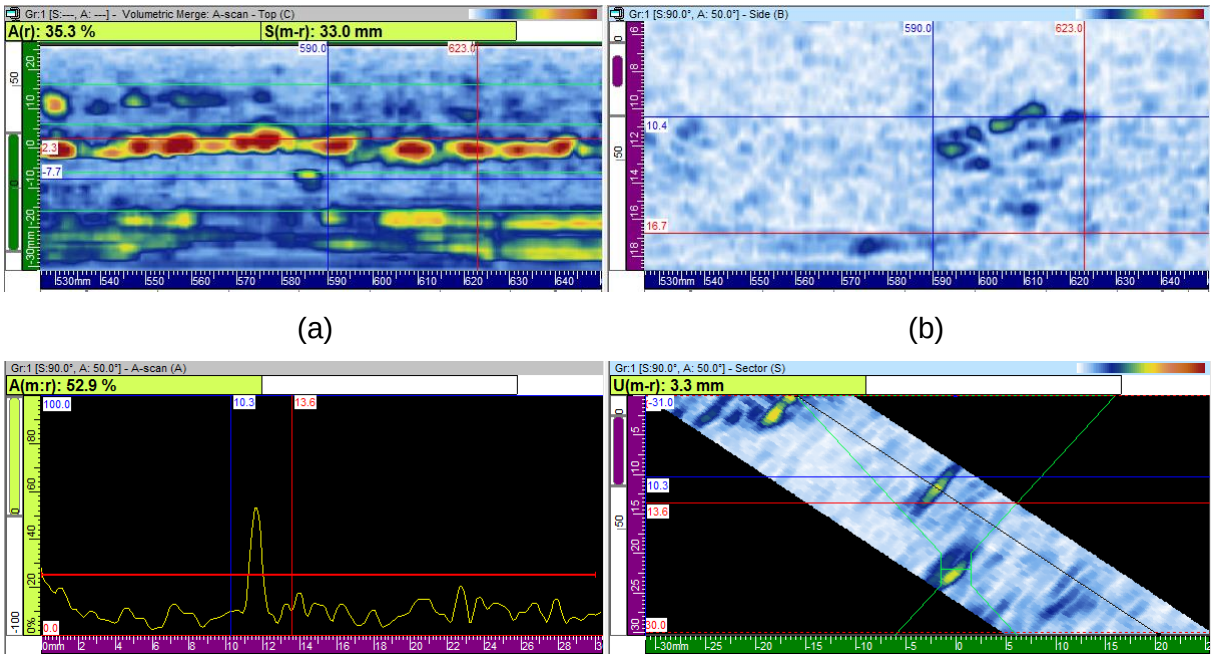
(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.37: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.17 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
3	2	50	52,9	590	33	13,6	3,3	90	5



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.38: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.18 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
4	2	50	>100	600	16	22	2,5	270	5

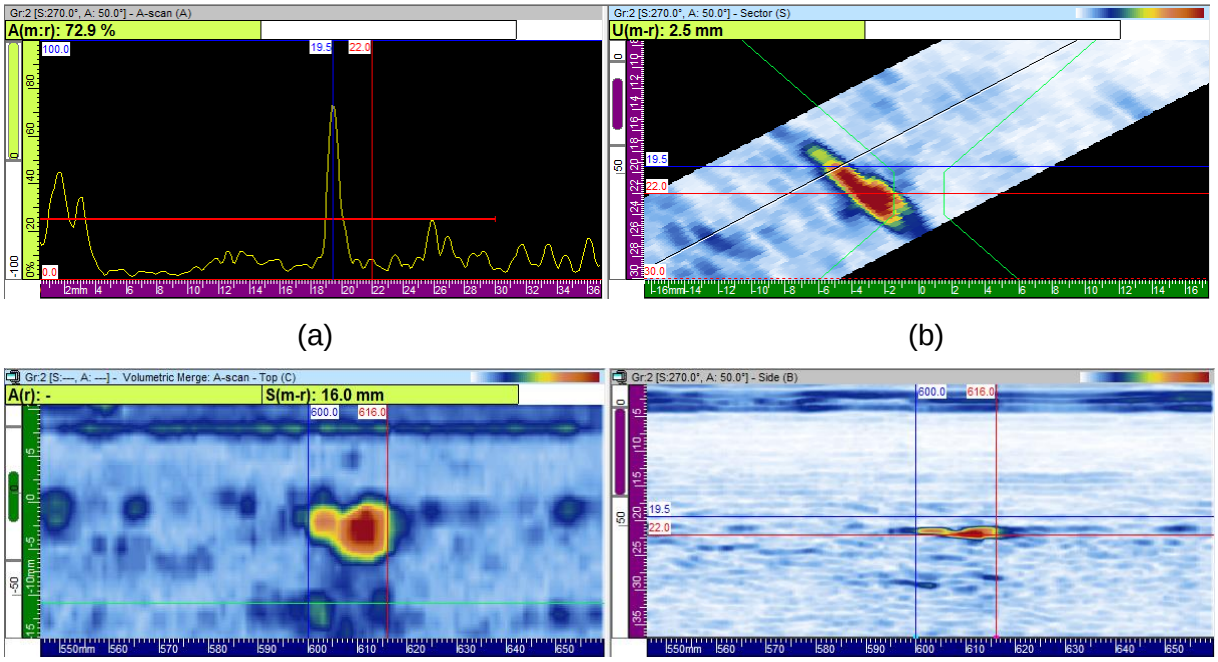


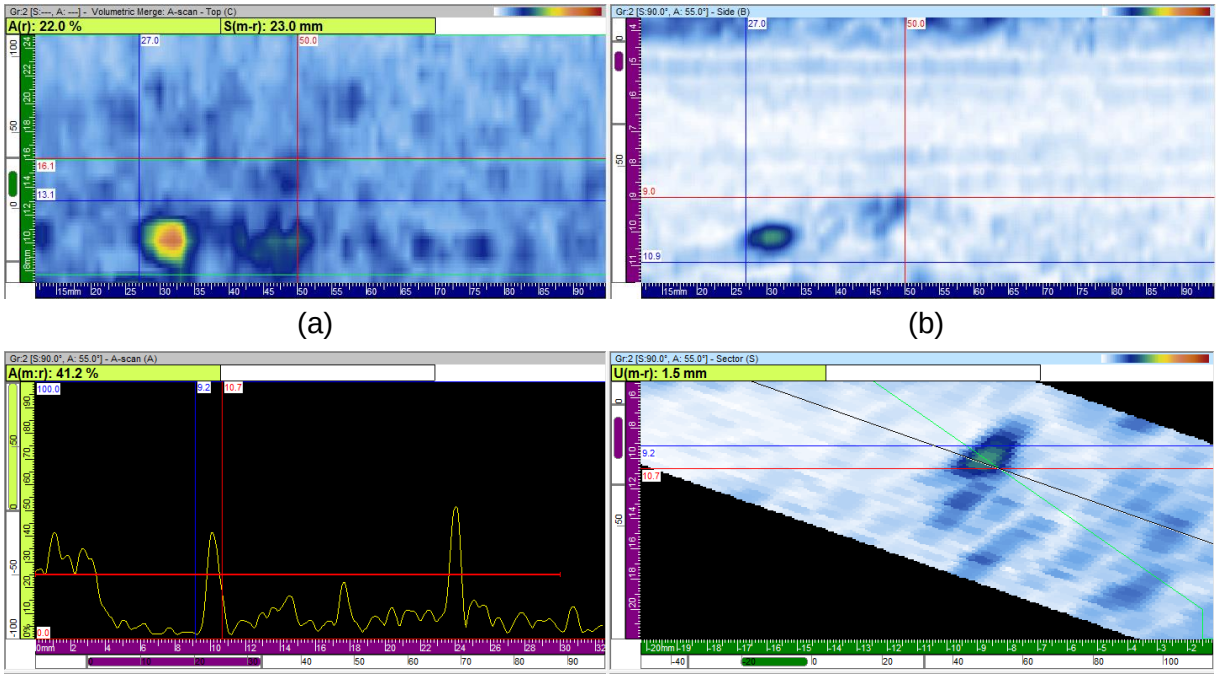
Figura 3.39: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Inspeção Ultrassom *Phased Array* com Transdutor de 5MHz – Varredura Linear: 55º com Onda Longitudinal

Foram identificadas as seguintes descontinuidades durante a inspeção, conforme informações das Tabelas 3.19 a 3.22 e Figuras 3.40 a 3.44.

Tabela 3.19 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
1	2	55	41,2	27	23	10,7	1,5	90	0



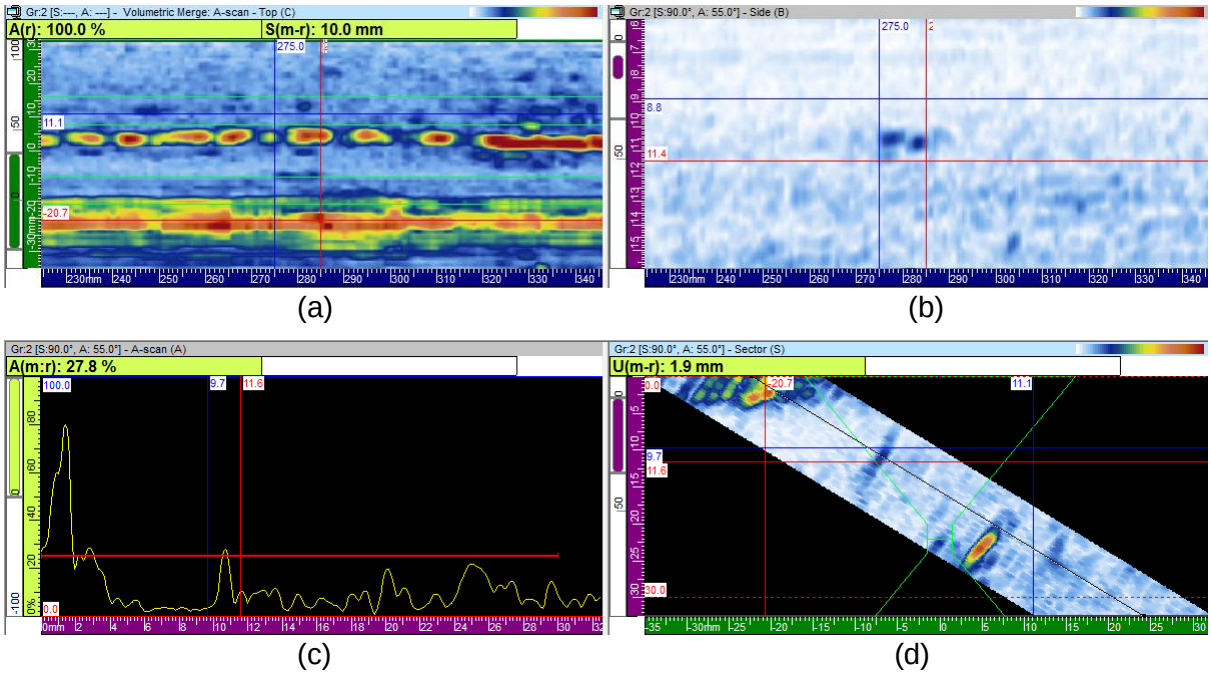
(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.40: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.20 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
2	2	55	27,8	275	10	11,6	1,9	90	0



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.41: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.21 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
3	1	55	73,7	591	35	12,1	2,4	90	0

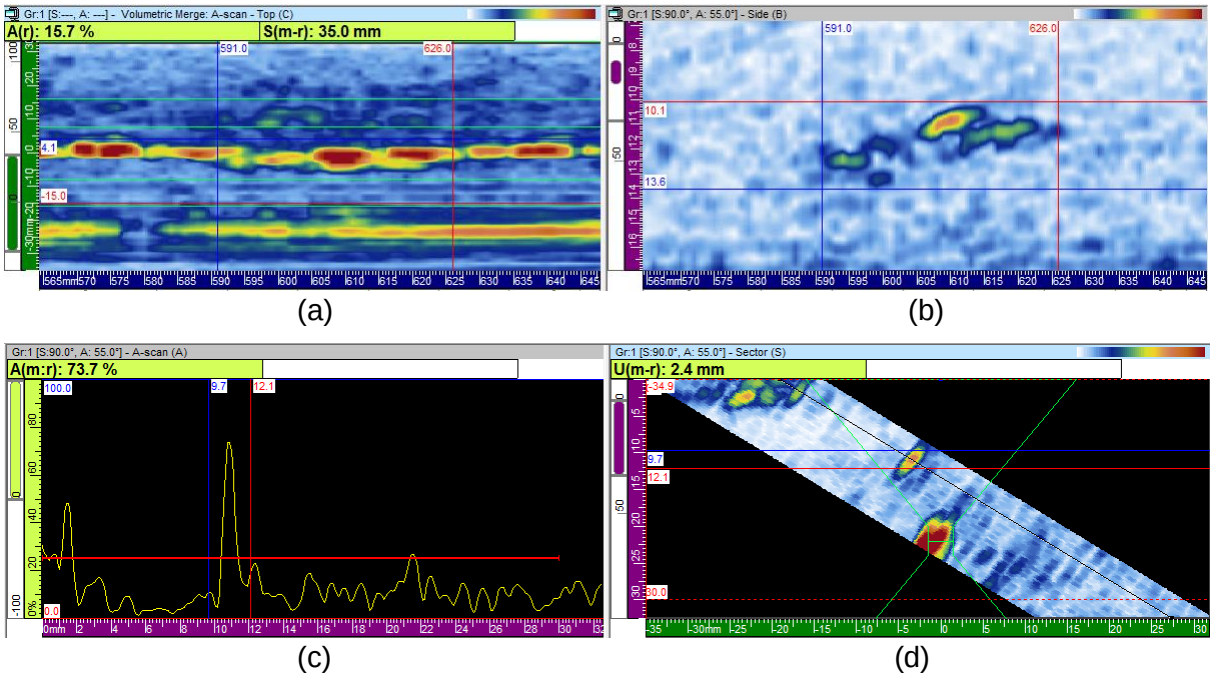
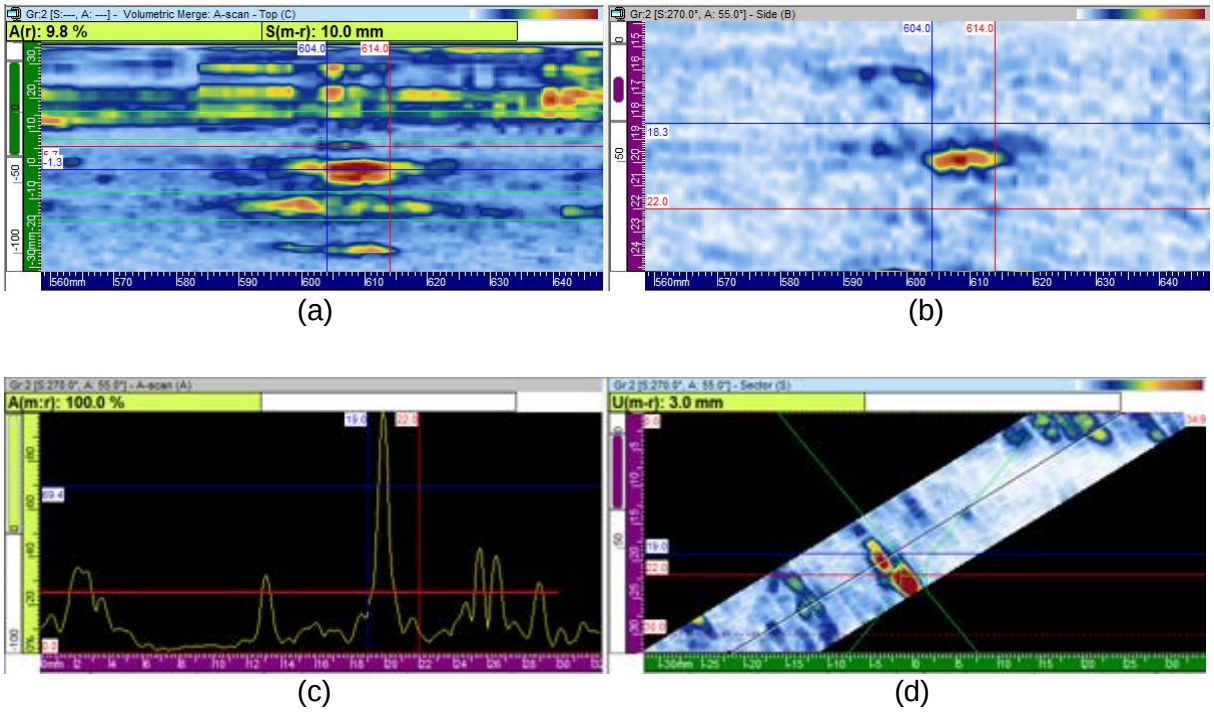


Figura 3.42: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.22 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
4	1	55	>100	604	10	22	3	270	0



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.43: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Inspeção Ultrassom *Phased Array* com Transdutor de 2,25MHz – Varredura Linear: 50º com Onda Longitudinal

Foram identificadas as seguintes descontinuidades durante a inspeção, conforme informações das Tabelas 3.23 a 3.26 e Figuras 3.44 a 3.47.

Tabela 3.23 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
1	1	50	89	29	25	7,5	3,7	90	10

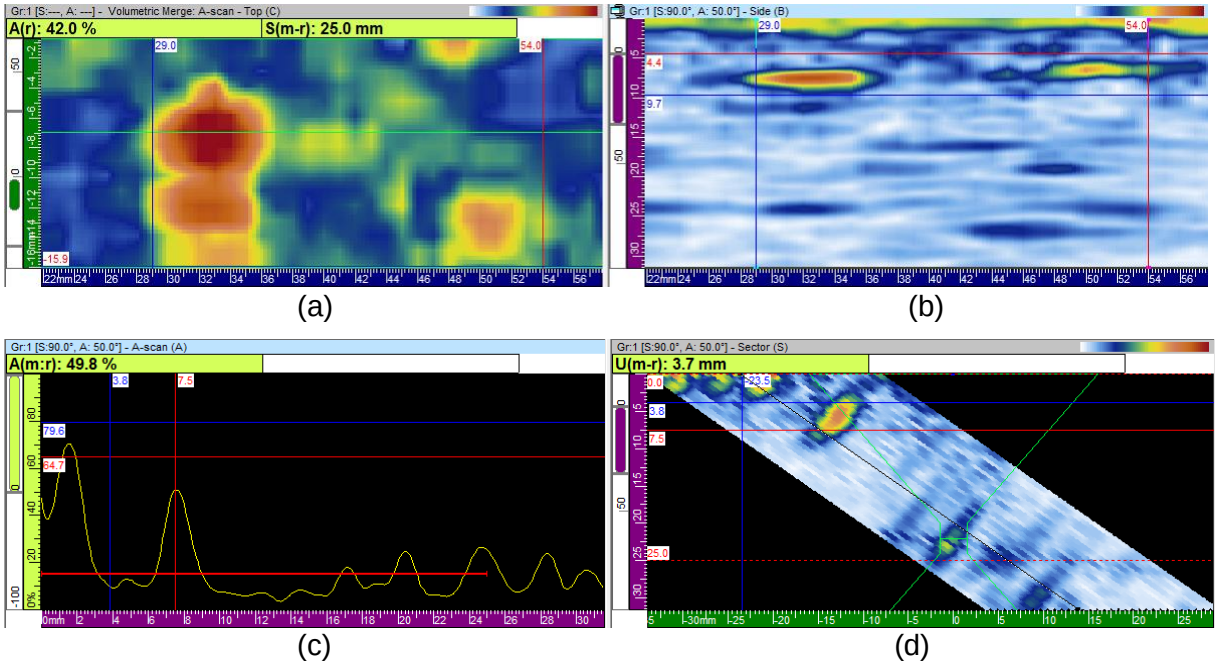
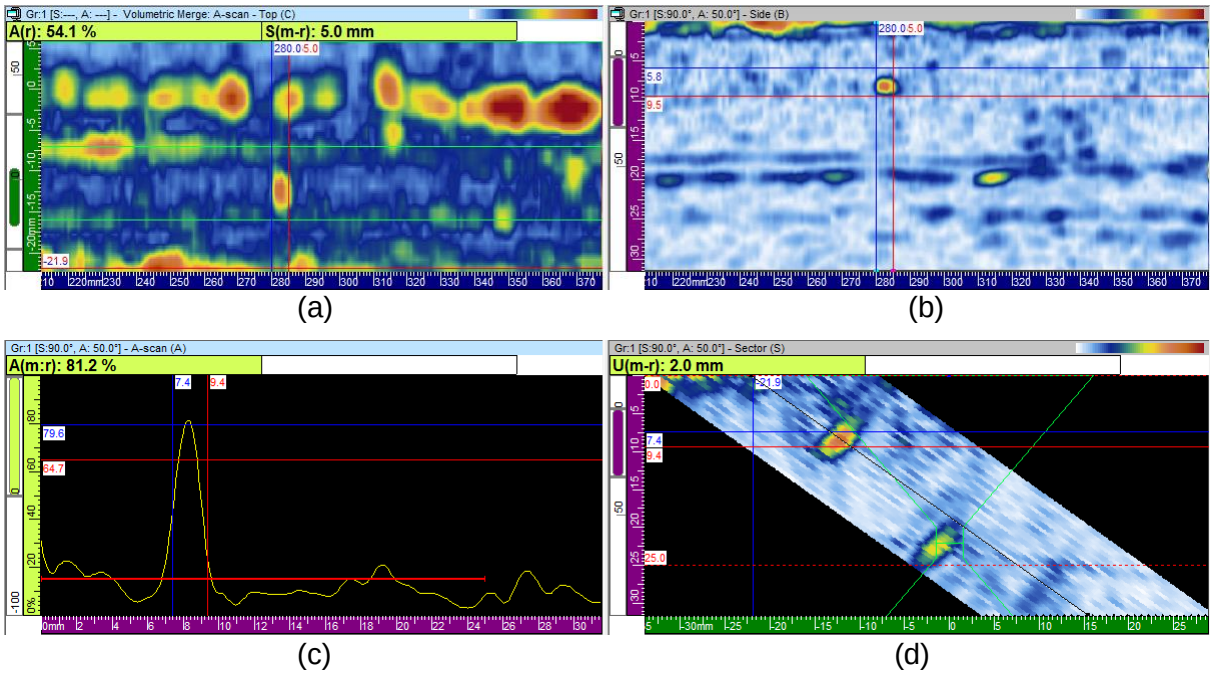


Figura 3.44: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.24 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
2	1	50	81,2	280	5	9,4	2	90	10



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.45: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.25 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
3	1	50	>100	591	35	12,3	3,8	90	10

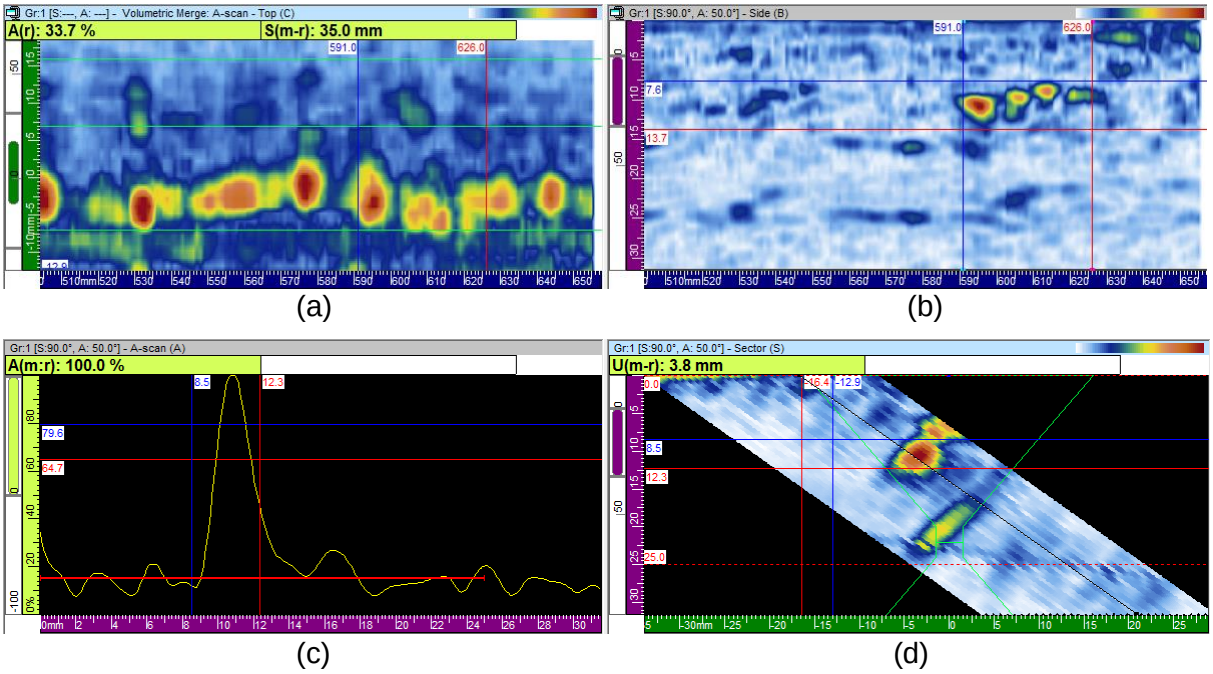


Figura 3.46: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.26 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
4	1	50	70,6	603	11	22	2,3	90	10

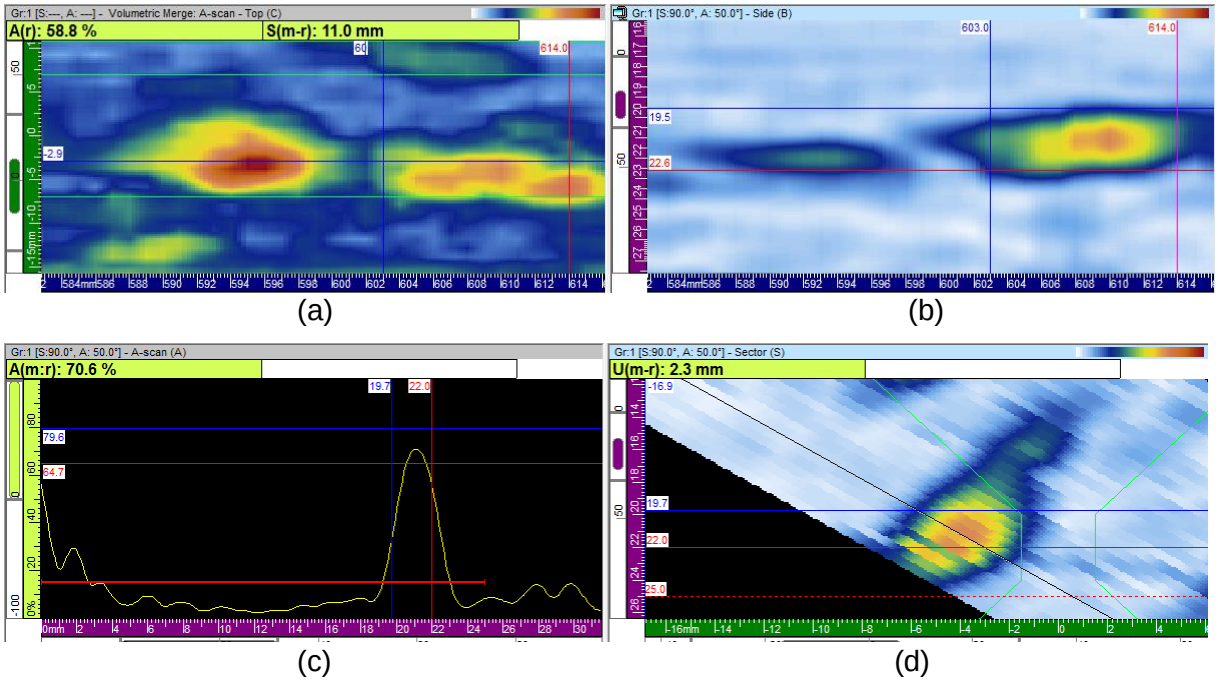


Figura 3.47: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Inspeção Ultrassom *Phased Array* com Transdutor de 2,25MHz – Varredura Linear: 55º com Onda Longitudinal

Foram identificadas as seguintes descontinuidades durante a inspeção, conforme informações das Tabelas 3.27 a 3.30 e Figuras 3.48 a 3.51.

Tabela 3.27 – Descontinuidade 1. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
1	1	55	93,7	29	26	10,9	2,5	90	5

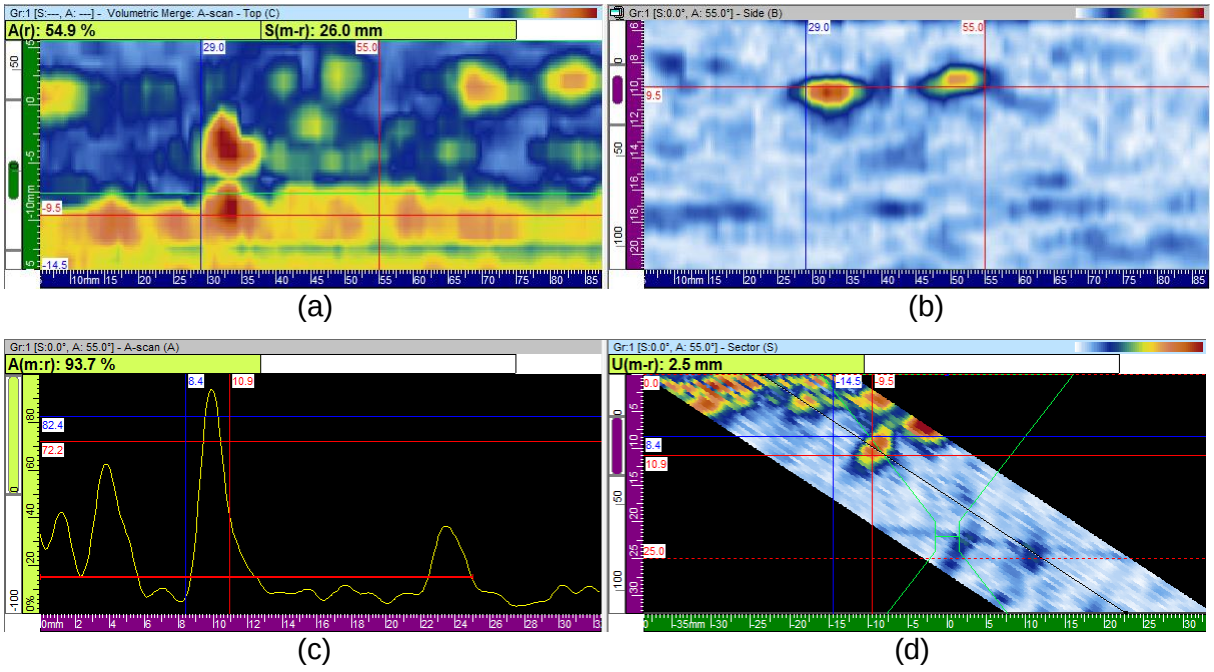
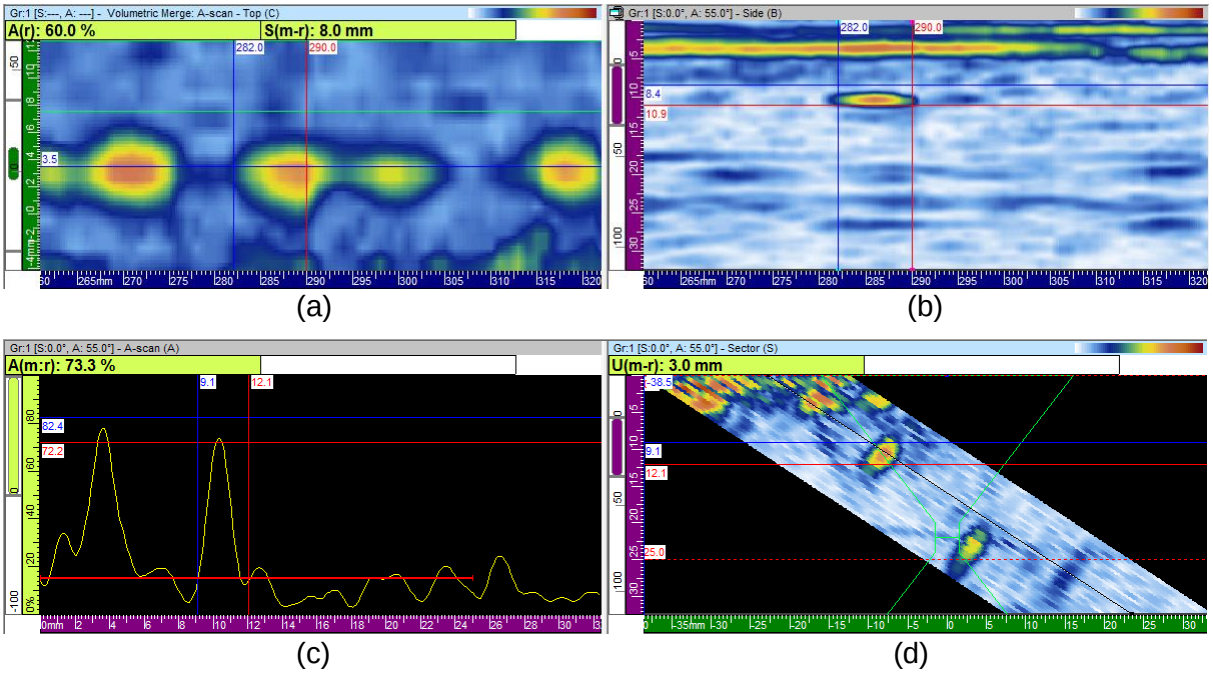


Figura 3.48: Descontinuidade 1. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.28 – Descontinuidade 2. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
2	1	55	73,3	282	8	12,1	3	90	5



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.49: Descontinuidade 2. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.29 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
3	1	55	90,6	595	35	13,2	2,5	90	5

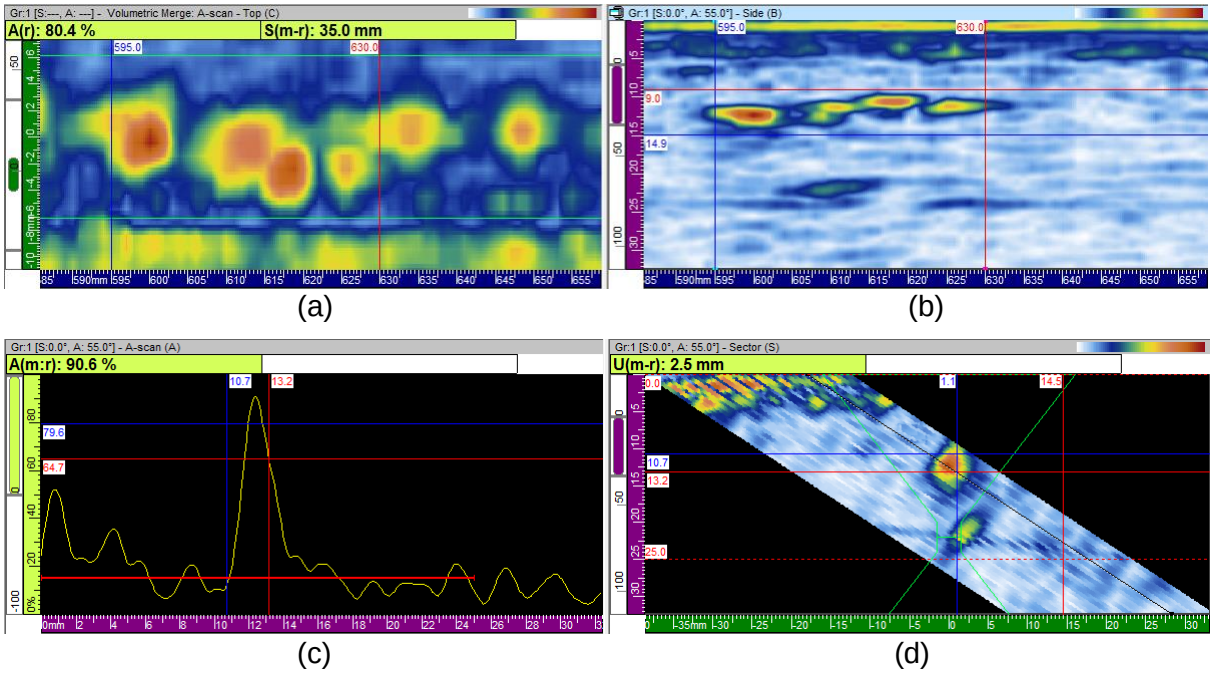
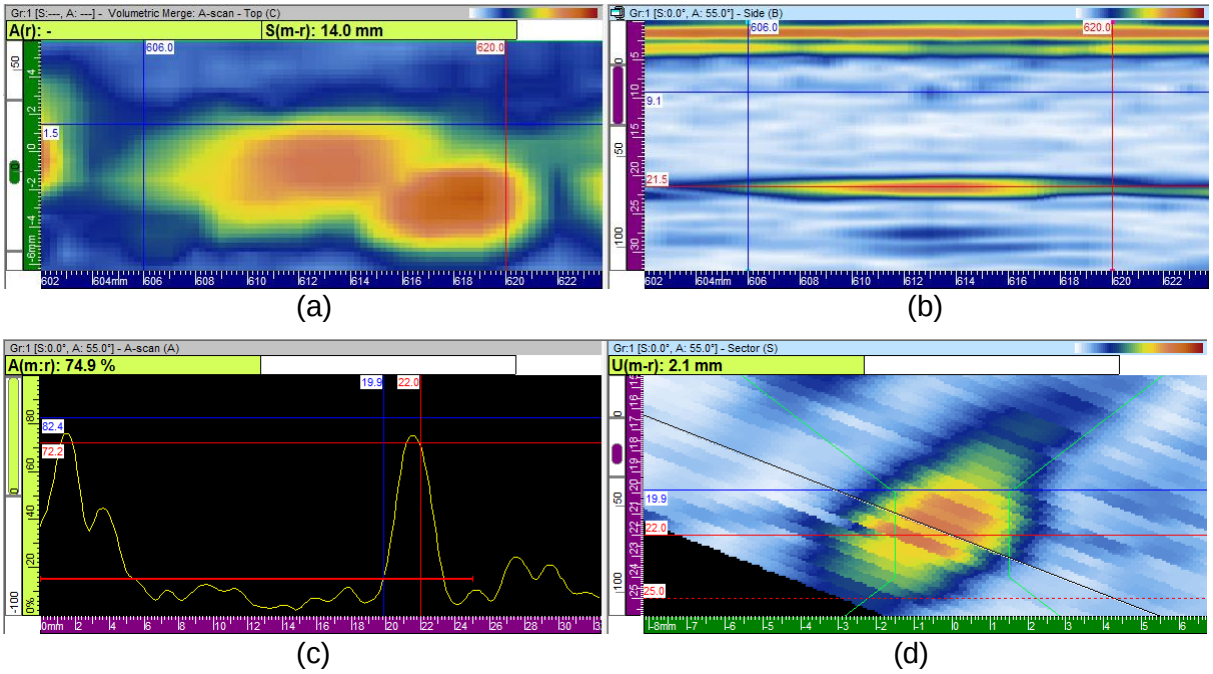


Figura 3.50: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.30 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
4	1	55	74,9	606	14	22	2,1	90	5



(a) (b)

(c) (d)

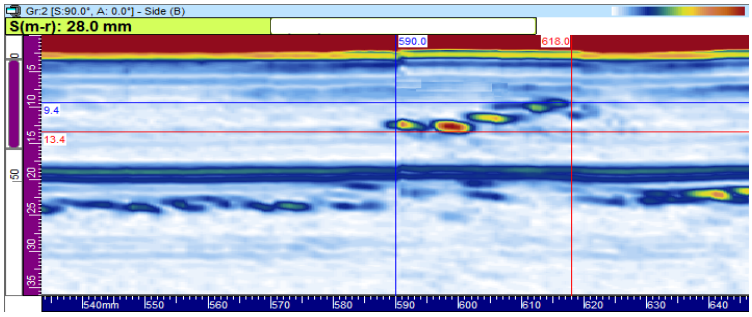
Figura 3.51: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. (a) e (b) Medição do Comprimento. (c) Amplitude. (d) Altura. Tomoview 2.10®.

Inspeção Ultrassom *Phased Array* com Transdutor de 5MHz – Varredura Linear: 0º com Onda Longitudinal

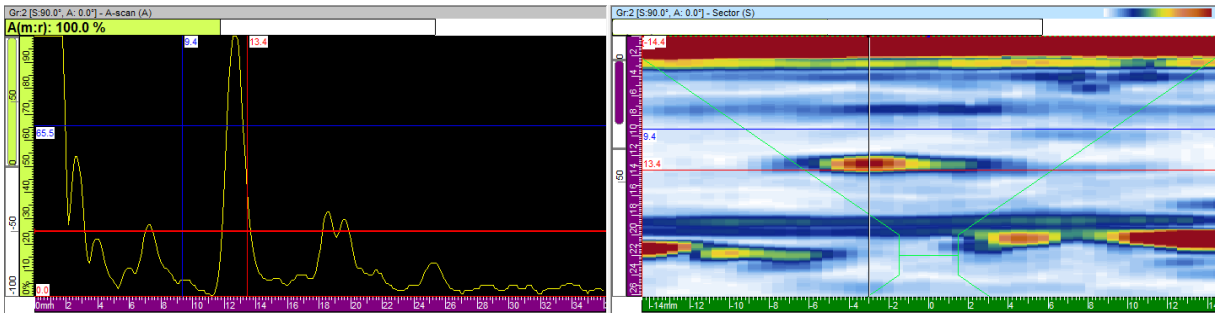
Foram identificadas as seguintes descontinuidades durante a inspeção, conforme informações das Tabelas 3.31 e 3.32 e Figuras 3.52 e 3.53.

Tabela 3.31 – Descontinuidade 3. Varredura Linear com Onda Longitudinais. Ângulo de 0º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
3	1	0	>100	590	28	13,4	-	-	29



(a)

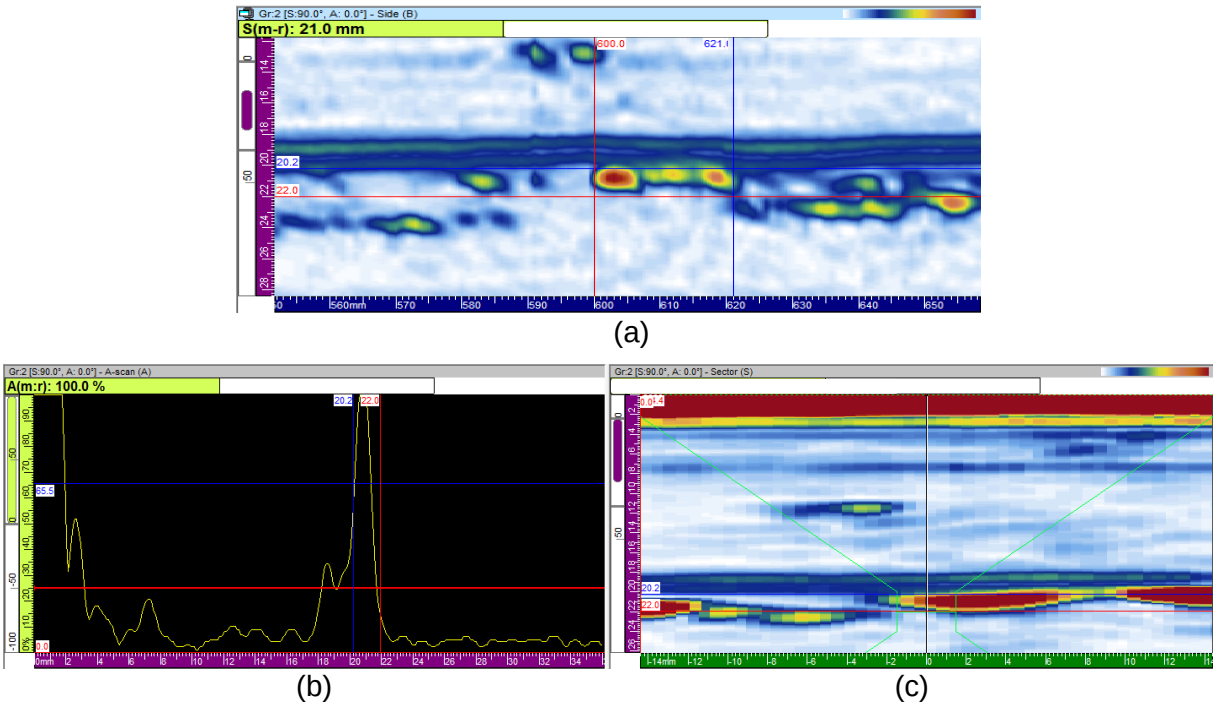


(b) (c)

Figura 3.52: Descontinuidade 3. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 0º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L. (a) Medição do Comprimento. (b) Amplitude. (c) Região de maior profundidade. Tomoview 2.10®.

Tabela 3.32 – Descontinuidade 4. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 0º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L.

Descont.	Grupo	Ângulo (°)	Amplitude (%)	Localização (mm)	Comprimento (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)	Skew	Index
4	1	0	>100	600	21	22	-	-	29



(a)

(b) (c)

Figura 3.53: Descontinuidade 4. Inspeção por Ultrassom *Phased Array*. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 0º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12-0L. (a) Medição do Comprimento. (b) Amplitude. (c) Região de maior profundidade. Tomoview 2.10®.

3.9 Macrografia para Dimensionamento Real das Descontinuidades

A Tabela 3.33 exibe os resultados para o dimensionamento real das 5 descontinuidades que foram avaliadas neste projeto. As Figuras 3.54 a 3.58 exibem as macrografias realizadas para determinação da profundidade real e altura real de cada descontinuidade.

Tabela 3.33 – Dimensionamento Real das Descontinuidades.

Descontinuidade	Descrição	Posição Inicial (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Profundidade (mm)
1	Falta de Fusão no Chanfro	27	25	0,85	10,48
2	Falta de Fusão no Chanfro	275	10	1,59	10,84
3	Inclusão de Escória	590	35	1,54 a 3,75	12,03 a 14,99
4	Falta de Penetração na Raiz	600	15	4,15	22
5	Falta de Fusão no Chanfro	590	30	3,88	5,67

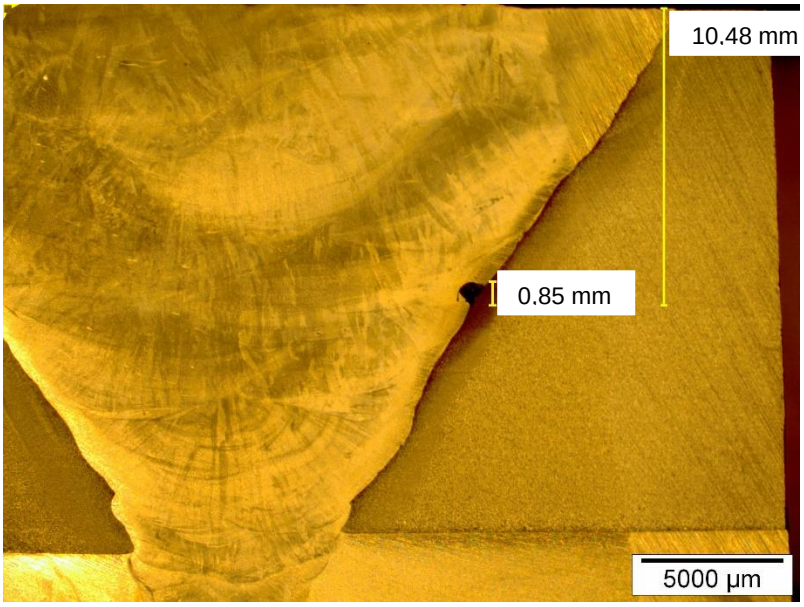


Figura 3.54: Macrografia da Descontinuidade 1. Dimensionamento de Altura e Profundidade.

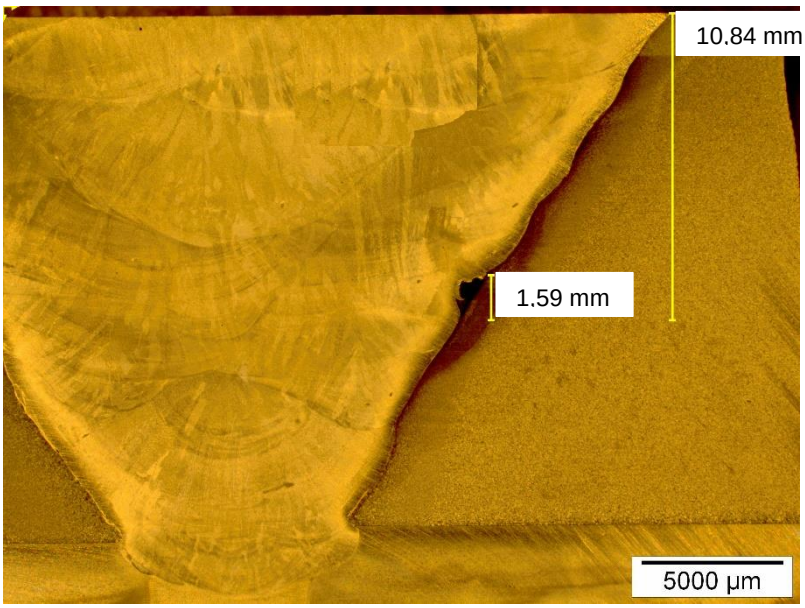
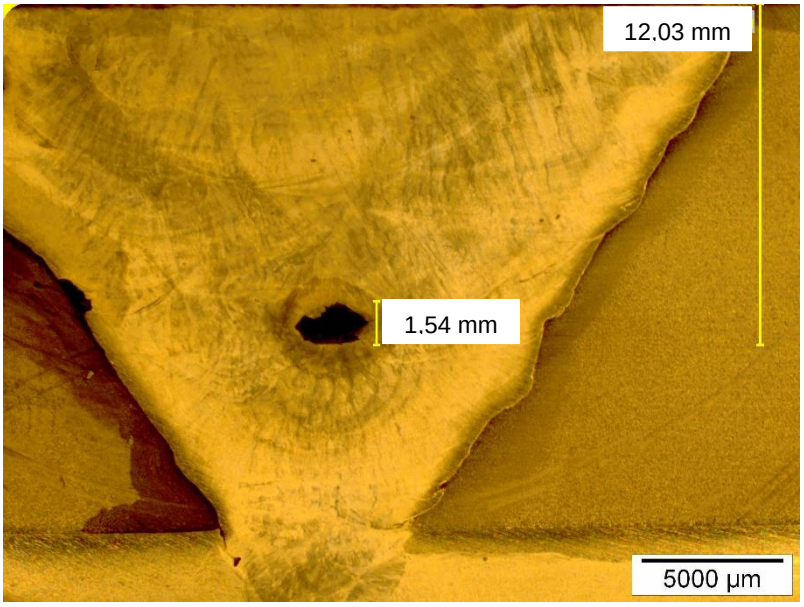
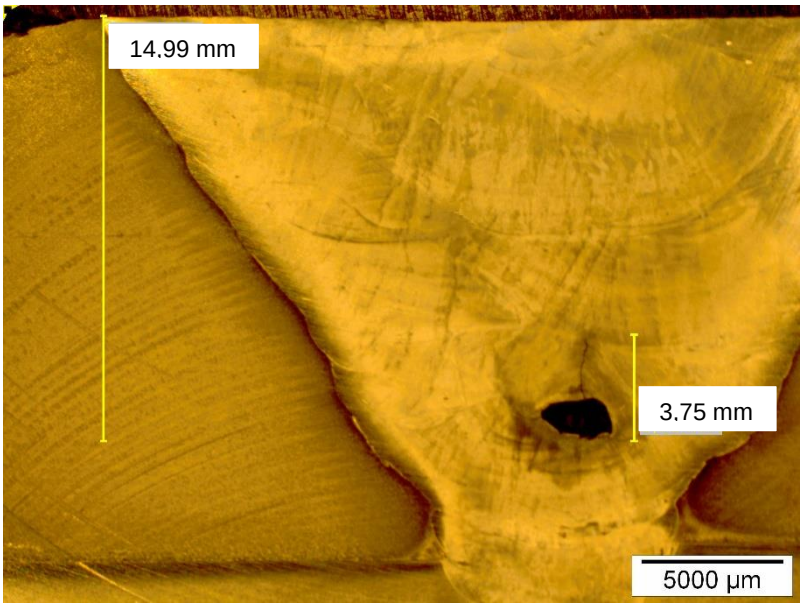


Figura 3.55: Macrografia da Descontinuidade 2. Dimensionamento de Altura e Profundidade.



(a)



(b)

Figura 3.56: Macrografia da Descontinuidade 3. Dimensionamento de Altura e Profundidade. (a) Profundidade Mínima. (b) Profundidade Máxima.

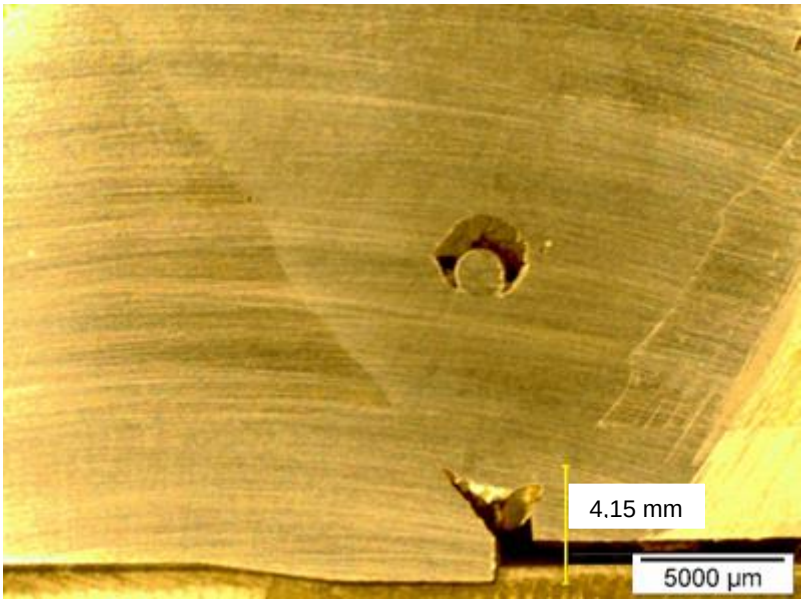


Figura 3.57: Macrografia da Descontinuidade 4. Dimensionamento de Altura.

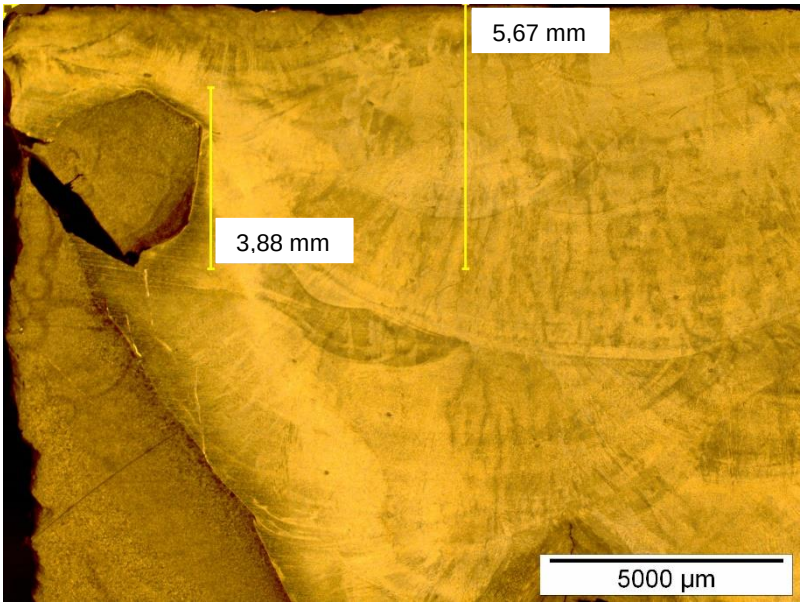


Figura 3.58: Macrografia da Descontinuidade 5. Dimensionamento de Altura e Profundidade.

Capítulo 4 - Discussão

4.1 Avaliação dos resultados dos ensaios para caracterização metalográfica, análise química e dureza vickers da junta soldada

Com os resultados obtidos nos ensaios macrográficos, micrográficos, análise química e ensaio de dureza vickers, a junta soldada foi caracterizada em três regiões, sendo: metal de base, ZTA e metal de Solda.

A região do metal de base apresenta uma microestrutura predominantemente bainítica. Esta é uma região isotropicamente acústica e não apresenta limitações para aplicação do ensaio por ultrassom pela técnica *Phased Array.*

A ZTA próxima ao reforço apresenta uma microestrutura de bainita e martensita decorrente do ciclo térmico da soldagem sobre o metal de base. A ZTA próximo à raiz é formada por grãos poligonais de ferrita e algumas pequenas ilhas de perlita nos contornos de grão. A dureza da ZTA é maior que a do MB devido à ação do ciclo térmico da soldagem que leva a alterações microestruturais.

A microestrutura do metal de solda apresenta um padrão colunar dendrítico característicos da estrutura bruta de fusão decorrente do processo de solidificação do metal de solda. A dureza medida no revestimento apresentou o maior valor, o que é decorrente da natureza do material quando comparado ao metal de base. Observa-se que a região de enchimento apresentou valores menores de dureza, o que se explica pelo fato de que nesta região ocorre o crescimento dos grãos e não sofreu grande influência dos passes subsequentes da soldagem. A dureza reduz com o aumento do tamanho de grão. Analisando a macrografia observa-se que a região do metal de solda é uma região anisotropica, onde, a velocidade de propagação do feixe é influenciada pela microestrutura do material e dependerá do ângulo de incidência em relação à direção de crescimento dos grãos (THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 1994).

A análise química do metal de base, metal de adição e revestimento apresentaram uma composição química conforme a especificada para o aço API 5L X70 e para a liga Inconel® 625.

4.2 Avaliação da Medição do Tamanho de Grão

A região do metal de base apresentou tamanho de grão ASTM nº 11 e o comprimento médio do intercepto foi 7,3 µm. A ZTA apresentou tamanho de grão ASTM nº 11,5 e o comprimento médio do intercepto foi 5,7 µm. O revestimento apresentou tamanho de grão ASTM nº 7,5 e comprimento médio do intercepto igual a 24,9 µm. O tamanho de grão não foi medido na região do metal de solda.

Segundo o THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (1994), microestrutura de uma solda austenítica é formada quando ocorre a solidificação e a fase austenítica forma grãos colunares que crescem ao longo das direções de máxima perda de calor durante o resfriamento. Estes grãos podem atingir até um ou dois milímetros de comprimento.

Quando o tamanho de grão é da ordem de 1/10 do comprimento de onda, ocorre interferência no feixe sônico gerando espalhamento (CARPENTIER; NAGESWARAN; TSE, 2010) (NAGESWARAN; TAT-HEAN GAN, 2015). O comprimento de onda é calculado pela razão entre a velocidade de propagação da onda no material e a frequência adotada.

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 foram calculados o comprimento de onda para as frequências de 4MHz e 2,25 MHz e as velocidades adotadas neste estudo utilizando a Equação 4.

Tabela 4.1 – Comprimento de Onda para a Frequência de 4 MHz

Região MB/Revestimento		Região da Solda	
Vel. Longitudinal 5793,6 m/s	Vel. Transversal 3264,6 m/s	Vel. Longitudinal 5911,6 m/s	Vel. Transversal 2944,6 m/s
λ = 1,448 mm	λ = 0,816 mm	λ = 1,478 mm	λ = 0,736 mm
$\lambda/10$ = 145 µm	$\lambda/10$ = 82 µm	$\lambda/10$ = 148 µm	$\lambda/10$ = 74 µm

Tabela 4.2 – Comprimento de Onda para a Frequência de 2,25 MHz

Região MB/Revestimento		Região da Solda	
Vel. Longitudinal 5793,6 m/s	Vel. Transversal 3264,6 m/s	Vel. Longitudinal 5911,6 m/s	Vel. Transversal 2944,6 m/s
λ = 2,575 mm	λ = 1,451 mm	λ = 2,627 mm	λ = 1,308 mm
$\lambda/10$ = 258 µm	$\lambda/10$ = 145 µm	$\lambda/10$ = 263 µm	$\lambda/10$ = 131 µm

Observa-se que o tamanho de grão avaliado no metal de base, na ZTA e no revestimento ("lined") influencia na propagação do feixe sônico pelo espalhamento rayleigh, apesar de o tamanho de grão medido ser menor que 1/10 do comprimento de onda.

A microestrutura da solda é mais grosseira do que na região do revestimento ou no metal de base (NAGESWARAN; TAT-HEAN GAN, 2015). Uma onda ultrassônica que se propaga através do material pode ser desviada ou fortemente atenuada.

No estudo desenvolvido pelo UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (2011), observou-se que um comprimento de onda maior melhora a penetração da energia ultrassônica em ligas austeníticas. À medida que o comprimento de onda aumenta (em relação ao tamanho médio dos diâmetros dos grãos), a atenuação do feixe sônico é reduzida, pois se torna menos sensível aos efeitos da microestrutura.

4.3 Avaliação do Ensaio Radiográfico

Os ensaios radiográficos se destacam pela sua propensão em detectar defeitos volumétricos. No presente estudo observou-se que, as descontinuidades oriundas da falta de fusão no chanfro, apresentaram dificuldade para serem detectadas pelo ensaio radiográfico, enquanto que no ensaio ultrassônico elas foram facilmente detectadas.

Segundo ASM METALS HANDBOOK (2012), a radiografia é uma técnica deficiente para detectar defeitos planares em soldas como falta de penetração, falta de fusão e trincas caso não estejam paralelas ao feixe de radiação.

Foram detectadas ao longo do CP02 descontinuidades do tipo porosidade que não foram planejadas inicialmente. Desta forma, não foram analisadas neste trabalho.

4.4 Avaliação da Simulação Computacional pelo software CIVA

Pode ser observado analisando as Figuras 3.11 a 3.17 que os feixes sônicos ao se propagarem no material ferrítico API 5L X70 (meio isotrópico) apresentam perfis com boa penetração. Quando o feixe sônico atinge a solda de Inconel® 625 (meio anisotrópico), ocorre grande perturbação do formato original do perfil sônico para as ondas longitudinais e transversais. Deslocamentos quanto a localização e dimensionamento das descontinuidades podem ocorrer devido a esta perturbação.

Os contornos de grão causam uma reflexão parcial do feixe sônico que alteram a velocidade da onda de propagação (THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 1994). GARDAHAUT *et al* (2014) observou que o perfil do feixe simulado é desviado ao se propagar em uma solda anisotrópica, em comparação com o feixe simulado em meio isotrópico. Os resultados obtidos por AIZPURUA *et al* (2014) em um estudo para caracterização da estrutura de soldas anisotrópicas para a indústria nuclear mostram que a propagação do feixe não é uma linha reta. A anisotropia do material e a diferença na orientação dos grãos afeta o feixe e o desvia da trajetória esperada.

A fim de comparações, foi realizada uma simulação computacional utilizando ondas transversais com feixe rebatido (“full skip”) em um aço carbono (estrutura isotrópica), mostrada na Figura 4.1. Pode-se observar que a propagação do feixe sônico atinge todo o volume da solda, sem grande atenuação ou dispersão do feixe.

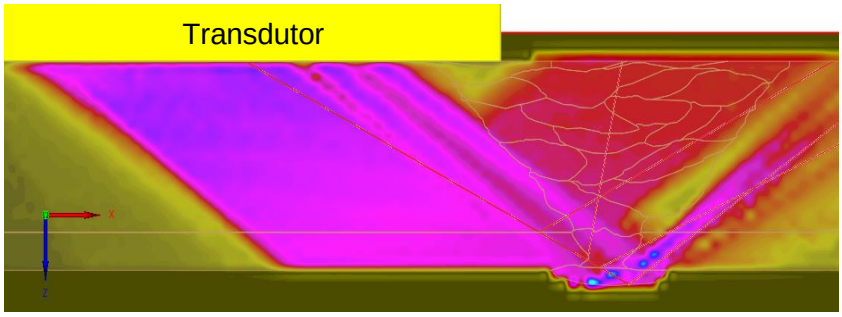


Figura 4.1: Simulação de inspeção por US-PA em Material Isotrópico. Ondas transversais. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N55S. Varredura linear: 55º; Elementos ativos: 32; 1º elemento: 1. Index: -35 mm. CIVA 11.0®.

O feixe sônico ao incidir na região de interface entre o material ferrítico API 5L X70 e o revestimento de Inconel 625 sofreu grande atenuação devido à dificuldade em se propagar para o segundo meio. As regiões de maior pressão sônica (de coloração azul) estão mais presentes nas simulações que utilizaram o maior index na configuração, pois nesta região o feixe sônico percorre uma área menor na região da solda sofrendo menor influência da estrutura anisotrópica do material e consequentemente, menor atenuação.

A simulação pelo software CIVA colaborou neste trabalho para a confirmação das possíveis trajetórias do feixe sônico no interior de soldas austeníticas. As comparações feitas com os resultados experimentais e as inspeções realizadas apresentaram resultados bastante similares quanto à avaliação da atenuação e dispersão do feixe. Comparações quanto a simulação de incidência do feixe sônico em descontinuidades na solda e a inspeção real não foram avaliadas neste estudo.

4.5 Avaliação da Atenuação e da Velocidade Sônica nos Materiais

Na região do metal de base (MB)/revestimento (“lined”), a velocidade medida foi uma média entre as duas regiões analisadas, que foi de 5793,6 m/s para ondas longitudinais e 3264,6 m/s para ondas transversais. Na região da solda, a velocidade medida foi igual a 5911,6 m/s para ondas longitudinais e 2944,6 m/s para ondas transversais. Os valores encontrados estão próximos do que se tem disponível em bibliografia para o Inconel® 625 conforme verificado na Tabela 1.1. A variação de velocidade medida neste estudo para o valor teórico foi menor que 2%.

O valor da atenuação depende do tamanho, forma, distribuição das orientações e anisotropia dos grãos (PLOIX et al, 2006). Na região do metal de base (MB)/revestimento (“lined”), a atenuação média foi de 0,10 dB/mm para ondas longitudinais e 0,12 dB/mm para ondas transversais. Na região da solda, a atenuação média foi de 0,44 dB/mm para ondas longitudinais e 0,26 dB/mm para ondas transversais. Como esperado, a atenuação foi maior na solda devido a alterações de velocidade que a onda sofre pela anisotropia desta região.

O UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY NORTHERN DIVISION (1985) avaliou a atenuação em materiais austeníticos e verificou que na faixa de frequência entre 2 e 4 MHz, a atenuação devido à dispersão varia entre 0,2 e 1,0 dB por mm para todos os três modos de onda, porém, isso não inclui outros fatores como a divergência do feixe sônico, que é um efeito comum em soldas austeníticas.

4.6 Avaliação da Relação Sinal/Ruído

A relação sinal/ruído do material foi avaliada na região central da solda. Foi utilizado o transdutor *Phased Array* de 5MHz com onda longitudinal e os seguintes ângulos de propagação: 0º, 35º, 40º, 45º, 50º, 55º, 60º, 65º e 70º. A melhor relação sinal/ruído apresentada foi para os ângulos de 50º e 55º, onde o ganho referente ao sinal proveniente do ruído foi 21,7 e 20,1 dB respectivamente. Se o ganho referente ao sinal proveniente do ruído for, pelo menos, 20 dB maior que o ganho referente ao sinal proveniente do refletor, a relação sinal/ruído é considerada satisfatória.

Soldas de ligas à base de níquel são consideradas difíceis de inspecionar por ultrassom. O eco de ruído é gerado a partir da microestrutura cristalina colunar do metal de solda como um eco de ruído do material, de modo que o eco da ponta da ponta do defeito é ocultado pelo eco de ruído gerado pela microestrutura resultando em uma baixa capacidade de detecção e redução da relação sinal / ruído (HIRASAWA; FUKUTOMI, 2010).

O nível de ruído aumenta com o aumento da frequência acústica. O uso de sondas de baixa frequência (1 a 2 MHz) é recomendado para minimizar o nível de ruído destes materiais (UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY NORTHERN DIVISION, 1985).

4.7 Avaliação da Inspeção por Ultrassom através da Técnica *Phased Array*

Para este estudo foram soldadas duas juntas com exatamente os mesmos parâmetros de soldagem, identificadas como CP01 e CP02. O CP01 foi utilizado para a confecção de corpos de prova e para fabricação de três blocos padrões para a realização das calibrações do ensaio. O CP02 foi utilizado para verificação da capacidade de detecção e dimensionamento de descontinuidades internas pela técnica de inspeção por ultrassom *Phased Array.*

O procedimento e o processo de soldagem de uma junta têm grande influência na inspeção ultrassônica de soldas austeníticas. EDELMANN e HORNUNG (1982) reforçam a importância de se fabricar blocos padrões onde os parâmetros de soldagem sejam o mais próximo possível da junta a ser examinada a fim de se alcançar o mesmo alinhamento dos grãos que compõem a microestrutura da solda.

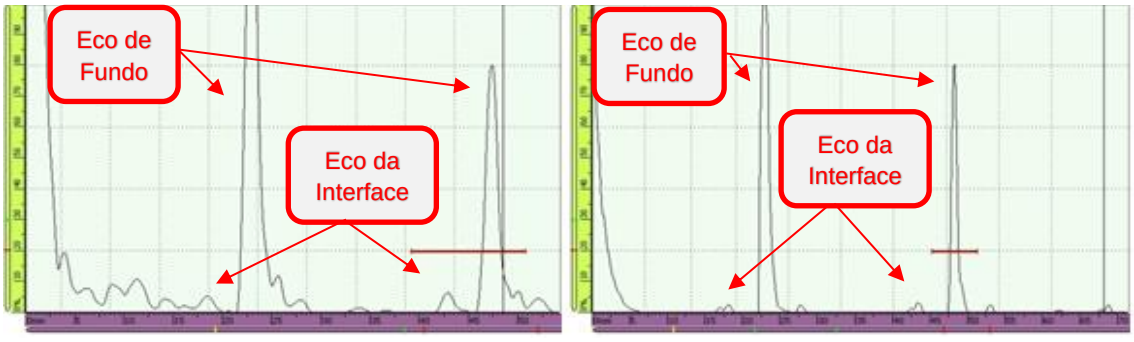
Foi verificado que com o uso de mais elementos, 32 neste caso, houve um aumento no poder de penetração do feixe, gerando uma maior possibilidade de focalização e melhoria da resolução angular resultando em imagens de maior qualidade e contribuindo para uma inspeção mais confiável.

Foi possível realizar a detecção dos 3 furos cilíndricos do bloco padrão B com solda e furos na linha de fusão (Figura 2.4) utilizando ondas longitudinais e do bloco padrão A com solda e furos centralizados (Figura 2.3) utilizando ondas transversais. Pode-se concluir que um procedimento de inspeção por ultrassom *Phased Array* pode ser qualificado conforme a norma Petrobrás N-1594_F.

Para realizar as varreduras utilizando ondas longitudinais foi removido o reforço da solda, pois ondas longitudinais trabalham somente com incidência direta (“half skip”) devido a maior parte da energia do feixe sônico incidente ser perdida para uma onda transversal convertida após a reflexão.

No estudo desenvolvido na UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY NORTHERN DIVISION (1985) foi removido o reforço da solda para que o transdutor se acoplasse na superfície da junta a fim de viabilizar a inspeção volumétrica das soldas austeníticas usando ondas longitudinais. FIGUEREDO e AIUB (2016) qualificaram um procedimento para inspeção de soldas austeníticas com o reforço utilizando sapatas “*Water Wedge*”.

No caso do presente trabalho onde o revestimento do tubo utilizado é um “lined” fabricado por expansão, observou-se que a propagação do feixe ocorre em ambos os materiais quando se utiliza tanto ondas longitudinais quanto transversais. Este fato pode ser comprovado pela análise da Figura 4.2. É possível observar ecos de baixa amplitude após maximização do segundo eco proveniente da reflexão de fundo do bloco curvo, na posição correspondente a região de interface entre o aço API 5L X70 e o revestimento de Inconel® 625, além do eco de fundo referente a espessura de parede do tubo.



(a) (b)

Figura 4.2: Verificação do Eco de Interface na Região MB/Lined. (a) Utilização de Onda Longitudinal. (b) Utilização de Onda Transversal.

Foi observada uma mudança na velocidade do feixe sônico ao penetrar-se no metal de solda, o que acarretou a um deslocamento no posicionamento das indicações. Quando o feixe sônico se propaga através do material austenítico, a direção de propagação pode não ser a mesma que a do feixe incidente, sendo a direção exata dependente da orientação do grão na microestrutura do material. Esta variação da trajetória do feixe sônico causada pela anisotropia do material pode levar a erros na localização e dimensionamento de defeitos (UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY NORTHERN DIVISION, 1985).

O feixe sônico ao incidir na interface do revestimento (“lined”) de Inconel® 625 com o tubo de aço API 5L X70, gerou uma indicação próxima da raiz nas varreduras realizadas, referente a esta interface. O eco de fundo gerou uma indicação semelhante à de uma falta de penetração de raiz em toda a sua extensão, como mostrado na Figura 4.3. Estas indicações estão localizadas em uma profundidade de 24 mm, posterior a espessura de parede do tubo devido a mudança na velocidade do feixe sônico.

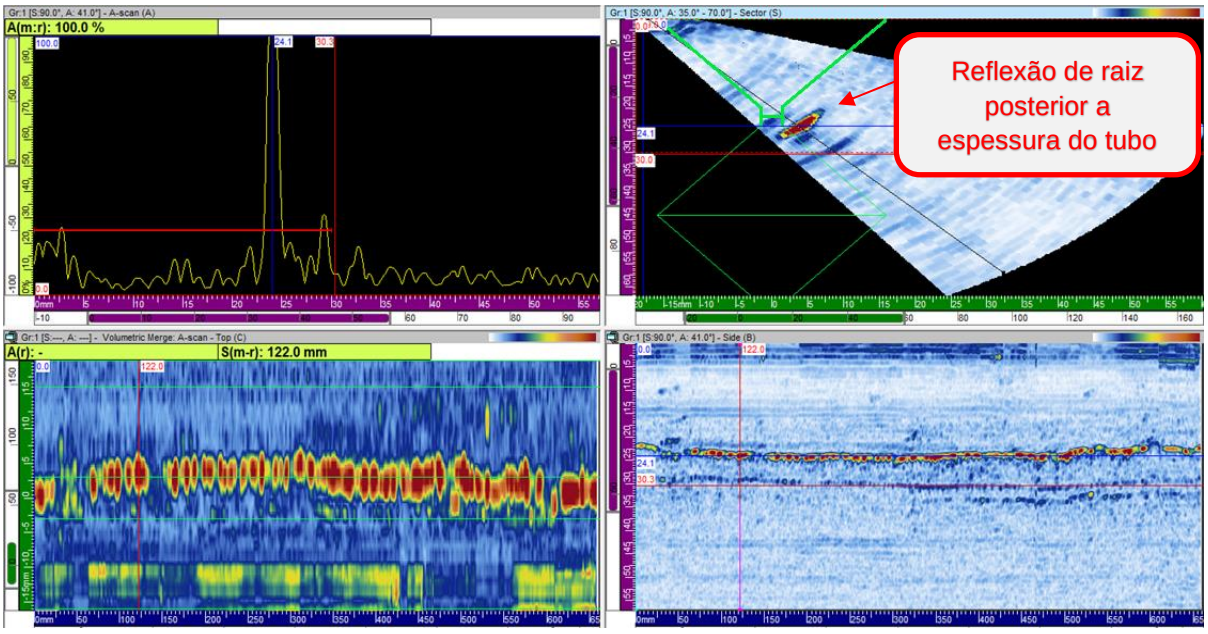


Figura 4.3: Indicação do eco de fundo do tubo. Profundidade de 24 mm. Tomoview 2.10®.

No guia de boas práticas e lições aprendidas PIPELINE OPERATORS FORUM (2015), elaborado pelas operadoras BP Exploration, Shell, Petrobras, ExxonMobil, Statoil, Total e ConocoPhillips é informado que se o revestimento de ligas resistentes a corrosão é metalurgicamente ligado ao aço carbono, não ocorre reflexão do pulso ultrassônico na interface entre os materiais. Porém, se os materiais são mecanicamente ligados, como no caso de tubos revestidos por expansão, a energia do feixe ultrassônico será refletida na interface gerando uma indicação de eco de interface.

Johannes KEUTER (2014), em um estudo de inspeção em tubos revestidos por ligas resistentes a corrosão verificou que para tubulações ligadas mecanicamente, a qualidade da interface entre o aço carbono e o revestimento de ligas resistentes a corrosão é muito importante. Esta interface pode atuar como um refletor e comprometer a inspeção por ultrassom. Contudo, o autor recomenda uma análise para cada projeto. No caso de um revestimento metalurgicamente ligado (“clad”) a aplicação do ultrassom é possível, já que o feixe sônico percorrera tanto o aço carbono quanto o revestimento.

4.7.1 Inspeções US-PA com Transdutor de 5MHz – Varredura Linear: 55º com Onda Transversal

A varredura com ondas transversais foi realizada com o objetivo de identificar descontinuidades de falta de fusão no chanfro. A avaliação do volume da solda não foi possível de ser realizada com este tipo de onda devido à grande atenuação que o feixe sônico sofreu ao se propagar na microestrutura.

4.7.2 Inspeção US-PA com Transdutor de 5MHz – Varredura Setorial: 35º a 70º com Onda Longitudinal

A utilização de uma única configuração de feixe sônico cobrindo todo o metal de solda nesta varredura não demonstrou bons resultados devido às variações de velocidade e a dispersão que o feixe sônico sofreu no metal austenítico gerando grandes deslocamentos no posicionamento das indicações. As varreduras setoriais não identificaram as descontinuidades de falta de fusão no chanfro.

Conforme verificado por André LAMARRE (2016) e pela Absolute NDE (2016), a inspeção realizada com focalização em diferentes regiões do metal de solda apresenta melhores resultados para a inspeção.

4.7.3 Inspeções US-PA com Transdutores de 2,25MHz e 5MHz – Varredura Linear: 50º e 55º com Onda Longitudinal

Observa-se que a reflexão do eco de fundo referente a raiz da solda também gerou uma indicação semelhante à de uma falta de penetração de raiz em toda a sua extensão, gerando uma imprecisão quanto ao dimensionamento do defeito inserido na raiz da solda. Com a focalização do feixe em 22 mm (espessura de parede do tubo), foi possível distinguir o defeito de raiz em algumas das varreduras. A utilização da visualização D-scan foi fundamental para análise da detecção e dimensionamento das descontinuidades.

Durante a inspeção foi observado uma zona morta variando de 4 a 6 mm na região superior da solda em todas as varreduras, como mostram as Figuras 4.4 a 4.7.

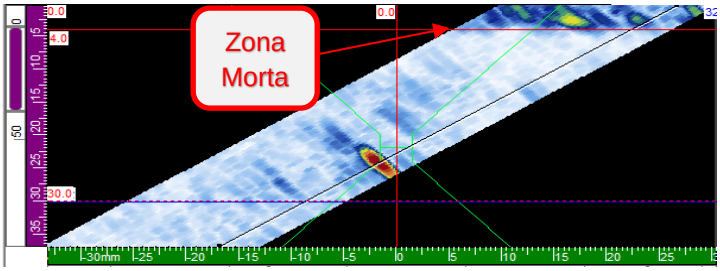


Figura 4.4: Zona morta de 4 mm na região superior da solda. Inspeção por US-PA. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Tomoview 2.10®.

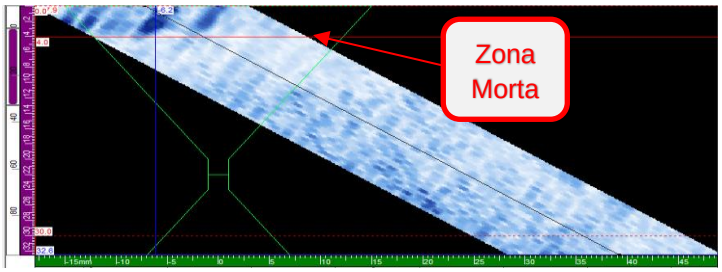


Figura 4.5: Zona morta de 4 mm na região superior da solda. Inspeção por US-PA. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 5L64-A12 / Sapata SA12N60L. Tomoview 2.10®.

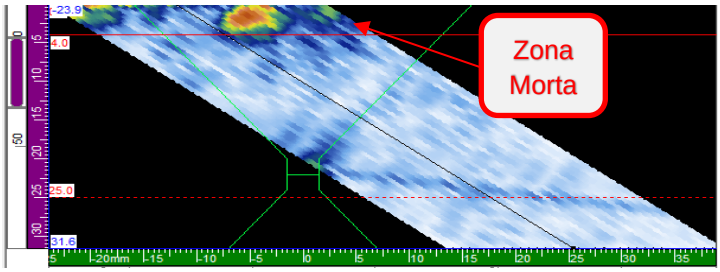


Figura 4.6: Zona morta de 4 mm na região superior da solda. Inspeção por US-PA. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 50º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Tomoview 2.10®.

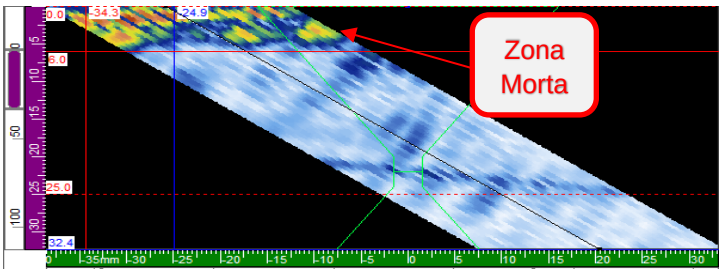


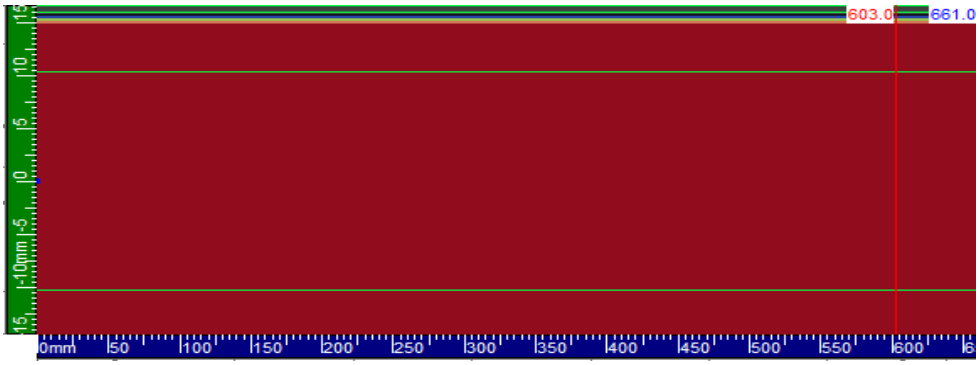
Figura 4.7: Zona morta de 6 mm na região superior da solda. Inspeção por US-PA. Varredura Linear com Ondas Longitudinais. Ângulo de 55º. Conjunto Transdutor 2,25L64-A2 / Sapata SA2N45L-2L64. Tomoview 2.10®.

Esta zona morta é consequência do acoplamento do transdutor sobre a solda e varia de acordo com a lei focal, frequência do transdutor e acabamento superficial. Este fato pode inviabilizar a inspeção em espessuras menores ou mesmo a inspeção na região superior da solda. Por isso é importante a utilização de transdutores de ondas de “creeping” para avaliação da região superior da solda (LAMARRE, 2016) (DUCHARME *et al*, 2016). O uso de sapatas “Water Wedge” pode ser aplicado para minimizar este efeito da zona morta do eco de entrada na peça (FEUILLY *et al*, 2013) (FIGUEREDO; AIUB, 2016). As sapatas “Water Wedge” não foram avaliadas neste trabalho.

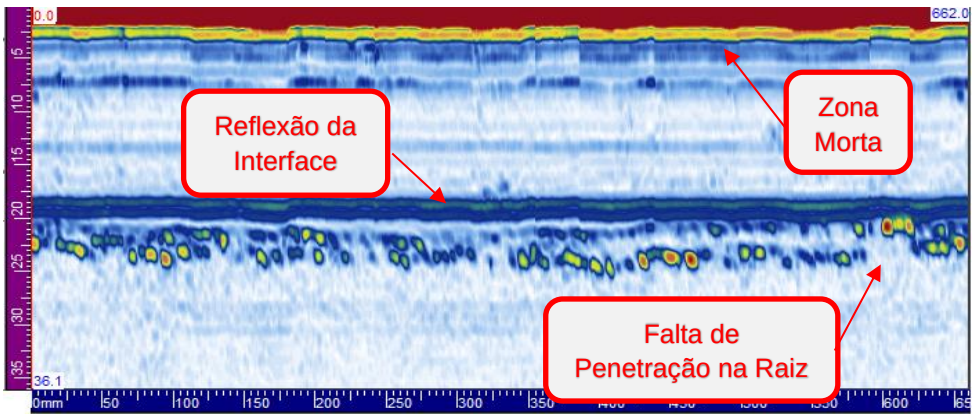
4.7.4 Inspeção US-PA com Transdutor de 5MHz – Varredura Linear: 0º com Onda Longitudinal

A reflexão do feixe na interface entre a região da solda e do revestimento também gerou uma indicação em toda a extensão das imagens acima da raiz. Foi possível identificar o defeito artificial de falta de penetração na raiz da solda pela análise do padrão da imagem na vista D-scan. Nota-se o desaparecimento do eco de reflexão da raiz na região do defeito, como mostra a Figura 4.8, caracterizando uma falta de penetração na raiz da solda. Não foram realizadas medições de altura das descontinuidades utilizando sapata 0º.

Durante a inspeção também foi observado uma zona morta de 3,7 mm na região superior da solda em todas as varreduras, que comprometeu a visualização C-scan.



(a)



(c)

Figura 4.8: Visualização do padrão de reflexão de raiz. (a) Vista S-scan. (b) Vista C-scan. (c) Vista D-scan. Tomoview 2.10®.

4.8 Avaliação da Detecção e Dimensionamento das Descontinuidades

As Tabelas 4.3 a 4.7 apresentam os resultados de todas as detecções obtidas na inspeção por ultrassom *Phased Array* com a utilização das varreduras setorial e linear de cada descontinuidade e os comparam com o dimensionamento real de profundidade e altura comprovado após a realização dos cortes e macrografias das descontinuidades.

Tabela 4.3 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom *Phased Array* - Descontinuidade 01 - Falta de Fusão no Chanfro

Configuração da Inspeção	Grupo	Âng. (°)	Amp. (%)	Local (mm)	Comp. (mm)	Prof. (mm)	Alt. (mm)	Prof. Macro (mm)	Altura Macro (mm)	Comp. Real (mm)
5MHz Transversal Varredura Linear: 55^0 Skew: 90 / Index: -12	1	55	87,8	27	27	14,3	3,1	10,48	0,85	25
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 50^0 Skew: 90 / Index: 5	2	50	56,9	28	22	10,3	1,8			
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 55^0 Skew: 90 / Index: 0	2	55	41,2	27	23	10,7	1,5			
2,25MHz Longitudinal Varredura Linear: 50^0 Skew: 90 / Index: 10	1	50	89	29	25	7,5	3,7			
2,25MHz Longitudinal Varredura Linear: 55^0 Skew: 90 / Index: 5	1	55	93,7	29	26	10,9	2,5			

Tabela 4.4 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom *Phased Array* - Descontinuidade 02 - Falta de Fusão no Chanfro

Configuração da Inspeção	Grupo	Âng. (°)	Amp. (%)	Local (mm)	Comp. (mm)	Prof. (mm)	Alt. (mm)	Prof. Macro (mm)	Altura Macro (mm)	Comp. Real (mm)
5MHz Transversal Varredura Linear: 55^0 Skew: 90 / Index: -12	1	55	29,8	278	11	14,3	2,8	10,84	1,59	10
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 50^0 Skew: 90 / Index: 5	2	50	48,2	276	9	11,6	1,2			
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 55^0 Skew: 90 / Index: 0	2	55	27,8	275	10	11,6	1,9			
2,25MHz Longitudinal Varredura Linear: 50^0 Skew: 90 / Index: 10	1	50	81,2	280	5	9,4	2			
2,25MHz Longitudinal Varredura Linear: 55^0 Skew: 90 / Index: 5	1	55	73,3	282	8	12,1	3			

Tabela 4.5 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom *Phased Array* - Descontinuidade 03 - Inclusão de Escória

Configuração da Inspeção	Grupo	Âng. (°)	Amp. (%)	Local (mm)	Comp. (mm)	Prof. (mm)	Alt. (mm)	Prof. Macro (mm)	Altura Macro (mm)	Comp. Real (mm)
5MHz Longitudinal V. Setorial: 35^0 a 70^0 Skew: 90 / Index: -1	1	49	42	594	30	12,2	3,3	12,03 a 14,99	1,54 a 3,75	35
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 50^0 Skew: 90 / Index: 5	2	50	52,9	590	33	13,6	3,3			
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 55^0 Skew: 90 / Index: 0	1	55	73,7	591	35	12,1	2,4			
2,25MHz Longitudinal Varredura Linear: 50^0 Skew: 90 / Index: 10	1	50	>100	591	35	12,3	3,8			
2,25MHz Longitudinal Varredura Linear: 55^0 Skew: 90 / Index: 5	1	55	90,6	595	35	13,2	2,5			
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 0^0 Skew: - / Index: 29	1	0	>100	590	28	13,4	-			

Tabela 4.6 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom *Phased Array* - Descontinuidade 04 - Falta de Penetração na Raiz

Configuração da Inspeção	Grupo	Âng. (°)	Amp. (%)	Local (mm)	Comp. (mm)	Prof. (mm)	Alt. (mm)	Prof. Macro (mm)	Altura Macro (mm)	Comp. Real (mm)
5MHz Longitudinal V. Setorial: 35^0 a 70^0 Skew: 270 / Index: 1	1	39	>100	596	9	22	2	22	4,15	15
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 50^0 Skew: 270 / Index: 5	2	50	>100	600	16	22	2,5			
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 55^0 Skew: 270 / Index: 0	1	55	>100	604	10	22	3			
2,25MHz Longitudinal Varredura Linear: 50^0 Skew: 90 / Index: 10	1	50	70,6	603	11	22	2,3			
2,25MHz Longitudinal Varredura Linear: 55^0 Skew: 90 / Index: 5	1	55	74,9	606	14	22	2,1			
5MHz Longitudinal Varredura Linear: 0^0 Skew: - / Index: 29	1	0	>100	600	21	22	-			

Tabela 4.7 – Resultados da Macrografia e Varreduras por Ultrassom *Phased Array* - Descontinuidade 05 - Falta de Fusão no Chanfro

Configuração da Inspeção	Grupo	Âng. (°)	Amp. (%)	Local (mm)	Comp. (mm)	Prof. (mm)	Alt. (mm)	Prof. Macro (mm)	Altura Macro (mm)	Comp. Real (mm)
5MHz Transversal Varredura Linear: 55^0 Skew: 270 / Index: -35	1	55	>100	591	29	10,6	5,8	5,67	3,88	30

As descontinuidades 1 e 2, do tipo falta de fusão no chanfro, foram detectadas somente pelas varreduras utilizando sapatas angulares. A varredura utilizando feixe 0º não detectou a descontinuidade devido a sua orientação e maior favorecimento para detecção de uma incidência em ângulo. As varreduras realizadas com transdutores de 2,25 MHz obtiveram uma melhor resposta para as descontinuidades. As descontinuidades 1 e 2 foram detectadas pela onda transversal com feixe rebatido (“full skip”). Observa-se que não houve grande penetração do feixe no revestimento de Inconel® 625, ou seja, a onda transversal se deslocou somente no material ferrítico e acarretou a uma imprecisão quanto a determinação da profundidade das indicações.

Para a descontinuidade 3, do tipo inclusão de escória localizada no metal de solda, observou-se variações entre as detecções quanto a medição de amplitude dos sinais e medição da altura. Isso é devido à orientação e morfologia da descontinuidade no interior do metal de solda e também pela grande atenuação que o feixe sônico sofre nesta região. Uma descontinuidade que apresenta uma morfologia e uma orientação mais uniforme ao longo do comprimento proporciona um dimensionamento mais preciso. Observou-se que a descontinuidade apresenta variação de altura e profundidade ao longo do seu comprimento, desta forma, foi considerada a medida de maior valor encontrado. A varredura utilizando ondas transversais não identificou a descontinuidade 3 devido à grande atenuação que o feixe sônico sofre ao se propagar no metal de solda.

A descontinuidade 4, do tipo falta de penetração na raiz, foi detectada em todas as configurações avaliadas com ondas longitudinais, como esperado, pois esta região apresenta estrutura com tamanho de grão menor do que a região dos passes de enchimento e acabamento. As configurações com o transdutor de 2,25MHz apresentaram menor amplitude de detecção que as demais devido ao dimensionamento ter sido realizado pelo “skew” 90, que não proporcionava a melhor resposta de reflexão da descontinuidade. A varredura utilizando ondas transversais não identificou a descontinuidade 4 devido a atenuação que a onda sofreu ao incidir sobre a interface entre o metal de base API 5L X70 e o revestimento de Inconel® 625.

A descontinuidade 5, do tipo falta de fusão no chanfro, foi detectada somente pela varredura com onda transversal. A orientação da descontinuidade influenciou para que as demais varreduras não fossem eficazes somando-se a isto a localização na região de zona morta dos transdutores que foram posicionados sobre a solda. A varredura com onda transversal é executada para detecção prioritária de descontinuidades do tipo falta de fusão no chanfro. Como a descontinuidade 5 foi detectada pela onda transversal com feixe rebatido (“full skip”), não houve grande penetração do feixe no revestimento de Inconel® 625. A onda transversal se deslocou somente no material ferrítico e acarretou a uma imprecisão quanto à determinação da profundidade da descontinuidade.

A Tabela 4.8 apresenta um resumo com as melhores configurações de detecção, dimensionamento de comprimento, altura e resposta de amplitude de sinal para cada tipo de descontinuidade avaliada.

Tabela 4.8 – Melhores Configurações de Inspeção por Ultrassom *Phased Array*

Descontinuidade	Descrição	Detecção	Dimensionamento da Altura	Dimensionamento do Comprimento	Resposta de Amplitude de Sinal
1	Falta de Fusão no Chanfro	5MHz Longitudinal e Transversal V. Linear: 50º e 55º 2,25 MHz Longitudinal V. Linear: 50º e 55º	5MHz Longitudinal V. Linear: 55º	2,25MHz Longitudinal V. Linear: 50º	2,25MHz Longitudinal V. Linear: 55º
2	Falta de Fusão no Chanfro	5MHz Longitudinal e Transversal V. Linear: 50º e 55º 2,25 MHz Longitudinal V. Linear: 50º e 55º	5MHz Longitudinal V. Linear: 55º	5MHz Longitudinal V. Linear: 55º	2,25MHz Longitudinal V. Linear: 50º
3	Inclusão de Escória	5MHz Longitudinal V. Linear: 0º, 50º e 55º V. Setorial: 35º a 70º 2,25 MHz Longitudinal V. Linear: 50º e 55º	2,25MHz Longitudinal V. Linear: 50º	2,25 MHz Longitudinal V. Linear: 50º e 55º 5 MHz Longitudinal V. Linear: 55º	2,25MHz Longitudinal V. Linear: 50º
4	Falta de Penetração na Raiz	5MHz Longitudinal V. Linear: 0º, 50º e 55º V. Setorial: 35º a 70º 2,25 MHz Longitudinal V. Linear: 50º e 55º	5MHz Longitudinal V. Linear: 55º	2,25MHz Longitudinal V. Linear: 50º	5MHz Longitudinal V. Linear: 50º e 55º V. Setorial: 35º a 70º
5	Falta de Fusão no Chanfro	5MHz Transversal V. Linear: 55º	5MHz Transversal V. Linear: 55º	5MHz Transversal V. Linear: 55º	5MHz Transversal V. Linear: 55º

A velocidade sônica adotada teve influência direta na localização e no dimensionamento das descontinuidades, pois sofrem alterações devido a microestrutura do material austenítico. No estudo de PALANICHAMY (1995), observou-se este fenômeno em para a determinação do tamanho de grão em aços inoxidáveis austeníticos, onde concluiu-se que a velocidade do som é afetada pelo tamanho de grão do material. Um aumento de tamanho de grão resulta na redução da velocidade do som.

JUVA e LIETO (1980) demostraram ser possível utilizar ondas transversais para inspeção de soldas com espessuras na faixa de 2 mm a 10 mm soldadas por arco elétrico manual. Indicações na raiz podem ser detectadas em soldas austeníticas de maior espessura utilizando ondas transversais, desde que não envolva longos percursos de propagação no metal de solda (THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, 1994).

No estudo da UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY NORTHERN DIVISION (1985), observou-se que quando o feixe ultrassônico se propaga através de uma microestrura austenítica, a direção de propagação pode não ser a mesma que a do feixe incidente, sendo a direção exata dependente da orientação do grão. Esta variação da trajetória do feixe causada pela anisotropia pode levar a erros na localização e dimensionamento de defeitos.

Através dos dados das inspeções por ultrassom *Phased Array*, foi possível analisar o dimensionamento das descontinuidades detectadas. A análise consiste na distribuição dos dados em função do tamanho real (medidas adotadas na fabricação das descontinuidades ou medidas por macrografia) e seu tamanho medido nas inspeções por ultrassom *Phased Array.*

As Figuras 4.9 a 4.11 apresentam a distribuição dos dados de uma maneira geral. Os pontos localizados sobre a reta estão dimensionados corretamente enquanto que os pontos localizados acima da reta estão sobredimensionados e os abaixo da reta estão subdimensionados.

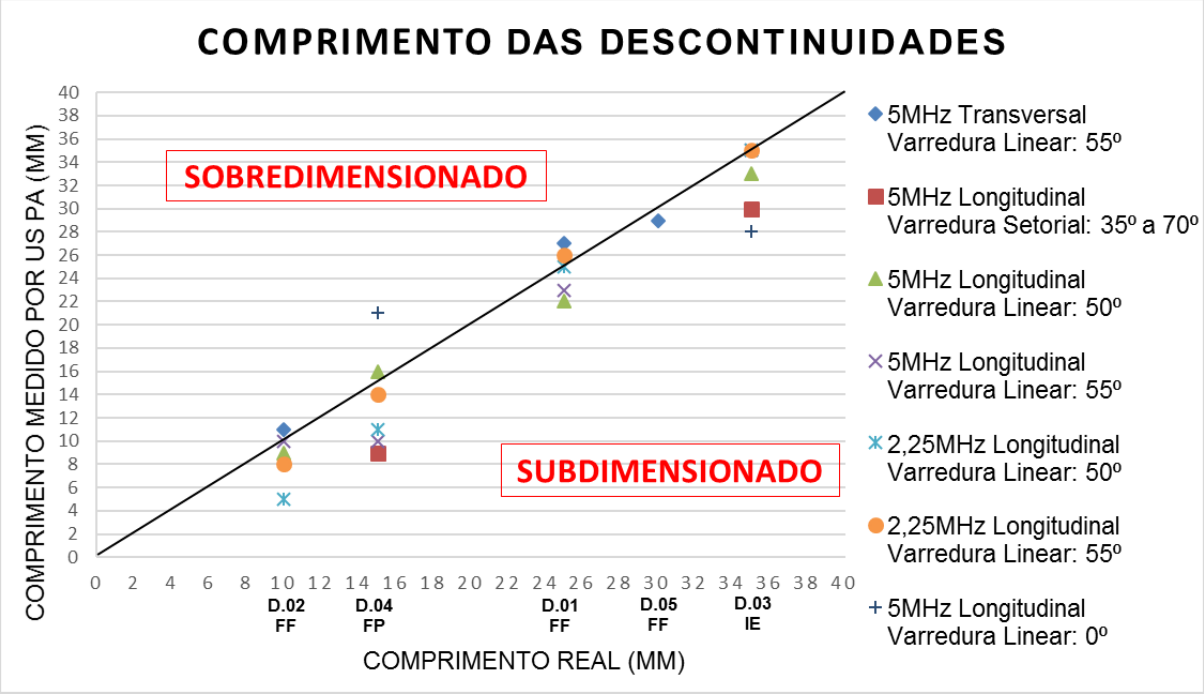


Figura 4.9: Distribuição dos Dados. Comprimento das Descontinuidades.

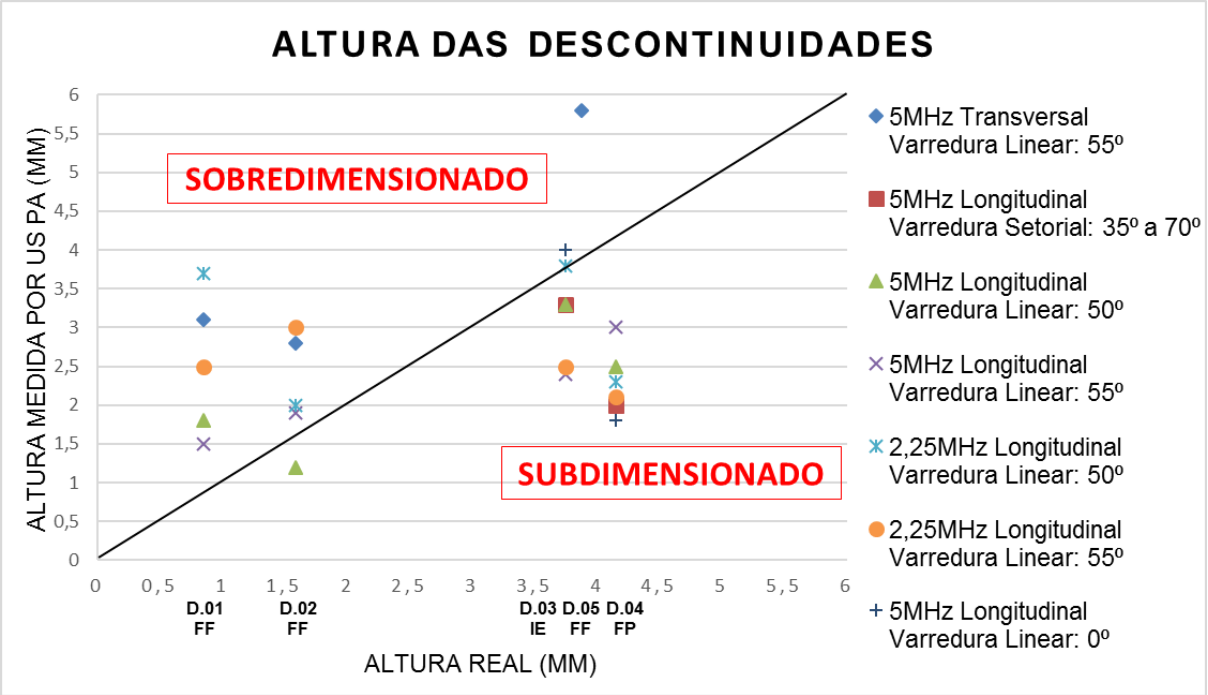


Figura 4.10: Distribuição dos Dados. Altura das Descontinuidades.

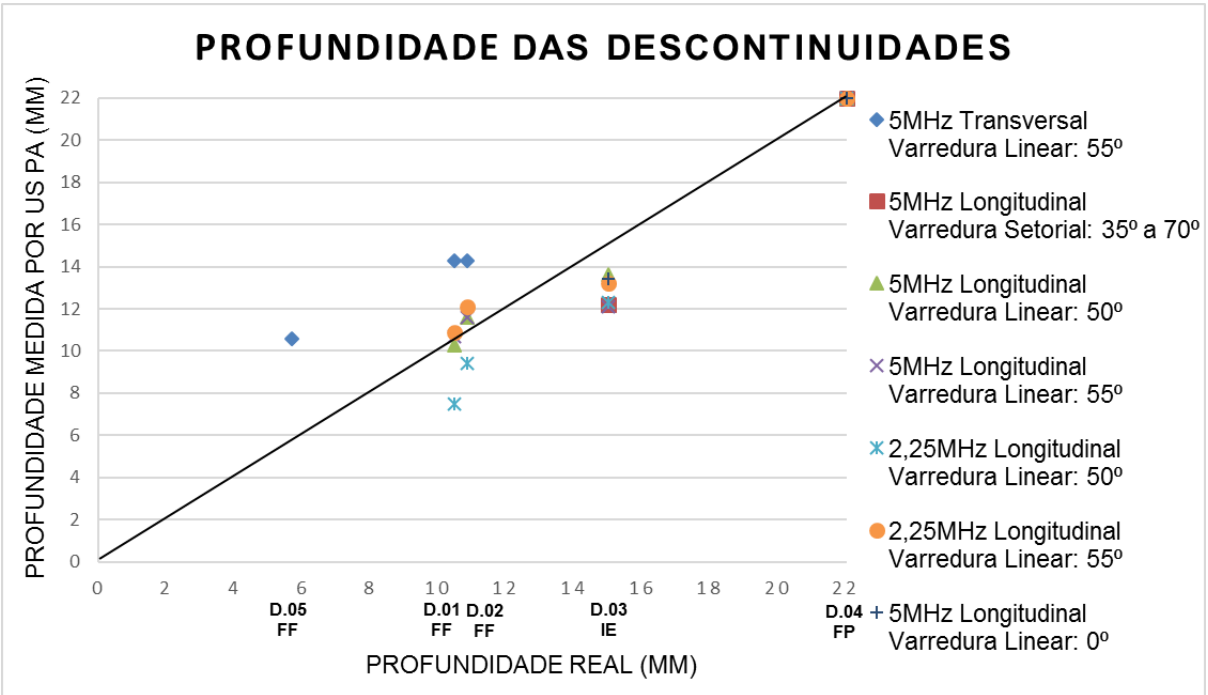


Figura 4.11: Distribuição dos Dados. Profundidade das Descontinuidades.

A Figura 4.12 apresenta as medições de amplitude para cada uma das descontinuidades do estudo obtidas em função das varreduras executadas.

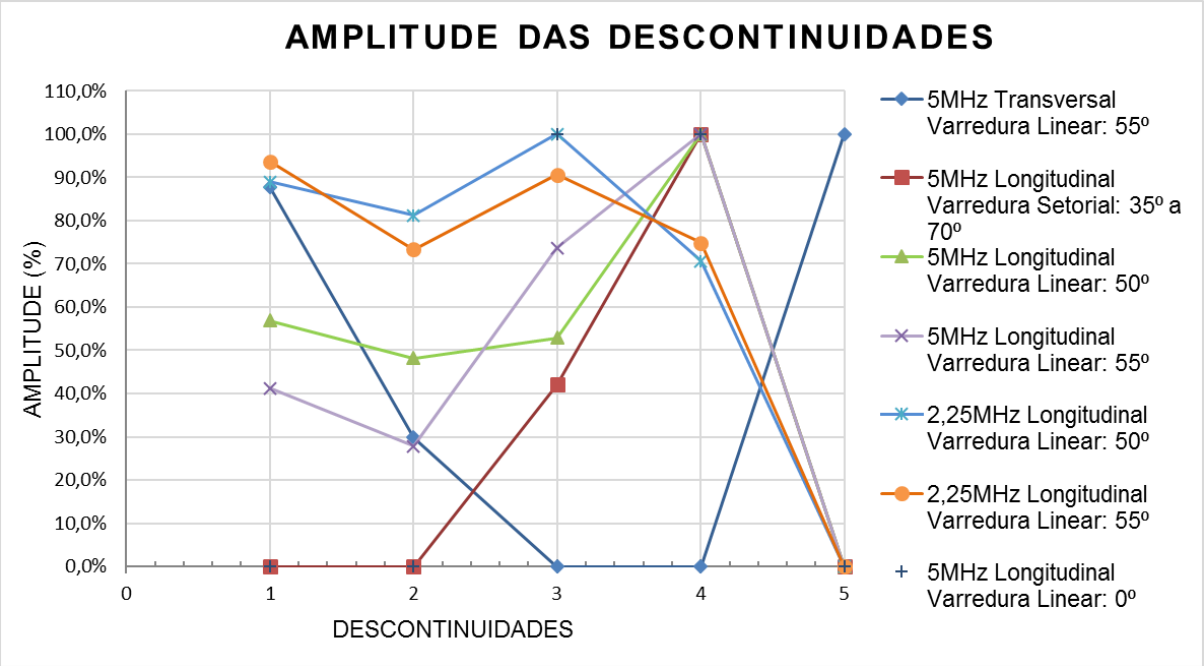


Figura 4.12: Distribuição dos Dados. Amplitude apresentada pelas Descontinuidades.

Analisando a Figura 4.12 observa-se que no geral, a melhor resposta de amplitude de sinal foi obtida com a utilização dos transdutores de 2,25MHz. Os resultados confirmam que a utilização de transdutores de baixa frequência é necessária para reduzir os níveis de atenuação do feixe sônico.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam uma relação entre os valores de dimensionamento medidos por ultrassom *Phased Array* em função do tamanho real (medidas adotadas na fabricação das descontinuidades ou medidas por macrografia). Desta forma pode-se avaliar o erro de dimensionamento de comprimento e altura para as descontinuidades.

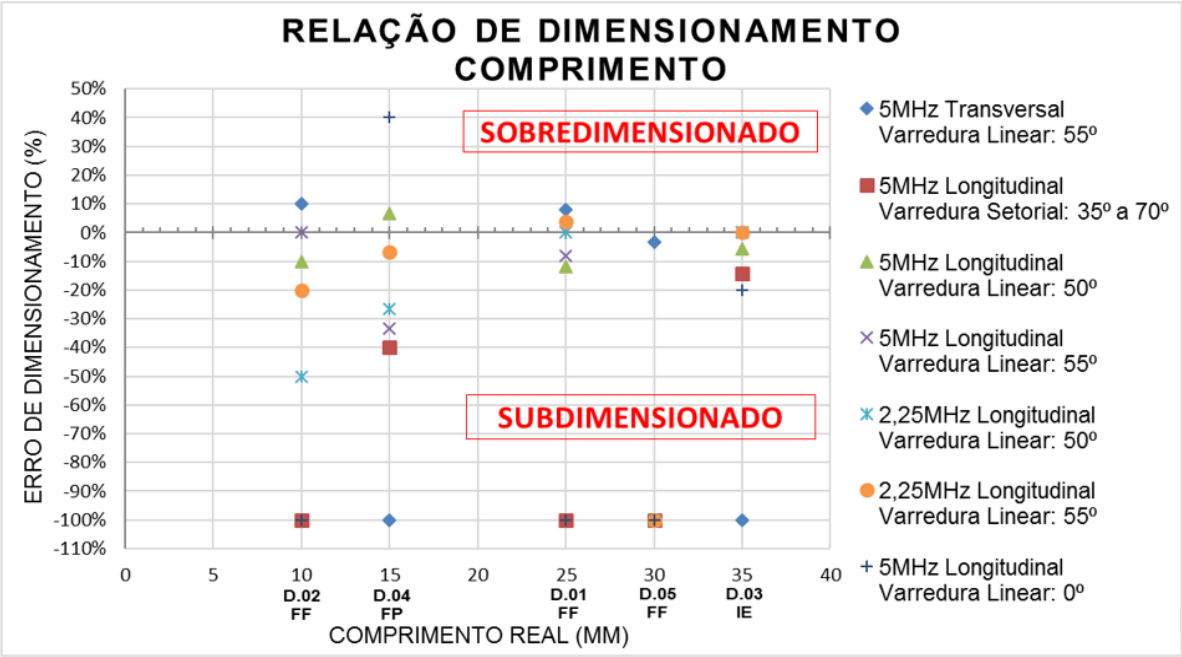


Figura 4.13: Relação de Dimensionamento Real x Medido por US PA - Comprimento

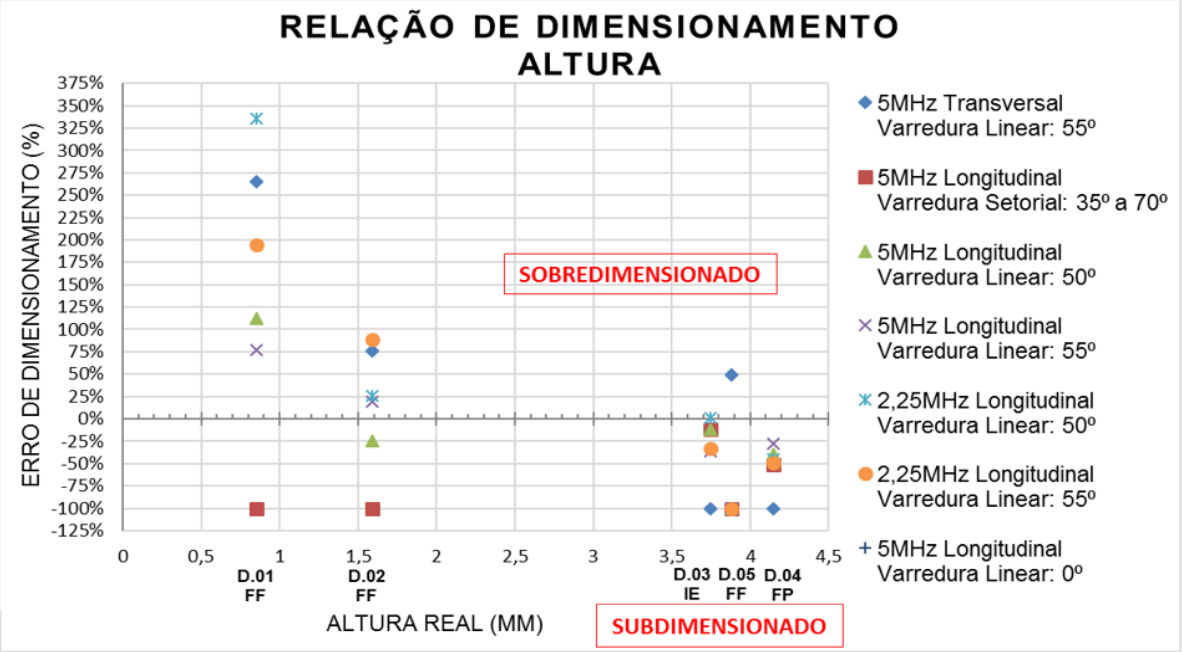


Figura 4.14: Relação de Dimensionamento Real x Medido por US PA - Altura

Do gráfico da Figura 4.13 observa-se que as descontinuidades foram mais subdimensionadas do que sobredimensionadas quanto ao comprimento. Neste trabalho foi adotado um intervalo de erro para o dimensionamento das descontinuidades de -30% até +30% do tamanho real da indicação. Observa-se que a maioria das descontinuidades foram dimensionadas dentro deste intervalo. Para as descontinuidades do tipo falta de fusão no chanfro, a varredura linear utilizando ondas transversais com ângulo de 55º proporcionou melhores resultados quanto ao dimensionamento do comprimento, fato explicado devido a melhor orientação do feixe para identificação deste tipo de indicação. Para dimensionamento da descontinuidade localizada na raiz e nos passes de enchimento da solda observa-se que o melhor resultado obtido foi com a utilização do transdutor de 2,25MHz utilizando varredura linear com ondas longitudinais e ângulo de 50º. Ondas longitudinais de baixa frequência sofrem menor influência da microestrutura anisotrópica durante a propagação no metal de solda. Observa-se também uma melhor relação sinal/ruído obtida na propagação dos ângulos de 50º e 55º.

Analisando o gráfico da Figura 4.14 observa-se que as descontinuidades foram melhor dimensionadas quanto a altura pela inspeção utilizando o transdutor de 5MHz com ondas longitudinais, varredura linear e ângulo de 55º. Este resultado é devido a maior sensibilidade que os transdutores com frequência de 5MHz apresentam em função do menor comprimento de onda do feixe ultrassônico, o que proporciona maior resolução nos dimensionamentos de altura das indicações.

Conclusão

A partir dos resultados obtidos neste estudo pode-se concluir:

1) A técnica *Phased Array* foi considerada adequada para a aplicação. Foi possível realizar a detecção dos 3 furos cilíndricos do bloco padrão confirmando a possibilidade de qualificação de um procedimento de inspeção por ultrassom *Phased Array* conforme a norma Petrobrás N-1594_F.

2) Para a detecção de descontinuidades nos corpos de prova utilizados no presente trabalho o transdutor de 2,25MHz se apresentou com um melhor desempenho, o que decorre do fato de que frequências mais baixas tendem a minimizar o nível de ruído em materiais austeníticos melhorando a sensibilidade do método.

3) Para a inspeção do metal de solda o modo de propagação por ondas longitudinais com ângulo de 50º apresentou melhores resultados, pois essas ondas são menos sensíveis à microestrutura do material quando comparadas as ondas transversais e o ângulo de 50º proporciona melhor relação sinal/ruído na propagação do feixe sônico.

4) Para a identificação de descontinuidades do tipo falta de fusão no chanfro, a configuração utilizando ondas transversais "*full skip*" proporcionou melhores resultados devido a melhor incidência conforme a orientação da descontinuidade.

5) Para o dimensionamento de pequenas dimensões como a altura das descontinuidades, a frequência de 5MHz mostrou-se mais eficaz em função do menor comprimento de onda do feixe ultrassônico, o que proporciona maior resolução.

6) A localização e o dimensionamento das descontinuidades inseridas não foram exatamente conforme as medidas reais. Isto se deve as alterações de velocidade da onda sônica ao se propagar na microestrutura de um material austenítico.

Sugestão para Trabalhos Futuros

Com a realização deste trabalho surgiram novas abordagens que poderiam ser implementadas e analisadas em trabalhos futuros.

1) Utilizar um sistema de inspeção com transdutores Dual Matrix Array (DMA) e dual linear array (DLA), com o objetivo de avaliar a detecção e o dimensionamento de descontinuidades utilizando esta configuração;

2) Utilizar uma metodologia de inspeção adotando sapata "*Water Wedge"* com transdutores de baixa frequência para viabilizar a inspeção sem a necessidade de remoção do reforço da solda.

3) Realizar a inspeção de soldas circunferenciais de Inconel® 625 utilizando varredura setorial com focalização em diferentes regiões do metal de solda e com configurações de leis focais envolvendo apenas a incidência direta. Inspecionar a área do reforço com transdutor de ondas de "*creeping*".

4) Aumentar o quantitativo de descontinuidades para avaliação por ultrassom phased array e realização de uma análise estatística através de um estudo de probabilidade de detecção.

Referências Bibliográficas

AIZPURUA, I; AYESTA, I, CASTRO, I. Caracterização da estrutura de solda anisotrópica para a indústria nuclear. In: European Conference on Non-Destructive Testing, 11, 2014. Anais... Prague (Czech Republic), 2014.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API SPECIFICATION 5L. Specification for Line Pipe. 4º edition. API Publishing Services. EUA, 2004.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Norma AWS D1.1, Structural Welding Code Steel. 22. ed. Miami (USA): Le Jeune Road, 2014.

ANDREUCCI, R. Ultrassom. São Paulo: ABENDE, 2011.

ASM METALS HANDBOOK. Properties and Selection. Irons, Steels and High Performance Alloys. 10. ed. USA, Materials Park, 1990.

ASM METALS HANDBOOK. Nondestructive Evaluation and Quality Control. 9. ed. USA, Materials Park, 2012.

ASNT HANDBOOK - "Ultrasonic Testing", editor P. McIntire, Vol. 7, ASNT, New York, 1991.

AIZPURUA, I; AYESTA, I; CASTRO, I. Characterization of Anisotropic Weld Structure for Nuclear Industry. In: European Conference on Non-Destructive Testing, 11, 2014. Anais... Prague (Czech Republic), 2014.

BERLANGER, J.; MAROIS, D.; BEAULIEU-CHARBONNEAU, L.; GUY MAES. “Improved Solution for Encoded *Phased Array* UT Examination of Dissimilar Metal Piping Welds”. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/jrc-nde2012/papers/118.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2017.

BIUTH, M.; FABBRI, L.; MONJARET, J. L. Effect of Cladding on Inspection Results. [s.d.].

BUSHBERG, J.T.; et al. The Essential Physics of Medical Imaging. Maryland (USA) : Willians & Wilkins, 2002. 742 p.

CARNEVAL, R. O; RICHTER, M. R; PEVERATI, E. F; RAMOS, J. E; RUDEK, R. J. Comparação entre os Resultados de Simulação e da Inspeção de Soldas com Ultrassom *Phased Array*. In: Congresso Nacional De Ensaios Não Destrutivos E Inspeção, 32, 2016. Anais... São Paulo (Brasil), 2016.

CARPENTIER, C; NAGESWARAN, C; TSE, Y. Y. Evaluation of a New Approach for the inspection of Austenitic Dissimilar Welds Using Ultrasonic *Phased Array* Techniques, Proc 10th ECNDT conference, Moscow, June 2010.

CERQUEIRA, Alexsinaldo. Avaliação da Técnica de Ultrassom *Phased Array* na Inspeção de Juntas Soldadas Dissimilares e Cladeadas com Diferentes Espessuras de Amanteigamento. Porto Alegre, 2009. 106 p. Dissertação (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

COPPEN, M. C. Ultrassom. 1ª Edição. Rio de Janeiro: ABENDI. 2012.

DENNIS, M; LATIOLAIS, C; THIGPEN, B. Weld overlay examination using ultrasonic *Phased Array* technology. 6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Budapest. 2007.

DUCHARME, P; RIGAULT, S; STRIJDONK, I; FEUILY, N; DILIGENT, O; PICHÉ, P; JACQUES, F. Automated Ultrasonic *Phased Array* Inspection Of Fatigue Sensitive Riser Girth Welds With A Weld Overlay Layer Of Corrosive Resistant Alloy (CRA). Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/method-automatic-ultrasonic-testing-aut-corrosion-alloy-jacques>. Acesso em: 30 jan. 2017.

EDELMANN, X; HORNUNG, R. Investigation of an ultrasonic technique for detection of surface flaws during in-service inspection of dissimilar metal welds. In: Conf. On Quantitative NDE in the Nuclear Industry, 1982. Anais... California (Unites States), 2016.

FERNANDES, F., LOPES, B., CAVALEIRO, A., RAMALHO, A. LOUREIRO, A. Effect of arc current on microstructure and wear characteristics of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron. Surface and Coatings Technology. 5.205, p.4094–4106, 2011.

FEUILLY, N; ROMITO, C; DILIGENT, O; KERDILÈS, E; CATALDO, G; MITCHELL, A. Different Solutions for Automated Ultrasonic Testing Of Corrosion Resistance Alloy Girth Welds On Deepwater Steel Catenary Risers. In: Rio Pipeline Conference & Exposition, 2013. Anais... Rio de Janeiro (Brasil), 2013.

FIGUEREDO, M. A. S; AIUB, M. M. Inspeção de Soldas Circunferenciais em Tubulações com Metal de Base ou Clad de Inconel Utilizando Ultrassom *Phased Array* sem Remoção de Reforço. In: Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, 2016. Anais... São Paulo (Brasil), 2016.

FLOTTÉ, D; CHAUVEAU, D. New Approach to Optimise the Ultrasonic Testing of Austenitic Welds. In: World Conference on Nondestructive Testing, Roma (Italy), 2000.

FLOTTÉ, D; BITTENDIEBEL, S. A *Phased Array* Ultrasonic Testing Of A Manual Thick Austenitic Weld – Feedback. In: World Conference on Non-Destructive Testing, 19., 2016. Anais... Munich (Germany), 2016.

GARDAHAUT, A; LOURME, H; JENSON, F; LIN, S; NAGAI, M. Ultrasonic Wave Propagation in Dissimilar Metal Welds – Application of a Ray-Based Model and Comparison with Experimental Results. In: European Conference on Non-Destructive Testing, 11., 2014. Anais... Prague (Czech Republic), 2014.

GHAEMI, M. Codes for Automatic Ultrasonic Testing (AUT) of Pipeline Girth Welds. In: European Conference on Non-Destructive Testing, 11., 2014. Anais... Prague (Czech Republic), 2014.

GINZEL, E. *Phased Arrays* and Mechanised Ultrasonic Testing. 2a Ed. Prometheus Press. Canadá, 2003.

GREEN, R. E. Effect of Metallic Microstructure on Ultrasonic Attenuation. In: Proc. of a Symposium on Microstructural Characterisation and Reliability Strategies. Pennsylvania (United States), 1980.

GOLIS, M. J., & American Society for Nondestructive Testing. ASNT level III study guide: Ultrasonic method. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, Inc. 1992.

HIRASAWA, Taiji; FUKUTOMI, H. Application of *Phased Array* UT Technique for Crack Depth Sizing in Nickel Based Alloy Weld. Stainless steel, v. 770, p. 80, 2010.

HUDGELL, R. J. 'Handbook on the ultrasonic examination of austenitic clad steel components', European Commission Joint Research Centre, 1994.

IMASONIC. TRL/SE Arrays (Separate Transmit Receive). Disponível em: < http://www.imasonic.com/Industry/PA_TRL.php >. Acesso em: 26 set. 2016.

JUVA, A; LIETO, A. The ultrasonic examination of thin austenitic stainless steel butt welds. British Journal of NOT, July 1980.

KEJELIN, N. Z; BUSCHINELLI D. A; BOHÓRQUEZ, A. J; NIÑO, C. E. Soldagem Dissimilar do Aço X-60 com Inconel 625 (Dissimilar Metal Welding of X-60 Steel with Inconel 625). [s.d.].

KEUTER, J. In-Line Inspection of Pipes Using Corrosion Resistant Alloys (CRA). Rosen Technology and Research Center GmbH. Germany, 2014.

KUPPERMAN, D. S; REIMANN, K. J; KIM, D. I. Ultrasonic characterisation and microstructure of stainless steel weld metal. In: Proc. of Symposium on Microstructural Characterisation and Reliability Strategies, Pennsylvania (United States), 1980.

KUPPERMAN, D. S; REIMANN, K. J. Ultrasonic wave propagation and anisotropy in austenitic stainless steel weld metal. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-27, No 1, pp 7-15, 1980.

LAMARRE, A. Improved Inspection of CRA-Clad Pipe Welds with Accessible Advanced Ultrasonic Phased-Array Technology. In: World Conference on Non-Destructive Testing, 19., 2016. Anais... Munich (Germany), 2016.

LENKKERI, J. and JUVA, A.: 'The effect of anisotropy on the propagation of ultrasonic waves in austenitic stainless steel', Reliability of Ultrasonic Inspection of Austenitic Materials, Belgium, 1980.

MAGRUDER, C. Advanced Probes for Austenitic and CRA Weld Inspection. Olympus. 2014. Slide.

MAHAUT, S.; CALMON, P.; CHATILLON, S.; RAILLON, R. "Ultrasonic NDT simulation tools for P*hased Array* techniques", in Review of progress in QNDE, Vol. 22, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings 509, Melville, New-York, 2002, pp. 777-784.

MAHAUT, S.; GODEFROIT, J. L.; ROY, O.; CATTIAUX, G.: Application of phased array techniques to coarse grain components inspection. In: Ultrasonics 42, 2004, S. 791-796.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

MOLES, M.; LABBÉ, S.; ZHANG, J. "Improved Focusing for Thick-Walled Pipeline Girth Welds using *Phased Arrays*", Insight, vol. 47, no. 12, December 2005, P. 1

MOYSAN, J; APFEL, A; CORNELOUP, G; CHASSIGNOLE, B. Modelling the Grain Orientation of Austenitic Stainless Steel Multipass Welds to Improve Ultrasonic Assessment of Structural Integrity, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, pp. 77-85 (2003).

NAGESWARAN, C.; TAT-HEAN GAN. Application of *Phased Array* Ultrasonic Inspection of Girth Welds for Clad Pipelines. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/apcndt2013/papers/048.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2017.

NEAU, G. HOPKINS, D. The Promise of Ultrasonic *Phased Arrays* and the Role of Modeling in Specifying Systems. Disponível em: <http://www.bercli.net/docs/ANSTpaperBERCLI_homeformat.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2017.

NOUAILHAS, B; NGUYEN, G. V. C; PONS, F. et al. Ultrasonic Modeling and Experiments: An Industrial Case: Bimetallic Weld in Nuclear Power Plant. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.9, No.213, P145-153, 1990.

OLYMPUS. Detectores de Defeitos - Sonda Dual Linear Array. Disponível em: < http://www.olympus-ims.com/pt/dual-linear-array-probe/ >. Acesso em: 26 set. 2016.

OLYMPUS. Técnicas TOFD e *Phased Array* para Inspecção de Soldaduras. Lisboa: [s.d.].

OGILVY, J A. Ultrasonic Beam Profiles and Beam Propagation in Austenitic Weld using a Theoretical Ray Tracing Model. Ultrasonics. Vol. 24, p. 337, 1986.

PALANICHAMY, P. Ultrasonic velocity measurement for estimation of grain size in austenitic stainless steel. NDT & Int. 1995

PAPADAKIS, E. P.: 'Revised grain-scattering formulas and tables', J Acoust Soc Am, Vol 37, p. 703-710, 1965.

PETER, J. S. Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications. New York: Marcel Dekker, 2002.

PETROBRAS; N-133_M; Soldagem. 2015.

PETROBRAS. N-1594_F. Ensaio Não-Destrutivo - Ultra-Som. 2004.

PIPELINE OPERATORS FORUM. Integrity Management of CRA Pipelines - Operator Experiences and Integrity Challenges. 2015.

PLOIX, M. A; GUY, P; EL GUERJOUMA, R; MOYSAN, J; CORNELOUP, G; CHASSIGNOLE, B. Attenuation Assessment for NDT of Austenitic Stainless Steel Welds. In: European Conference on Non Destructive Testing, 9, 2006. Anais... Berlin (Alemanha), 2006.

RANDLE, V. 'Microtexture determination and its applications', Institute of Materials, London, 1992.

RAVICHANDRAN, D. P; MOHIUDDIN, S. K; ISMAIL, M. Single Sided Weld Inspection using Advanced Ultrasonic Methods. In: Malaysia International NDT Conference & Exhibition, 2015. Anais... Kuala Lumpur (Malaysia), 2015.

ROTH, D; SCHUMACHER, E. CIVA: Simulation Software for NDT Applications. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/ndt-canada2009/papers/10.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2017.

R/D TECH, "Introduction to *Phased Array* Ultrasonic Technology Applications – R/D Tech Guideline", August 2004

SANTIN, J. L. Ultra-som Técnica e Aplicação. 2ª Edição. Curitiba. Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.

SANTIN, J. L; WASELEWSKE, V. Alternativas para a calibração da sensibilidade no ensaio por ultra-som de soldas de tubulações. In: Conferencia Panamericana De END, 4., 2007. Anais... Buenos Aires (Argentina), 2007.

SANTOS, D. D; VIEIRA, R. R; MACHADO FILHO, A. Análise da Técnica de Ultrassom Convencional em Estruturas Soldadas Conforme Critérios de Aceitação das Normas ASME VIII e AWS D1.1. In: Seminário De END E Inspeção No Setor Siderúrgico, 3., 2013. Anais... Belo Horizonte, 2013.

SCHNAUT, U. BERG-LAY: A new production method for CRA Lined Steel Pipe based on sheet metal. In: Pipeline Technology Conference, 4., 2009. Anais... Hannover (Germany), 2009.

SCHUBERT, Frank et al. A New Ultrasonic *Phased Array* Testing System for Dissimilar Welds. Radiation Protection, v. 7, p. 12428, 2012.

SENGOTTUVELAPPAN, E. "*Phased Array* Ultrasonic Inspection Of 25%Cr Super Duplex Stainless Steel On Subsea Manifold Piping Girth Welds In Lieu Of Radiography". Disponível em: <http://www.ndt.net/article/nde-india2014/papers/CP0112_full.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2017.

SPECIAL METALS. Technical Bulletin INCONEL® Alloy 625. Disponível em: <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2017.

SILK, M. G.; STONEHAM, A. M.; TEMPLE, J. A. G. 'The Reliability of Non-destructive Inspection – Assessing the assessment of structures under stress', Adam Hilger, Bristol, 1987.

SIQUEIRA, M. H. S. Inspeção por Ultrassom de Juntas Soldadas de Aços Inoxidáveis Austeníticos. Monografia, UP. Rio de Janeiro, 2014.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Norma ASME Section V: Nondestructive Examination. New York, 2015.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Norma ASME Section VIII – Div. 1: Rules for Construction of Pressure Vessels. New York, 2015.

THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING. Handbook on the Ultrasonic Examination of Austenitic Clad Steel Components. Miami: The American Welding Society, 1994.

TURNER, J. A. Elastic Wave Propagation and Scattering in Heterogeneous, Anisotropic Media: Textured Polycrystalline Materials. Department of Engineering Mechanics, University of Nebraska-Lincoln, 1999.

UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY NORTHERN DIVISION. The Ultrasonic Inspection of Austenitic Materials – State of the Art Report. Oxfordshire: OECD Nuclear Energy Agency, 1985.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Improvements in 500-kHz Ultrasonic Phased-Array Probe Designs for Evaluation of Thick Section Cast Austenitic Stainless Steel Piping Welds. Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2011.

VAN DER ENT, J; FINDLAY, N; PORTZGEN, N; NUPEN, O; ENDAL, G; FØRLI, O. Automatic Ultrasonic Inspection Of Pipeline Girth Welds With A Corrosive Resistant Alloy (CRA) Layer. In: Asia-Pacific Conference on NDT, 12, 2006. Anais... Auckland (New Zealand), 2006.

WAGNER, S; DUGAN, S; STUBENRAUCH, S; JACOBS, O. Modification of the Grain Structure of Austenitic Welds for Improved Ultrasonic Inspectability. 38th MPA-Seminar. MPA Universität Stuttgart, 2012.

WELDING HANDBOOK – MATERIALS AND APLICATIONS – PART 2. 5.4 – 8th edition. American Welding Society. Miami, Fl. 1998. 621 p.

ZUMPANO, P. et al. Challenges About Testing, Welding and NDT of CRA Pipelines in Brazilian Pre-Salt. ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2012.