

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DE MINAS, METALURGICA E
DE MATERIAIS – PPG3M

MAURO MORESCO

**DIMENSIONAMENTO E MONITORAMENTO DE DEFEITOS EM TUBO SOLDADO DE
AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX (UNS S327150) PELA TÉCNICA DE
ULTRASSOM *PHASED ARRAY***

PORTO ALEGRE

2017

MAURO MORESCO

**Dimensionamento e monitoramento de defeitos em tubo soldado de aço
inoxidável superduplex (UNS S327150) pela técnica de ultrassom *phased array***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia na área de Ciência e Tecnologia dos Materiais, modalidade acadêmica.

Orientador: Professor Doutor Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Porto Alegre

2017

MAURO MORESCO

Dimensionamento e monitoramento de defeitos em tubo soldado de aço inoxidável superduplex (UNS S327150) pela técnica de ultrassom *phased array*

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia na área de Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientados: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Coordenador do PPGEM: Prof. Dr. Carlos P. Bergmann

BANCA EXAMINADORA:

Afonso Reguly (DEMET/UFRGS)

Toni Roger Schifelhain de Lima (FAURGS)

Tiago Falcade (IQ/UFRGS)

Dedico este trabalho a minha noiva e família, pela compreensão e pelo apoio constante.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGE3M, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke, pela orientação e conhecimento ao trabalho realizado.

Aos colegas do PPGE3M pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

“Nenhuma mente que se abre para uma nova ideia, voltará a ter o tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

A operação segura e eficiente em unidades de produção de petróleo e gás depende do desempenho de seus dispositivos, componentes e estruturas. Dutos rígidos são importantes componentes utilizados na indústria *offshore*, comumente empregados como *flowlines* e *risers*. Durante a vida em serviço destes componentes, eles sofrem tensões axiais cíclicas associadas a sua movimentação, ao processo de extração de petróleo e ao vórtice das marés. O aço inoxidável superduplex surgiu na última década como um material alternativo para ambientes quimicamente agressivos, mas quando catodicamente protegidos contra a corrosão, esses aços são vulneráveis a fragilização por hidrogênio. Este trabalho tem como objetivo, através da técnica de Ensaio Não Destrutivo de ultrassom *phased array*, monitorar o crescimento de defeitos internos e externos criados intencionalmente próximos à raiz e ao reforço da solda de um tubo de aço superduplex (UNS S32750) de 6'' submetido a fadiga tração-tração e fragilização induzida por hidrogênio devido à proteção catódica. As inspeções foram realizadas periodicamente com varreduras de 30 a 75° ao longo da circunferência da solda, por um transdutor linear 1-D de 16 elementos e 5MHz acoplado a uma sapata de 36°. Os resultados obtidos foram utilizados para alimentar análises de integridade estrutural, obtenção da curva da/dN x ΔK .

Palavras-chaves: Phased array, Ultrassom, Ensaios não-destrutivos.

ABSTRACT

Safe and efficient operation in oil and gas production units depends on the performance of your devices, components and structures. Rigid pipelines are important components in the offshore industry, common used as flowlines and risers. During a life in service of components, they suffer cyclical axial stresses associated with their movement, by the oil extraction process and tidal vortex. Super duplex stainless steel has emerged in the last decade as an alternative material for chemically aggressive environments, but when cathodically protected against corrosion, it is vulnerable to hydrogen embrittlement. This work aims to, through the ultrasonic non-destructive testing by phased array monitor the growth of internal and external defects created intentionally close to the root and reinforcement of the weld of a superduplex steel tube (UNS S32750) with diameter of 6" submitted to tensile-traction fatigue and hydrogen-induced embrittlement due to cathodic protection. The inspections were performed periodically with 30 to 75° scans along the circumference of the weld, by a linear transducer of 1-D, 16-element and 5MHz coupled to a wedge of 36°. The obtained results were used to feed structural integrity analyzes, obtaining the curve of $da/dN \times \Delta K$.

Keywords: Phased array, Ultrasound, Non-destructive testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema da onda longitudinal; A) oscilação da partícula e compressão e rarefação resultantes; B) amplitude do deslocamento da partícula versus distância de viagem da onda, λ corresponde a um ciclo completo (adaptado de ASM HANDBOOK, 2001).	5
Figura 2. Esquema da onda transversal, λ corresponde a um ciclo completo (adaptado de ASM HANDBOOK, 2001).	6
Figura 3. Diagrama apresentando os possíveis eventos que ocorrem quando uma onda longitudinal a partir do material 1 atinge em ângulo o material 2 (adaptado de ASM HANDBOOK, 2001).	8
Figura 4. Vistas do ultrassom (B-scan, C-scan e D-scan). Roxo indica o eixo do ultrassom; azul, o eixo do movimento transdutor; e verde, o eixo de varredura eletrônica para uma varredura linear (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007a).	12
Figura 5. Representação do A-scan: sinal de RF (esquerda); sinal retificado (direita) (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007a).	13
Figura 6. Vista lateral B-scan: A) vista não-corrigida (esquerda); B) vista corrigida pelo ângulo de refração (direita) (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007a).	14
Figura 7. Exemplo de um padrão de visualização S-can (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007a).	14
Figura 8. Descrição das vistas da técnica de ultrassom por phased array C-scan, B-scan e S-can. C-scan vista de topo, B-scan vista de lado e S-can vista de seção cruzada (adaptado de CHARTIER, 2007).	15
Figura 9. Cantos ou extremidades refletoras são centros de difração que tendem a emitir ondas esféricas ou cilíndricas (adaptado de ASTM INTERNATIONAL, 2013).	16
Figura 10. Mostra a intensidade dos sinais referente ao defeito no gráfico A-scan relacionados ao esboço do feixe de ultrassom convencional sobre o defeito (adaptado de ASTM INTERNATIONAL, 2013).	17
Figura 11. Esboço mostrando a técnica de inspeção por ultrassom convencional com a correspondente imagem do padrão de visualização A-scan: A) configuração da inspeção por ultrassom convencional de uma solda em um bocal, B) padrão de visualização A-scan da base de um falha rente a solda (adaptado de CHARTIER, 2007).	18
Figura 12. Esboço mostrando a técnica de inspeção por <i>phased array</i> com a correspondente imagem do padrão de visualização S-scan: A) configuração da inspeção por ultrassom <i>phased array</i> de uma solda em um bocal, B) padrão de visualização S-scan de um falha rente a solda (adaptado de CHARTIER, 2007).	19
Figura 13. Padrão de visualização S-scan dimensionando defeito próximo á raiz (adaptado de CIORAU, 2007).	20

Figura 14. Representação esquemática do dimensionamento de descontinuidades utilizando a técnica da queda dos 6 dB em uma junta soldada (adaptado de SANTIN, 2003).	21
Figura 15. Princípio de medição da altura da falha usando AATT (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007b).	22
Figura 16. Exemplo de um dimensionamento através de AATT de uma trinca com transdutor de phased array em posição estática com o feixe varrendo a região da trinca de 7,0mm de altura: A) Ilustração do princípio; B) e C) ampliação da imagem por S-scan dos sinais de ultrassom e dimensionamento da altura da trinca (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007b).	22
Figura 17. RATT base de avaliação da altura da falha sobre a relativa medida do caminho do ultrassom entre o sinal do topo e curva da falha (adaptado de POPOVYCH; KARPASH, 2014).	23
Figura 18. Definição dos transdutores de matriz convencionais: A) 1-D matriz linear, B) 2-D matriz em grade, C) matriz anular (adaptado de DRINKWATER; WILCOX, 2006).	24
Figura 19. Padrão de visualização S-scan do monitoramento em tempo real de um ensaio de fadiga: A) imagem inicial do ensaio, B) imagem da etapa final antes da ruptura (adaptado de NAGESWARAN, 2013).	26
Figura 20. Nucleação de fadiga em planos de escorregamento (adaptado de MEYERS, M. A.; CHAWLA, 2008)	37
.....	37
Figura 21. Ilustração de extrusão de uma folha de cobre vista por MEV (adaptado de MEYERS, M. A.; CHAWLA, 2008).	37
Figura 22. Corpo-de-prova padrão defeitos internos.....	40
Figura 23. Corpo-de-prova padrão defeitos externos.....	41
Figura 24. Eletrodo de cobre em forma de disco utilizado para gerar os defeitos.....	42
Figura 25. Posição dos defeitos intencionais externos e internos indicados pelas setas.	43
Figura 26. Esquema representando as divisões do tubo (em horas) para facilitar a inspeção e a localização dos defeitos (ilustrados por pontos vermelhos).	43
Figura 27. Representação das partes que compõem o corpo de prova em escala real.	44
Figura 28. Representação esquemática da estrutura da bancada de ensaio de fadiga..	1
Figura 29. Componentes do sistema de fixação rotulado e movimento de alinhamento.	45
Figura 30. Módulo de tração.	45
Figura 31. Geometria do chanfro utilizada lado B reto e lado A inclinado a 25°.....	48
Figura 32. Ilustração do transdutor matricial 1-D e da sapata angular.....	48
Figura 33. Ilustração dos modos de varreduras usados nas inspeções.....	49

Figura 34. Centro do defeito intencional interno de 2mm pelo padrão de visualização B-scan.....	50
Figura 35. Método de medição de altura dos defeitos com auxílio do software.	51
Figura 36. Escala de cor utilizada nas inspeções por phased array.	51
Figura 37. Sinal referente ao início da base do defeito gerado por fadiga pelo modo de varredura Lado B_2 no ciclo 808.254.....	52
Figura 38. Método de medição da largura do defeito gerado por fadiga identificado pelo modo de varredura Lado B_2, ciclo 808.254 em 58° como mostra o padrão de visualização B-scan.....	52
Figura 39. Os três sinais da região de interesse visualizada pelo lado B com o transdutor afastado.	53
Figura 40. Os três sinais da região de interesse visualizada pelo lado A com o transdutor afastado.	54
Figura 41. Sinais referentes à base e a topo do defeito intencional interno de 6mm pelo modo de varredura lado B_2.....	55
Figura 42. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional interno de 4 mm pelo modo de inspeção lado B_1.	55
Figura 43. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional interno de 6mm pelo lado A_2.	56
Figura 44. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional interno de 12 mm pelo lado A_1.	56
Figura 45. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional externo de 4 mm Lado_2.	58
Figura 46. Modo de varredura Lado A_1 para o defeito de 4 mm externo: A) sem aumento no ganho; B) aumento do ganho em 10 dB.....	60
Figura 47. Modo de varredura Lado A_2 para o defeito de 12mm externo: A) sem aumento no ganho; B) aumento do ganho em 15dB.....	60
Figura 48. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional externo de 4mm pelo modo de varredura Lado B_2.....	61
Figura 49. Modo de varredura Lado B_2: A) S-scan defeito 4mm; B) S-scan defeito 6 mm	62
Figura 50. Modo de varredura Lado B_2: A) S-scan defeito 9 mm; B) S-scan defeito 12 mm	62
Figura 51. Padrão de visualização B-scan a 45° do modo de varredura Lado A_2, mostra o sinal da falta de penetração da solda na raiz.	64
Figura 52. Defeito não intencionais provável vazio às 4:00 horas pelo padrão de visualização Lado A_2.	65
Figura 53. Defeitos não intencionais dois defeitos no cordão de solda a 25 e 12 mm de distância do defeito das 11:30, ambos identificados pelo modo de varredura Lado A_2.	66

Figura 54. Novo defeito encontrado próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 39.173.....	68
Figura 55. Novo defeito encontrado próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 319.959.....	68
Figura 56. Novo sinal no cordão de solda lado A a 45 mm do defeito externo das 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2, padrão de visualização B-scan a 45° em 462.175 ciclos.	70
Figura 57. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 661.001 ciclos.	71
Figura 58. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 721.624 ciclos: A) sem aumento no ganho B) aumento em 5dB no ganho.	74
Figura 59. Largura da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 721.624 ciclos.....	74
Figura 60. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 763.254 ciclos: A) sem aumento no ganho B) aumento em 10 dB no ganho.	29
Figura 61. Largura da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 763.254 ciclos pelo padrão de visualização B-scan a 60°.	29
Figura 62. Vazio próximo da frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 4:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 no ciclo 763.254, B-scan 70°.	77
Figura 63. Vazio próximo da frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 4:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 no ciclo 763.254, padrão de visualização B-scan a 60°.	77
Figura 64. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 768.254 ciclos: A) sem aumento no ganho B) aumento de 10 dB no ganho.....	28
Figura 65. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 808254 ciclos: A) sem aumento no ganho B) aumento de 5 dB no ganho.....	28
Figura 66. Largura da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 808.254 ciclos.....	81
Figura 67. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em: A) 843.254 e B) 850.500.....	83
Figura 68. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em: A) 823.254 e B) 833.254.....	28
Figura 69. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em: A) 823.254 e B) 833.254.....	28
Figura 70. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em: A) 843.254 e B) 850.500.....	29

Figura 71. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em: A) 863.165 e B) 873.165 adicionado 5dB.	29
Figura 73. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 833.254 ciclos.	87
Figura 74. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_1 em 833.254 ciclos.	87
Figura 75. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 843.254 ciclos pelo padrão de visualização B-scan a 57°.	88
Figura 76. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 850.500 ciclos: A) sem aumento de ganho B) adicionado 10 dB no ganho.....	88
Figura 77. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 863.165 ciclos.	89
Figura 78. Largura da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 863.165 ciclos pelo padrão de visualização B-scan a 55°.	89
Figura 79. Defeito gerado por fadiga na superfície do cordão de solda no ciclo 863.165.	90
Figura 80. Superfície de fratura do lado B do corpo de prova em escala real no ciclo 882.198 (régua da figura em cm).	91
Figura 81. Altura do defeito gerado por fadiga detectado pelo modo de varredura Lado B_2 ao longo dos ciclos do ensaio em escala real.....	92
Figura 82. Largura do defeito gerado por fadiga detectado pelo modo de varredura Lado B_2 ao longo dos ciclos do ensaio em escala real.....	92
Figura 83. Gráfico da/dN x ΔK do ensaio de fadiga do corpo de prova em escala real.	93
Figura 84. Gráfico a/N do ensaio de fadiga do corpo de prova em escala real.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Apresenta as tolerâncias de dimensões do tubo de aço inox conforme norma ASTM A312.....	40
Tabela 2. Apresenta as tolerâncias de dimensões do tubo de aço inox conforme norma ASTM A312.....	41
Tabela 3. Composição química do certificado dos fabricantes do metal base (UNS S32750, SAF 2507) e do metal de adição (AWS A5.9/A5.9M-ER2594).	42
Tabela 4. Número de ciclos por configuração de parâmetros do ensaio de fadiga.....	46
Tabela 5. Gases de proteção / purga utilizados durante a solda.	47
Tabela 6. Descrição dos parâmetros de soldagem.	47
Tabela 7. Altura dos defeitos internos intencionais reais e medidas pela técnica de ultrassom.....	57
Tabela 8. Altura dos defeitos externos intencionais reais e medidos pela técnica de ultrassom.....	59
Tabela 9. Altura dos defeitos intencionais iniciais (zero ciclo) reais e medidos pelo modo de varredura Lado B_2.....	64
Tabela 10. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre zero a 337.541 ciclos.	67
Tabela 11. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre 351.529 a 661.001 ciclos.	69
Tabela 12. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre 704.554 a 763.254 ciclos.	72
Tabela 13. Altura e largura do defeito por fadiga na região da falha, medidos pelo modo de varredura Lado A_2 e Lado B_2 entre 661001 a 763254 ciclos.	73
Tabela 14. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre 763.254 a 808.254 ciclos.	78
Tabela 15. Altura e largura do defeito por fadiga na região da falha, medidos pelo modo de varredura Lado A_2 e Lado B_2 entre 768.254 a 808.254 ciclos.	79
Tabela 16. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre 813.254 a 850.500 ciclos.	82
Tabela 17. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado A_2 a partir da incidência direta do feixe entre 823.254 a 873.165 ciclos.....	83
Tabela 18. Altura e largura do defeito por fadiga na região da falha, medidos pelo modo de varredura Lado A_2 e Lado B_2 entre 813.254 a 863.165 ciclos.	86

LISTA DE SIGLAS

α - ferrita

Δ TOF - *delta Time of Flight*

γ - austenita

AATT - *absolute arrival time technique*

AID - Aço Inoxidável Duplex

AISD - aços inoxidáveis superduplex

CCC - cúbica de corpo centrado

CC- - corrente contínua negativa

CFC - cúbica de face centrada

ECA - *Engineering Critical Assessment*

END - Ensaio Não-Destrutivo

EFE - energia de falha de empilhamento

F_{\max} - carga máxima

F_{\min} - carga mínima

HC - hexagonal compacta

H_{abs} - hidrogênio absorvido

H_{ads} - hidrogênio adsorvido

MEV - microscópico eletrônico de varredura

O - octaédricos

PATT - *pulse arrival time technique*

PPMA - polimetilmetacrilato

ppm - partes por milhão

PTFE - politetrafluoretileno

R - razão de carregamento

RATT - *relative arrival time technique* TOF - *time of Flight*

RF - radiofrequência

SCE - eletrodo de calomelano saturado

SPOT - *satellite pulse observation time technique*

T - tetraédricos

TIG - *Tungsten Inert Gas*

TIH - Trinca Induzida por Hidrogênio

V_{ECS} - Potencial de Eletrodo de calomelano saturado

LISTA DE SÍMBOLOS

α - ângulo de incidência

β - ângulo de refração

Δt - diferença no tempo de chegada

ρ - densidade (g/cm^3)

λ - comprimento de onda (m)

σ - tensão aplicada

b - vetor de Burgers

f - frequência (Hz)

H - altura da falha

N - número de ciclos

r - raio

R - coeficiente de reflexão

S - tensão aplicada

T - coeficiente de transmissão

V - potencial elétrico em volts

v - Velocidade (m/s)

Z - impedância acústica (g/cm^2)

1-D - uma dimensão

2-D - duas dimensões

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM	2
3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ONDA ULTRASSÔNICA	4
3.3 VARIÁVEIS NA INSPEÇÃO POR ULTRASSOM	6
3.4 PADRÕES DE VISUALIZAÇÃO DE ULTRASOM	12
3.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE FALHA POR ULTRASSOM	15
3.5.1 TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE TOPO	15
3.5.2 TÉCNICA DE DIMENSIONAMENTO QUEDA DE 6 dB	20
3.5.3 TÉCNICA DE DIMENSIONAMENTO AATT	21
3.5.4 TÉCNICA DE DIMENSIONAMENTO RATT	22
3.6 PHASED ARRAY	23
3.7 AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX	27
3.8 FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO	28
3.9 PROTEÇÃO CATÓDICA	32
3.10 FADIGA	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 CORPOS-DE-PROVA PADRÃO	39
4.2 CORPO-DE-PROVA EM ESCALA REAL	41
4.3 ENSAIO DE FADIGA EM ESCALA REAL	44
4.4 SOLDAGEM	47
4.5 EQUIPAMENTO PHASED ARRAY, TRANSDUTOR e CODER	48
4.6 PARÂMETROS DE INSPEÇÃO E MODOS DE VARREDURA	49
4.7 MÉTODO DE MEDIÇÃO DOS DEFEITOS	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1 CORPO DE PROVA PADRÃO INTERNO	53
5.2 CORPO DE PROVA PADRÃO EXTERNO	58
5.3 CORPO DE PROVA EM ESCALA REAL	63
5. CURVA da/dN	93

6. CONCLUSÃO.....	95
7. SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
8. REFERÊNCIAS.....	97

1. INTRODUÇÃO

A produção de petróleo e gás depende do desempenho de seus dispositivos, componentes e estruturas. O aço inoxidável superduplex surgiu na última década como um material alternativo para ambientes quimicamente agressivos.

Aços inoxidáveis superduplex são conhecidos pela combinação de excelentes propriedades de resistência à corrosão com ótimas propriedades mecânicas. Muitas dessas propriedades são derivadas da combinação estratégica das propriedades de aços ferríticos e austeníticos. Dentre as principais aplicações dos aços superduplex, pode-se citar sistemas de transporte de petróleo e gás, *offshore*, *flowlines* e *risers*. O uso de altas concentrações de Cr e Mo é a estratégia metalúrgica empregada para obtenção de uma excelente resistência à corrosão localizada. A adição de Ni e N, por outro lado, estabiliza a microestrutura na fração ideal entre austenita e ferrita, proporcionando uma melhor combinação de propriedades mecânicas.

Embora apresente excelente resistência a corrosão generalizada e por pites em alguns casos para operar satisfatoriamente, essas ligas devem ser protegidas catodicamente contra corrosão. Os aços inoxidáveis superduplex quando expostos a um meio agressivo (água do mar), polarização catódica em conjunto com tensões axiais cíclicas são suscetíveis a fragilização por hidrogênio.

A formação de trincas ou defeitos em estruturas fabricadas com esse tipo de material ou durante a sua instalação (processo de soldagem) pode ser inevitável, sendo essencial a avaliação da resistência do material à propagação de trinca e o estudo referente à propagação de defeitos nos meios em que este material será utilizado. O processo de soldagem dos materiais se torna uma etapa crítica, pois muitos defeitos podem surgir nessa etapa (como vazios, falta de penetração na raiz e trincas no cordão de solda entre outros) que podem comprometer toda estrutura. A taxa de crescimento e o tamanho admissível dos defeitos na estrutura determinarão o tempo de vida útil dos equipamentos, bem como as práticas de segurança utilizadas nas operações, periodicidade de inspeções e paradas para manutenção. A obtenção da curva da/dN x

ΔK para esses componentes nos fornece informações importantes relacionando o tamanho do defeito ao longo dos ciclos de operação relacionado com sua severidade.

Para determinar a integridade estrutural do material, este trabalho utiliza a técnica de END de ultrassom *phased array* para monitorar o crescimento de defeitos internos e externos criados intencionalmente próximos à raiz e ao reforço da solda de um tubo de 6" de aço superduplex (UNS S32750), submetido à fadiga (tração-tração) e fragilização induzida por hidrogênio (proteção catódica) em água do mar sintética. Através de inspeções periódicas os defeitos foram monitorados e os resultados foram utilizados para determinar curva da/dN e ΔK do material em estudo.

2. OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver metodologia para dimensionar e monitorar o crescimento de defeitos na região da solda e na zona termicamente afetada de um tubo de 6" de aço inoxidável superduplex (UNS S327150), através da técnica de ensaio não destrutivo por ultrassom *phased array*.

O objetivo secundário é aplicar os resultados obtidos para alimentar análise de taxa de crescimento de trinca e gerar curva da/dN a partir dos dados obtidos na inspeção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM

Inspeção por ultrassom é um dos métodos mais disseminados entre os ensaios não destrutivos (END) na indústria metal mecânica, usado na inspeção de metais para detecção e caracterização de falhas internas, defeitos superficiais, caracterização em juntas, medição de espessura, controle de corrosão e com menos frequência para determinar propriedades físicas e estruturais.

A inspeção por ultrassom em metais é conduzida principalmente para detecção de discontinuidades. Esse método pode ser usado para detectar falhas internas de metais e ligas, inspecionar soldas, controle de qualidade, avaliação de manutenção

preventiva. Inspeção por ultrassom é um ensaio não destrutivo em que feixes de ondas de som de alta frequência são induzidas em um material para detectar falhas superficiais ou internas. As ondas sonoras percorrem o material, por consequência do deslocamento das ondas, ocorre perda de energia (atenuação) e nas interfaces de materiais as mesmas são refletidas. O feixe refletido é captado e analisado para definir a presença e localização de falhas ou discontinuidades.

Defeitos de processo, cavidades de contração, flocos, poros, trincas e outras discontinuidades que produzam interfaces reflectivas podem ser facilmente detectadas. Inclusões e outras heterogeneidades podem também ser detectadas por causarem reflexão parcial ou dispersão da onda ultrassônica, ou por produzir outro efeito detectável pela onda ultrassônica (ASM HANDBOOK, 2001).

A maioria dos instrumentos de inspeção ultrassônicos detectam falhas por monitorar um ou mais dos seguintes itens: reflexão do som a partir de interfaces de materiais ligados ou discontinuidades dentro do próprio metal; tempo de transição da onda ultrassônica através da peça a partir do ponto de saída do sinal do transdutor até o ponto de entrada do mesmo; atenuação da onda ultrassônica por absorção e dispersão dentro da peça; e características da resposta espectral tanto para o sinal transmitido ou refletido.

A maioria das inspeções ultrassônicas são realizadas nas frequências entre 0,1 e 25MHz, bem acima do intervalo de audição humana, que está entre 20Hz e 20kHz. Ondas ultrassônicas são vibrações mecânicas; a amplitude de vibração em peças metálicas, imposta pela onda, gera uma tensão muito abaixo da tensão de deformação, evitando assim efeitos permanentes sobre a peça.

As principais vantagens da inspeção por ultrassom quando comparada a outros métodos de inspeção não-destrutivos em metais são: poder de penetração superior; alta sensibilidade; maior precisão na determinação de posição de falhas, estimativa de tamanho, caracterização da orientação, forma e natureza dos defeitos; varredura volumétrica; não apresenta risco para o operador; portabilidade; possibilita um processamento dos dados coletados em computadores para caracterização de defeitos

e propriedades dos materiais. As desvantagens da inspeção por ultrassom são as seguintes: operação manual requer cuidado e experiência; grande conhecimento técnico é necessário para o desenvolvimento de procedimentos de inspeção; peças rugosas, irregulares pequenas, muito finas ou heterogêneas são difíceis de inspecionar; acoplantes são necessários pra prover uma maior eficiência na transferência da energia da onda ultrassônica entre o transdutor e a peça a ser inspecionada; padrões de referência são necessários para caracterização das falhas e calibração do equipamento (ASM HANDBOOK, 2001).

3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ONDA ULTRASSÔNICA

Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que propagam-se através da oscilações ou vibrações de átomos ou moléculas de um material. Em muitos aspectos, o feixe de ultrassom é similar ao feixe de luz; ambos são ondas e seguem a equação geral da onda. Os feixes de ultrassom são refletidos a partir da superfície; refratados quando cruzam a junção entre duas superfícies, duas substâncias que possuam características diferentes de velocidade do som; difratados na borda ou ao redor de obstáculos; dispersado por superfícies rugosas ou partículas que reduzem a energia de um feixe ultrassônico, comparável à maneira em que a dispersão reduz a intensidade do feixe de luz.

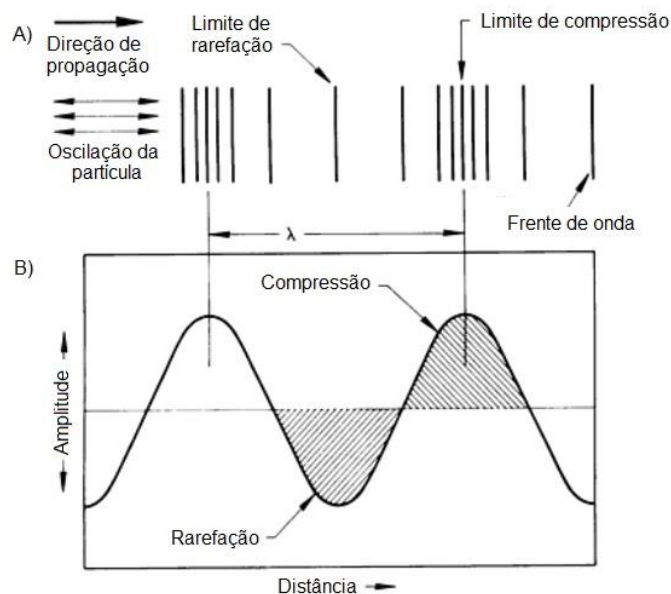
Quando o átomo ou partículas moleculares de um material elástico são deslocados de sua posição de equilíbrio por uma força aplicada, uma tensão interna atua para restaurar a partícula para sua posição de origem, por causa das forças intra-atômicas entre as partículas do material, o deslocamento de um ponto induz o deslocamento dos vizinhos, esse efeito propaga uma onda. A amplitude, modo de vibração e velocidade de onda diferem nos sólidos, líquidos e gases por causa da diferença na distância média das partículas de cada tipo de matéria. Essas diferenças influenciam a força de atração das partículas e o comportamento elástico da matéria. As variáveis que descrevem a velocidade de propagação de uma onda monocromática no tempo e espaço são frequência ou período e comprimento de onda é dada por:

$$v = f \lambda$$

Onde v é a velocidade (em m/s), f é a frequência (em Hz) e λ é o comprimento de onda (em m).

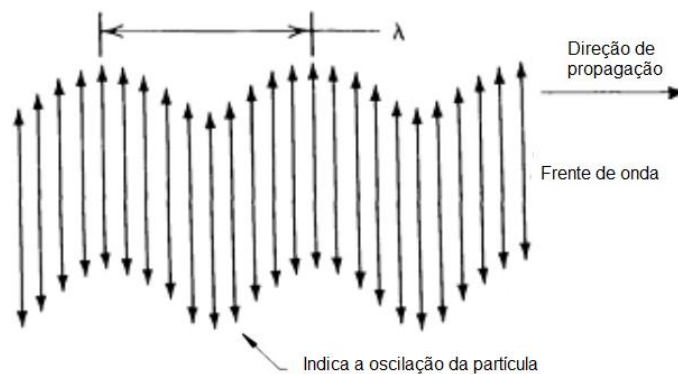
Sobre as bases dos modos de deslocamento das partículas, as ondas ultrassônicas são classificadas como longitudinal, transversal e superficial. Onda longitudinal ou compressiva é um tipo de onda ultrassônica amplamente usada na inspeção de materiais, essa onda viaja através do material como uma série compressões e rarefações alternadas em que partículas transmitem as vibrações de onda de volta ou na direção de propagação da onda. A figura 1 apresenta o efeito da onda ultrassônica longitudinal no material, a amplitude do deslocamento da partícula versus distância do deslocamento da onda, a distância entre uma crista e outra é o comprimento de onda (λ). O eixo vertical pode representar a “pressão” em vez do deslocamento da partícula. O eixo horizontal pode mostrar o tempo em vez da distância de viagem, pois a velocidade do som é constante em um material e essa relação é usada como medida na inspeção por ultrassom.

Figura 1. Esquema da onda longitudinal; A) oscilação da partícula e compressão e rarefação resultantes; B) amplitude do deslocamento da partícula versus distância de viagem da onda, λ corresponde a um ciclo completo (adaptado de ASM HANDBOOK, 2001).



Onda transversal ou cisalhante também é usada na inspeção por ultrassom, é propagada perpendicularmente à direção das ondas longitudinais, as ondas transversais não podem ser propagadas por colisões elásticas das moléculas ou partículas de átomos adjacentes, neste caso são necessários que cada partícula adjacente exerça uma enorme força de atração em seu vizinho de modo que vibre e empurre seu vizinho, fazendo com que a onda atravesse o material com velocidade associada à onda transversal, que é aproximadamente cinquenta por cento da velocidade da onda longitudinal no mesmo material, como mostra figura 2.

Figura 2. Esquema da onda transversal, λ corresponde a um ciclo completo (adaptado de ASM HANDBOOK, 2001).



3.3 VARIÁVEIS NA INSPEÇÃO POR ULTRASSOM

As principais variáveis que devem ser consideradas na inspeção por ultrassom incluem as características da onda ultrassônica usada e as características da peça a ser inspecionada.

A frequência da onda ultrassônica usada afeta a capacidade de inspeção de muitas maneiras: a sensibilidade, a habilidade de um sistema de inspeção por ultrassom em detectar uma pequena descontinuidade é geralmente aumentada por usar alta frequência (curto comprimento de onda).

Resolução, ou habilidade do sistema em fornecer simultaneamente sinais mais separados a partir de descontinuidades que estão próximas da superfície e do fundo da

peça é diretamente proporcional à largura de banda da frequência e inversamente à largura do pulso, geralmente a resolução aumenta com um aumento da frequência;

Penetração, ou máxima profundidade (alcance) em um material no qual um sinal claro proveniente de uma falha pode ser detectado, é reduzida com o uso de alta frequência, esse efeito é mais pronunciado em materiais que possuem grãos grosseiros e estrutura heterogênea que resulta em uma dispersão da onda ultrassônica maior comparando com materiais de grão fino e homogêneo;

Dispersão ou direção do feixe, ou divergência do feixe de ultrassom a partir do centro do eixo do feixe é afetada pela frequência. Com a diminuição da frequência, a forma de um feixe ultrassônico se afasta cada vez mais da propagação ideal do feixe zero. Outros fatores como transdutores (diâmetro) e o uso de técnicas com foco influenciam na direção do feixe.

Impedância acústica, quando uma onda ultrassônica viaja através de um meio e colide em uma junção (segundo meio) uma quantidade da energia acústica incidente é refletida e a partir da junção uma parte da energia é transmitida no segundo meio. A característica que determina a quantidade de reflexão é a impedância acústica entre os dois materiais em ambos os lados da junção. Se a impedância acústica de dois materiais é igual, não haverá reflexão; se a impedância difere significativamente (como aço e ar) haverá praticamente reflexão completa da onda. A impedância acústica (Z) de uma onda é dada em gramas por centímetro quadrado segundo, definida como o produto da densidade do material, ρ , dada em gramas por centímetro cúbico e a velocidade da onda no meio, v , dada em centímetro por segundo:

$$Z = v \rho$$

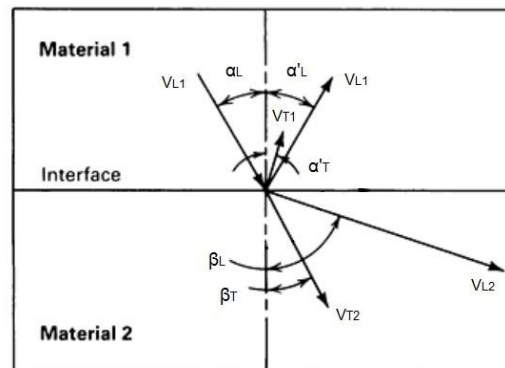
O percentual de energia refletida a partir da interface entre dois materiais depende da taxa de impedância acústica (Z_2/Z_1) e o ângulo de incidência. Para o ângulo de incidência 0° , o coeficiente de reflexão (R) que é taxa de intensidade de feixe refletido (I_r) pela intensidade do feixe incidente (I_i) é dado por:

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{r-1}{r+1}\right)^2 = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}\right]^2 \quad \therefore \quad T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Onde Z_1 é a impedância acústica do meio1, Z_2 é a impedância acústica do meio 2, e r a relação da impedância (Z_2/Z_1). Como T designa o coeficiente de transmissão, $R + T = 100\%$, como toda energia é refletida ou transmitida, T é obtido a partir dessa relação.

Ângulo de incidência: apenas quando uma onda ultrassônica incide em um ângulo coerente (incidência normal, ângulo de incidência 0°) sobre uma interface ocorre reflexão e transmissão sem qualquer mudança na direção do feixe. Em qualquer outro ângulo de incidência, os fenômenos de conversão de modo (mudança da natureza do movimento da onda) e refração (mudança na direção do movimento da onda) devem ser considerados. Esses fenômenos podem afetar o feixe por inteiro ou apenas parte dele, a soma total de alterações que ocorre na interface depende do ângulo de incidência e a velocidade da onda ultrassônica que deixa o ponto de impacto sobre a interface. A figura 3 mostra um diagrama representando por vetores os eventos possíveis (onda refletida e refratada) quando uma onda longitudinal (VL1) propaga pelo meio 1 e atinge o meio 2 com ângulo (α_L), em relação a normal da interface(ASM HANDBOOK, 2001).

Figura 3. Diagrama apresentando os possíveis eventos que ocorrem quando uma onda longitudinal a partir do material 1 atinge em ângulo o material 2 (adaptado de ASM HANDBOOK, 2001).



Nem todos os eventos representados por vetores mostrados na figura anterior serão gerados, dependem das características da onda e como ela se comporta nos meios, ângulo de incidência e velocidade da onda em cada meio. A lei geral que descreve o comportamento da onda em uma interface é conhecida como lei de Snell, de acordo com a lei a relação do seno do ângulo de incidência pelo seno do ângulo de reflexão ou refração é igual à relação das correspondentes velocidades de onda e pode ser expressa por:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2}$$

Onde o ângulo α é o ângulo de incidência, β é o ângulo de refração ou reflexão, V_1 e V_2 são as respectivas velocidades das ondas incidentes e reflexão ou refração; ambos os ângulos α e β são medidos a partir da linha normal à interface.

Ângulo crítico, se o ângulo de incidência (α_L) é pequeno a propagação da onda sonora em um dado meio pode sofrer conversão de modo na interface, resultando em uma propagação simultânea de onda longitudinal e transversal no segundo meio. Se o ângulo continuar aumentando, a direção da onda longitudinal refratada introduzirá a junção ($\beta_L \rightarrow 90^\circ$), para alguns valores específicos de α_L e β_L esse valor será igual a 90° , acima desse valor a onda longitudinal refratada não propagará mais no interior do material, deixando apenas uma onda cisalhante (ou transversal) refratada propagar no segundo meio, este valor é conhecido como primeiro ângulo crítico. Se o ângulo de incidência no primeiro meio é aumentado além do primeiro ângulo crítico, a direção da onda cisalhante refratada introduzirá o plano de junção ($\beta_T \rightarrow 90^\circ$). Em um segundo valor específico de α_L e β_T será igual a 90° , acima desse valor a onda transversal refratada não propagará mais no material, esse segundo valor de α_L é chamado de segundo ângulo crítico. Acima desse valor a onda transversal refratada será substituída por uma onda superficial (onda de Rayleigh) que propagará sobre a superfície do material. Ângulos críticos são de importância especial na inspeção por ultrassom, valores de α_L entre o primeiro e segundo ângulo crítico são requeridos para maioria das inspeções com feixe em ângulo. Em inspeção de feixe de ângulos usuais, geralmente é

desejável ter apenas propagação de onda transversal no material. Pelo fato da onda longitudinal e cisalhante propagarem em diferentes velocidades, os sinais referentes aos defeitos serão recebidos em tempos diferentes. Quando ambos tipos de onda estão presentes no material, pode haver confusão no padrão de sinais no visor do aparelho de inspeção, levando a interpretações errôneas.

Intensidade do feixe: a intensidade de um feixe ultrassônico está relacionada com a amplitude de vibração das partículas. Pressão acústica é o termo mais usado para denotar a amplitude de tensão alternada exercida sobre um material pela propagação da onda acústica. A pressão acústica é diretamente proporcional ao produto da impedância acústica e a amplitude do movimento da partícula. A pressão acústica exercida por uma partícula varia na mesma direção e com a mesma frequência com a posição dessa partícula muda com o tempo. Pressão acústica é a maior propriedade em uma onda ultrassônica, e seu quadro determina a quantidade de energia (poder acústico) da onda. Pode-se notar que a pressão acústica não é a intensidade de um feixe ultrassônico. Intensidade é a energia transmitida através da unidade de área do feixe, é proporcional ao quadrado da pressão acústica. Quando as ondas ultrassônicas são refletidas ou refratadas, a energia da onda incidente é repartida entre várias ondas refletidas e refratadas. A relação entre energia acústica da onda resultante é complexa e depende do ângulo de incidência e das propriedades acústicas dos materiais que compõem a interface.

Atenuação do feixe ultrassônico: atenuação refere-se à perda da energia do som, com a passagem do feixe de ultrassom pelo material. O fator que está primariamente responsável pela perda da intensidade do feixe pode ser classificado como perda de transmissão, efeitos de interferência e espalhamento do feixe. Perda de transmissão inclui absorção, dispersão e efeito da impedância acústica na interface. Efeitos de interferência incluem difração e outros efeitos que criaram franjas de onda, mudança de fase e frequência. Espalhamento do feixe ou dispersão é influenciado pelo trajeto da onda ultrassônica em uma microestrutura variada gerando um acréscimo na atenuação de um material, a propagação da onda ultrassônica em materiais policristalinos está sujeita a interagir com componentes microestruturais como

impurezas, inclusões, porosidades, microtrincas, corrosão, entre outros, causando atenuação e variação na velocidade da propagação do som no material. Estudos indicam que aços inoxidável duplex com grãos grosseiros e com morfologia alterada (estrutura de Widmanstätten) apresentam maior atenuação (VIJAYALAKSHMI; MUTHUPANDI; JAYACHITRA, 2011).

Efeito da impedância acústica pode ser usado para calcular uma quantidade de som que reflete durante a inspeção de ultrassom em uma peça imersa em água. Por exemplo, quando uma onda ultrassônica atinge com ângulo de incidência normal a superfície de uma trinca em uma chapa de uma liga de alumínio 1100 durante uma inspeção com incidência direta do feixe, a quantidade de som que volta para o transdutor, reflexão de retorno é apenas 6% da intensidade original. A redução na intensidade ocorre por causa da partição da energia quando onda é apenas parcialmente refletida na interface alumínio/água. A perda da intensidade do feixe de ultrassom de retorno é uma das bases para caracterizar as falhas em materiais, perda pela impedância acústica pode severamente diminuir a intensidade de um feixe de ultrassom, pois uma pequena fração da área do feixe pode ser refletida pela descontinuidade e capturada pelos instrumentos de detecção.

Absorção da energia ultrassônica ocorre principalmente por conversão de energia mecânica em calor, deslocamento elástico dentro de um material com a propagação do som através dele. Absorção pode ser entendida como uma ação de frenagem no deslocamento da oscilação das partículas, essa ação de frenagem é mais pronunciada quando a oscilação das partículas está mais acentuada em, alta frequência. Para a maioria dos materiais, perda de absorção aumenta diretamente com a frequência.

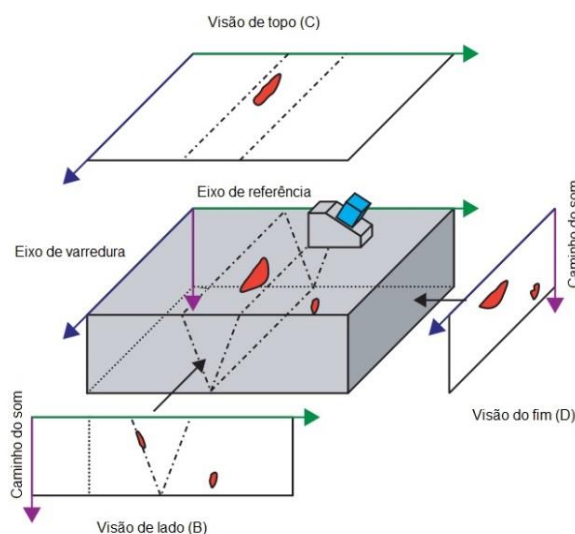
Dispersão de uma onda ultrassônica ocorre porque a maioria dos materiais não são totalmente homogêneos. Descontinuidades do cristal, como contorno de grão, limite dos grãos e inclusão não metálica, tende a defletir quantidade pequena de energia de ultrassom fora do feixe de ultrassom principal. Especialmente em microestruturas mistas ou materiais anisotrópicos, conversão de modo na interface dos cristais pode ocorrer por causa da diferença na velocidade do som e impedância acústica na

fronteira. A dispersão é altamente dependente da relação do tamanho do cristal ao comprimento de onda. Quando o tamanho de grão é menor que 0,01 vezes o comprimento de onda, a dispersão é desprezível. O efeito de dispersão varia aproximadamente com três vezes o tamanho de grão, quando o tamanho de grão é 0,1 vezes o comprimento de onda ou maior, excessiva dispersão pode ocorrer tornando impossível a inspeção por ultrassom (LIU; DATTA, 2016; ROGÉRIO DOS SANTOS ALVES; ALEX SOARES DE SOUZA, 2014)

3.4 PADRÕES DE VISUALIZAÇÃO DE ULTRASSOM

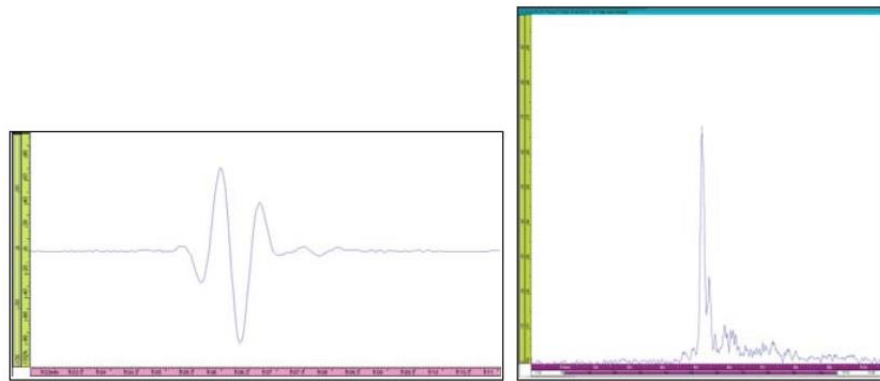
Visualizações ultrassônicas são imagens definidas por diferentes planos de visualização entre o caminho do som e os parâmetros de varredura (eixo direcional). As mais importantes visualizações similares a projeções 2-D de técnica de desenho estão presentes na figura 4. Essas vistas de projeção são um plano ou planos acumulados vindas de C-scan, B-scan e D-scan; as vistas de projeção são também chamados de vistas de topo, lado e fim respectivamente.

Figura 4. Vistas do ultrassom (B-scan, C-scan e D-scan). Roxo indica o eixo do ultrassom; azul, o eixo do movimento transdutor; e verde, o eixo de varredura eletrônica para uma varredura linear (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007a).



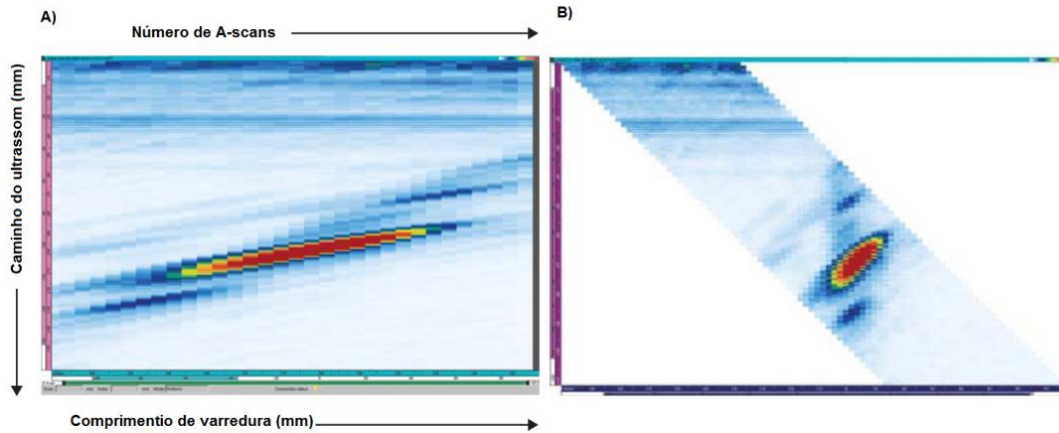
As vistas de ultrassom básicas são: A-scan; B-scan; C-scan; D-scan e S-scan. Um A-scan é uma representação da amplitude de pulso ultrassônico versus tempo de voo (caminho do som), ou uma forma de onda. Um A-scan pode ser apresentado como um RF (radiofrequência) ou sinal retificado, apresentado na figura 5.

Figura 5. Representação do A-scan: sinal de RF (esquerda); sinal retificado (direita) (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007a).



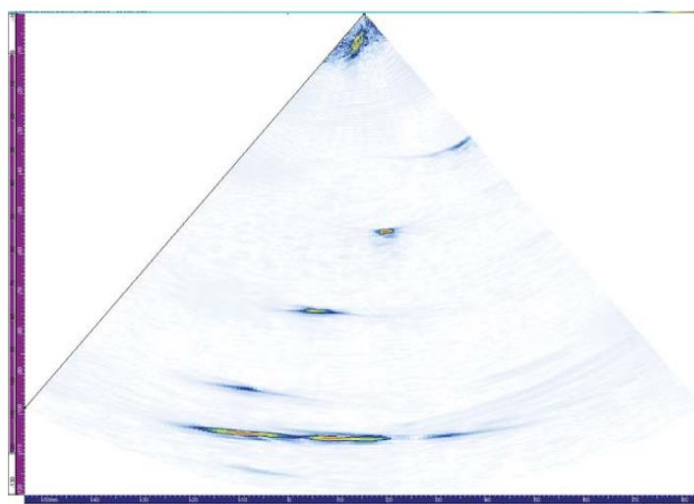
O B-scan é um vista 2-D de dados de ultrassom gravados. O eixo horizontal é a posição de digitalização e o eixo vertical é o caminho do som ou tempo de voo, conforme figura 6. As posições dos dados digitalizados estão relacionadas com a posição do *coder* no momento da aquisição. B-scan é uma série de curvas de A-scan empilhadas, cada A-scan é representada por um codificador/posição da amostragem por tempo-base. Tal como mostra a imagem da digitalização alongada do defeito (figura 6A), a distorção do defeito ocorre devido a dispersão do feixe entre outros fatores. Se o caminho do som é corrigido pelo ângulo refratado e pela lei de atraso, o B-scan representará a vista com volume correto da região inspecionada, com a digitalização do comprimento sobre o eixo horizontal e a profundidade sobre o eixo vertical.

Figura 6. Vista lateral B-scan: A) vista não-corrigida (esquerda); B) vista corrigida pelo ângulo de refração (direita) (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007a).



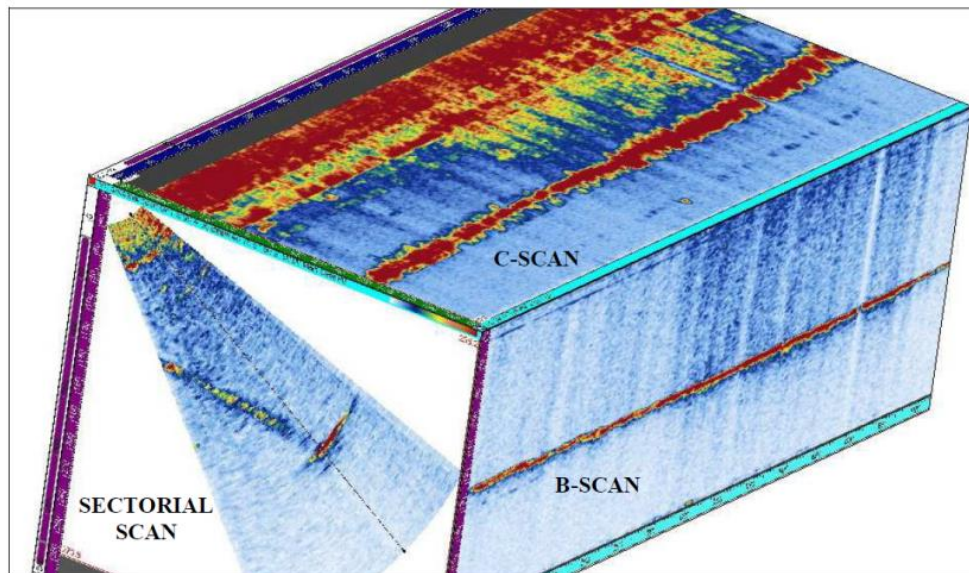
Um S-scan (varredura setorial) é um padrão de visualização único *do phased array*, representa uma vista em 2-D de vários A-scan agrupados a partir de um canal específico corrigido por atraso e ângulo refratado como mostra figura 7. Uma varredura típica S-scan através de uma faixa de ângulos utiliza a mesma distância de foco e elementos. O eixo horizontal corresponde à distância projetada a partir do ponto de saída para a imagem corrigida e o eixo vertical corresponde à profundidade.

Figura 7. Exemplo de um padrão de visualização S-can (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007a).



Na figura 8 podem ser observadas as imagens C-scan e B-scan referentes ao ângulo indicado pela linha preta da vista S-scan.

Figura 8. Descrição das vistas da técnica de ultrassom por phased array C-scan, B-scan e S-can. C-scan vista de topo, B-scan vista de lado e S-can vista de seção cruzada (adaptado de CHARTIER, 2007).

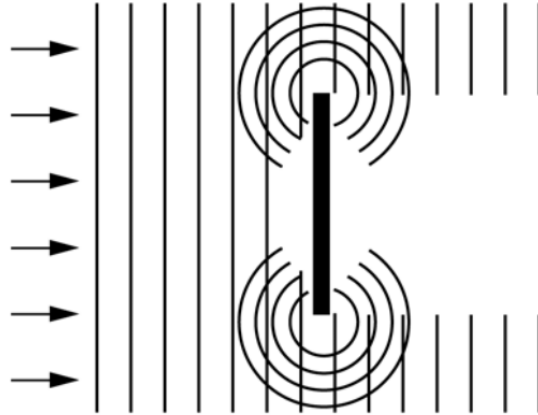


3.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE FALHA POR ULTRASSOM

3.5.1 TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE TOPO

Difração ultrassônica é um fenômeno onde uma onda tende a contornar a extremidades agudas de uma falha localizada no caminho da onda, ilustradas na figura 9. Enquanto a falha tende a criar uma sombra ao caminho da onda, a difração ocorre nas extremidades da trinca e a energia ultrassônica é gerada para preencher parte da região sombreada. Extremidades agudas são centros de difração e tendem a gerar frentes de onda esféricas ou cilíndricas como se fossem fontes pontuais ou de linhas de ultrassom. Se a intensidade do sinal relacionado a esses centro de difração é identificada, é possível determinar a posição relativa em relação à espessura do componente.

Figura 9. Cantos ou extremidades refletoras são centros de difração que tendem a emitir ondas esféricas ou cilíndricas (adaptado de ASTM INTERNATIONAL, 2013).

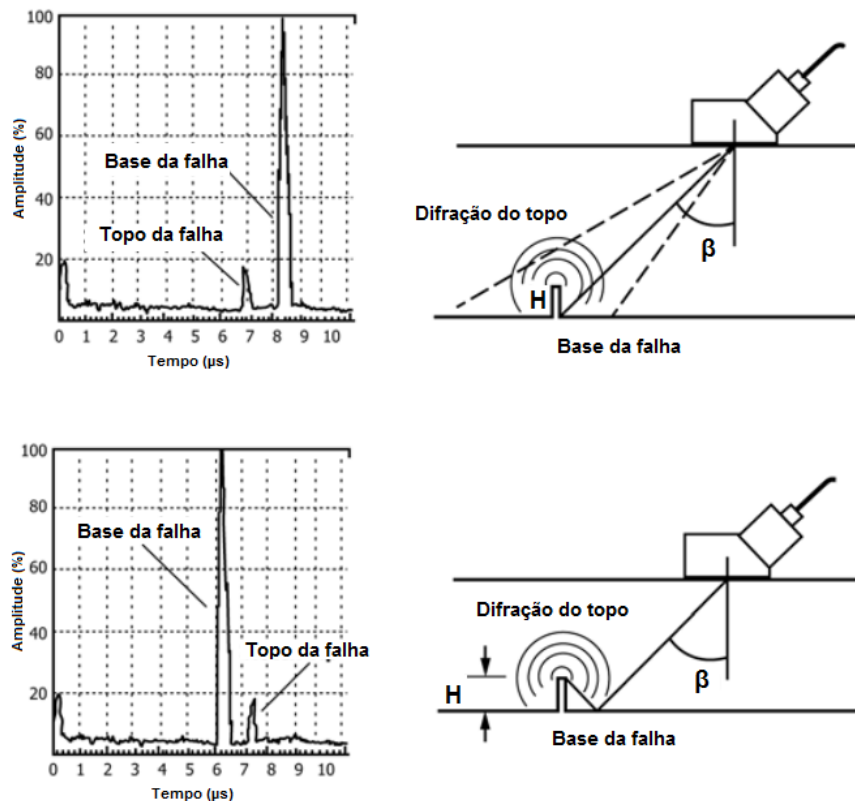


Quando o feixe de ultrassom atinge uma falha, reflexão a partir do plano principal da falha além da difração e modelo de conversão pode ocorrer. Existem duas padronizações, técnicas de medidas para dimensionar defeitos por difração de topo: *Time of Flight* (TOF) técnica que mede o tempo de chegada do sinal de difração do topo da falha e determina a altura a partir da superfície; *Delta Time of Flight* (Δ TOF) técnica que mede a diferença no tempo de chegada do sinal de difração do topo e o sinal refletor da base do defeito a partir da superfície (ASTM INTERNATIONAL, 2013; METHODS; SIZING, 2012).

O método de difração de topo pode ser válido para uma ampla variedade de falhas. Os pré-requisitos são que o topo da falha e o sinal do topo da falha serem distinguíveis em relação aos outros sinais. Para falhas rasas o sinal de difração pode ser mascarado pelo sinal refletido pela base da falha devido à baixa resolução. Quando a falha é localizada na região da solda ou próxima a região da solda, onda longitudinal e transversal pode ser usada para esses métodos. Onda longitudinal pode ajudar na localização de sinais de difração fracos do topo, em aços inoxidáveis que apresentam alta atenuação, mas a reflexão a partir de componente afastado da superfície deve ser evitada devido à conversão de modo (onda longitudinal em transversal) prejudicando a identificação do sinal, nesses casos é indicada onda transversal. Para dimensionar falhas com esse método, o usuário deve ser capaz de identificar os dois sinais: primeiro

sinal difratado a partir do topo da falha e segundo sinal que é refletido a partir da base da falha. A figura 10 a seguir ilustra o gráfico A-scan (gráfico de amplitude do sinal (%) pelo tempo de voo da onda (μs)) do sinal do topo da falha difratado, base da falha, o sinal difratado da onda refletida pelo fundo do material e um esboço dos caminhos do feixe de ultrassom em relação a falha afastada da superfície da peça inspecionada. (ASTM INTERNATIONAL, 2013).

Figura 10. Mostra a intensidade dos sinais referente ao defeito no gráfico A-scan relacionados ao esboço do feixe de ultrassom convencional sobre o defeito (adaptado de ASTM INTERNATIONAL, 2013).



A identificação do sinal de difração do topo e da base do defeito através da técnica de ultrassom por phased array é facilitada em relação ao ultrassom convencional devido as imagens que podem ser geradas pelo equipamento, através dos padrões de visualização S-scan e B-scan, a produtividade é aumentada e a interpretação dos dados facilitada. As figuras 11 e 12 mostram os padrões de

visualizações geradas através das técnicas de ultrassom convencional e *phased array* e suas respectivas configurações de inspeção, enquanto o ultrassom convencional necessita selecionar sapata adequada para inspeção e varrer a região do defeito várias vezes com cada sapata e juntar os dados para avaliação, tornando o processo em campo demorado e de difícil interpretação em identificar os sinais da falha em relação as anomalias da solda, as inspeções por *phased array* com auxílio do padrão de visualização S-scan é facilitado. A figura 12 B) mostra através do padrão de visualização S-scan a face da falha, ilustrando com clareza os sinais da falha em relação a solda, o sinal de difração da ponta da falha, propagação da falha, profundidade e orientação.(CHARTIER, 2007)

Figura 11. Esboço mostrando a técnica de inspeção por ultrassom convencional com a correspondente imagem do padrão de visualização A-scan: A) configuração da inspeção por ultrassom convencional de uma solda em um bocal, B) padrão de visualização A-scan da base de um falha rente a solda (adaptado de CHARTIER, 2007).

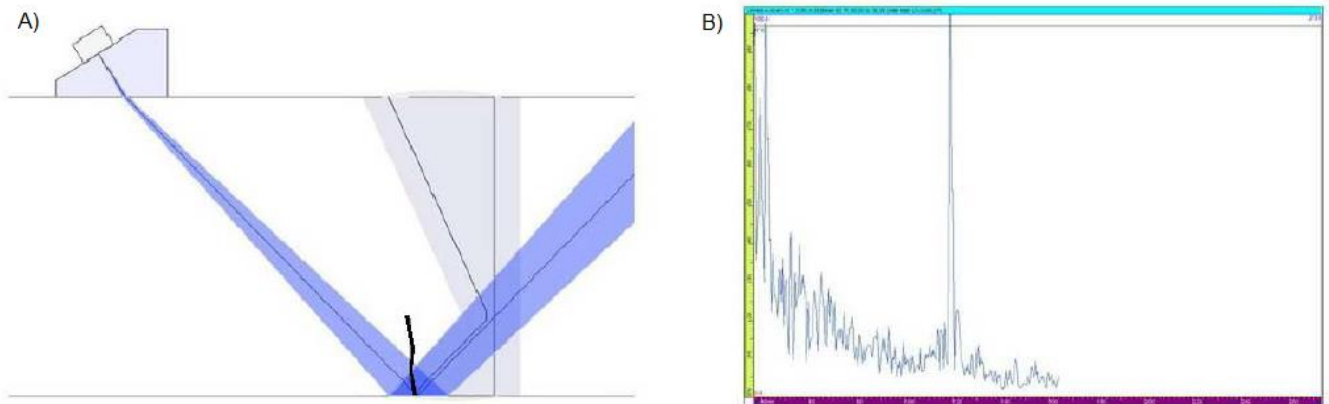
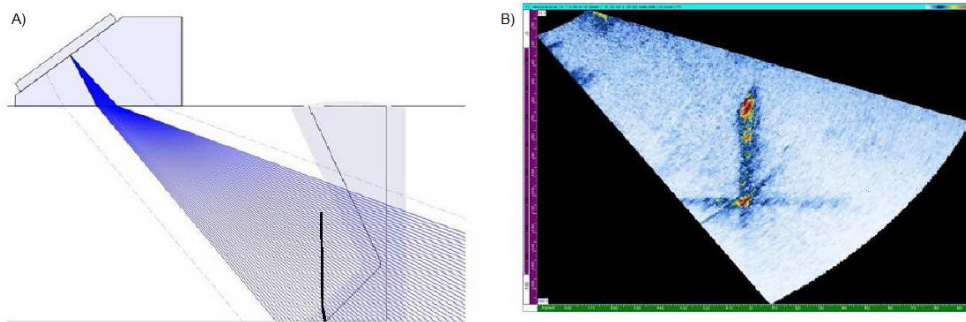
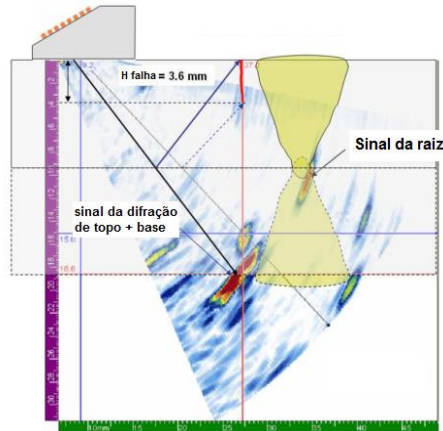


Figura 12. Esboço mostrando a técnica de inspeção por *phased array* com a correspondente imagem do padrão de visualização S-scan: A) configuração da inspeção por ultrassom *phased array* de uma solda em um bocal, B) padrão de visualização S-scan de um falha rente a solda (adaptado de CHARTIER, 2007).



As facilidades que a técnica de ultrassom *phased array* proporciona são evidenciadas por outros pesquisadores que estudaram as vantagens da técnica na inspeção em soldas, comprovando que os defeitos padrão em solda são facilmente detectados. A combinação dos padrões de visualização S-scan e B-scan aumentam as informações sobre as dimensões dos defeitos, o dimensionamento da altura e a avaliação da extensão baseiam-se no padrão de visualização S-scan. A figura 13 mostra um defeito próximo ao cordão de solda detectado pela reflexão do feixe, a altura foi medida a partir da base do defeito até o sinal de difração, altura real 3,8 mm e valor medido 3,6 mm. (CIORAU, 2007)

Figura 13. Padrão de visualização S-scan dimensionando defeito próximo á raiz (adaptado de CIORAU, 2007).



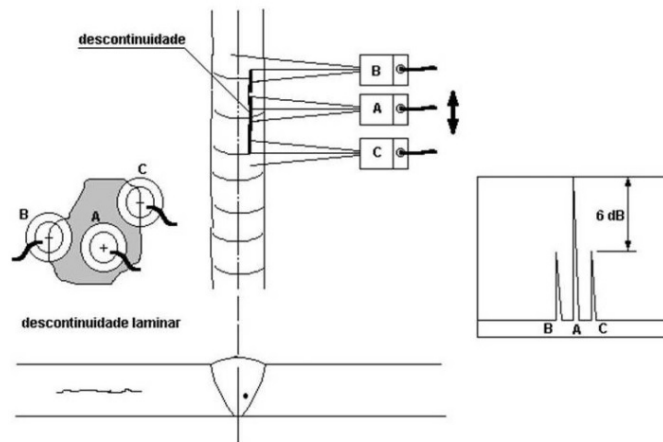
3.5.2 TÉCNICA DE DIMENSIONAMENTO QUEDA DE 6 dB

A técnica de dimensionamento utilizando a queda de 6 dB tem como referência inicial a posição do transdutor ultrassônico em relação a descontinuidade que deverá proporcionar nesta posição um eco de reflexão com a maior amplitude possível. Conhecido este ponto, o transdutor é deslocado lateralmente até que apenas a metade do feixe sônico inicial esteja incidindo sobre a descontinuidade, que vai proporcionar uma queda de amplitude de 50% que equivale a 6 dB, sendo a linha de centro do transdutor uma das extremidades da descontinuidade. Aplica-se o mesmo procedimento para a outra extremidade, determinando assim o comprimento da descontinuidade. Esta técnica pode ser aplicada para dimensionar pequenos refletores (falta de fusão, inclusão de escória e trincas) como também para grandes refletores (dupla laminação) muito comuns em chapas laminadas.

As etapas para o dimensionamento do comprimento de descontinuidades numa junta soldada são mostradas na figura 14. Com o transdutor na posição (A) busca-se a maximização do sinal da descontinuidade a 100% da altura da tela do aparelho no modo de representação em A-scan. Nas posições (B) e (C) o cabeçote é deslocado lateralmente, no sentido de determinar as bordas da descontinuidade, que representam

uma queda de 50% da altura original do sinal que corresponde a um decréscimo de 6 dB (SANTIN, 2003).

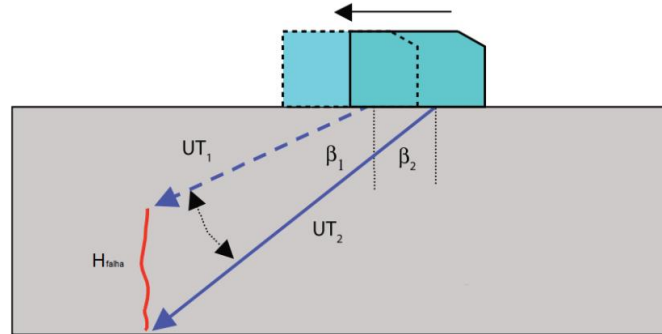
Figura 14. Representação esquemática do dimensionamento de descontinuidades utilizando a técnica da queda dos 6 dB em uma junta soldada (adaptado de SANTIN, 2003).



3.5.3 TÉCNICA DE DIMENSIONAMENTO AATT

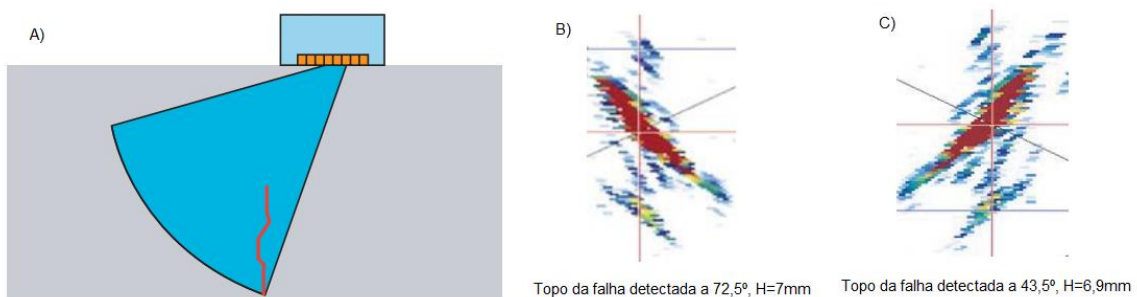
A *Absolute arrival time technique* (AATT) também chamada de *pulse arrival time technique* (PATT) é uma técnica de difração de topo que foca em localizar topo e base da falha. O transdutor é varrido sobre a área da falha para detectar os melhores ângulos de detecção dos sinais da raiz e topo do defeito. O sinal a partir do topo da falha é maximizado e o tempo de chegada (caminho do som) é medido para ambos. Esse tempo de voo ou caminho do som (UT) é definido para a base e topo do defeito podendo assim definir seu tamanho. Essa técnica é demonstrada na figura 15.

Figura 15. Princípio de medição da altura da falha usando AATT (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007b).



No ultrassom por Phased Array, o feixe pode varrer uma ampla área contendo a falha usando S-Scan (sectorial scan), com isso podendo dimensionar a altura da falha através da AATT, como pode ser visto na figura 16 (POPOVYCH; KARPASH, 2014).

Figura 16. Exemplo de um dimensionamento através de AATT de uma trinca com transdutor de phased array em posição estática com o feixe varrendo a região da trinca de 7,0mm de altura: A) Ilustração do princípio; B) e C) ampliação da imagem por S-scan dos sinais de ultrassom e dimensionamento da altura da trinca (adaptado de OLYMPUS NDT, 2007b).

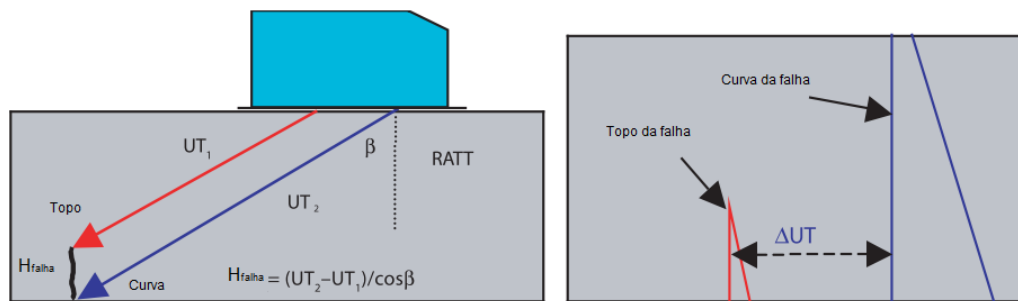


3.5.4 TÉCNICA DE DIMENSIONAMENTO RATT

A *relative arrival time technique* (RATT) também chamada de *satellite pulse observation time technique* (SPOT) é uma técnica de dimensionamento baseada na leitura do tempo de voo, não na leitura da amplitude do sinal. É aplicada para observar

a diferença do tempo de chegada entre o sinal refletido pela base da falha e o sinal difratado do topo da falha enquanto ambos estão presentes no visor do aparelho de ultrassom. Para usar essa técnica o diâmetro do feixe deve ser maior que a altura projetada da falha, a falha deve estar perpendicular à superfície examinada, o transdutor na mesma posição e o feixe incidido no mesmo ângulo como demonstra figura 17.

Figura 17. RATT base de avaliação da altura da falha sobre a relativa medida do caminho do ultrassom entre o sinal do topo e curva da falha (adaptado de POPOVYCH; KARPASH, 2014).



Nessa condição o sinal de difração do topo deve ocorrer antes no tempo devido ao mais curto caminho do som. A amplitude do sinal é muito menor em comparação ao sinal refletor do canto da falha; e o sinal do topo e curva da falha devido ao sinal sendo difratado e o outro refletido duas vezes. Para medir a altura da falha é necessário medir a diferença no tempo de chegada entre os dois sinais e depois aplicar a seguinte fórmula: $H = v\Delta t / 2\cos(\beta)$, onde: H = altura da falha, v = velocidade da onda ultrassônica, Δt = diferença no tempo de chegada, β = ângulo refratado (POPOVYCH; KARPASH, 2014).

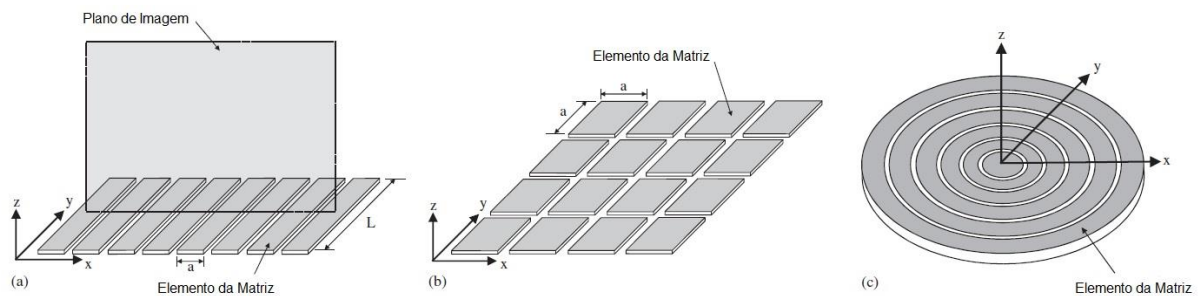
3.6 PHASED ARRAY

Transdutores de matrizes são amplamente usados em ensaios não destrutivos (SONG; SHIN; JANG, 2002), sonares (DYBEDAL; LØVIK; INGEBRIGTSEN, 1985),

diagnósticos médicos (WONGWAISAYAWAN et al., 2015) e inspeção em materiais compósitos (ABDESSALEM et al., 2015).

Os transdutores de matriz para ultrassom podem ser brevemente classificados em: uma-dimensão (1-D), duas-dimensões (2-D) ou anular, mostrados na figura 18. Transdutores de matriz linear de 1-D são os mais disseminados na indústria, seus elementos consistem em uma linha de tiras paralelas conforme figura 18 A). O sistema de coordenadas cartesianas mostrado na figura descreve no plano x-y os elementos da matriz. O comprimento dos eletrodos está paralelo ao eixo y e a direção normal do plano é paralela ao eixo z. A imagem produzida pelas ondas geradas pelos eletrodos no plano x-z está exibida na figura 18 B). Transdutor de matriz 2-D mostrada na figura 18 B) vem ganhando espaço no setor de END, composto por elementos quadrados em forma de matriz, dispostos no plano x-y, permite obter uma imagem em 3-D. Transdutor de matriz anular mostrado na figura 18 C) possui uma estrutura diferente dos outros transdutores de matriz, são projetados para conferir uma profundidade de foco variável e não permite mudar a direção do feixe. Neste contexto eles são usados como substitutos dos transdutores de foco convencionais, como por exemplo, inspeção de tarugos de titânio. Esses transdutores são tipicamente convexos em vez de planares e conferindo foco inicial e reduzindo o número de elementos. As configurações das matrizes mostradas na figura 18 são simples, mas existem muitas outras possibilidades de padrão de elementos (DRINKWATER; WILCOX, 2006).

Figura 18. Definição dos transdutores de matriz convencionais: A) 1-D matriz linear, B) 2-D matriz em grade, C) matriz anular (adaptado de DRINKWATER; WILCOX, 2006).



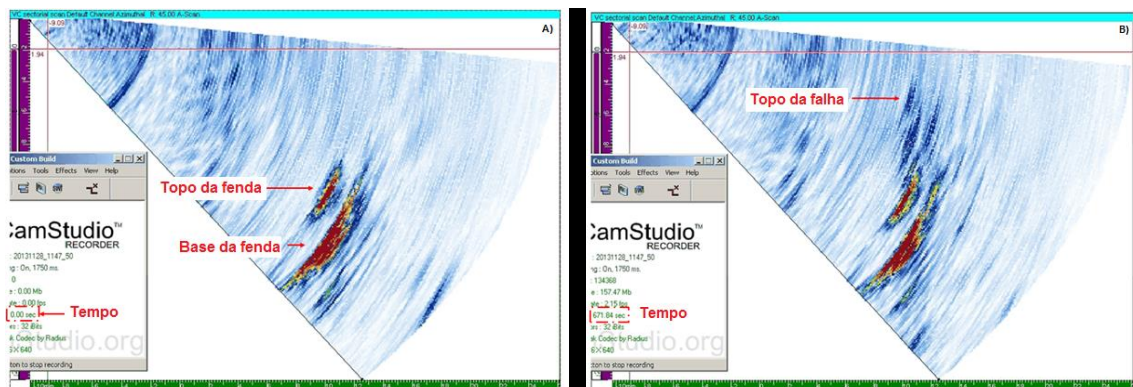
Transdutores de matrizes ultrassônicas apresentam grandes vantagens sobre transdutores padrões de monocristal. Para gerar um feixe em fase e com interferência construtiva, vários elementos do transdutor são excitados em tempos determinados, formando uma frente de onda no ângulo desejado, essa é a principal característica tecnológica de ultrassom de transdutor matricial, a excitação controlada por computador (amplitude e atraso de sinal) de cada elemento individual que compõe os transdutores de multi-elemento. A excitação controlada dos elementos piezoelétricos possibilita gerar um feixe de foco ultrassônico variado, através de softwares, parâmetros como ângulos de incidência e profundidade de foco podem ser ajustáveis. O feixe de varredura focado pode detectar por modo especular trincas no material a partir do eixo de incidência. Um transdutor de mono cristal, com limite de movimento e angulação de feixe, tem grande probabilidade de não detectar trincas localizadas fora do eixo de foco e perder o sinal de retorno de defeitos devido sua orientação (OLYMPUS NDT, 2007b).

Transdutores de matriz são usados em END em uma grande faixa de modalidades de inspeções. O uso de transdutores de matriz reduz o número de transdutores convencionais usados em uma inspeção. Existem vários tipos de modalidades de inspeção, nesta revisão serão citados apenas os dois mais utilizados. A mais simples modalidade é a utilização do transdutor paralelo à superfície do material a ser inspecionado utilizado acoplante na interface ou apenas ar, podendo criar uma frente de onda ou um foco de inspeção. Varredura angular pode ser realizada utilizando acoplante entre o transdutor e o material a ser inspecionado, mas é mais comumente usado com auxílio de sapatas angulares, como polimetilmetacrilato (PPMA, conhecido no mercado como Plexiglas e Perspex), é usado para orientar o feixe de inspeção em um ângulo fixo na peça, desse modo convertendo as ondas longitudinais na sapata em ondas transversal na peça. Dessa forma o transdutor de matriz pode direcionar a onda cisalhante na peça em uma faixa de ângulos limitada. Tipicamente a faixa de ângulos para onda longitudinal na sapata é mantido além do ângulo crítico longitudinal, de modo que apenas as ondas transversais são excitadas na peça de ensaio para simplificar a inspeção. A razão para varrer a inspeção em ângulo nessa configuração é usualmente para aumentar a detectabilidade de falhas que pode ocorrer sobre a faixa de ângulos,

no entanto isso pode também ser usado para aumentar a cobertura a partir de uma localização particular. (CHATILLON et al., 2000; CHIMENTI, 2014)

Uma dos principais objetivos da técnica por ultrassom *phased array* é estabelecer a taxa de crescimento de defeitos durante a propagação das falhas podendo assim determina a integridade da estrutura. Modelos de fraturas baseados na Lei de Paris visam prever a taxa de crescimento de uma defeito durante o ensaio por fadiga, isto é determinar a curva da/dN. Isto normalmente pode ser aproximado durante o teste de fadiga, medindo o tamanho de uma fenda através de métodos de ensaio não destrutivo, interrompendo o teste periodicamente e realizando uma inspeção. Pesquisadores realizaram um monitoramento em tempo real do crescimento de uma fenda em bloco padrão durante um ensaio de fadiga pela técnica de ultrassom *phased array* podendo assim determinar a curva da/dN. A figura 19 mostra a través do padrão de visualização S-scan o início e uma etapa ligeiramente antes da ruptura do corpo de prova. (NAGESWARAN, 2013)

Figura 19. Padrão de visualização S-scan do monitoramento em tempo real de um ensaio de fadiga: A) imagem inicial do ensaio, B) imagem da etapa final antes da ruptura (adaptado de NAGESWARAN, 2013).



3.7 AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX

Aço inoxidável é uma ótima alternativa de material para equipamentos na indústria química. O desenvolvimento de processos químicos e petroquímicos que envolvem alta temperatura, pressão e ambientes altamente corrosivos, levou a um aumento da demanda de uma nova linha de aços inoxidáveis, mais resistentes para essas condições. Essa categoria pertence aos aços inoxidáveis duplex (AID), devido a sua microestrutura austenítica-ferrítica possuem maior resistência mecânica e resistência à corrosão que aços austeníticos padrão (Duplex Stainless Steels, 1997).

Os aços inoxidáveis duplex são ligas Fe-Cr-Ni-Mo, contendo até 0,30% em peso de nitrogênio na forma atômica, que apresentam microestruturas bifásicas compostas por uma matriz ferrítica e austenítica pela fase precipitada com morfologia arredondada e alongada. A diferença básica entre os aços inoxidáveis duplex e superduplex consiste principalmente nas concentrações de cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio que essas ligas apresentam, sendo que alguns desses elementos interferem diretamente na resistência à corrosão por pite, que é uma forma de ataque químico em ambientes contendo íons agressivos, dentre estes destaca-se o íon cloreto (Cl⁻).

Podemos quantificar empiricamente a resistência à corrosão por pite, PRE_N (*Pitting Resistance Equivalent*) através da norma ASTM A890/A890M, essa grandeza pode ser calculada de acordo com a expressão:

$$PRE_N = \%Cr + [(3,3\% \times \%Mo)] + [(16) \times (\%N)]$$

Os aços inoxidáveis bifásicos (austenítico-ferrítico) cujos valores do PRE_N forem da ordem de 35 a 40, constituem a família dos aços inoxidáveis duplex e aqueles cujos PRE_N forem superiores a 40, constituem a família dos inoxidáveis superduplex. Com relação à microestrutura, a concentração volumétrica de ferrita deve aproximar-se de $50 \pm 5\%$ para um material corretamente balanceado do ponto de vista microestrutural (MARTINS; CASTELETTI, 2007; SERVICE, 2002).

A principal evolução na composição química dos AID foi o progressivo aumento no teor de nitrogênio. Este conhecimento é bem difundido e mostra que ligas com teor de

nitrogênio maior que 0,3% em peso em AID melhoram as propriedades de resistência mecânica, resistência à corrosão e a soldabilidade, a classe de aço inoxidável superduplex 25Cr-7Ni-4Mo possui os limites de nitrogênio na faixa de 0,3% em peso de nitrogênio. Aço inoxidável superduplex foi originalmente desenvolvido para resistir à corrosão na água do mar; e por consequência, esse material é particularmente adequado para ambientes contendo cloretos. O tipo mais comum de aço inoxidável superduplex é o EN1.4410 (UNS S32750), apresenta a mesma ou melhor resistência a corrosão que a classe de superaustenítico como a liga 25-6Mo (UNS N08926) (MATEO et al., 2001; U. KIVISA"KK, 1999).

O comprometimento da resistência à corrosão se deve ao empobrecimento do cromo e do molibdênio presentes ao redor da fase sigma formadas na matriz. A presença de sigma, além do grande endurecimento que causa no material, acaba por comprometer também a ductilidade, impedindo muitas vezes a aplicação convencional do aço. A fase sigma apresenta elevada dureza (equivalente em alguns casos a 940 HV) e grande fragilidade. Sua estrutura cristalina apresenta trinta átomos por célula unitária de sua estrutura tetragonal, de relação c/a próxima de 0,52, e à temperatura ambiente não é magnética (MEC, 2004).

A precipitação de sigma se inicia nos contornos de grão ou de interfase e é intensificada por diversas horas de exposição à temperaturas da ordem de 700 a 900 °C, sua presença é indesejável nos aços dúplex por comprometer tanto a resistência à corrosão quanto a tenacidade, a presença de apenas 3% em volume da fase sigma na microestrutura faz com que a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy reduza de 200J-220J para próximo de 15J à temperatura ambiente. Após tratamento térmico de solubilização e resfriamento em água, a microestrutura torna-se totalmente bifásica, dissolvendo completamente a fase sigma e outros componentes secundários que aparecem em menores proporções (MARTINS; CASTELETTI, 2007).

3.8 FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO

A presença do hidrogênio nos aços pode provocar diversos fenômenos de fragilização. A eletrólise da água e os hidrocarbonetos representam uma das principais

fontes de hidrogênio, tanto natural como sintético, os quais constituem uma abundante fonte de energia disponível atualmente. As principais formas nas quais o hidrogênio é observado nos aços é:

- Dissolvido intersticialmente como hidrogênio atômico (H);
- Precipitado na forma de hidrogênio molecular (H₂);

A introdução de hidrogênio no aço pode ser realizada através de carregamento catódico, via solução eletrolítica ou através de atmosferas gasosas em alta pressão. A evolução eletroquímica do hidrogênio atômico (H) faz parte de uma reação catódica, onde cátions de hidrogênio hidratados (H₃O⁺) são transportados por difusão/migração em direção ao cátodo, onde o cátion sofre redução passando para hidrogênio na forma atômica. A reação pode ser expressa segundo a equação: $M + H_2O \leftrightarrow MO + 2H$.

Desta forma uma parte do hidrogênio atômico pode se recombinar na forma molecular (H₂), que então deixa a superfície metálica. A outra parte dos átomos de hidrogênio passa por uma reação de absorção que penetra na superfície do material e permanece na forma atômica (HARDIE; CHARLES; LOPEZ, 2006; POPOV, 2015).

Na estrutura cúbica de face centrada (CFC) os interstícios octaédricos (O) têm o maior volume livre, enquanto que na estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) os interstícios tetraédricos (T) são os maiores. A estrutura CFC possui interstícios maiores do que a estrutura CCC, a austenita (CFC) é capaz de dissolver mais facilmente o hidrogênio do que a ferrita (CCC). Portanto, o coeficiente de solubilidade do hidrogênio na austenita é maior do que na ferrita, enquanto que o coeficiente de difusão do hidrogênio é maior na ferrita do que na austenita (ALSARRAF, 2010).

Conteúdo total de hidrogênio é dado pelo hidrogênio reticular (H localizado em posições intersticiais na matriz) e pelo hidrogênio aprisionado nos defeitos metalúrgicos (hidrogênio reversível e irreversivelmente aprisionado). Em situações reais, os átomos de hidrogênio não estão localizados somente nas posições intersticiais, eles também podem ser retidos por diferentes tipos de defeitos presentes dentro do material: na rede cristalina (hidrogênio em solução sólida), contornos de grão, discordâncias, vazios e mesmo precipitados coerentes e incoerentes podem atuar como sítios aprisionadores

de hidrogênio (DAYAL; PARVATHAVARTHINI, 2003; HARDIE; CHARLES; LOPEZ, 2006).

A transformação da austenita em martensita, quando em ambientes hidrogenados, é geralmente associada à ocorrência de fratura frágil em aços com microestrutura predominantemente austenítica. A introdução de hidrogênio em uma microestrutura austenítica produz a expansão da rede cristalina assim como tensões suficientes para promover a transformação (BUGAEV, 1997).

A presença de martensita aumenta a suscetibilidade de trincas induzidas pelo hidrogênio, pois ela atua como um facilitador do transporte/difusão de H no material. A difusão por caminhos facilitados ocorre ao longo de caminhos favoráveis, tais como contornos de grão orientados, sendo em geral desprezível em metais com rápida difusão intersticial como, por exemplo, a ferrita, porém pode desempenhar um papel importante em metais CFC como no caso dos aços austeníticos.

A fragilização por hidrogênio é frequentemente classificada em três tipos:

- Fragilização por hidrogênio interna reversível: também denominada como fratura retardada ou fragilização em baixa taxa de deformação;
- Fragilização por hidrogênio associada ao ambiente;
- Fragilização pela reação do hidrogênio.

Quando a ocorrência de fragilização é observada em amostras pré-carregadas com hidrogênio durante a realização de ensaios mecânicos, diz-se que esta fragilização é causada pela fragilização interna reversível ou pela fragilização pela reação do hidrogênio. Em serviço, a fragilização por hidrogênio geralmente ocorre em regiões dos componentes onde não há corrosão ou mesmo em regiões protegidas contra corrosão, como por exemplo, por proteção catódica. Isto porque a corrosão ocorre preferencialmente em regiões anódicas, enquanto que o hidrogênio na forma atômica é gerado na superfície do aço (região catódica) devido à dissociação da água. Portanto, a difusão do hidrogênio atômico para o interior do material é a causa da fragilização por hidrogênio (ASM HANDBOOK, 2001).

Portanto a fragilização por hidrogênio é definitivamente relacionada com a absorção de H, sendo muitas vezes necessário um tempo de incubação para realizar o carregamento e promover o transporte, resultando assim em uma fratura retardada. Na maioria das vezes a fragilização provoca trincas individuais evidentes (intergranular e transgranular), ao contrário das trincas ramificadas características na corrosão sob tensão.

Não existe uma teoria universalmente aceita para a fragilização por hidrogênio. As principais teorias:

Teoria da Pressão tem como base a recombinação do hidrogênio atômico (H) em hidrogênio molecular (H_2) em defeitos existentes no material. A presença de hidrogênio na forma gasosa dá origem a pressões internas elevadas (>105 atm) que implicam na expansão da cavidade do defeito. A pressão interna exercida pelas moléculas de hidrogênio pode provocar a nucleação e o crescimento de microtrincas, mesmo sem a presença de tensão externa aplicada (OLDEN; THAULOW; JOHNSEN, 2008). Os principais tipos de trincas produzidas pela presença de hidrogênio molecular no material: Trinca Induzida por Hidrogênio (TIH): tensões internas deformam o material e produzem bolhas de gases de H_2 . A presença destas bolhas responsáveis pela TIH são características em aços de baixa resistência em contato com ambientes contendo H_2S . Trincas Induzidas por Hidrogênio e Orientadas por Tensão: são uma combinação entre TIH e trincas sob tensão por sulfetos. Estas trincas se desenvolvem na presença de bolhas formadas por H_2 em conjunto com tensões residuais aplicadas (ROBERTSON et al., 2015).

Teoria da Decoesão: o mecanismo de decoesão considera a existência de uma concentração crítica de átomos de hidrogênio por onde a fratura frágil ocorre. Este mecanismo pode ser aplicado para fraturas intergranulares, onde elevadas concentrações de hidrogênio se concentram na região dos contornos de grão, atingindo assim a concentração crítica para ocorrência da fratura frágil.

Teoria da Plasticidade: o mecanismo de plasticidade é bem fundamentado em respeito aos efeitos provocados pelo hidrogênio no comportamento das discordâncias,

visto que a mobilidade das discordâncias aumenta na presença do hidrogênio. Uma grande quantidade de observações através de microscopia eletrônica de transmissão comprova a conformidade deste mecanismo, o fato de que o efeito do hidrogênio nos movimentos de discordâncias não é dependente do tipo de discordância (cunha, helicoidal ou mista) e que se manifesta em estruturas cristalográficas diferentes, sugere que esta teoria pode ser considerada como universal. O modelo afirma que o efeito de reforço do hidrogênio decresce de acordo com a razão $1/r^2$ (onde r é a distância entre os centros elásticos), sendo significativo somente para pequenas distâncias a partir do centro da discordância. Cálculos mostraram que a tensão de cisalhamento decresce cerca de 35% a uma distância de $3b$ e somente 8% para $20b$, onde b é o vetor de Burgers (HARDIE; CHARLES; LOPEZ, 2006).

3.9 PROTEÇÃO CATÓDICA

Materiais metálicos quando expostos a determinados ambientes agressivos tendem a sofrer dissolução, tornando-se íons dissolvidos no meio. Esse processo é mais intenso à medida que o metal é mais ativo ou menos nobre e que as condições do meio foram mais agressivas. Assim, a proteção catódica é empregada para manter a integridade das estruturas metálicas em meios corrosivos diversos.

O principal intuito da proteção catódica é a inversão desse processo natural, evitando que o material dissolva. Proteção catódica é um meio eletroquímico de controlar a corrosão baseada no fato do ânodo de uma célula eletroquímica sofrer oxidação enquanto o cátodo sofrer redução. Na proteção catódica o objetivo é proteger o metal, tornando-o o cátodo da célula, pode ser usada em qualquer metal em diversos meios corrosivos como, água do mar, solos ácidos, concreto entre outros ambientes corrosivos. Existem dois tipos de proteção catódica: ânodo de sacrifício e sistema de corrente impressa.

. Uma vantagem da utilização de métodos que apliquem corrente é o ajuste do potencial catódico imposto, diminuindo o hidrogênio produzido na reação. Outra vantagem em relação aos eletrodos de sacrifício é a possibilidade de proteção em eletrólitos de menor condutividade (POPOV, 2015).

Sistema de proteção catódica por ânodo de sacrifício é simples, requer apenas um material anódico para proteção do aço no ambiente de interesse. No processo de proteção por ânodos de sacrifício o fluxo de corrente se origina da diferença de potencial existente entre o metal a ser protegido e aquele escolhido como ânodo. Utilizando eletrodos de sacrifício para proteger estruturas de aço submersas em ambientes marinhos, o potencial imposto ultrapassa $-1000\text{mV}_{\text{ECS}}$ (GENTIL, 1994).

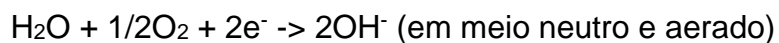
Proteção catódica de sistema de corrente impressa, muito utilizada em proteção de tubos, consiste em um ânodo e cátodo (tubulação) enterrado, conectados a um retificador elétrico que fornece corrente contínua para os eletrodos do sistema (ânodo e tubulação). As maiorias dos ânodos de corrente impressa são feitos a partir de eletrodos de material não consumível que são naturalmente catódicos para o aço, se esses eletrodos forem conectados diretamente a uma estrutura eles atuariam como um cátodo e causariam aceleração na corrosão da estrutura. A fonte de corrente impressa reverte a polaridade natural e permite que o material atue como um ânodo. Ao invés da corrosão do ânodo, outras reações de oxidação ocorrem, como a formação de cloro ou oxigênio e o ânodo não é consumido. A diferença de potencial entre o ânodo e cátodo é limitada pelo sistema do ânodo de sacrifício, dependendo do material do ânodo e especificações do ambiente. A ampla diferença de potencial disponível pela técnica de corrente impressa permite remota localização do ânodo, permitindo maior eficiência na distribuição padrão de corrente ao longo do cátodo protegido (ASM, 1992).

O potencial mínimo de proteção adotado para um aço é de -800 mV (negativo, pois quanto mais negativo, a proteção tende a ser maior), em relação à semicélula de Ag/AgCl , e -770 mV em relação ao eletrodo de calomelano saturado (SCE). Para outros metais e ligas, são outros os potenciais mínimos de proteção, dependendo do potencial natural de cada um (GENTIL, 1994).

A proteção catódica não é necessária para evitar a corrosão generalizada em água do mar nos aços inoxidáveis superduplex (AISD). O mesmo acontece com a corrosão por pites, pois o P_{REN} desses aços é suficientemente alto. Porém, em condições severas de salinidade pode ocorrer corrosão por pites e por fresta. Para isto, considera-

se que os AISD encontram-se bem protegidos em potenciais mais negativos do que -850mV_{ECS}. (GREGORI, 2004).

Para que se possa avaliar o processo de geração de hidrogênio, é preciso entender o mecanismo de formação de micropilhas de corrosão no material. Esse comportamento é inevitável, seja por razões pertinentes ao metal ou ao meio. Suas causas principais são as dissimilaridades entre metais, impurezas, tensões internas, aeração diferencial, diferença na composição do eletrólito, etc. Para existir uma corrente de proteção nas áreas anódicas da estrutura a ser protegida, é necessário que reações de redução ocorram nas áreas catódicas. Nestas reações, a água tende a se dissociar em íons H⁺ e OH⁻, que podem ser reduzidos com liberação de hidrogênio ou oxidados com liberação de oxigênio conforme equações abaixo conforme o meio:



Estudos indicam que aço inoxidável duplex (UNS 31803) sob potencial de proteção catódica entre -1050mV e -1150mV durante trinta dias em meio salino, apresentaram mudança significativos no comportamento da curva tensão-deformação. Quanto mais negativo o potencial de proteção maior é a diminuição na deformação do material e mais acentuado é o caráter frágil da fratura dos corpos de prova desse ensaio. Quanto o potencial foi levado para -1050mV ou mais negativo, o modo da fatura macroscópica altera-se de dúctil para frágil, indicando o aumento da sensibilidade a fratura do aço inox duplex com aumento do potencial negativo. Nesse processo, a evolução da reação de hidrogênio ocorre quando o potencial é menor que -1000mV, alguns átomos de hidrogênio formarão moléculas e deixarão a superfície do metal e outras moléculas serão adsorvidas na superfície do metal e depois absorvidas causando fragilização por hidrogênio (WANG, 2013).

O uso de um potencial muito negativo pela técnica pode ter desvantagens, possibilitando uma sobre proteção de aço de alta resistência causando fragilização por

hidrogênio. Desprendimento do revestimento ocorre quando uma mistura penetra o revestimento e o hidrogênio é gerado na superfície do metal sob o revestimento. O gás pode acumular até atingir pressão causando empolamento ou trincas no revestimento protetor. Quando o revestimento é danificado, a necessidade para corrente de proteção aumenta e pode exceder a confiabilidade do sistema. Quando a proteção catódica é aplicada, a produção de hidrogênio na superfície do metal é uma das reações catódicas possíveis. Se a proteção catódica for aplicada em água do mar, existem duas reações que podem levar à formação de hidrogênio atômico, dois corpos carregados opostamente interagem se atraindo (H^+) é então adsorvido na superfície catódica, o hidrogênio passa da condição adsorvida (H_{ads}) para a absorvida (H_{abs}). Em alguns casos, o H^+ pode se recombinar, formando hidrogênio gasoso (H_2) (BASH, 2015)

3.10 FADIGA

Em inúmeras aplicações, componentes mecânicos podem estar expostos a diferentes carregamentos cíclicos ao mesmo tempo, como tração, flexão e torção em direções diferentes, que por sua vez causam danos microscópicos ou macroscópicos na estrutura. Nessa situação diz-se que o material sofrerá fadiga multiaxial (DOWLING; IYYER, 1987). De acordo com Dieter e Bacon, para que o processo de fadiga de fato ocorra, três fatores necessariamente precisam estar presentes: 1) cargas trativas em um nível suficientemente elevado; 2) Amplitude considerável da tensão aplicada e 3) número suficientemente grande de carregamentos cíclicos. Contudo, a deformação plástica, mesmo que de forma muito localizada, necessita estar presente para que a fadiga ocorra (DIETER; BACON, 1988).

Falhas em componentes metálicos têm sido observadas para cargas repetitivas ou flutuantes, muito abaixo daquelas requeridas para uma falha catastrófica sob um único carregamento. As falhas ocorridas sob condições de carregamento dinâmico são chamadas de falhas por fadiga. Fadiga pode ser definida conforme a norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) E1823 (2013), como um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em

vários pontos, e que pode culminar em trincas ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carga.

Tradicionalmente, o comportamento de um material sob condições de carregamento cíclico é descrito pela curva S-N (ou σ -N), onde S (ou σ) é a tensão aplicada e N é o número de ciclos até a ruptura ou falha. O processo de fadiga é usualmente dividido em uma etapa de iniciação, outra de crescimento estável da trinca, e a ruptura final, de propagação rápida. Cada qual é descrita por diferentes fenômenos, descritos a seguir.

As trincas por fadiga iniciam em planos localizados de cisalhamento, onde há concentração de tensões que pode ser criada pela presença de inclusões não metálicas, porosidades ou descontinuidades. Tanto a iniciação quanto o crescimento de trinca são consequências de escorregamentos cíclicos em bandas de deslizamento, o que implica deformação plástica, mesmo que em muito pequena escala, como resultado do movimento de discordâncias. A deformação inicial fica restrita a alguns grãos do material, já que o carregamento cíclico na fadiga fica abaixo da tensão de escoamento. Os grãos da superfície são mais susceptíveis a essa microplasticidade, já que há menos restrição ao movimento em relação aos grãos subsuperficiais

As bandas de deslizamento ocorrem sob a presença de tensões cisalhantes. Essa tensão de cisalhamento atuante em planos de deslizamento não é homogeneamente distribuída do ponto de vista microscópico, já que cada grão possui sua orientação cristalográfica particular. Em alguns planos, o deslizamento é mais favorável do que em outros. Ao ocorrer, são gerados degraus entre os planos e a possível formação de uma pequena trinca. A formação de intrusões e extrusões em planos de cisalhamento específicos, que englobam o processo de iniciação de trincas e formam degraus, está representada na figura 20. A Figura 21 ilustra esta formação de maneira real, identificada através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). (MEYERS, M. A.; CHAWLA, 2008).

Figura 20. Nucleação de fadiga em planos de escorregamento (adaptado de MEYERS, M. A.; CHAWLA, 2008)

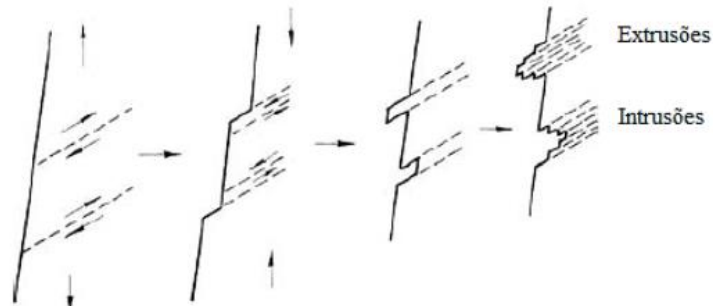
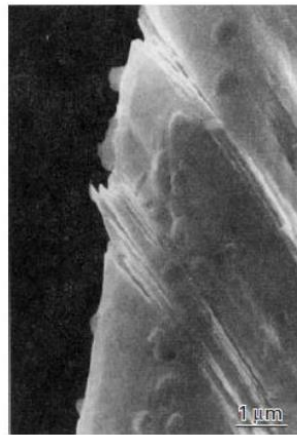


Figura 21. Ilustração de extrusão de uma folha de cobre vista por MEV (adaptado de MEYERS, M. A.; CHAWLA, 2008).



Iniciação, a plasticidade na frente da trinca é fortemente afetada pelo tamanho de grão, orientação cristalográfica e nível de tensões, já que o tamanho de trinca é comparável ao da microestrutura do material.

Crescimento de trinca - Uma vez ocorrida a nucleação, e considerando a continuidade do carregamento cíclico, a trinca tende a crescer ao longo do plano de maior tensão cisalhante e através dos contornos de grão (SCHIJVE, 2004).

A heterogeneidade da distribuição de tensões na superfície provoca uma concentração maior em regiões determinadas. Logo, as condições superficiais afetam de maneira direta o processo de iniciação por fadiga.

O processo de iniciação é completado quando o crescimento da microtrinca não depende mais das condições de superfície. O seu tamanho na transição da iniciação para o crescimento é significativamente diferente para cada tipo de material. Desta forma, o tempo de iniciação na vida em fadiga do material pode variar muito conforme suas características superficiais (SCHIJVE, 2004).

Crescimento de trinca - De uma maneira geral, uma vez ocorrida a nucleação de microtrincas e, dado o prosseguimento do carregamento cíclico, a trinca tende a crescer ao longo do plano de tensão de cisalhamento máxima e contornos de grão, o que corresponde à direção de 45° em relação à direção de carregamento.

A presença de microtrincas contribui para a distribuição heterogênea de tensões ao longo de uma superfície. Como resultado, mais de um plano de deslizamento pode ser ativado. Além disso, à medida que a trinca cresce através de grãos adjacentes, aumenta a restrição ao movimento de planos de deslizamento devido à presença de grãos vizinhos. Novos planos de deslizamento, em diferentes direções, são ativados. A direção de crescimento da microtrinca diverge da orientação do plano de deslizamento inicial. Geralmente, há uma tendência de crescimento da trinca a 45° em relação à direção de carregamento, sendo que em seguida o crescimento ocorre para uma direção perpendicular a de carregamento.

A presença de barreiras, como outros grãos, podem inicialmente atuar como um limite ao crescimento da trinca. Após vencer os primeiros grãos mais próximos à superfície, a microtrinca assume uma taxa progressiva de crescimento. A resistência ao crescimento de trinca, à medida que penetra no componente, torna-se uma propriedade do material em si, não sendo mais um fenômeno de superfície. Nesta etapa, a escala da frente de deformação plástica é aumentada para escalas bem maiores do que aquelas envolvendo um único grão. A ruptura final, caracterizada por uma propagação

instável da trinca, ocorre no momento em que ela ultrapassa o tamanho crítico (SCHIJVE, 2004).

A propagação das trincas por fadiga pode ser tratada eficientemente pelos conceitos tradicionais da Mecânica da Fratura, que demonstram que a taxa de propagação da/dN , ou o quanto a trinca cresce por ciclo do carregamento, depende primariamente da faixa ou gama de variação do fator de intensidade de tensões ΔK aplicado sobre a peça. Este método descrito na norma ASTM E647-13A abrange a determinação das taxas de crescimento de defeito por fadiga controlada pelo fator de concentração de tensões máximo (K_{max}). Os resultados são expressos em termos da faixa do fator de intensidade de tensões (ΔK), definida pela teoria da elasticidade linear. A tensão residual do defeito pode influenciar significativamente os valores da taxa de crescimento do defeito por fadiga, particularmente em baixos índices do fator de intensidade de tensão e baixos valores de tensão, no entanto tais variáveis não sejam incorporadas no cálculo de ΔK . Raju e Newman propuseram métodos para obtenção do valor de intensidade de tensões (ΔK) para defeito superficiais. (ASTM STANDARD E647 – 13A, 2014; RAJU; NEWMAN, 1986)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CORPOS-DE-PROVA PADRÃO

Foram criados dois corpos-de-prova padrão para auxiliar a identificação e dimensionamento dos defeitos do corpo-de-prova em escala real. Cada padrão foi confeccionado a partir da metade de um a seção transversal de um tubo igual ao que foi utilizado para obter o corpo de prova do ensaio em escala, as dimensões do tubo estão apresentadas na tabela 6.

Tabela 1. Apresenta as tolerâncias de dimensões do tubo de aço inox conforme norma ASTM A312.

Diâmetro Externo (mm)	Tolerância (mm)	Espessura (mm)	Tolerância (% da espessura)	Taxa (Espessura /Diâmetro externo)
168.28	+1.6/-0.8	18.26	+15%/-12.5%	acima de 0.05

Foram criados por eletro-erosão por penetração defeitos internos e externos paralelos ao cordão de solda no lado B do tubo com alturas de 2, 4, 6, 9 e 12mm e uma região simulando o cordão de solda com os defeitos alinhados ao lado B da solda conforme figuras 22 e 23 visão frontal e de topo dos corpos de prova padrão com defeitos intencionais interno e externo.

Figura 22. Corpo-de-prova padrão defeitos internos

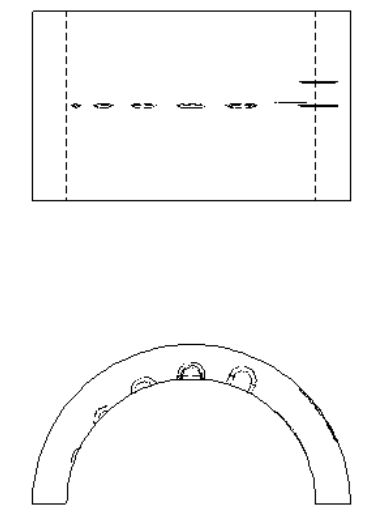
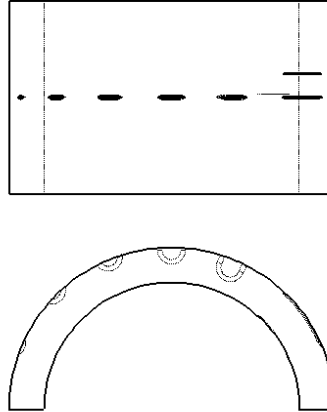


Figura 23. Corpo-de-prova padrão defeitos externos.



4.2 CORPO-DE-PROVA EM ESCALA REAL

O corpo de prova em escala real fabricado com aço superduplex (UNS S32750, SAF 2507) foi projetado de maneira a representar uma união de dois tubos soldados utilizado no transporte de fluidos em ambiente corrosivo. O corpo de prova em escala real é constituído por dois tubos soldados de superduplex com diâmetro nominal externo de 168,28 mm, espessura nominal de 18,26 mm e comprimento de 400 mm, na tabela 2 são apresentadas as tolerâncias do tubo.

Tabela 2. Apresenta as tolerâncias de dimensões do tubo de aço inox conforme norma ASTM A312.

Diâmetro Externo (mm)	Tolerância (mm)	Espessura (mm)	Tolerância (% da espessura)	Taxa (Espessura /Diâmetro externo)
168.28	+1.6/-0.8	18.26	+15%/-12.5%	acima de 0.05

Os tubos foram unidos por uma solda circunferencial, com metal de adição AWS A5.9/A5.9M-ER2594, utilizando o processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) orbital automático com multipasses. A tabela 3 mostra a composição química dos materiais utilizados.

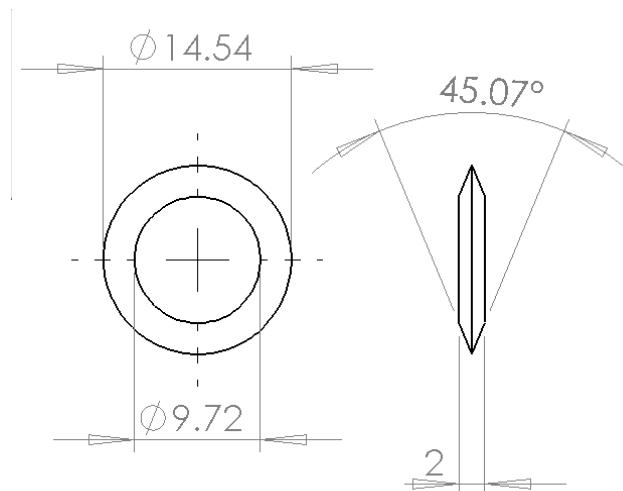
Tabela 3. Composição química do certificado dos fabricantes do metal base (UNS S32750, SAF 2507) e do metal de adição (AWS A5.9/A5.9M-ER2594).

UNS S32750 / SAF 2507										
Elemento	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
% em peso	0.015	25.6	6.51	3.88	0.46	0.32	0.019	0.0007	0.28	0.12

AWS A5.9/A5.9M-ER2594											
Elemento	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu	W
% em peso	0.009	25.14	9.22	3.91	0.59	0.47	0.014	0.001	0.26	0.06	0.005

Diferentes defeitos intencionais foram inseridos no cordão de solda, retratando condições críticas possivelmente encontradas em campo. Pela técnica de eletroerosão por penetração através de um eletrodo de cobre em forma de disco, conforme mostra figura 24, foram inseridos defeitos intencionais internos e externos no corpo de prova em escala real.

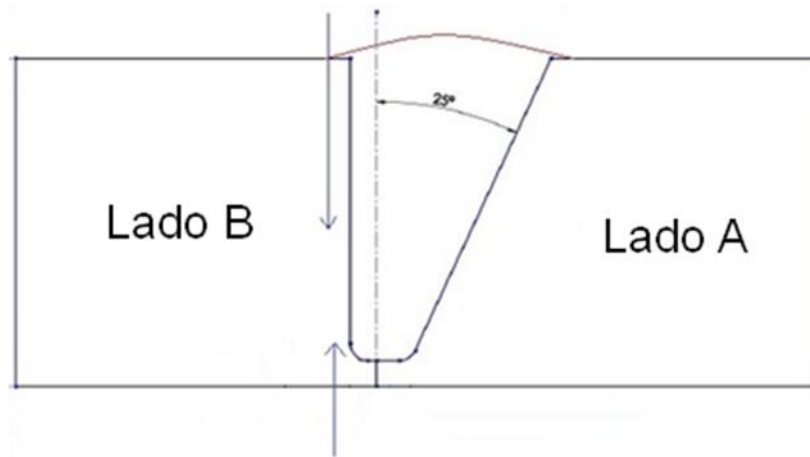
Figura 24. Eletrodo de cobre em forma de disco utilizado para gerar os defeitos.



Ao longo da circunferência da solda, três defeitos intencionais internos foram inseridos paralelos à raiz da solda no metal base do lado reto (lado B) com altura de 2mm, largura de 2mm e comprimento de 10mm. Três defeitos externos foram inseridos

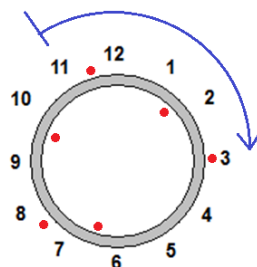
juntos ao reforço da solda do lado reto do chanfro com alturas de 2, 3 e 4mm; largura de 2mm e comprimento de 10mm, 12mm e 13mm respectivamente. A figura 25 indica através das setas a posição dos defeitos intencionais internos e externos.

Figura 25. Posição dos defeitos intencionais externos e internos indicados pelas setas.



Para facilitar a apresentação de resultados, a circunferência do corpo-de-prova foi separada em doze partes iguais a fim de facilitar a localização e identificação dos defeitos intencionais que estão representados por pontos vermelhos localizados ao longo da circunferência do tubo internamente e externamente, a seta azul indica a direção da inspeção, como mostra a figura 26.

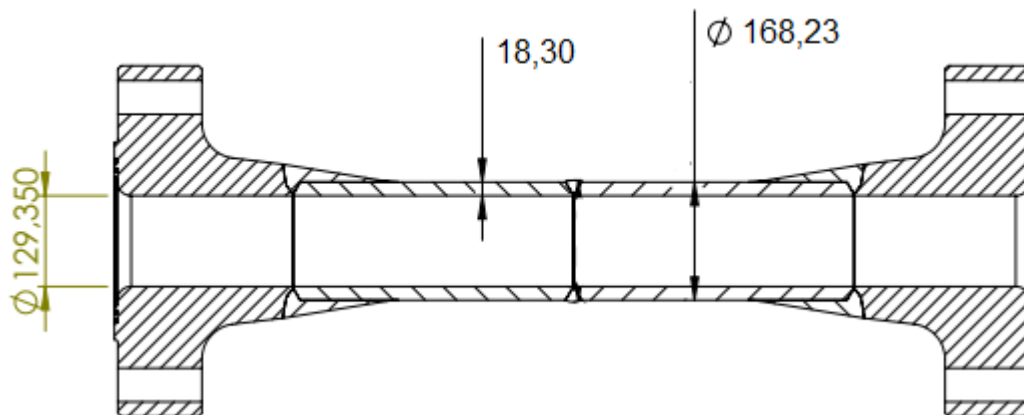
Figura 26. Esquema representando as divisões do tubo (em horas) para facilitar a inspeção e a localização dos defeitos (ilustrados por pontos vermelhos).



Apenas a região da união soldada foi exposta ao meio corrosivo, sendo o restante coberto com revestimento epoxy, uma janela ao longo da circunferência de

140mm centrada na solda permite o contato da superfície do tubo com meio corrosivo. Como mostra a Figura 27, os corpos de prova são constituídos por terminações flangeladas, fabricadas em aço carbono SAE 8620 submetido à cementação na região do raio de concordância.

Figura 27. Representação das partes que compõem o corpo de prova em escala real.



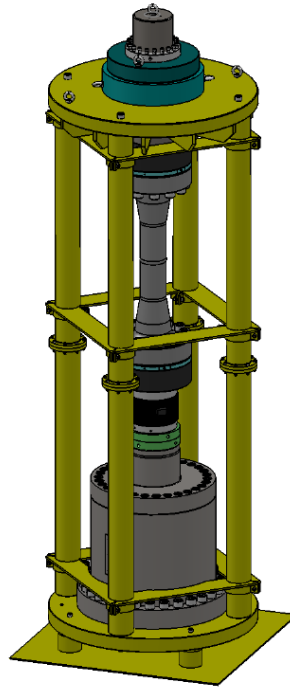
Para que esses flanges sejam fixados aos tubos de superduplex com confiabilidade do ponto de vista estrutural é necessário um aumento de espessura nas extremidades dos tubos para conferir equivalência estrutural mecânica entre os flanges e os tubos. Cada corpo de prova tem aproximadamente 1310 mm de comprimento de face a face dos flanges de conexão. Entre os flanges dos corpos de prova e os de isolamento, foram empregados conjuntos de vedações do tipo o'ring para o meio agressivo (Viton®).

4.3 ENSAIO DE FADIGA EM ESCALA REAL

O ensaio em escala real consiste na aplicação de carregamento variável tração-tração (fadiga) em corpos de prova submetidos a um ambiente corrosivo, alojado em uma bancada de ensaio. Essa bancada é constituída por vários componentes, mecânicos, hidráulicos e eletrônicos, de maneira a realizar um ensaio no qual haja completo controle sobre os parâmetros críticos e variáveis de interesse como mostra a

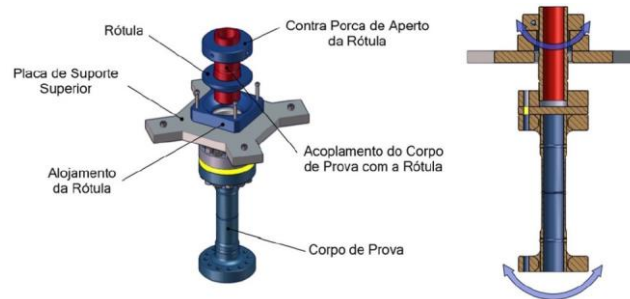
figura 28.

Figura 28. Representação esquemática da estrutura da bancada de ensaio de fadiga.



A estrutura da bancada foi projetada de maneira a resistir aos esforços de tração em fadiga, considerando a carga máxima do atuador hidráulico, 250 toneladas. A aplicação do sistema de fixação rotulado é útil para diminuir possíveis desalinhamentos ocasionados pela montagem da estrutura e/ou geradas pelo processo de soldagem dos espécimes. A figura 29 mostra a disposição dos componentes desse sistema.

Figura 29. Componentes do sistema de fixação rotulado e movimento de alinhamento.



Na parte inferior da máquina temos o chamado módulo de tração, ver figura 30, no qual é alojado o cilindro hidráulico, responsável pela aplicação do carregamento, o transdutor de posição linear registrando os deslocamentos gerados pela carga, as servo-válvulas de controle do cilindro, a célula de carga responsável pelo registro dos carregamentos e os anéis helicoidais de aperto que garantem sobre vida em fadiga ao sistema de conexão com o corpo de prova. Esse conjunto de componentes responde pela aquisição e controle dos parâmetros de carregamento e deslocamento presentes no ensaio.

Figura 30. Módulo de tração.



As condições de carregamento do ensaio, razão de carregamento (R), carga máxima (F_{max}), carga mínima (F_{min}) foram alteradas durante o ensaio e a frequência foi mantida constante em 0,2Hz. Na tabela 1 é apresentada a quantidade de ciclos rodados dentro das diferentes configurações (conjunto de parâmetros força máxima,

força mínima e frequência) utilizadas ao longo do ensaio totalizando seis configurações e 882.198 ciclos. Essa alteração de parâmetros foi realizada com o intuito de gerar diferentes marcas na frente de propagação da trinca por fadiga. Em todas as inspeções dentro das configurações de parâmetros 1 a 6 foi aplicando uma força de 90% da F_{max} para auxiliar na detecção das trincas por fadiga devida suas características (fina em sua espessura e superfície irregular) que dificultam sua detecção.

Tabela 4. Número de ciclos por configuração de parâmetros do ensaio de fadiga.

Configuração de parâmetros	Número de ciclos	Frequência (Hz)	Força máxima (kN)	Força mínima (kN)
Configuração 1	337.541	0,2	1500	750
Configuração 2	323.460		1500	375
Configuração 3	102.253		2000	800
Configuração 4	45.000		2000	1000
Configuração 5	64.999		2000	800
Configuração 6	8.945		2000	200

Durante o ensaio o corpo de prova foi submetido a ambientes corrosivos, tanto no exterior como no interior. O interior do corpo de prova foi preenchido por uma solução salina de água destilada contendo 35.000 ppm de NaCl, pressão atmosférica, temperatura de 60°C. O interior foi submetido a proteção catódica por um ânodo de sacrifício de 10kg com dimensão de 200x200x1000mm de uma liga de alumínio com uma alma de aço carbono soldada aos flanges do corpo de prova.

No exterior o corpo de prova foi envolvido por uma um cuba de aço inoxidável com revestimento de politetrafluoretileno (PTFE), armazenando uma solução salina de água destilada contendo 35.000 ppm de NaCl, simulando ambiente marinho, pressão atmosférica e temperatura de 60°C. Nesse mesmo sistema quatro contra eletrodos ligados a uma fonte de tensão foram dispostos ao redor do tubo gerando proteção catódica com potencial de -1100mV_{ECS}.

4.4 SOLDAGEM

O processo de soldagem adotado para união das juntas dos tubos para confecção do corpo-de-prova foi através de solda TIG (*Tungsten Inert Gas*) orbital mecanizada. O procedimento de soldagem do metal base (aço inoxidável superduplex UNS S32750) com metal de adição (AWS A5.9/A5.9M-ER2594, diâmetro de 0,8 mm e 1,0 mm), utilizou o processo de soldagem TIG com corrente contínua negativa (CC-), com eletrodo de tungstênio (tipo EWTh-2, diâmetro de 3,2 mm). Nas tabelas 4 e 5 são apresentados os parâmetros de soldagem e gases de proteção e purga utilizados durante a solda, energia de soldagem máxima de 1200 J/mm; temperatura máxima entre passes de 150 °C.

Tabela 5. Gases de proteção / purga utilizados durante a solda.

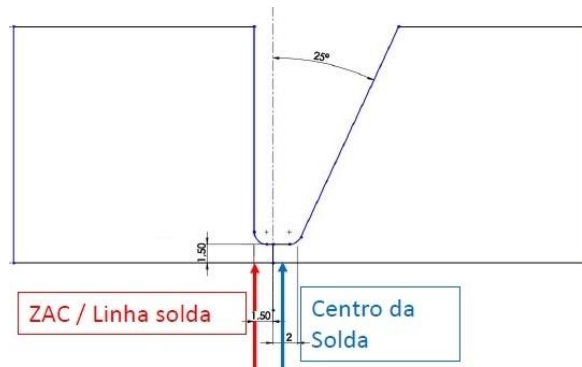
Gás de proteção / purga			
Função	Gás	Mistura (%)	Vazão (l/min)
Proteção	Ar+He+N	78-20-2	12
Purga	N	100	20

Tabela 6. Descrição dos parâmetros de soldagem.

Parâmetros de soldagem					
Camada	Diâmetro arame metal de adição (mm)	Corrente de pulso/base (A)	Tempo de pulso/base (s)	Tensão AVC pulso/base (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)
Raiz	0,8	180 / 110	0,30 / 0,20	10,0 / 9,0	10
Reforço	0,8	180 / 110	0,30 / 0,20	9,5 / 8,5	11 / 10 / 11 / 12
Enchimento	1,0	180 / 110	0,30 / 0,20	10,0 / 9,0	11 / 10 / 11 / 12
Acabamento	1,0	180 / 110	0,30 / 0,20	10,0 / 9,0	10 / 9 / 10 / 11

A figura 30 mostra a geometria do chanfro utilizada lado direito, lado A, lado inclinado chanfro à 25° e lado esquerdo, lado B, corresponde ao lado reto do chanfro.

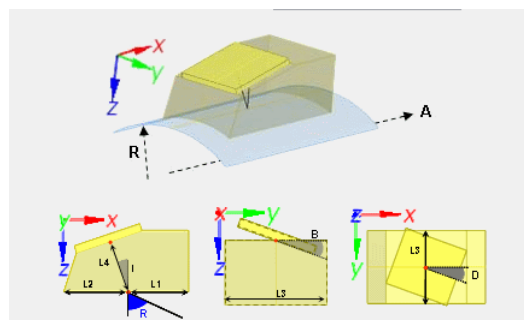
Figura 31. Geometria do chanfro utilizada lado B reto e lado A inclinado a 25°.



4.5 EQUIPAMENTO PHASED ARRAY, TRANSDUTOR e CODER

O equipamento de *phased array hardware Hard MultiX ++ e software Multi2000 v6.9.17-a* fabricado pela empresa M2M foram utilizados para aquisição e interpretação de dados na inspeção. As inspeções foram realizadas por um transdutor matricial de 1-D, frequência de 5 MHz e 16 elementos com largura de 0,41 mm, comprimento de 6,0 mm, espaçamento entre elementos de 0,09 mm e passo de 0,5 mm, resultando em uma abertura passiva de 6 mm e ativa de 8 mm. Acoplando em uma sapata de *pexiglass* com ângulo de incidência 36°, velocidade longitudinal da onda de 2337 m/s e dimensões da sapata de *pexiglass*: L1 de 9,85 mm, L2 de 13,55 mm, L4 de 12,9 mm. A figura 32 mostra as dimensões da sapata de *pexiglass*.

Figura 32. Ilustração do transdutor matricial 1-D e da sapata angular.



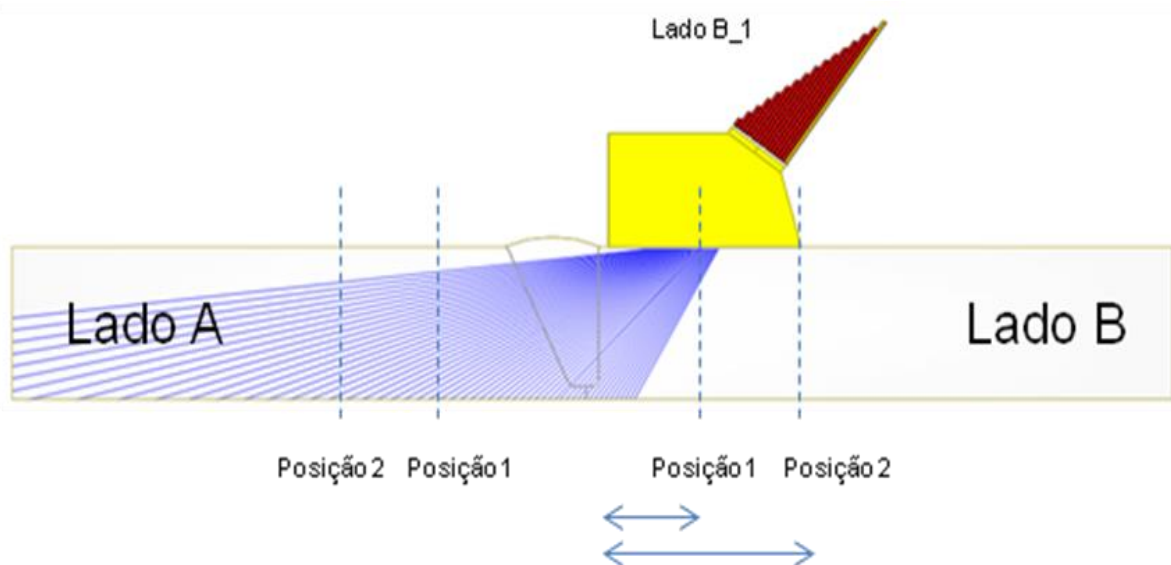
O deslocamento ao longo da circunferência do tubo foi registado por um codex com resolução de 12 steps/mm da fabricante Olympus, os parâmetros utilizados foram: velocidade de avanço de 10 mm/s e passo (captura de imagens) de 0,5 mm.

4.6 PARÂMETROS DE INSPEÇÃO E MODOS DE VARREDURA

Os parâmetros de inspeção usados nos corpos-de-prova padrão e escala real para identificação e dimensionamento dos defeitos foram varreduras setoriais de 30 a 85°, com 55 leis focais (conjunto de excitação dos elementos piezelétricos para formar uma frente de onda no ângulo desejado, 1° por lei focal), ganho de 75 dB, onda transversal de 3180 m/s com foco plano.

Foram realizados quatro modos de varredura compostas pelo lado do tubo e posição do transdutor. O tubo possui dois lados denominados como: lado A, lado do tubo que possui o chanfro de 25° e lado B, lado do tubo que possui o chanfro reto. O transdutor foi alocado em duas posições em cada lado da solda: posição 1 a frete do transdutor posicionado rente a solda e posição 2 com centro do transdutor afastado 25 mm do cordão de solda, as figura 33 mostra uma ilustração dos modos de varredura usados no trabalho.

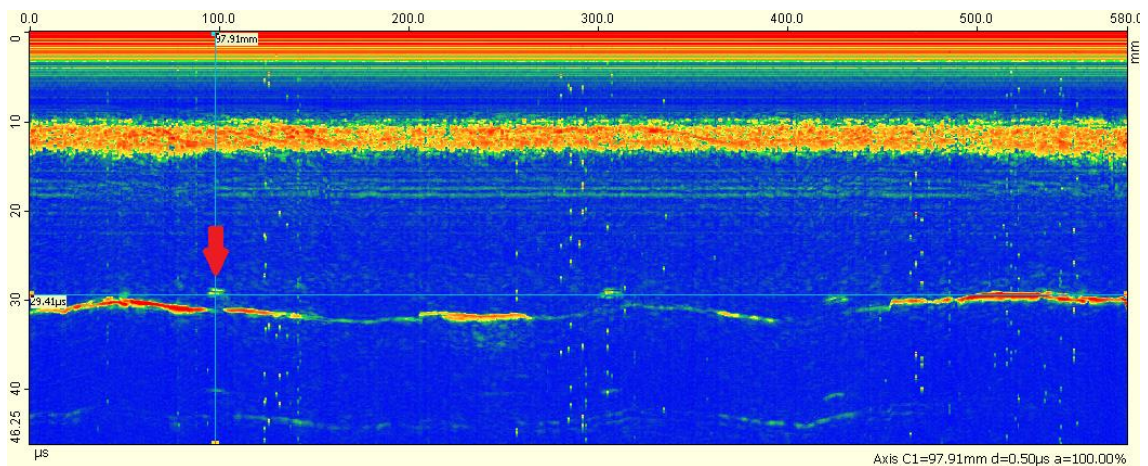
Figura 33. Ilustração dos modos de varreduras usados nas inspeções.



4.7 MÉTODO DE MEDIÇÃO DOS DEFEITOS

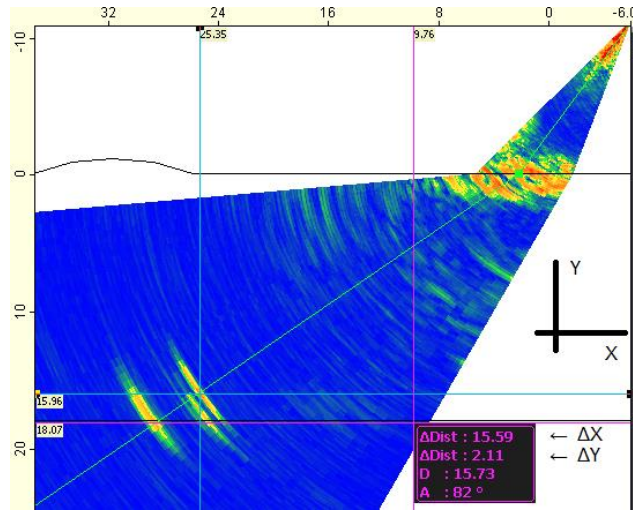
Com auxílio dos gráficos de A-scan, B-scan e S-scan a altura dos defeitos foram dimensionados pela diferença de altura dos sinais da difração do topo e base da trinca, esses pontos foram definidos pela diferença de altura dos centros de maior intensidade da base e da reflexão do topo. Primeiramente no padrão de visualização B-scan é encontrado a posição central do defeito (o ponto onde o sinal do defeito se apresenta mais alto em relação à base) a figura 34 mostra a posição do centro do defeito intencional interno de 2 mm ao longo da circunferência do tubo.

Figura 34. Centro do defeito intencional interno de 2mm pelo padrão de visualização B-scan.



Após definido a posição central do defeito no padrão de visualização B-scan com auxílio do padrão de visualização S-scan e A-scan são identificados os sinais da base e do topo da trinca e seus pontos de maior amplitude através do gráfico A-scan. A figura 35 mostra uma imagem do padrão de visualização S-scan com três sinais referentes a raiz da solda, base e topo do defeito intencional interno, onde são marcados no eixo Y os pontos de maior amplitude do sinal da base (pela linha roxa) e do topo (pela linha azul) do defeito, indicando uma variação no eixo Y (altura) de 2,11 mm na caixa preta.

Figura 35. Método de medição de altura dos defeitos com auxílio do software.



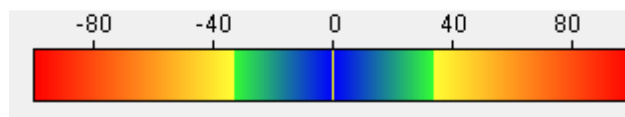
A escala de cores utilizada foi de: 0% a 33,3% de amplitude entre azul a verde e maior que 33,3% a 100% de amplitude do amarelo ao vermelho como mostra figura 36.

Figura 36. Escala de cor utilizada nas inspeções por phased array.

Escala de Cores

% min	% max	Color min	Smooth	Color max
0	33.3		<input checked="" type="checkbox"/>	
33.3	100		<input checked="" type="checkbox"/>	

Amplitude (%)



A largura dos defeitos foi definida através dos sinais obtidos pelo gráfico de B-scan S-scan e A-scan com auxílio das ferramentas do software da M2M. Ao identificar a região de propagação da trinca por fadiga no gráfico B-scan, com auxílio do gráfico S-scan foi definido o início e fim da base do defeito da seguinte forma: ao varrer a região da base da trinca gerada por fadiga, ao identificarmos um sinal ligeiramente acima da raiz como mostra a figura 37 foi definido o início e posteriormente o fim do

defeito por fadiga. A figura 38 mostra os pontos de início e fim no padrão de visualização B-scan já definidos e indica uma largura de 41,75 mm.

Figura 37. Sinal referente ao início da base do defeito gerado por fadiga pelo modo de varredura Lado B_2 no ciclo 808.254.

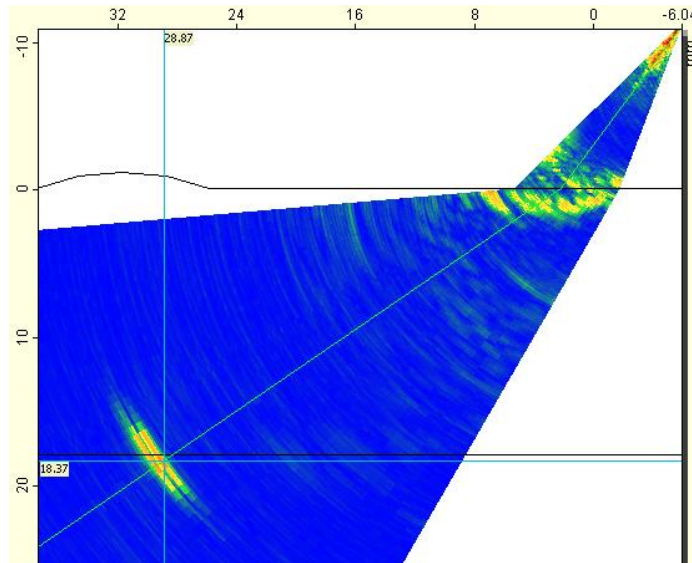
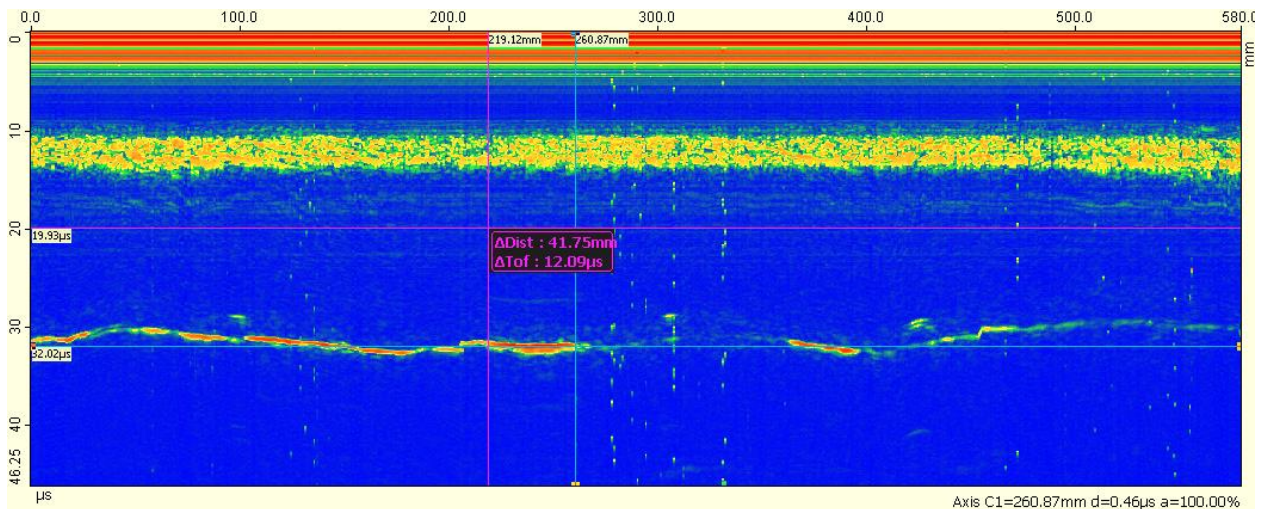


Figura 38. Método de medição da largura do defeito gerado por fadiga identificado pelo modo de varredura Lado B_2, ciclo 808.254 em 58° como mostra o padrão de visualização B-scan.

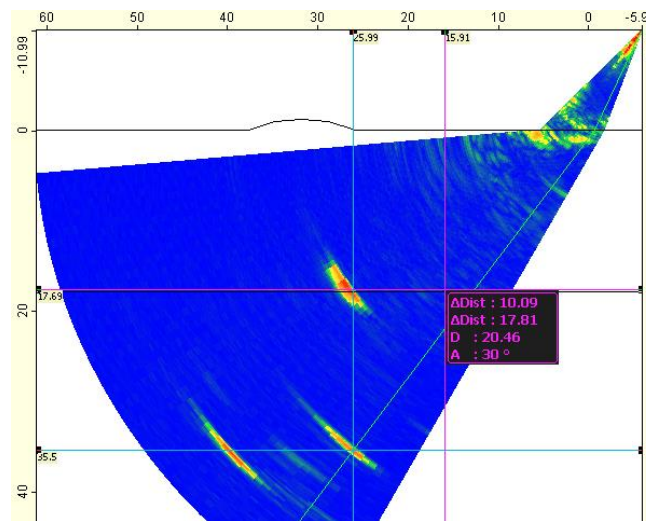


5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CORPO DE PROVA PADRÃO INTERNO

Inicialmente foram realizadas inspeções nos corpos de prova padrões com defeitos internos e externos. Os parâmetros de inspeção foram selecionados para que em uma varredura as principais áreas de interesse, regiões da solda (raiz e cordão) e defeitos intencionais fossem cobertos pelo feixe. Podemos verificar na figura 39 que a varredura Lado B_2 no corpo de prova padrão com defeitos internos conseguiu cobrir as regiões de interesse. Os sinais da região de interesse mostrados na figura 41 referentes ao cordão de solda apresentaram uma distância entre eles de 13,15 mm e ângulos com maior intensidade de 37° e 47° . O sinal próximo à raiz da solda apresentou intensidade maior do sinal em 54° e a distância entre os sinais do cordão e o sinal próximo a raiz foi de 1,06 mm.

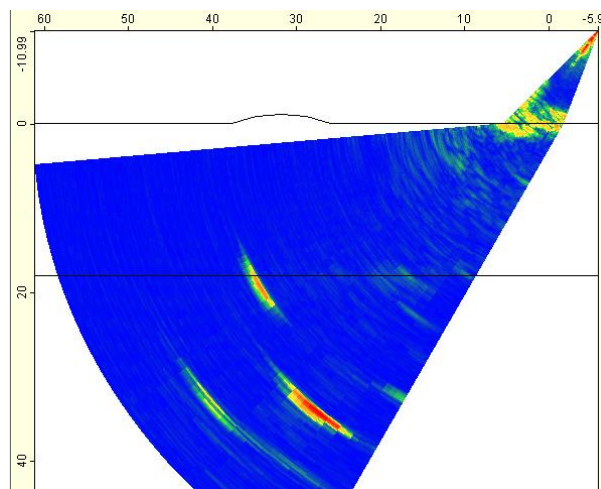
Figura 39. Os três sinais da região de interesse visualizada pelo lado B com o transdutor afastado.



Na varredura pelo Lado A_2 no corpo de prova padrão com defeitos internos as regiões de interesse foram cobertas, porém como podem ser visualizados na figura 40, os dois sinais obtidos por reflexão correspondentes ao cordão da solda em relação à posição do defeito intencional apresentam um deslocamento. Os sinais de maior

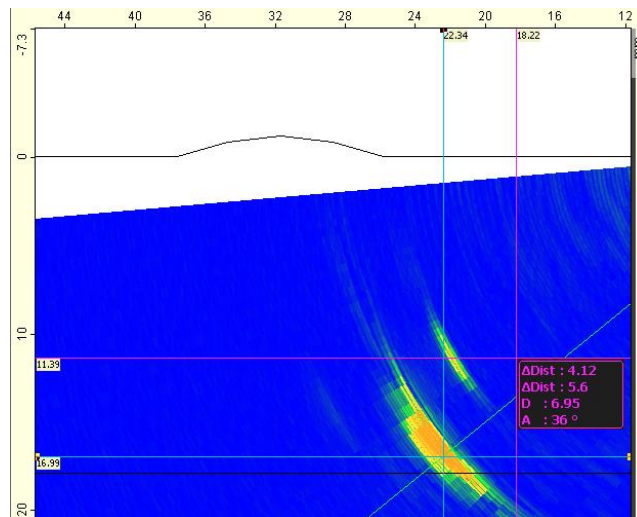
intensidade referente ao cordão exibiram distância entre eles de 12,08 mm e ângulos de 50° e 40°. A distância entre o sinal do cordão em relação ao sinal próximo a raiz foi de 6,27 mm. Pelos modos de varredura Lado A_1 e Lado B_1 foi identificado apenas dois dos três pontos de interesse, raiz e cordão de solda oposto a cada lado de inspeção.

Figura 40. Os três sinais da região de interesse visualizada pelo lado A com o transdutor afastado.



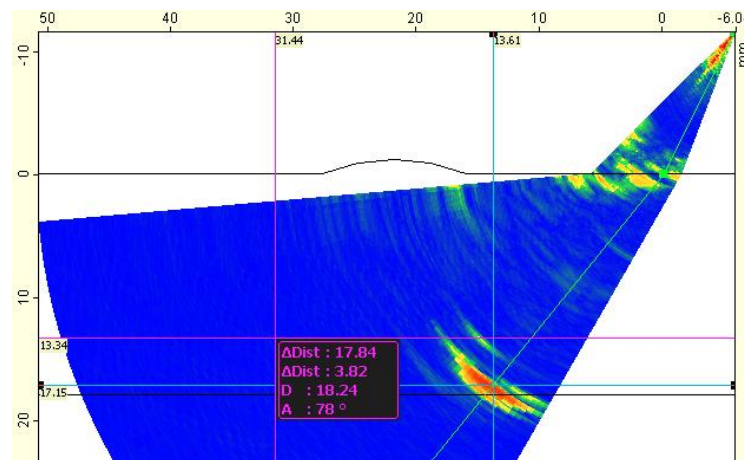
Avaliando os sinais do modo de varredura Lado B_2 do corpo de prova padrão de defeitos internos, os sinais de maior intensidade referentes às bases dos defeitos intencionais internos corresponde entre 54 a 56° e o ângulo do sinal da face inclinada foi diferente para cada defeito intencional interno, a figura 41 mostra a medição do defeito intencional interno de 6 mm.

Figura 41. Sinais referentes à base e a topo do defeito intencional interno de 6mm pelo modo de varredura lado B_2.



No modo de inspeção Lado B_1 dos defeitos internos os sinais de maior intensidade referentes à base dos defeitos intencionais internos variou entre 39 a 41°, a figura 42 mostra a medição do defeito intencional interno de 4mm.

Figura 42. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional interno de 4 mm pelo modo de inspeção lado B_1.



Os modos de inspeção para os defeitos intencionais internos de 6 e 12 mm pelo lado A_2 e Lado A_1 são apresentados nas figuras 43 e 44 respectivamente.

Figura 43. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional interno de 6mm pelo lado A_2.

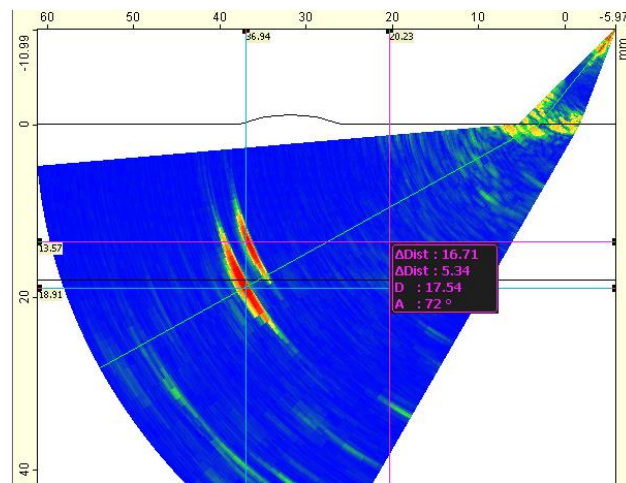
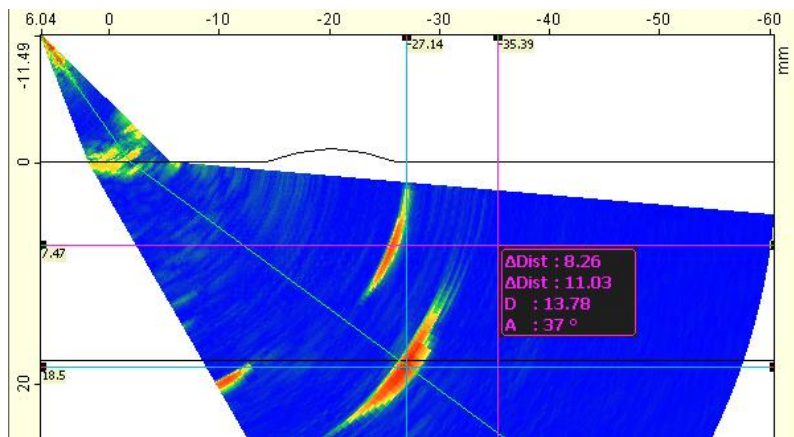


Figura 44. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional interno de 12 mm pelo lado A_1.



O ganho alto de 75 dB foi selecionado nas inspeções devido a grande atenuação do som nesse tipo de material e para que as difrações de incidência direta e as difrações provenientes da reflexão do feixe (para defeitos externos) fossem identificadas com maior facilidade. O sinal correspondente ao topo dos defeitos intencionais internos apresentaram elevada intensidade na ordem de 55 a 75 % e grande volume, pois a face inclinada dos defeitos possibilitou uma maior reflexão do feixe de inspeção, dificultando detectar a difração do cume do defeito.

As varreduras no corpo de prova padrão de defeitos internos com o transdutor afastado e junto ao cordão de solda pelo lado A apresentaram valores de medição próximos, a diferença entre as medições entre os defeitos de mesmo tamanho não foi maior que 0,20mm, como podem ser observados na tabela 7. Na tabela 7 também são apresentados os resultados de altura dos defeitos internos do corpo de prova padrão inspecionados pelo lado B com o transdutor afastado e rente ao cordão de solda (Lado B_2 e Lado B_1 respectivamente) comparando-os com as medidas reais, coletados pelo equipamento de eletroerosão. Os dois modos de inspeção também apresentaram valores de medição próximos entre eles na ordem de 0,25 mm de diferença. Todos os valores medidos apresentaram tamanho inferior ao tamanho real, fator que pode ser explicado pela dificuldade de identificar o cume do defeito pelo grande e intenso sinal da face inclinada do defeito intencional, além das limitações/resolução da técnica.

Tabela 7. Altura dos defeitos internos intencionais reais e medidas pela técnica de ultrassom.

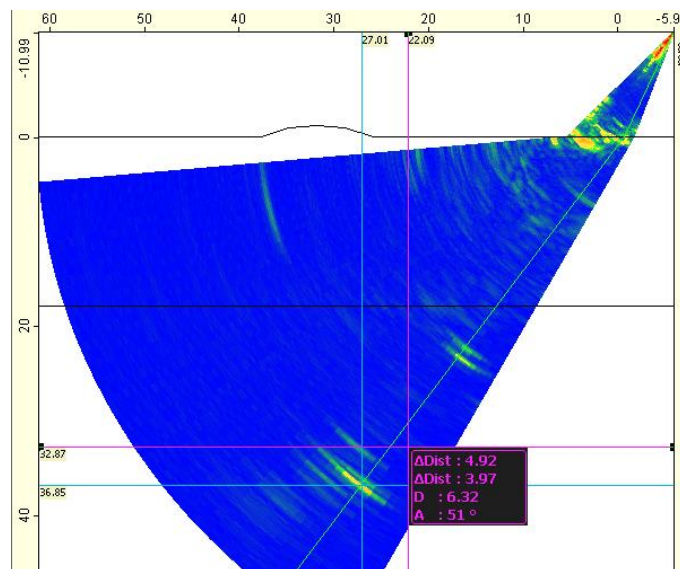
Corpo-de-prova padrão Interno						
Inspeção Lado A_1				Inspeção Lado A_2		
Altura (mm)			Altura (mm)			
	Real	Medido	Variação (%)	Real	Medido	Variação (%)
Defeito 2	2,00	2,10	5,00	2,00	1,92	-4,00
Defeito 4	4,00	3,46	-13,50	4,00	3,35	-16,25
Defeito 6	6,00	5,12	-14,67	6,00	5,34	-11,00
Defeito 9	9,00	8,10	-10,00	9,00	8,02	-10,89
Defeito 12	12,00	11,03	-8,08	12,00	11,18	-6,83
Inspeção Lado B_1				Inspeção Lado B_2		
Altura (mm)			Altura (mm)			
	Real	Medido	Variação (%)	Real	Medido	Variação (%)
Defeito 2	2,00	2,17	8,50	2,00	2,10	5,00
Defeito 4	4,00	3,82	-4,50	4,00	3,59	-10,25
Defeito 6	6,00	5,67	-5,50	6,00	5,60	-6,67
Defeito 9	9,00	8,60	-4,44	9,00	8,56	-4,89
Defeito 12	12,00	11,49	-4,25	12,00	11,40	-5,00

5.2 CORPO DE PROVA PADRÃO EXTERNO

O corpo de prova padrão com defeitos externos foi inspecionado da mesma forma que o corpo de prova anterior, ou seja, por ambos os lados e nas posições afastado e rente ao cordão de solda. Os defeitos externos foram detectados pela reflexão do feixe no fundo da peça e apresentaram menor intensidade de ambos os sinais (base e superfície inclinada) em relação aos sinais dos defeitos internos proveniente de incidência direta do feixe. Esse comportamento pode ser explicado devido à perda de energia do som pela reflexão dos sinais (emissão e reflexão).

A superfície inclinada apresentou intensidade de sinal menor na faixa de 60 a 75% para a base e de 30 a 40 % para difração da superfície inclinada, como pode ser observado no na figura 45 no S-scan do defeito externo de 4 mm pelo modo de varredura Lado B_2.

Figura 45. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional externo de 4 mm Lado_2.



As inspeções pelo modo de varredura Lado A_1 e Lado A_2 no corpo de prova do padrão externo apresentaram valores de medição com uma variação entre em relação aos valores reais na ordem de 1 a 20% para o defeito 12 mm e o restante não ordem de 5 a 10%, como pode ser observado na tabela 8.

Tabela 8. Altura dos defeitos externos intencionais reais e medidos pela técnica de ultrassom.

Corpo-de-prova Padrão Externo						
Inspeção Lado A_1				Inspeção Lado A_2		
Altura (mm)				Altura (mm)		
	Real	Medido	Variação (%)	Real	Medido	Variação (%)
Defeito 2	2,00	1,62	-19,00	2,00	1,99	-0,50
Defeito 4	4,00	3,79	-5,25	4,00	4,52	13,00
Defeito 6	6,00	6,20	3,33	6,00	6,26	4,33
Defeito 9	9,00	8,64	-4,00	9,00	9,18	2,00
Defeito 12	12,00	12,17	1,42	12,00	10,76	-10,33
Inspeção Lado B_1				Inspeção Lado B_2		
Altura (mm)				Altura (mm)		
	Real	Medido	Variação (%)	Real	Medido	Variação (%)
Defeito 2	2,00	-	-	2,00	1,92	-4,00
Defeito 4	4,00	-	-	4,00	3,97	-0,75
Defeito 6	6,00	-	-	6,00	5,47	-8,83
Defeito 9	9,00	-	-	9,00	8,87	-1,44
Defeito 12	12,00	-	-	12,00	12,44	3,67

Ambos os modos de inspeção Lado A_1 e Lado A_2 apresentaram difícil identificação do sinal da superfície inclinada dos defeitos intencionais externos devido à baixa intensidade. Para executar as medições foram adicionados após a inspeção, durante a tratativa dos dados, mais 10 dB para os modos de inspeção Lado A_1 e mais 15 dB para o modo de inspeção Lado A_2, para que os sinais dos defeitos intencionais da superfície inclinada fossem identificados e o centro dos mesmos fosse marcado para medição. O modo de inspeção Lado A_1 e Lado A_2 após a adição de ganho foi possível medir e identificar o sinal, no entanto o modo de inspeção Lado A_2 mesmo após a adição do ganho para ampliar os sinais pode induzir a um erro de medição, pois muitos ruídos foram amplificados e a identificação do mesmo comprometida, devido a intensidade desses sinais estarem na mesma faixa de intensidade dos ruídos. Como pode ser observado na figura 46 e 47 o aumento do ganho nos sinais pelos modos de

inspeção Lado A_1 e Lado A_2 para os defeitos intencionais externos possibilitou a medição.

Figura 46. Modo de varredura Lado A_1 para o defeito de 4 mm externo: A) sem aumento no ganho; B) aumento do ganho em 10 dB.

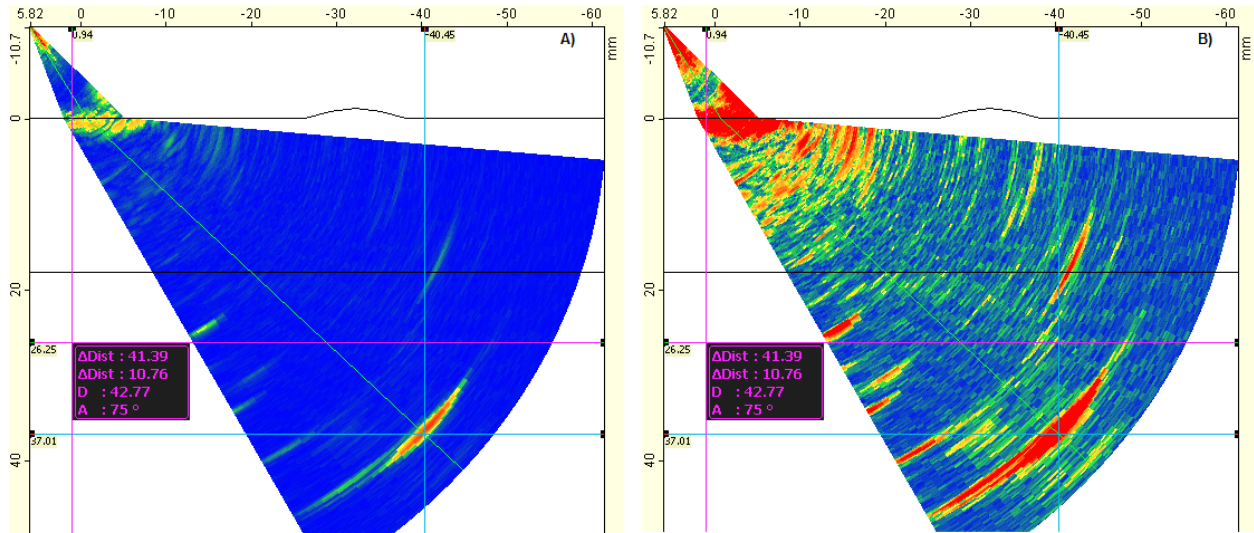
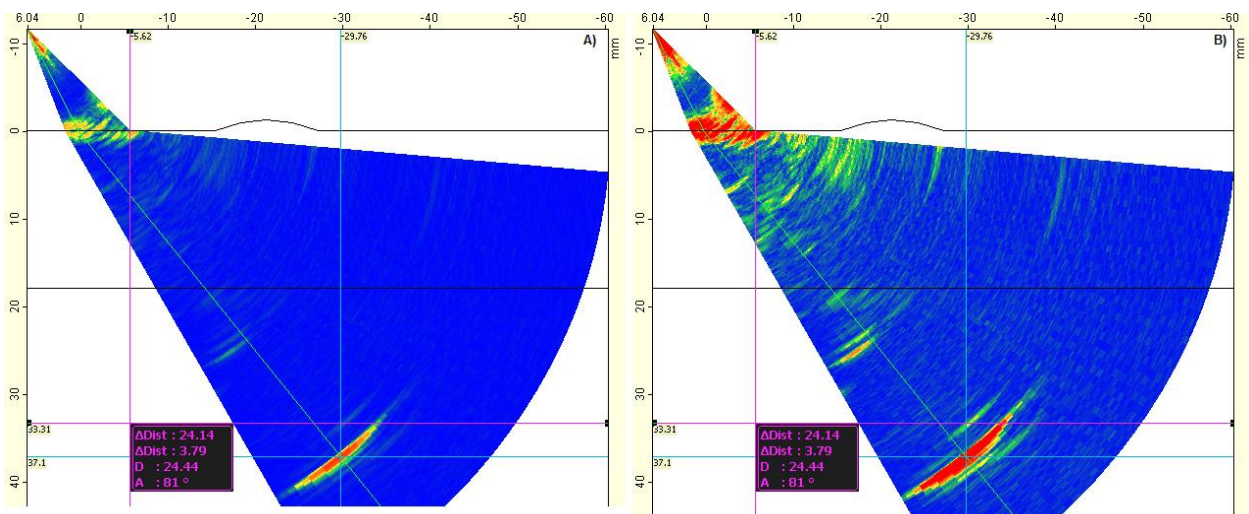


Figura 47. Modo de varredura Lado A_2 para o defeito de 12mm externo: A) sem aumento no ganho; B) aumento do ganho em 15dB.

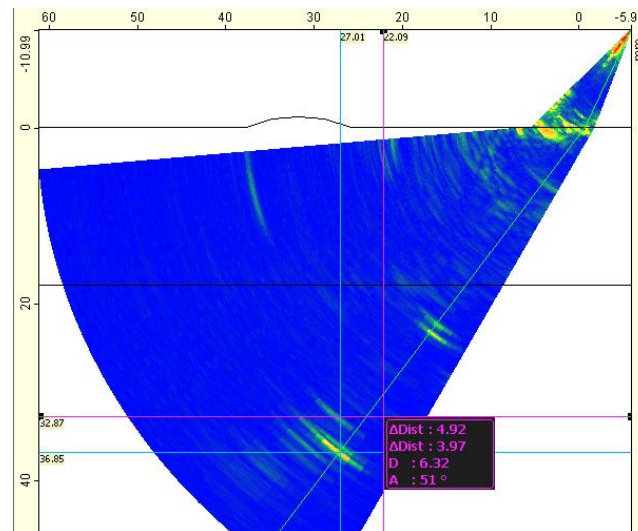


As varreduras realizadas pelo modo Lado B_1 não puderam ser dimensionadas, pois nessa configuração os defeitos intencionais externos não puderam ser cobertos

pelo feixe devido ao posicionamento do transdutor estar rente ao cordão de solda e os defeitos intencionais externos estarem logo abaixo do cordão.

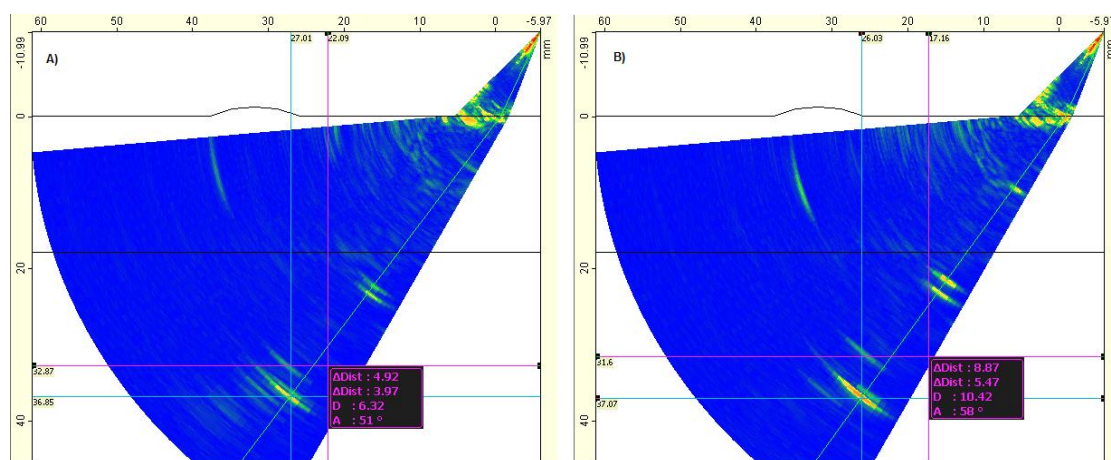
Os defeitos intencionais externos inspecionados pelo modo de varredura Lado B_2 apresentou posição dos sinais (base e superfície inclinada) mais coerente às esperadas no padrão, em relação aos sinais descritos no parágrafo anterior, identificados pelo modo de inspeção Lado B_1. Não foi necessário adicionar aumento de ganho para realizar as medições como mostra a figura 48, medição do defeito intencional externo de 4 mm pelo modo de varredura Lado B_2.

Figura 48. Sinais referentes à base e ao topo do defeito intencional externo de 4mm pelo modo de varredura Lado B_2.



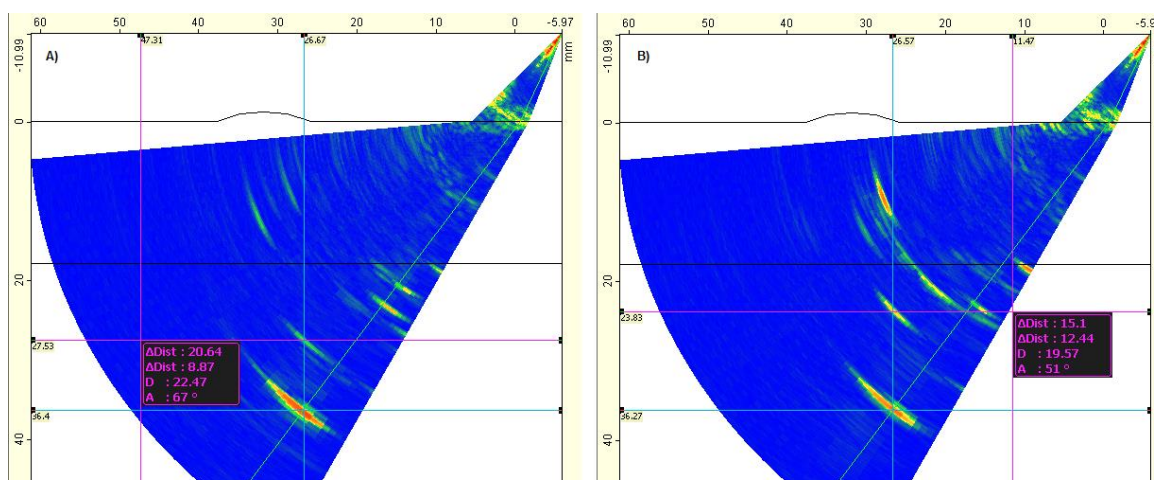
Os valores dos defeitos intencionais externo medidos para o modo de inspeção Lado B_2 apresentou valores próximos ao real, variação de 0,55 mm entre os mesmos, como pode ser observado na tabela 8. Os S-scans referentes ao modo de inspeção Lado B_2 apresentaram sinais próximos à região do defeito intencionais externos em ângulos altos entre 85 a 75°. O S-scans derivado do defeitos de 2 mm apresentou um sinal próximo a região do defeito externos, os S-scans dos defeitos de 4 e 6 mm apresentam configuração dos defeitos semelhantes, porem com intensidade e posições levemente diferentes como pode ser observado na figura 49.

Figura 49. Modo de varredura Lado B_2: A) S-scan defeito 4mm; B) S-scan defeito 6 mm



Os S-cans dos defeitos de 9 e 12 mm apresentaram configuração semelhante e uma pequena diferença na posição e intensidade dos sinais como pode ser observado na figura 50, os sinais de maior intensidade próximos a linha dos sinais refletidos (base e superfície inclinada) a aproximadamente 43° e 48° respectivamente são uma reflexão direta do feixe em relação a intersecção da face plana e inclinada dos defeitos.

Figura 50. Modo de varredura Lado B_2: A) S-scan defeito 9 mm; B) S-scan defeito 12 mm



Alguns sinais em ângulos baixos entre 30 a 35° são observados em todas as inspeções pelos modos de varredura Lado B_1 e Lado B_2. Esses sinais são prováveis

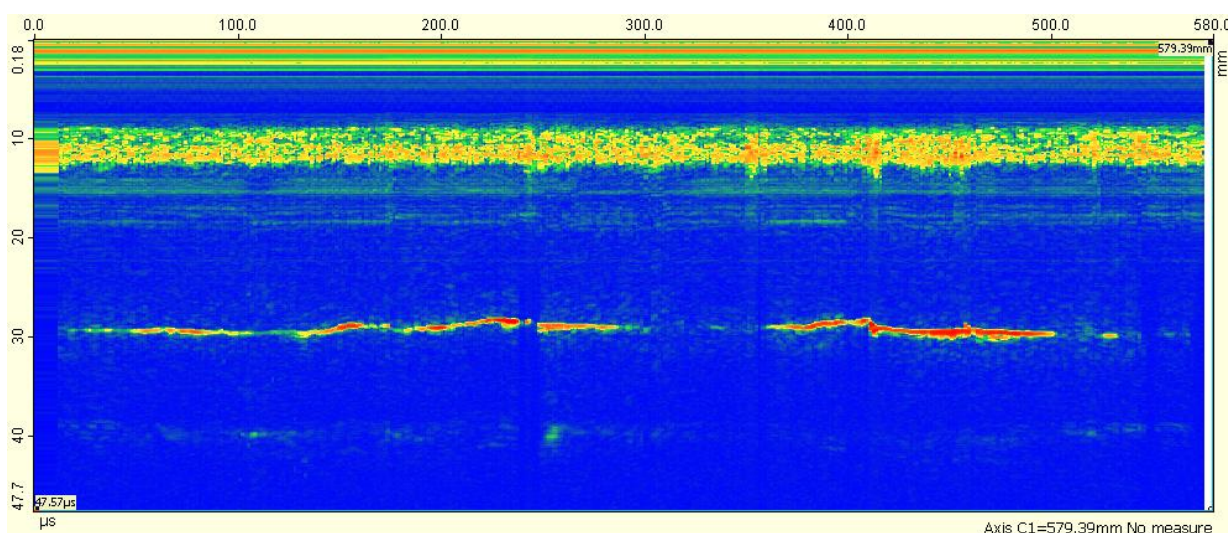
interferências de outra onda pelo fato dessa região estar próxima ao primeiro ângulo crítico próximo a 29° , esse limite inicial de inspeção foi mantido, pois uma pequena alteração na distância da posição do transdutor em relação ao cordão de solda alterava significativamente a intensidade dos sinais dos defeitos intencionais externos durante a inspeção do corpo de prova padrão em escala real.

5.3 CORPO DE PROVA EM ESCALA REAL

O ensaio de fadiga no corpo de prova em escala real foi realizado conforme parâmetros e número de ciclos descritos na tabela 1. Através dos resultados obtidos pelo estudo dos corpos de prova padrão, os modos de inspeção Lado A_2 e Lado B_2 foram selecionados para monitoramento inicial dos defeitos, durante a fase de nucleação da trinca. Antes de iniciar o ensaio em bancada foi realizada uma inspeção em zero ciclo pelo modo de inspeção Lado A_2 e Lado B_2. A inspeção pelo modo de varredura Lado A_2 apresentou maior atenuação dos sinais em relação ao modo de inspeção Lado B_2 pelo fato do feixe de ultrassom passar pela região da solda, sofrendo maior dispersão do feixe. Para os defeitos intencionais externos, os sinais da face inclinada apresentaram intensidade muito baixa na ordem de 10 %, ficando com valor semelhante de ruídos, sendo o modo de varredura Lado A_2 descartado para medição desses defeitos, mas sua execução mantida para os outros ciclos para auxiliar na interpretação dos sinais.

Os defeitos intencionais internos não puderam ser medidos com precisão pelo modo de varredura Lado A_2, pois o corpo de prova em escala real apresentou falta de penetração na raiz da solda em grande parte da circunferência do tubo, aproximadamente 60 % da circunferência foi comprometida, as posições dos defeitos intencionais internos coincidem com a região comprometida como pode ser visto na figura 51, padrão de visualização B-Scan a 45° com o feixe direcionada à solda. Pelo fato dos defeitos estarem atrás da solda posicionados no metal base no lado B, a base dos defeitos foi ofuscada pelo sinal da raiz.

Figura 51. Padrão de visualização B-scan a 45° do modo de varredura Lado A_2, mostra o sinal da falta de penetração da solda na raiz.



Apenas o modo de varredura Lado B_2 nos forneceu valores de medição da altura dos defeitos intencionais internos e externos como mostra tabela 9. Este modo de varredura foi selecionado como base de medição dos defeitos intencionais para os próximos ciclos, os outros modos de medição serão apresentados no trabalho em ciclos futuros auxiliando na medição e compreensão dos defeitos.

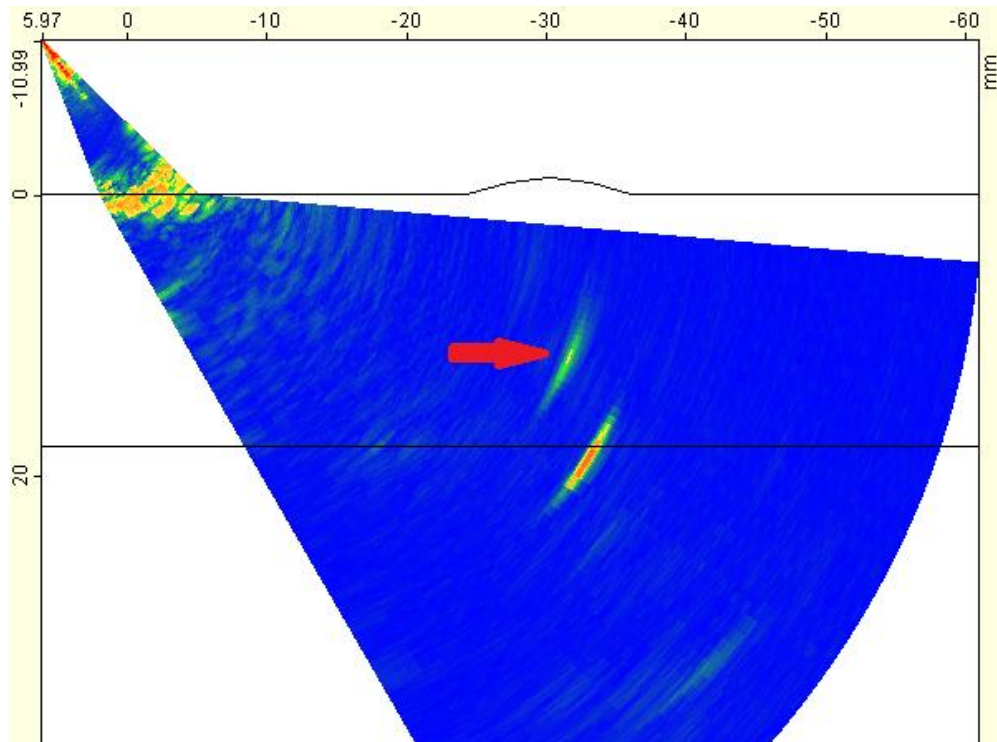
Tabela 9. Altura dos defeitos intencionais iniciais (zero ciclo) reais e medidos pelo modo de varredura Lado B_2.

ZERO ciclo				
Modo de inspeção Lado B_2				
Defeito	Horas	Real (mm)	Medido(mm)	Varição (%)
Externo	11:30	4,00	3,75	-6,25
Externo	03:00	2,00	1,92	-4,00
Externo	07:30	3,00	3,10	3,33
Interno	01:30	2,00	1,60	-20,00
Interno	06:30	2,00	2,15	7,50
Interno	09:30	2,00	1,90	-5,00

Podemos observar que os valores de altura medidos para os defeitos externos pelo modo de varredura Lado B_2 foram próximos aos reais, da ordem de 10% de variação em relação aos reais. Os valores medidos dos defeitos de 2 mm e 4 mm a partir do corpo de prova em escala real (1,92 e 3,75 mm) quando comparados com os defeitos de mesma ordem do corpo de prova padrão (1,92 e 3,97 mm) apresentaram pequena diferença na ordem de 0,25 mm.

Em zero ciclos foram identificados três sinais referentes a defeitos não intencionais em duas regiões da circunferência do tubo: um sinal próximo ao centro da solda às 4:00 a aproximadamente 65 mm do defeito das 3:00 externo, identificado pelo modo de varredura Lado A_2, provável vazio ou falta de fusão, apresentado nas figura 52 pela seta vermelha.

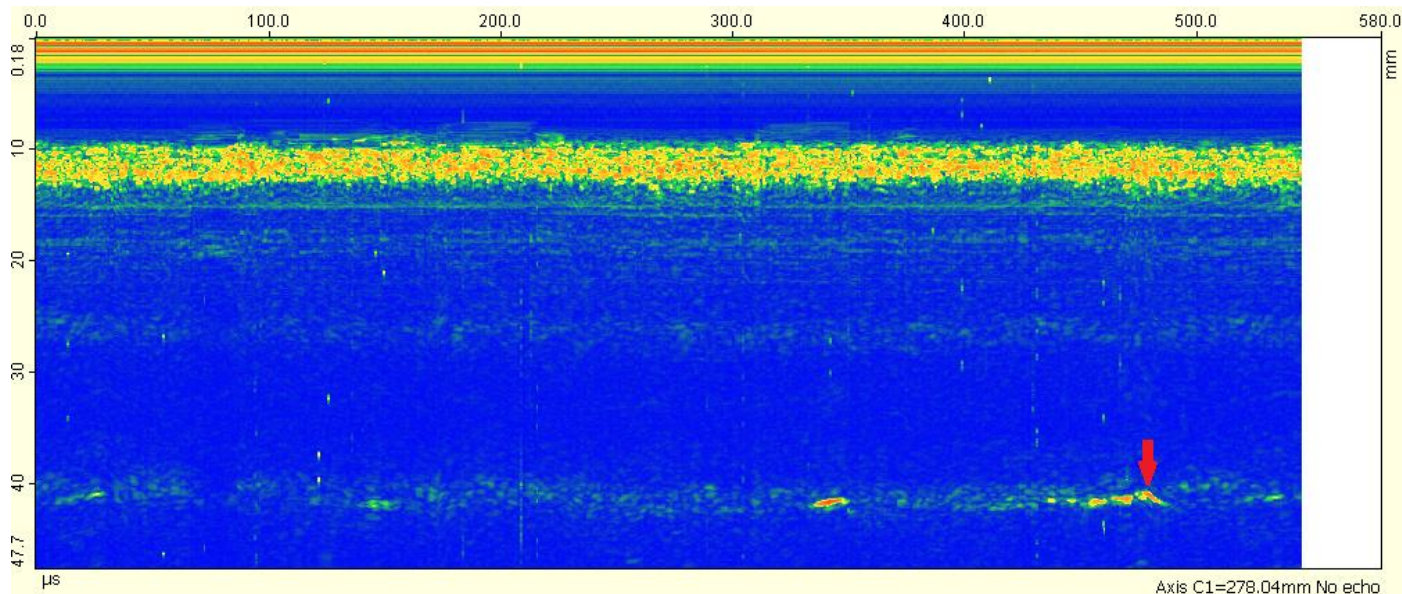
Figura 52. Defeito não intencionais provável vazio às 4:00 horas pelo padrão de visualização Lado A_2.



Os outros dois sinais foram identificados próximos ao defeito das 11:30 respectivamente 12 mm e 25 mm de distância na região do cordão, identificados pelo

modo de varredura Lado A_2, como mostra figura 53, a seta vermelha indica a posição do defeito intencional externo e os sinais ao lado os defeito no cordão.

Figura 53. Defeitos não intencionais dois defeitos no cordão de solda a 25 e 12 mm de distância do defeito das 11:30, ambos identificados pelo modo de varredura Lado A_2.



A primeira configuração de parâmetros de ensaio em fadiga, denominada configuração 1 descrita na tabela 1 (frequência 0,2 Hz, F_{\max} 1.500 kN e F_{\min} 750 kN) resultou em 337.541 ciclos. Foram realizadas 8 inspeções dentro dessa faixa de ciclos pelos modos e varredura Lado A_2 e Lado B_2. As inspeções nessa configuração de parâmetros não foram identificadas alterações significativas na altura dos defeitos intencionais, alguns valores medidos apresentam resultados menores que medições anteriores, pois estão relacionados a incerteza da técnica, como mostra tabela 10.

Tabela 10. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre zero a 337.541 ciclos.

Inspeção Lado B_2										
Altura										
			12222 ciclos		39172 ciclos		66895 ciclos		96042 ciclos	
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Medido (mm)	Variação (%)	Medido (mm)	Variação (%)	Medido (mm)	Variação (%)	Medido (mm)	Variação (%)
Externo	11:30	4,00	3,76	-6,08	3,88	-2,92	3,97	-0,83	4,09	2,25
Externo	03:00	2,00	1,95	-2,67	1,99	-0,50	1,89	-5,50	1,90	-5,17
Externo	07:30	3,00	3,16	5,33	3,18	5,89	3,20	6,78	3,16	5,22
Interno	01:30	2,00	1,87	-6,67	2,06	3,00	1,94	-2,83	2,06	3,00
Interno	06:30	2,00	1,88	-6,17	1,97	-1,50	2,10	4,83	2,18	8,83
Interno	09:30	2,00	1,82	-9,00	2,02	1,00	2,07	3,33	2,00	0,00
			133063ciclos		179463ciclos		238776 ciclos		319959 ciclos	
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Medido (mm)	Variação (%)	Medido (mm)	Variação (%)	Medido (mm)	Variação (%)	Medido (mm)	Variação (%)
Externo	11:30	4,00	4,12	2,92	3,89	-2,75	4,13	3,33	4,10	2,42
Externo	03:00	2,00	1,99	-0,33	1,78	-11,00	1,89	-5,50	1,86	-6,83
Externo	07:30	3,00	3,13	4,44	3,09	3,11	3,15	4,89	3,19	6,33
Interno	01:30	2,00	1,94	-3,00	2,14	7,17	1,89	-5,50	1,73	-13,67
Interno	06:30	2,00	2,15	7,33	2,29	14,67	1,88	-6,00	2,13	6,33
Interno	09:30	2,00	2,10	5,17	1,89	-5,50	1,94	-2,83	1,89	-5,33

Nas regiões próximas às 3:00 horas (pequeno vazio) e às 11:30 (dois sinais no cordão) não apresentaram alteração em seus padrões de visualização, identificados pelo modo de varredura Lado A_2, durante os ciclos da configuração 1. Um novo sinal foi identificado pelo modo de varredura Lado B_2 às 5:00 horas a uma distância de 85mm do defeito intencional externo das 3:00 horas, dois sinais levemente sobrepostos inicialmente observados em 39.173 ciclos como pode ser visualizado na figura 54. Esse defeito pode ser medido no ciclo 319.959 como mostra a figura 55.

Figura 54. Novo defeito encontrado próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 39.173.

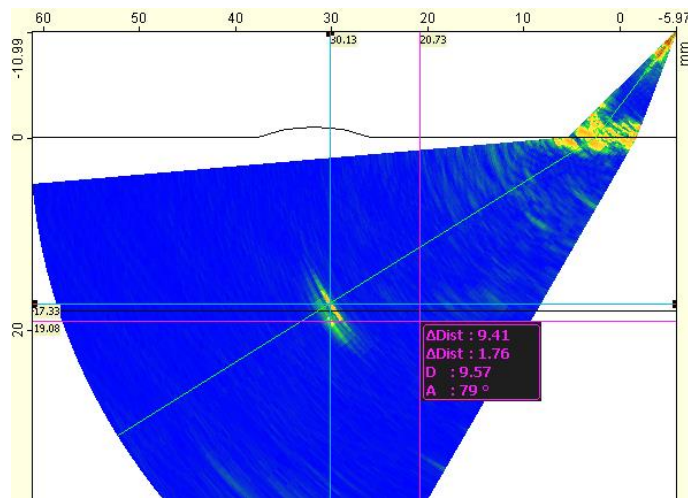
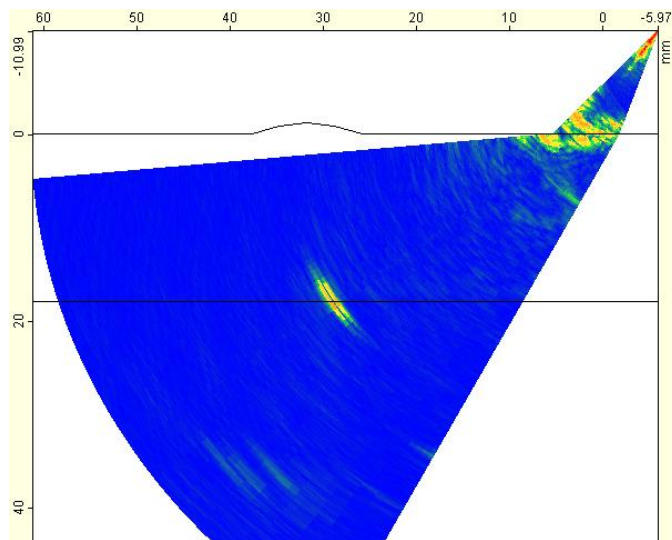


Figura 55. Novo defeito encontrado próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 319.959.



A segunda configuração de parâmetros denominada configuração 2 (frequência 0,2 Hz, F_{\max} 1.500 kN e F_{\min} 375 kN) iniciou no ciclo 337.541 e finalizou no ciclo 661.001 totalizando 323.470 ciclos nesta configuração. Foram realizadas 6 inspeções dentro dessa faixa de ciclos pelos modos e varredura Lado A_2 e Lado B_2. A tabela 11 mostra os valores medidos dos defeitos intencionais internos e externos pelo modo

de varredura Lado B_2, podemos observar que não houve crescimento significativo nos valores de altura medidos, mas apresentaram pequena diferença em relação aos defeitos medidos na configuração 1.

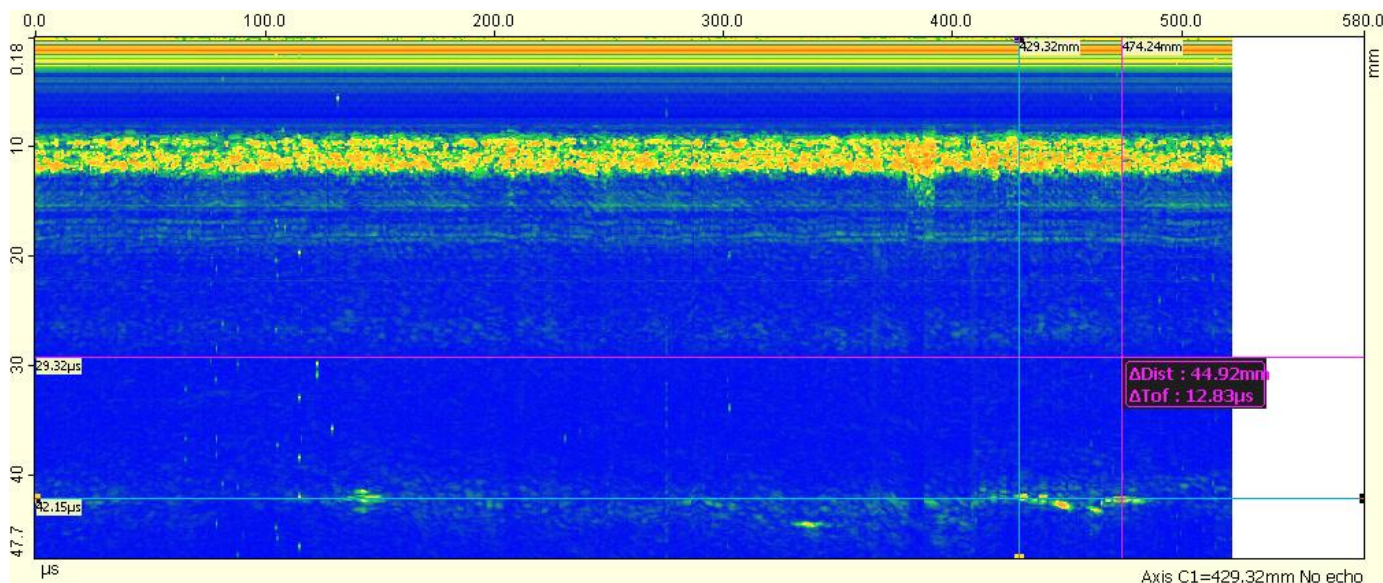
Tabela 11. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre 351.529 a 661.001 ciclos.

Inspeção Lado B_2								
Altura								
			351529 ciclos		405238 ciclos		462175 ciclos	
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)
Externo	11:30	4,00	4,11	2,67	4,24	6,08	4,15	3,67
Externo	03:00	2,00	1,79	-10,50	2,23	11,33	1,91	-4,50
Externo	07:30	3,00	3,38	12,56	3,22	7,22	3,22	7,22
Interno	01:30	2,00	1,89	-5,50	2,13	6,50	1,85	-7,50
Interno	06:30	2,00	2,31	15,33	2,09	4,33	2,14	7,00
Interno	09:30	2,00	1,87	-6,33	2,17	8,33	1,90	-5,00
			515765 ciclos		597104 ciclos		661001 ciclos	
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)
Externo	11:30	4,00	4,11	2,83	4,15	3,75	4,20	5,08
Externo	03:00	2,00	1,97	-1,50	1,89	-5,33	1,92	-4,00
Externo	07:30	3,00	3,20	6,67	3,20	6,67	3,17	5,67
Interno	01:30	2,00	2,00	0,00	1,92	-4,17	2,01	0,50
Interno	06:30	2,00	2,19	9,33	2,08	3,83	2,23	11,67
Interno	09:30	2,00	1,78	-10,83	2,12	6,17	1,80	-9,83

Na inspeção do ciclo 462.175 pelo modo de varredura lado A_2 foi constatado um novo sinal no cordão de solda no lado A a 44,92 mm de distância do defeito intencional externo das 11:30 horas próximos dos dois sinais no cordão de solda, constatados nas inspeções anteriores, a figura 56 mostra esse novo sinal pelo modo de varredura Lado A_2 padrão de visualização B-scan com o feixe focado na raiz da solda a 45°. A inspeção pelo modo de varredura lado B_2 próximo às 5:00 podemos

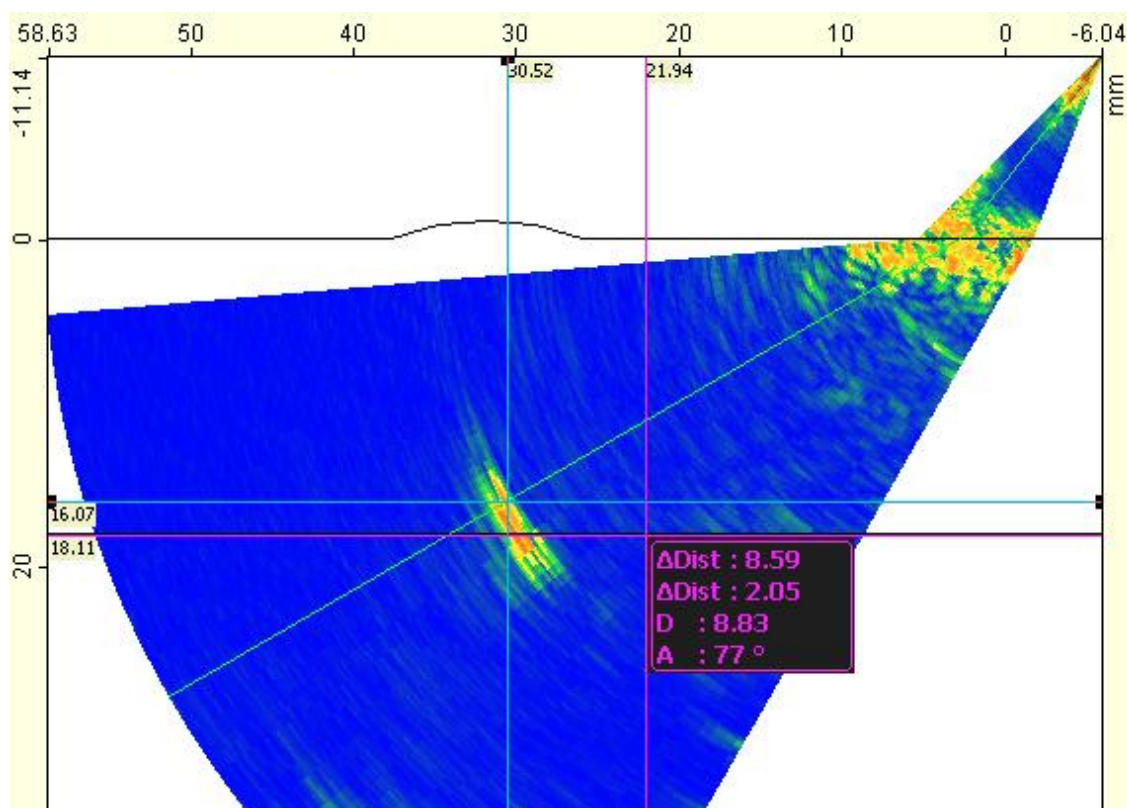
identificar uma região com comprimento de 23mm composta por sinais sobrepostos e levemente separados, provável frente de propagação da trinca por fadiga em formação.

Figura 56. Novo sinal no cordão de solda lado A a 45 mm do defeito externo das 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2, padrão de visualização B-scan a 45° em 462.175 ciclos.



A inspeções no ciclo 661.001 pelo modo de varredura lado B_2 próximo às 5:00 horas (aproximadamente entre 85 mm de distância do defeito das 3:00 horas e 70 mm do defeito das 6:00) apresentou um sinal com altura de 2,05mm, mais pronunciada que os demais sinais referentes a região de 24 mm de comprimento descrita no parágrafo anterior, como pode ser mostrado na figura 57. Os demais defeitos não intencionais (vazio no centro da solda próximo as 4:00 horas e os 3 defeitos no cordão de solda no lado A às 11:30 horas) não apresentaram evolução significativa.

Figura 57. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 661.001 ciclos.



A terceira configuração de parâmetros denominada configuração 3 (frequência 0,2 Hz, F_{\max} 2.000 kN e F_{\min} 800 kN) iniciou no ciclo 661.001 e finalizou no ciclo 76.3254 totalizando 102.253 ciclos nesta configuração. Foram realizadas 5 inspeções dentro dessa faixa de ciclos pelos modos e varredura Lado A_2 e Lado B_2. A tabela 12 mostra os valores medidos dos defeitos intencionais internos e externos pelo modo de varredura Lado B_2, podemos observar que não houve crescimento significativo nos valores de altura medidos em relação aos defeitos medidos na configuração 2.

Tabela 12. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre 704.554 a 763.254 ciclos.

Inspeção Lado B_2								
Altura								
			704554 ciclos		721624 ciclos		743304 ciclos	
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)
Externo	11:30	4,00	4,25	6,25	4,15	3,75	4,24	6,00
Externo	03:00	2,00	1,98	-1,17	1,89	-5,33	1,89	-5,50
Externo	07:30	3,00	3,27	8,89	3,17	5,56	3,24	8,11
Interno	01:30	2,00	2,12	6,17	2,06	3,00	2,03	1,33
Interno	06:30	2,00	2,32	15,83	2,13	6,67	2,18	8,83
Interno	09:30	2,00	2,11	5,67	1,98	-1,17	2,04	2,17
			758254 ciclos		763254 ciclos			
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)		
Externo	11:30	4,00	4,00	0,00	4,07	1,67		
Externo	03:00	2,00	1,91	-4,67	1,95	-2,33		
Externo	07:30	3,00	3,20	6,56	3,21	7,11		
Interno	01:30	2,00	1,95	-2,33	2,18	9,00		
Interno	06:30	2,00	2,27	13,67	2,34	16,83		
Interno	09:30	2,00	2,02	1,00	2,13	6,50		

Na região das 5:00 horas (aproximadamente entre 85mm de distância do defeito das 3:00 horas e 70 mm do defeito das 6:00) foi identificado no ciclo 661.001 um sinal referente a frente de propagação da trinca em fadiga, essa região foi monitorada medindo a altura e largura da frente de propagação da trinca pelos modos de varredura Lado A_2 e Lado B_2 até a ruptura, constatada visualmente no ciclo 863.165. Os valores medidos de altura e largura desse defeito dentro dos ciclos da configuração de parâmetros e seu início no ciclo 661.001 (ciclo da configuração 3) estão apresentados na tabela 13.

Tabela 13. Altura e largura do defeito por fadiga na região da falha, medidos pelo modo de varredura Lado A_2 e Lado B_2 entre 661001 a 763254 ciclos.

		Inspeção Lado A_2		Inspeção Lado B_2	
		Altura	Largura	Altura	Largura
Ciclos (número)	Posição (horas)	Medido (mm)	Medido (mm)	Medido (mm)	Medido (mm)
661.001	5:00	2.27	24.54	2.05	24.08
704.554	5:00	3.29	25.82	3.63	27.16
721.624	5:00	4.40	27.85	4.30	28.24
743.304	5:00	4.90	32.93	4.70	30.72
758.254	5:00	5.96	37.08	6.15	37.57
763.254	5:00	6.45	37.52	5.97	37.81

Como mostra tabela 13 durante os ciclos da configuração 3 houve um avanço significativo da frente de propagação da trinca em fadiga dentro dos 102.253 ciclos, o topo da frente de propagação do defeito (localizada na região das 5:00 descrita no parágrafo anterior) partiu de aproximadamente 2,05 mm para 5,97 mm e sua largura de 24,08 mm para 37,81 mm, valores identificados pela inspeção do modo de varredura Lado B_2 , nas figuras 58 a 61 são apresentados alguns padrões de visualização B-scan e S-scan de inspeções durante esses ciclos que evidenciam o crescimento da frente de propagação do defeito por fadiga.

Figura 58. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 721.624 ciclos: A) sem aumento no ganho B) aumento em 5dB no ganho.

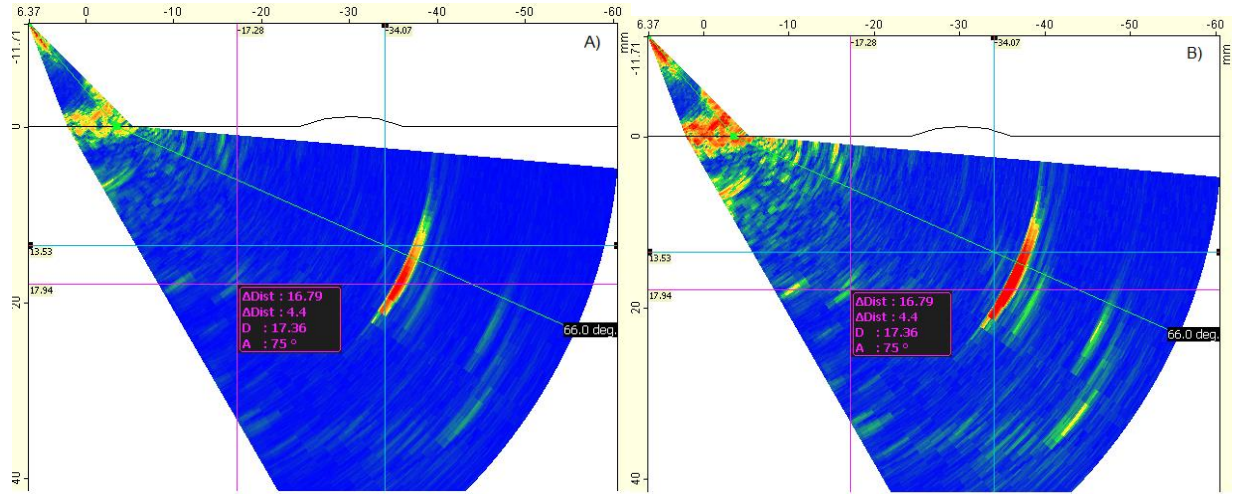


Figura 59. Largura da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 721.624 ciclos.

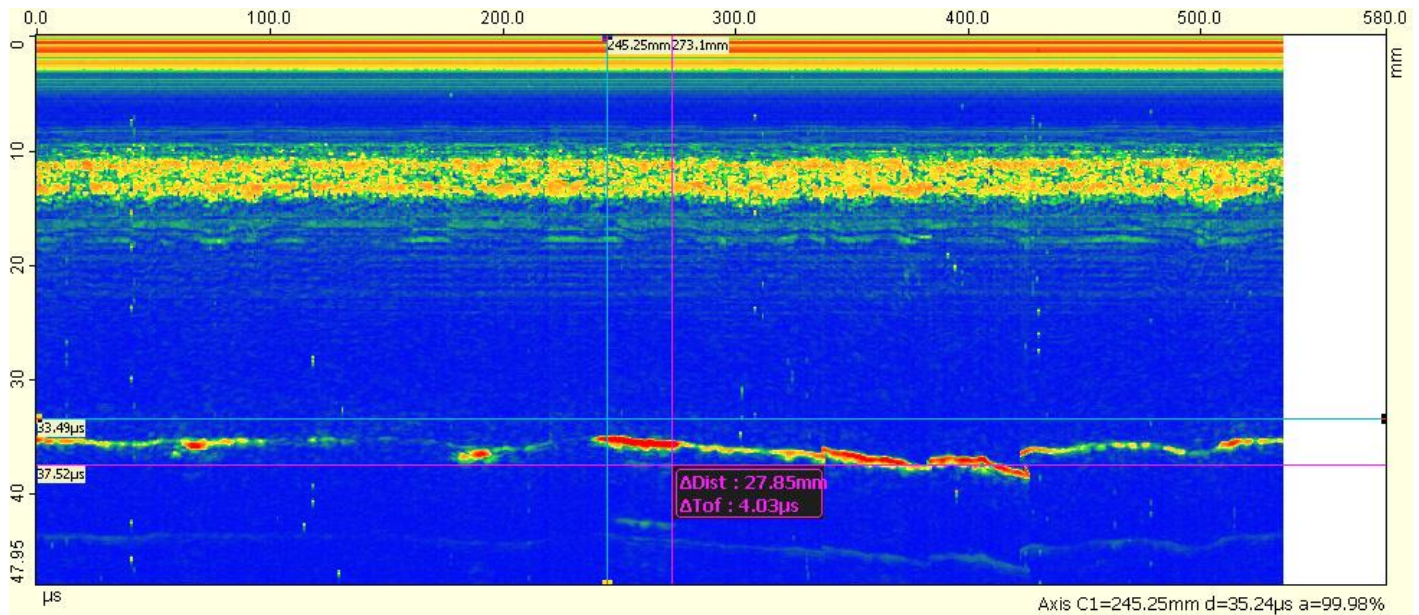


Figura 60. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 763.254 ciclos: A) sem aumento no ganho B) aumento em 10 dB no ganho.

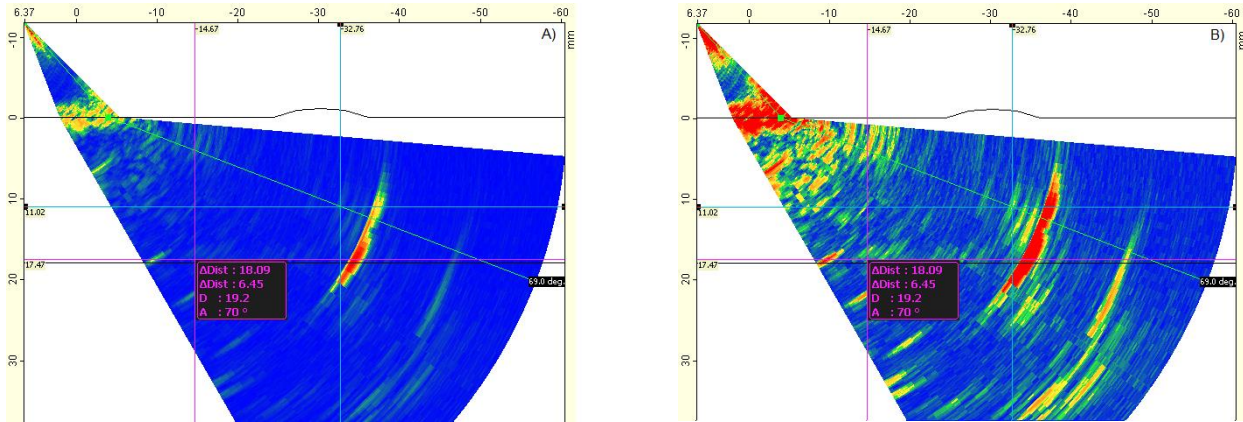
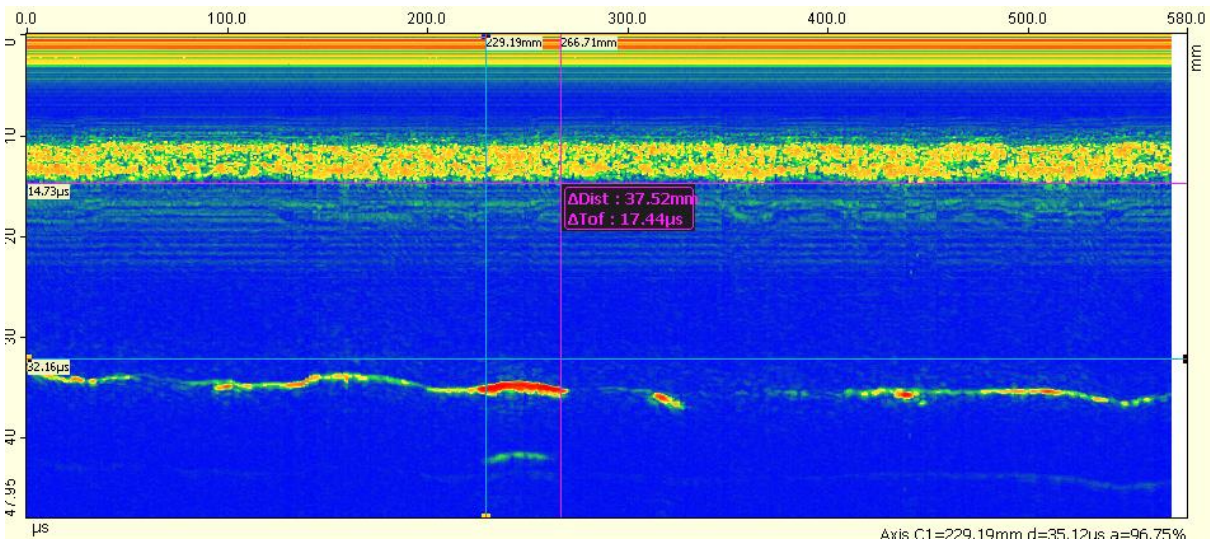


Figura 61. Largura da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 763.254 ciclos pelo padrão de visualização B-scan a 60°.



Os demais defeitos não intencionais (vazio no centro da solda próximo as 4:00 horas e os 3 defeitos no cordão de solda no lado A às 11:30 horas) apresentaram

pequena evolução dentro dos ciclos da configuração 3. Os 3 defeitos no cordão da solda próximos ao efeito das 11:30 horas puderam ser mais visíveis pelo aumento da intensidade do sinal. O defeito do vazio próximo às 4:00 horas no ciclo 763.254 ficou próximo de ser englobado pela frente de propagação do defeito em fadiga como pode ser observado na figura 62 e 63 nos padrões de visualização B-scan em 70° e 60°.

Figura 62. Vazio próximo da frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 4:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 no ciclo 763.254, B-scan 70°.

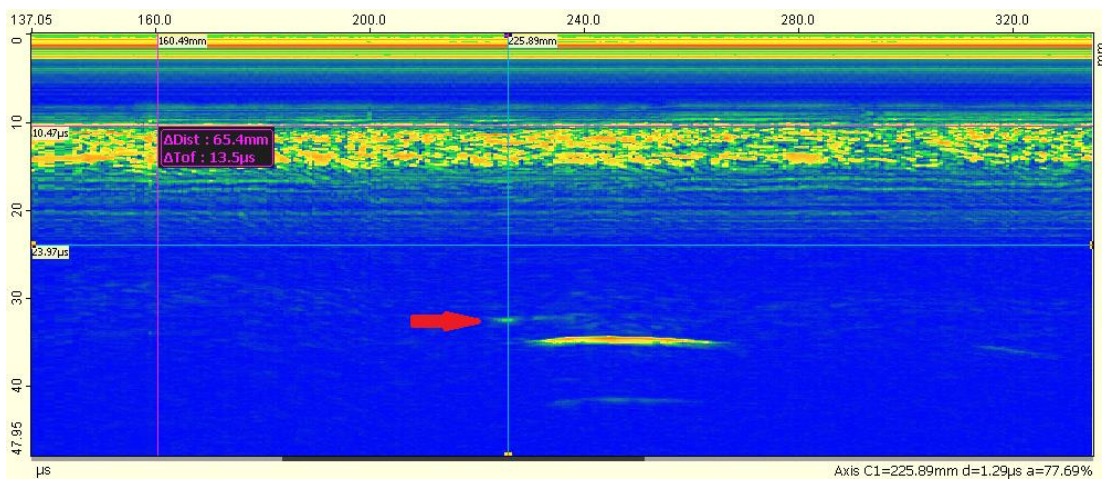
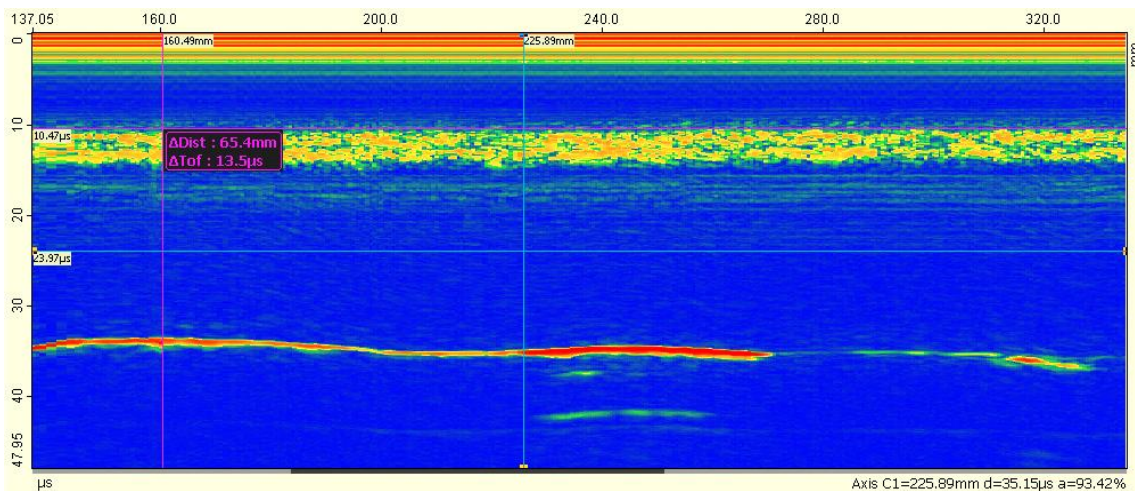


Figura 63. Vazio próximo da frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 4:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 no ciclo 763.254, padrão de visualização B-scan a 60°.



A quarta configuração de parâmetros denominada configuração 4 (frequência 0,2 Hz, F_{\max} 2000 kN e F_{\min} 1000 kN) iniciou no ciclo 763.254 e finalizou no ciclo 808.254 totalizando 45.000 ciclos nesta configuração. Foram realizadas 6 inspeções dentro dessa faixa de ciclos pelos modos e varredura Lado A_2 e Lado B_2. A tabela 14 mostra os valores medidos dos defeitos intencionais internos e externos pelo modo de varredura Lado B_2. Podemos observar na tabela 14 altura medida dos defeitos intencionais pelo modo de varredura Lado B_2 que não houve crescimento significativo nos valores de altura medidos em relação aos defeitos intencionais medidos na configuração 3.

Tabela 14. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre 763.254 a 808.254 ciclos.

Inspeção Lado B_2								
Altura								
			768254 ciclos		778254 ciclos		783254 ciclos	
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)
Externo	11:30	4,00	4,11	2,75	3,95	-1,25	4,18	4,42
Externo	03:00	2,00	1,89	-5,50	1,91	-4,33	1,92	-4,17
Externo	07:30	3,00	3,24	7,89	3,05	1,78	3,22	7,33
Interno	01:30	2,00	2,07	3,33	1,97	-1,33	2,00	-0,18
Interno	06:30	2,00	2,28	14,17	2,18	8,83	2,15	7,50
Interno	09:30	2,00	1,88	-5,83	2,08	4,17	1,94	-3,00
			788254 ciclos		798254 ciclos		808254 ciclos	
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)
Externo	11:30	4,00	4,16	4,08	3,94	-1,58	4,04	1,00
Externo	03:00	2,00	1,96	-2,00	1,95	-2,67	1,88	-6,00
Externo	07:30	3,00	3,27	8,89	3,37	12,33	3,27	9,00
Interno	01:30	2,00	1,94	-3,17	2,07	3,67	1,99	-0,67
Interno	06:30	2,00	2,00	-0,17	2,21	10,33	2,19	9,67
Interno	09:30	2,00	1,97	-1,50	1,90	-5,17	1,94	-2,83

O defeito gerado por fadiga durante os ciclos da configuração 4 continuou crescendo, mas com menor intensidade. A altura da frente de propagação do defeito gerado por fadiga próximo às 5:00 horas apresentou um pequeno aumento em sua frente de propagação na ordem de 1,0 mm em 45.000 ciclos e largura dessa frente manteve-se praticamente constante como pode ser observado na tabela 15. Os padrões de visualização S-scan nas figuras 64 a 66.

Tabela 15. Altura e largura do defeito por fadiga na região da falha, medidos pelo modo de varredura Lado A_2 e Lado B_2 entre 768.254 a 808.254 ciclos.

		Inspeção Lado A_2		Inspeção Lado B_2	
		Altura	Largura	Altura	Largura
Ciclos (número)	Posição (horas)	Medido (mm)	Medido (mm)	Medido (mm)	Medido (mm)
768.254	5:00	6.51	41.02	6.74	36.41
778.254	5:00	6.94	42.22	6.92	38.31
788.254	5:00	7.03	42.65	6.91	39.23
798.254	5:00	7.08	43.05	6.97	40.81
808.254	5:00	7.84	39.87	8.13	41,75

Figura 64. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 768.254 ciclos: A) sem aumento no ganho B) aumento de 10 dB no ganho.

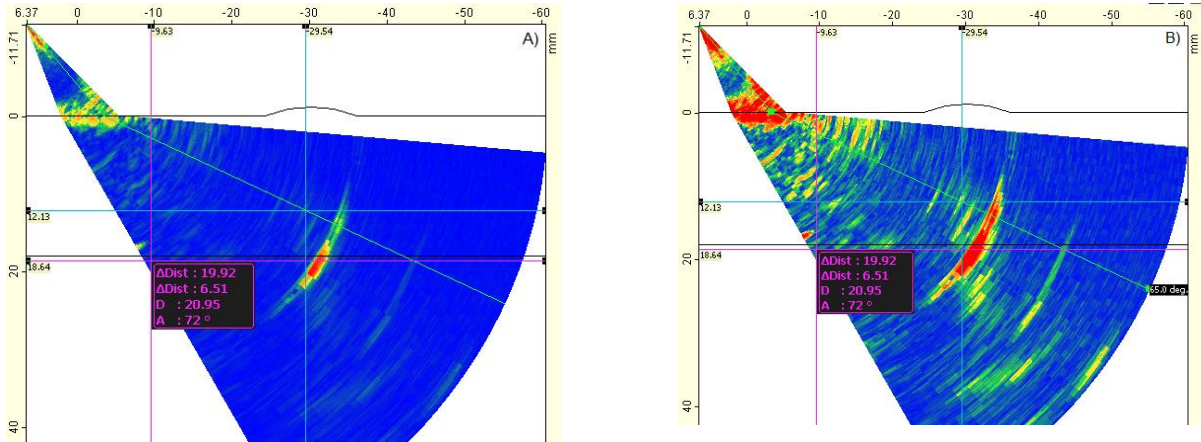


Figura 65. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 808254 ciclos: A) sem aumento no ganho B) aumento de 5 dB no ganho.

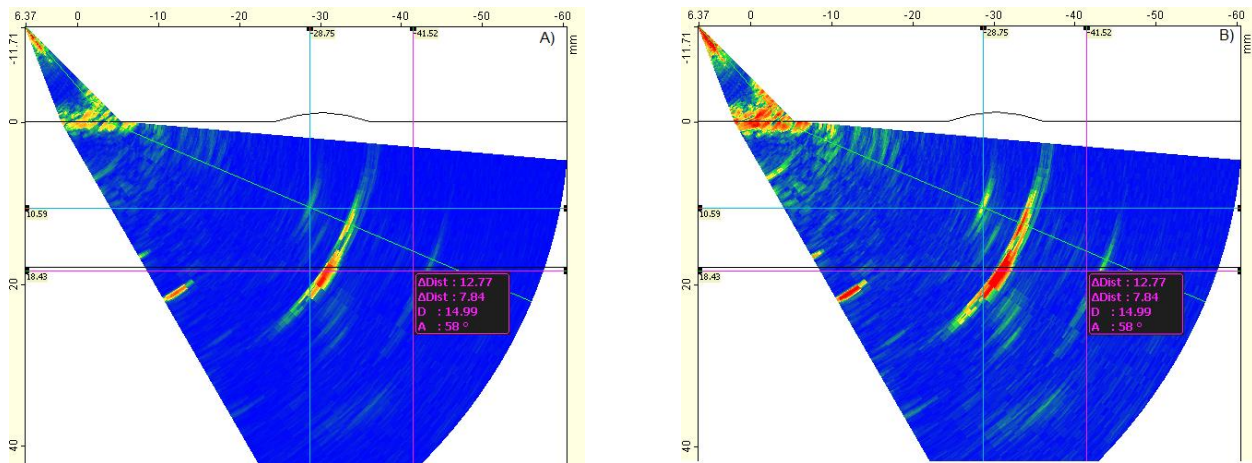
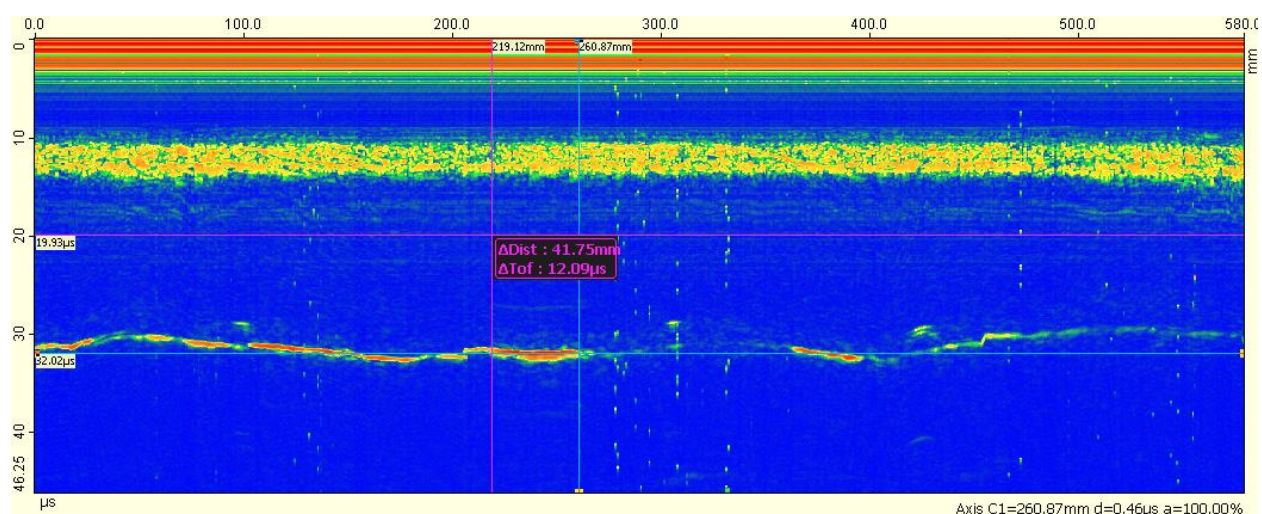


Figura 66. Largura da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 808.254 ciclos.



A quinta configuração de parâmetros denominada configuração 5 (frequência 0,2 Hz, F_{\max} 2.000kN e F_{\min} 800 kN) iniciou no ciclo 808.254 e finalizou no ciclo 873.253 totalizando 64.999 ciclos nesta configuração. Foram realizadas 7 inspeções dentro dessa faixa de ciclos pelos modos e varredura Lado A_2 e Lado B_2; e 3 inspeções entre os ciclos 833.254 a 850.500 (nos ciclos 833.254, 843.254 e 850.500) pelo modo de varredura Lado A_1 e Lado B_1.

Os defeito intencionais internos de 2,0 mm e os externos de 2,0 mm e 3,0 mm não apresentaram um aumento significativo dentro dos ciclos dos parâmetros de configuração 5 como pode ser observado na tabela 16, já o defeito intencional de 4,0 mm apresentou um aumento nesse conjunto de ciclos.

Tabela 16. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado B_2 entre 813.254 a 850.500 ciclos.

Inspeção Lado B_2								
Altura								
			813254 ciclos		823254 ciclos		833254 ciclos	
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)
Externo	11:30	4,00	3,98	-0,50	-	-	-	-
Externo	03:00	2,00	1,94	-3,17	1,91	-4,67	1,95	-2,67
Externo	07:30	3,00	3,22	7,44	3,18	5,89	2,99	-0,22
Interno	01:30	2,00	1,99	-0,67	1,99	-0,50	1,89	-5,33
Interno	06:30	2,00	2,23	11,67	2,36	18,17	2,30	15,00
Interno	09:30	2,00	2,01	0,50	1,89	-5,67	1,89	-5,50
			843254 ciclos		850500 ciclos			
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Média (mm)	Variação (%)	Média (mm)	Variação (%)		
Externo	11:30	4,00	-	-	-	-		
Externo	03:00	2,00	1,87	-6,33	1,91	-4,50		
Externo	07:30	3,00	3,11	3,67	3,35	11,67		
Interno	01:30	2,00	2,05	2,33	2,03	1,50		
Interno	06:30	2,00	2,05	2,50	2,22	11,00		
Interno	09:30	2,00	2,13	6,50	1,98	-1,17		

No ciclo 823.254 o sinal da reflexão da face inclinada do defeito intencional externo de 4,0 mm, às 11:30 horas, não pode ser identificado da mesma forma que a outra inspeção (por reflexão do feixe de ultrassom) pelo modo de varredura Lado B_2, pois o defeito apresentou aumento de seu tamanho.

Um novo sinal próximo à superfície surgiu no ciclo 823.254, semelhante aos sinais detectados por incidência direta no corpo de prova padrão referente aos defeitos intencionais externos maiores que 4,0 mm (exemplo defeito de 12,0 mm figura 52) este sinal continuou crescendo com aumento dos ciclos até 18,29 mm no ciclo 873.165

como pode ser observado pelo padrão de visualização S-scan na figura 71 A) pelo modo de varredura Lado A_2 e na figura 70 A) pelo modo de varredura Lado B_2.

As inspeções realizadas pelo modo de varredura Lado B_2 a partir do ciclo 843.254 apresentaram muitos sinais dificultando a interpretação, como pode ser observado na figura 67 pelo padrão de visualização S-scan. As inspeções realizadas pelo modo de varredura Lado A_2 não apresentaram os sinais de interferência encontrados pelo modo de varredura lado B_2, podendo interpretar e identificar o crescimento da trinca com maior facilidade como pode ser observado nas figuras 69 a 71 pelo padrão de visualização S-scan e na tabela 17 a evolução do crescimento do defeito.

Tabela 17. Altura dos defeitos intencionais medidos pelo modo de varredura Lado A_2 a partir da incidência direta do feixe entre 823.254 a 873.165 ciclos.

			Inspeção Lado A_2					
			Altura					
			823.254	833.254	843.254	850.500	863.165	873.165
			ciclos	ciclos	ciclos	ciclos	ciclos	ciclos
Defeito	Posição (horas)	Real (mm)	Média (mm)	Média (mm)	Média (mm)	Média (mm)	Média (mm)	Média (mm)
Externo	11:30	4.00	4.51	8.27	10.48	12.76	16.80	18.29

Figura 67. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em: A) 843.254 e B) 850.500.

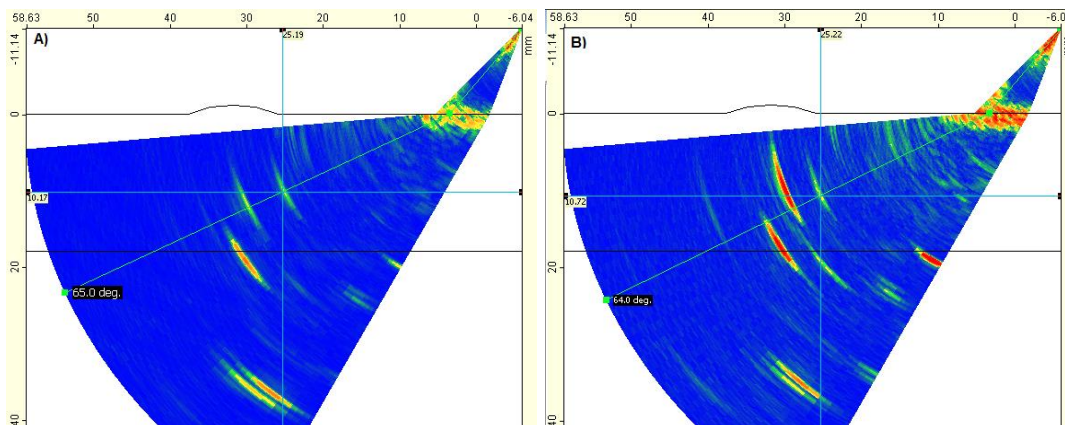


Figura 68. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em: A) 823.254 e B) 833.254.

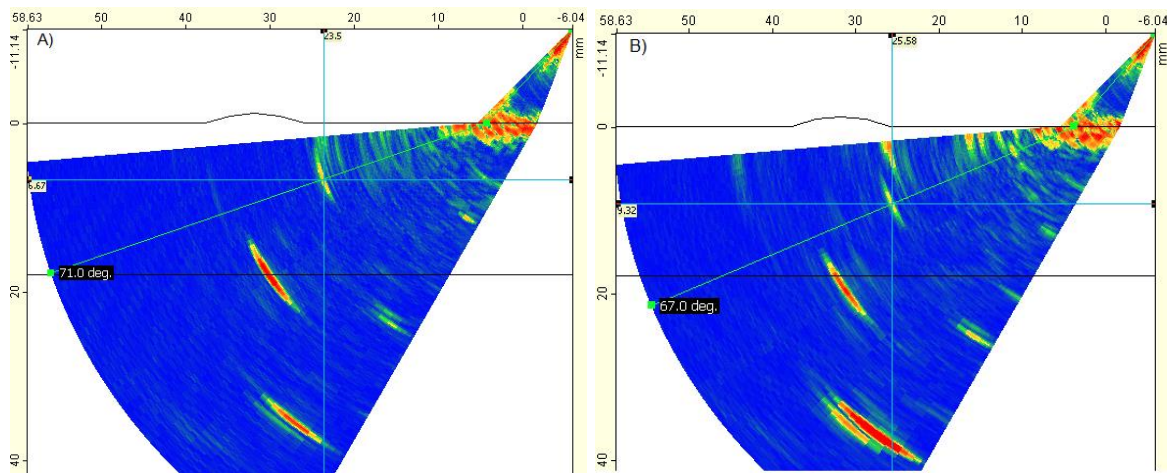


Figura 69. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em: A) 823.254 e B) 833.254.

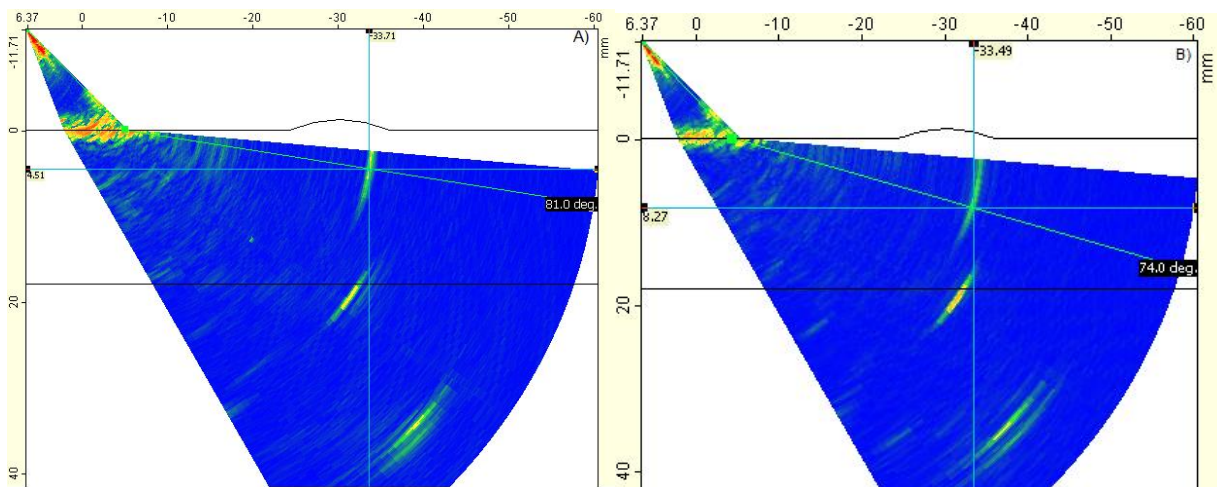


Figura 70. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em: A) 843.254 e B) 850.500.

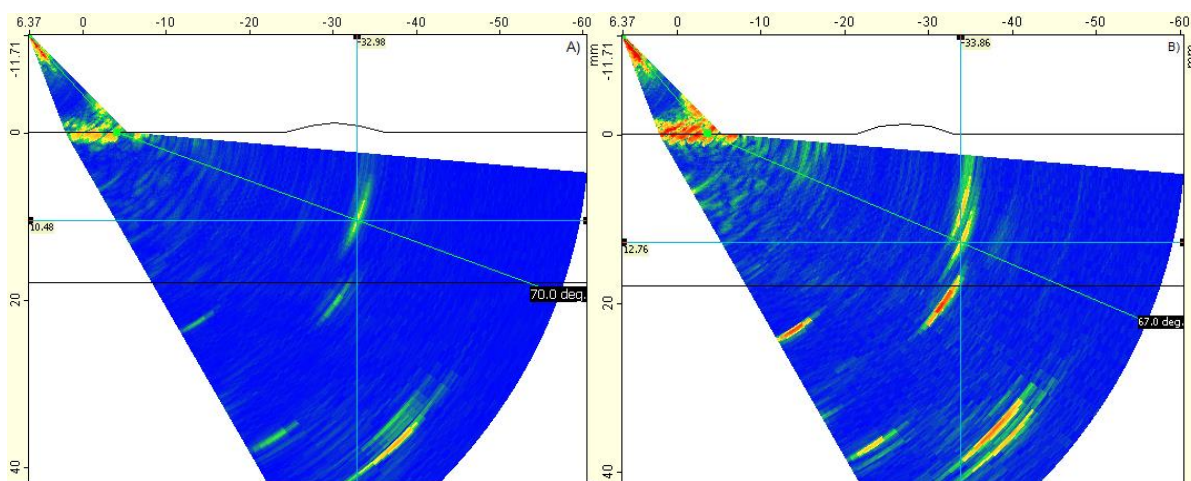
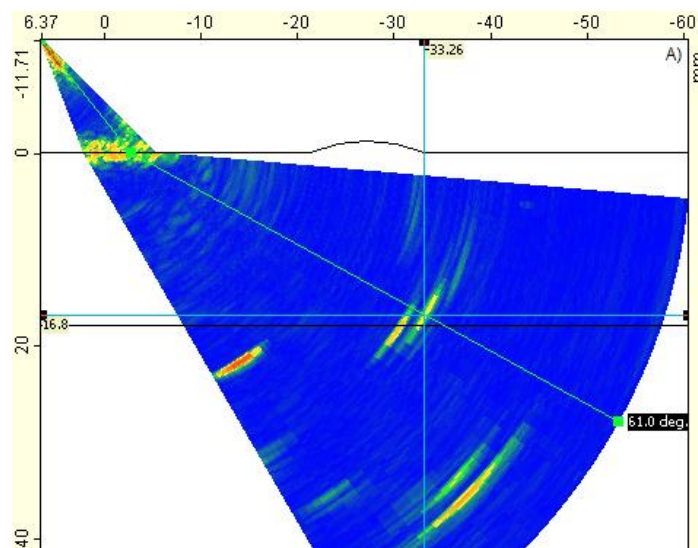
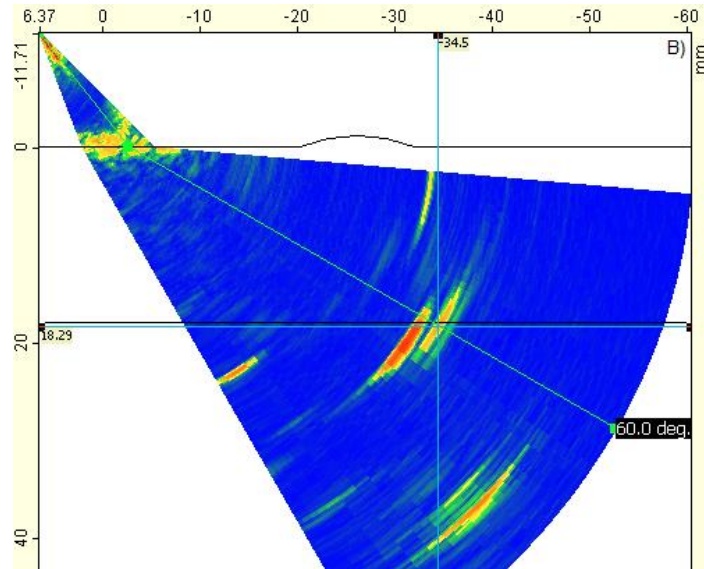


Figura 71. Defeito intencional as 11:30 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em: A) 863.165 e B) 873.165 adicionado 5dB.





O frente de propagação do defeito gerado por fadiga próximo as 5:00 horas durante os ciclos da configuração 5 apresentaram um aumento abrupto e significativo de sua frente de propagação, inicialmente detectada uma altura de aproximadamente 8,00 mm no ciclo 813.254 e finalizando com aproximadamente 17,00 mm no ciclo 850.500 como pode ser observado nas figuras 72, 73, 74, 75 a 76 pelo padrão de visualização S-scan. A largura da frente da base do defeito gerado por fadiga demonstrou um crescimento expressivo partindo de aproximadamente 45,0 mm e dobrando sua largura para aproximadamente 95mm no ciclo 850.500 como mostram as figuras 75 e 78 pelo padrão de visualização B-scan.

Tabela 18. Altura e largura do defeito por fadiga na região da falha, medidos pelo modo de varredura Lado A_2 e Lado B_2 entre 813.254 a 863.165 ciclos.

Ciclos (número)	Posição (horas)	Inspeção Lado A_2		Inspeção Lado B_2	
		Medido (mm)	Medido (mm)	Medido (mm)	Medido (mm)
813.254	5:00	8.40	45.46	8.44	43.50
823.254	5:00	10.41	51.88	10.73	51.50
833.254	5:00	12.88	59.04	12.71	58.67
843.254	5:00	13.89	70.65	13.54	71.09
850.500	5:00	17.09	84.69	18.30	86.74
863.165	5:00	18.79	96.21	19.09	96.94

Figura 72. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 823.254 ciclos A) sem aumento de ganho B) adicionado 10 dB no ganho.

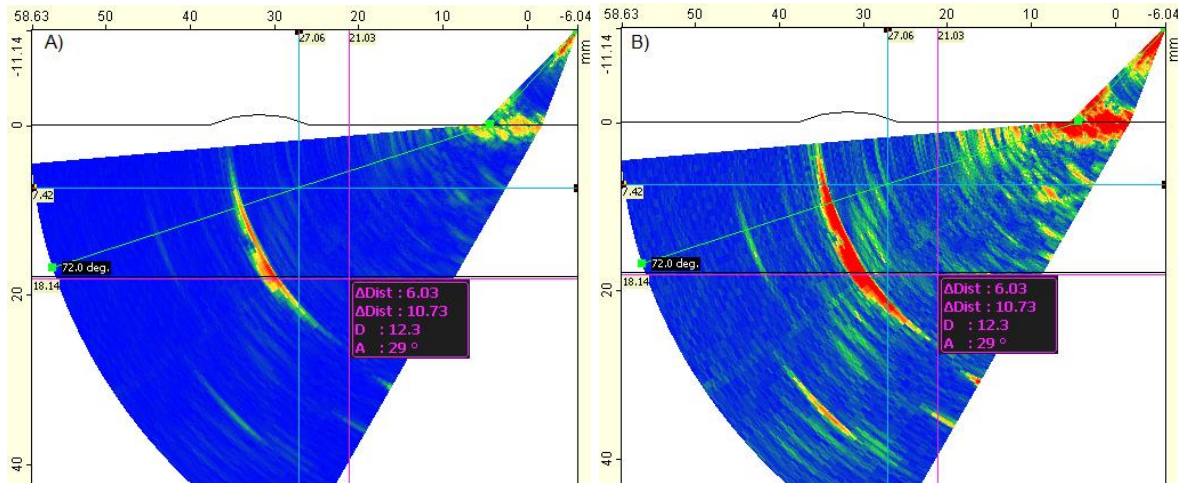


Figura 73. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_2 em 833.254 ciclos.

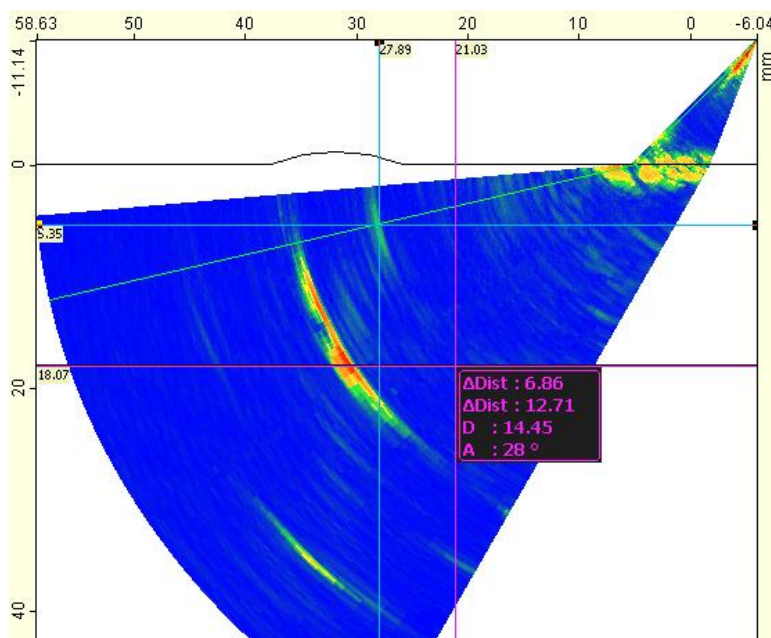


Figura 74. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado B_1 em 833.254 ciclos.

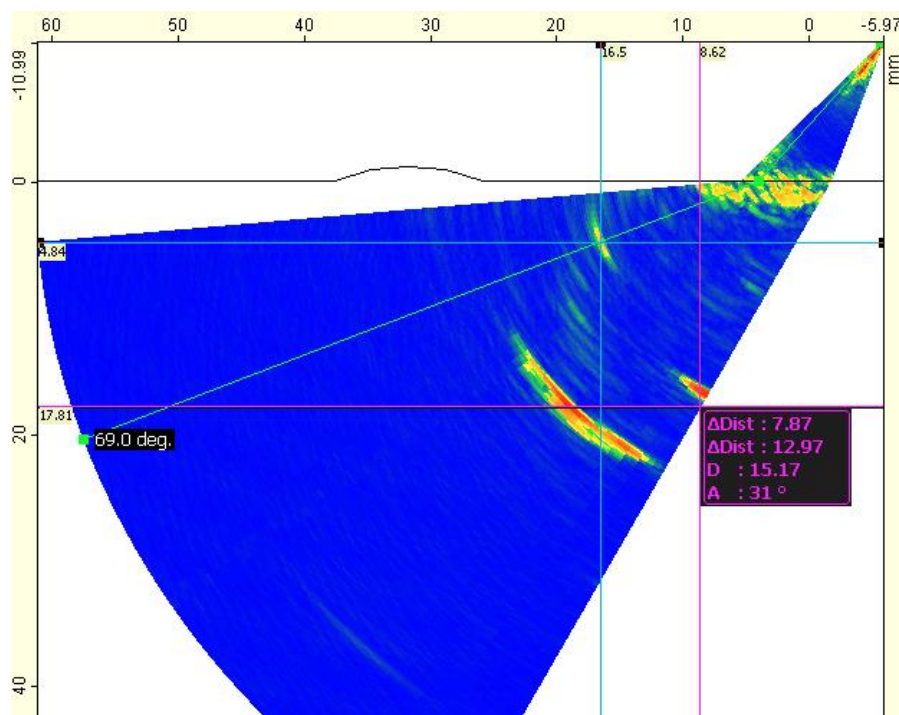


Figura 75. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 843.254 ciclos pelo padrão de visualização B-scan a 57°.

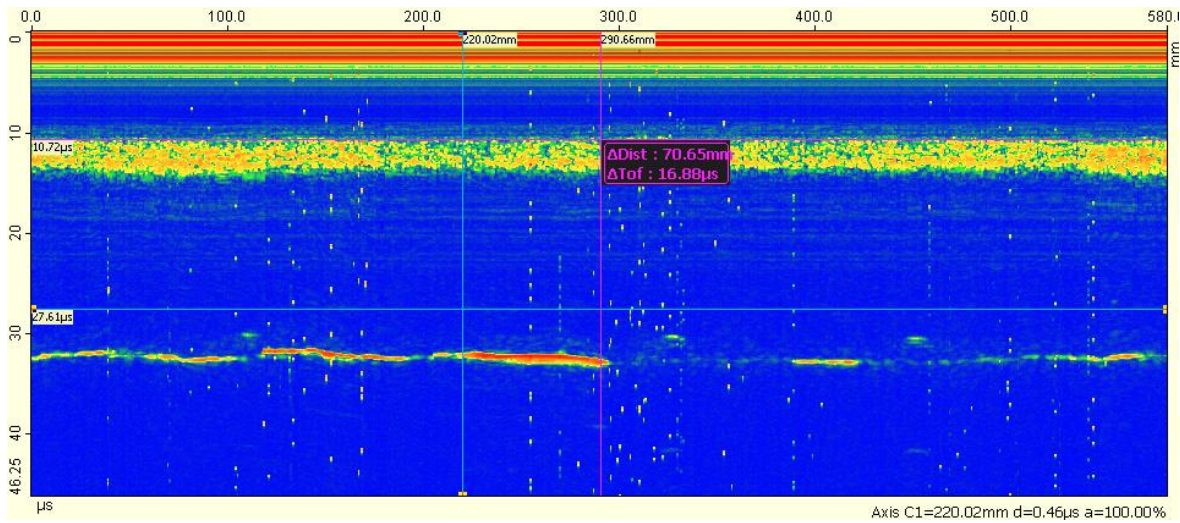


Figura 76. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 850.500 ciclos: A) sem aumento de ganho B) adicionado 10 dB no ganho.

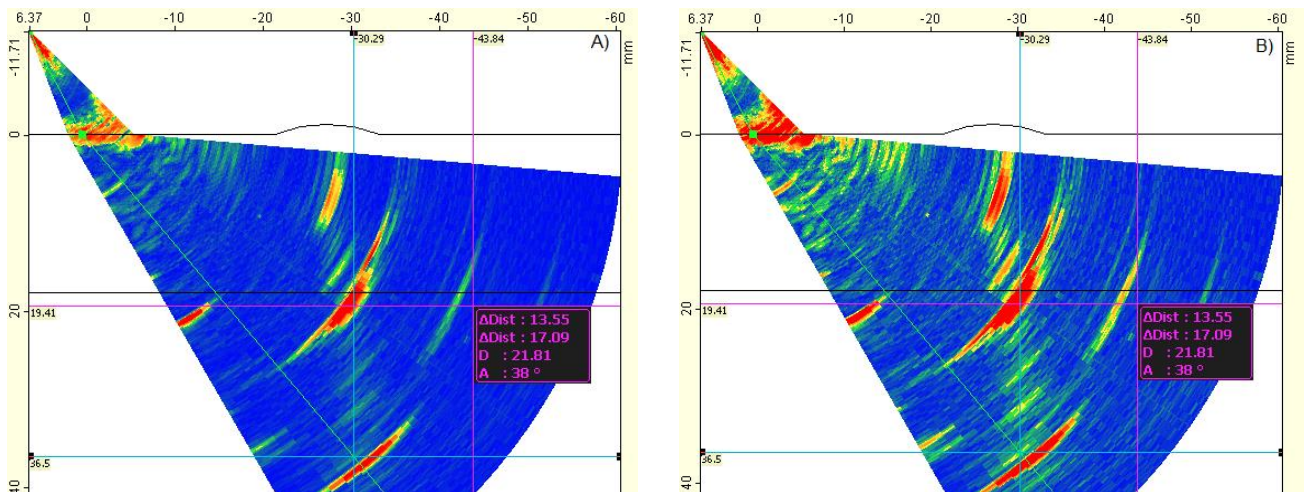


Figura 77. Frente de crescimento da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 863.165 ciclos.

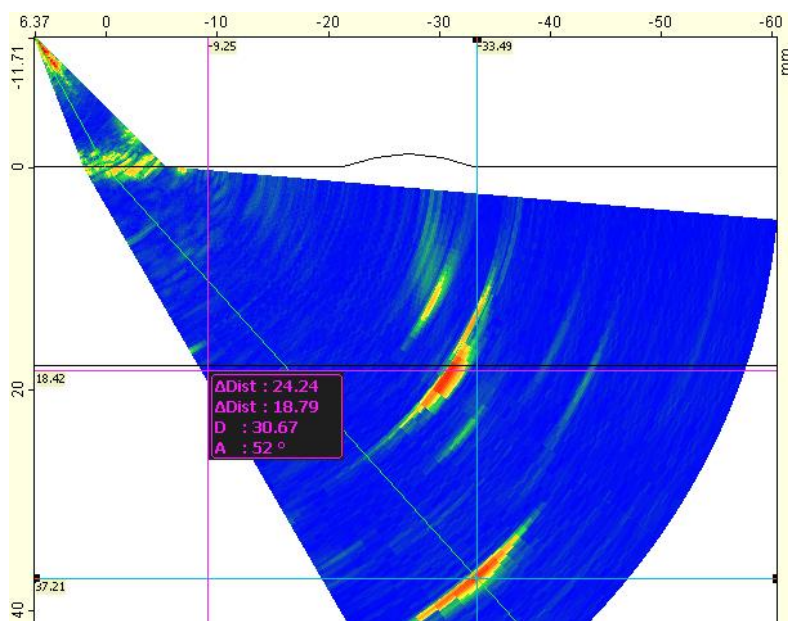
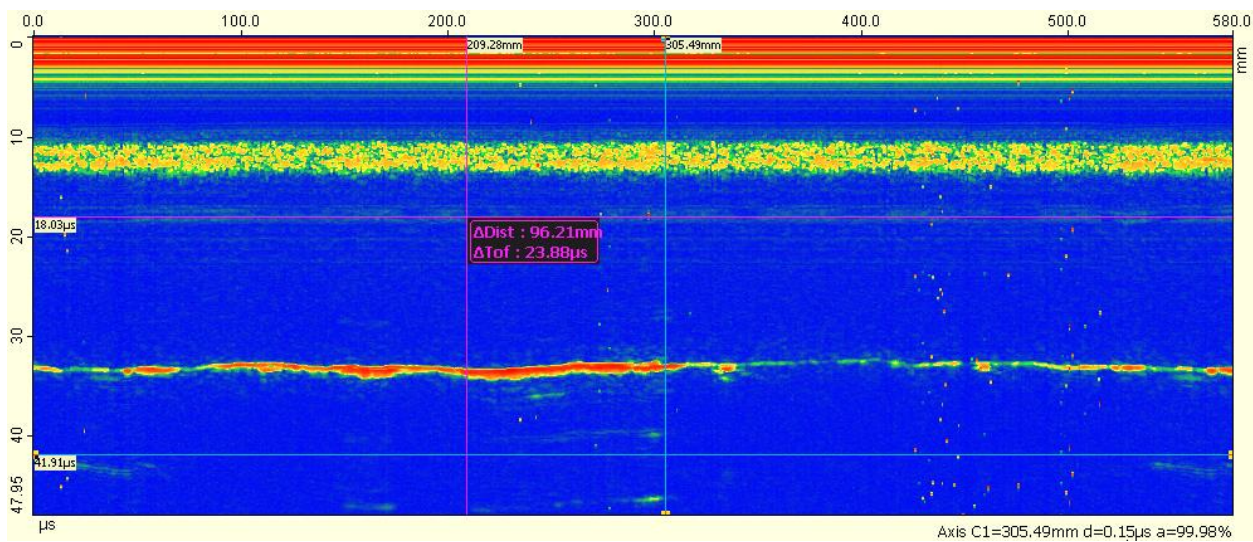


Figura 78. Largura da trinca por fadiga próximo as 5:00 horas visualizado pelo modo de varredura Lado A_2 em 863.165 ciclos pelo padrão de visualização B-scan a 55° .



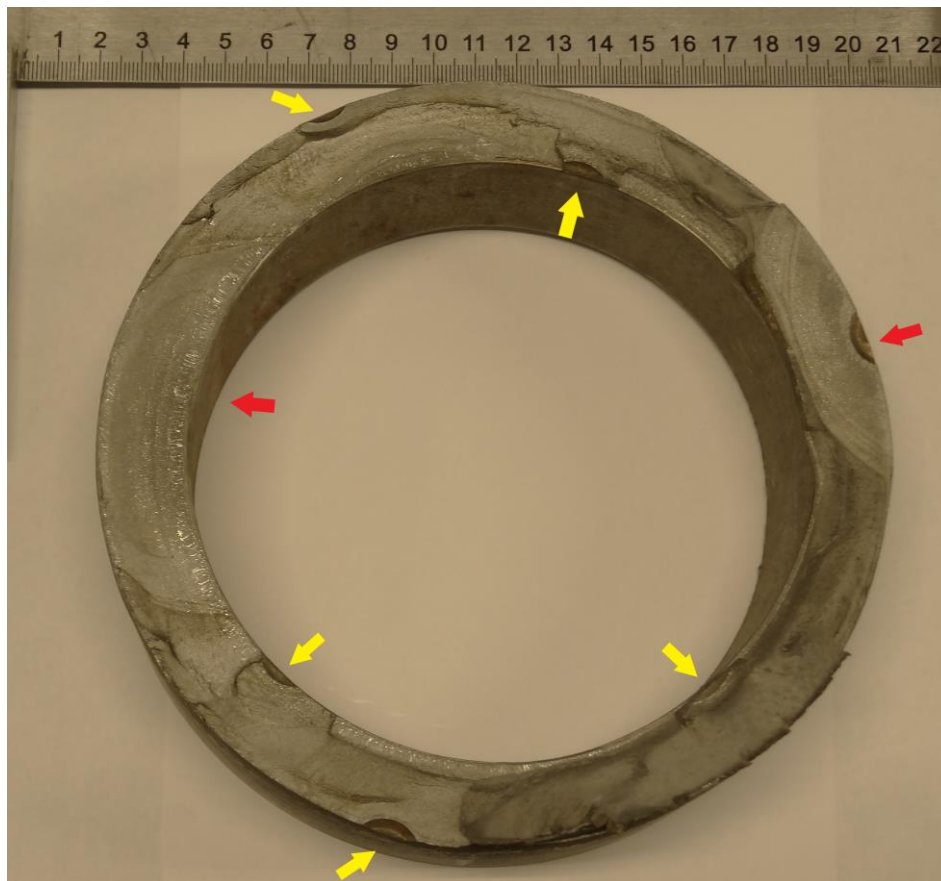
No ciclo 863.165 foi constatado a trinca por fadiga visualmente no cordão da solda, após aplicar a força de 90% da $F_{\text{máx}}$ da configuração 5, como mostra a foto da figura 79. Os defeitos intencionais e não intencionais após a constatação do defeito gerado por fadiga atingir a superfície foram ignorados e as inspeções suspensas, os ciclos restantes 10.088 até alcançar o ciclo 873.253 foram realizados para auxiliar a configuração 6 para romper o corpo de prova em escala real.

Figura 79. Defeito gerado por fadiga na superfície do cordão de solda no ciclo 863.165.



A sexta configuração de parâmetros denominada configuração 6 (frequência 0,2 Hz, F_{max} 2000 kN e F_{min} 200 kN) iniciou no ciclo 873.253 e finalizou no ciclo 882.198 totalizando 8.945 ciclos nesta configuração para alcançar a ruptura do corpo de prova em escala real. A figura 80 mostra a superfície de fratura do lado B do corpo de prova em escala real e as principais regiões citadas no trabalho, onde as setas vermelhas indicam as trincas que propagaram por fadiga e as setas amarelas indicam os defeitos intencionais que não nuclearam trincas de fadiga.

Figura 80. Superfície de fratura do lado B do corpo de prova em escala real no ciclo 882.198 (régua da figura em cm).



As figuras 81 e 82 mostram a evolução da altura e largura da trinca gerada por fadiga ao longo do ensaio em escala real a partir de sua constatação e monitoramento no ciclo 661.001 a 863.165.

Figura 81. Altura do defeito gerado por fadiga detectado pelo modo de varredura Lado B_2 ao longo dos ciclos do ensaio em escala real.

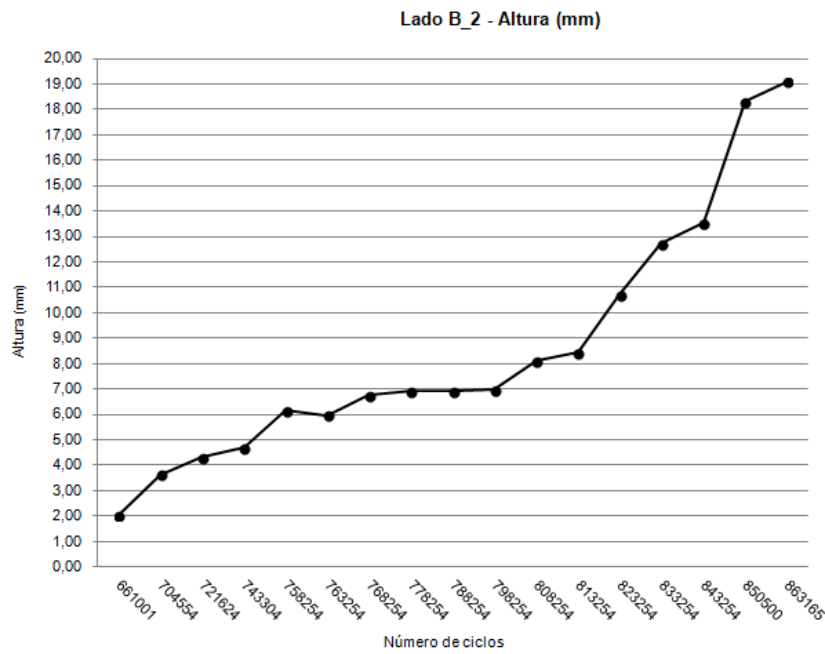
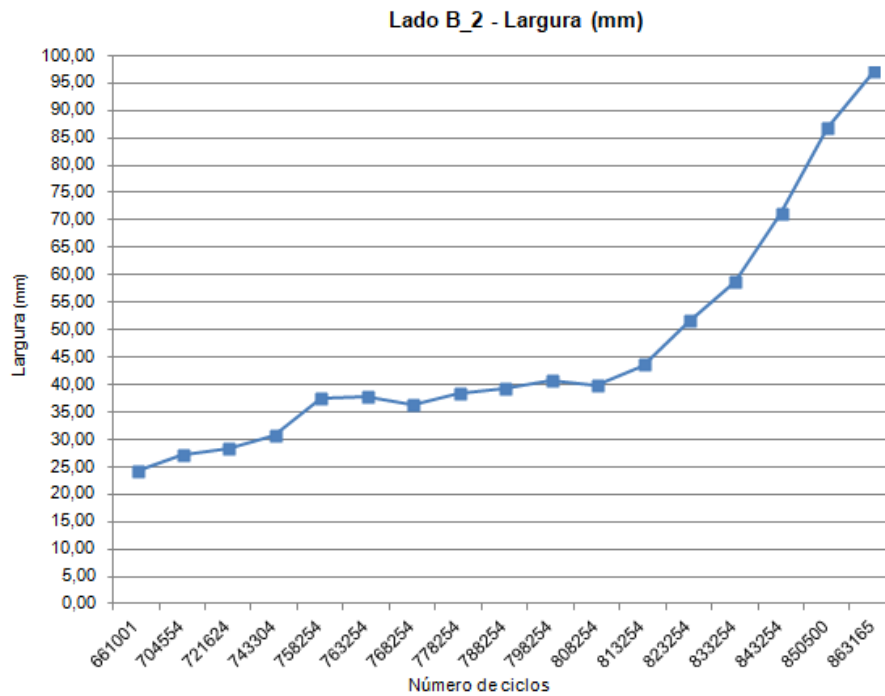


Figura 82. Largura do defeito gerado por fadiga detectado pelo modo de varredura Lado B_2 ao longo dos ciclos do ensaio em escala real.



5. CURVA da/dN

Através dos dados coletados de altura (a) e largura (2c) do defeito gerado por fadiga ao longo do ensaio em escala real foi gerada uma curva de altura do defeito ao longo dos ciclos (N) denominada curva da/dN. Na figura 85 encontra-se a curva da/dN x ΔK , com da/dN calculado com base no método do polinômio incremental da norma para ensaios em escala reduzida ASTM E647(2013). Para o cálculo de ΔK foi utilizado o método de Raju e Newman(1985) para tubos em tração com trincas elípticas nas mesma orientação do defeito. Os dados representaram um comportamento típico de estágio II de propagação, obedecendo a Lei de Paris, cujos parâmetros encontram-se ao lado da curva. Na figura 86 encontra-se a curva referente ao tamanho dos defeitos (profundidade a e comprimento superficial 2c) ao longo do ensaio, somente no trecho que apresentou crescimento significativo. (ASTM STANDARD E647 – 13A, 2014; RAJU; NEWMAN, 1986)

Figura 83. Gráfico da/dN x ΔK do ensaio de fadiga do corpo de prova em escala real.

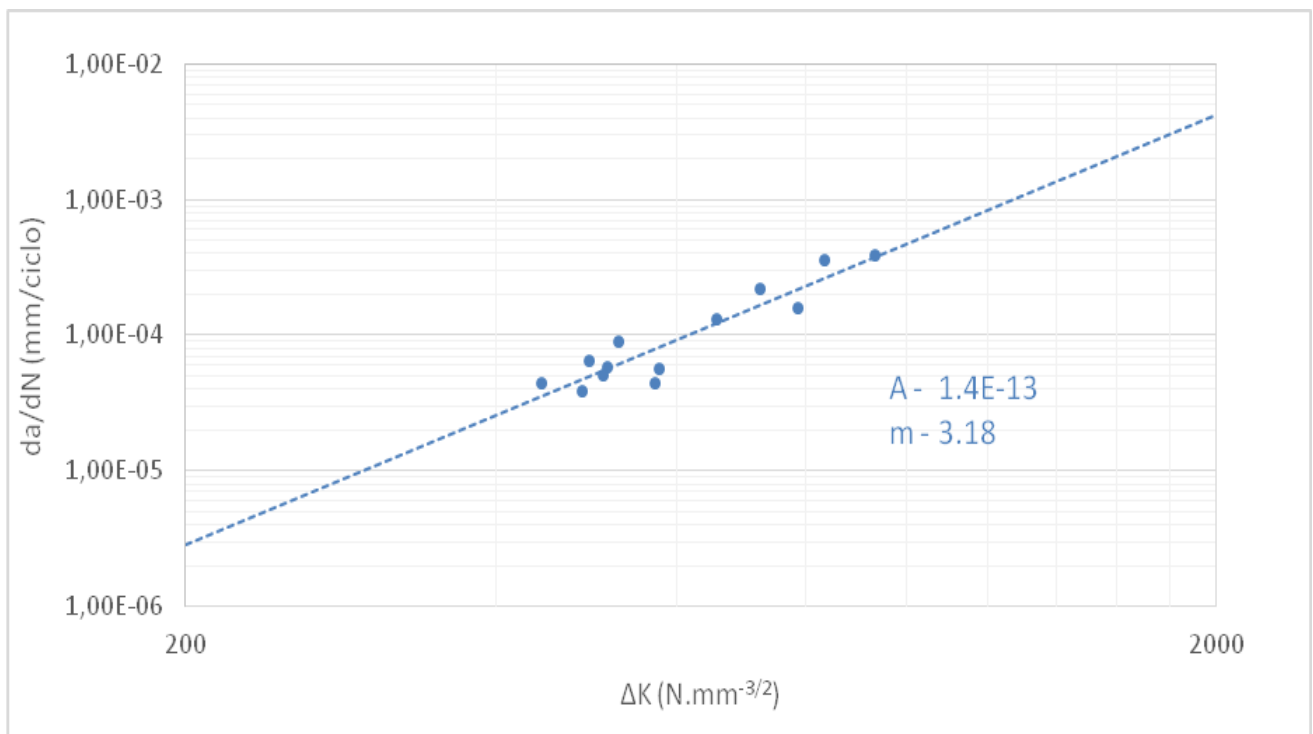
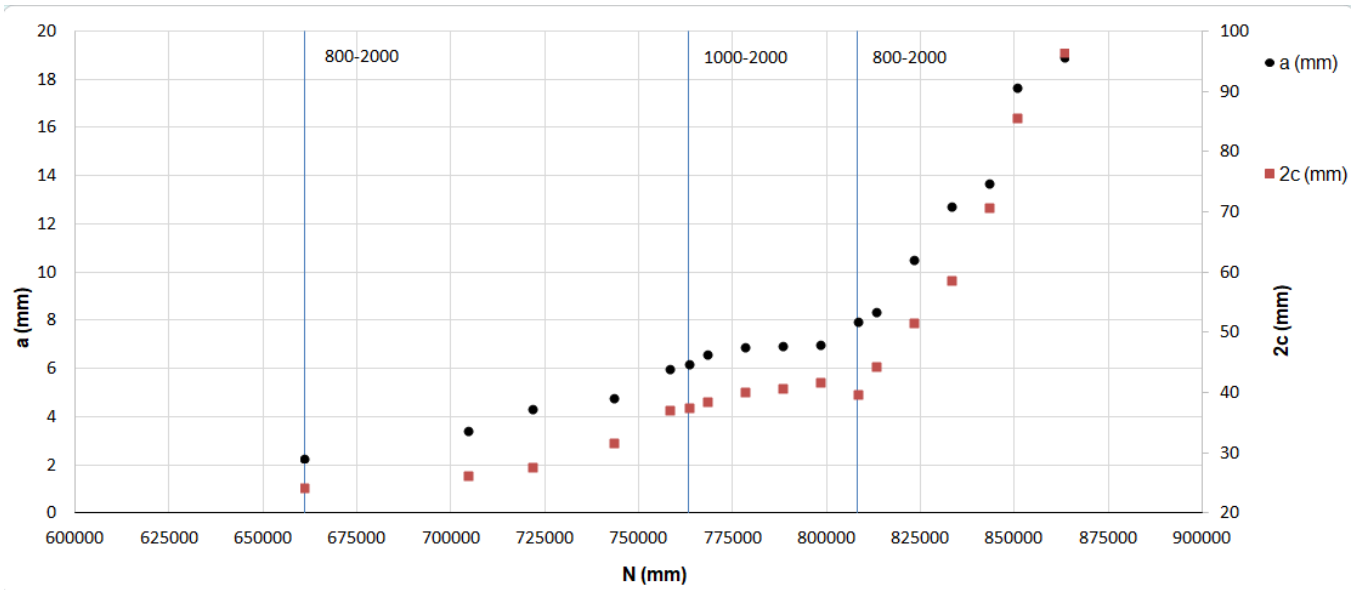


Figura 84. Gráfico a/N do ensaio de fadiga do corpo de prova em escala real.



6. CONCLUSÃO

O objetivo principal referente a medição e monitoramento dos defeitos intencionais e não intencionais pela técnica de ensaio não destrutivo phased array foram realizados com êxito.

A metodologia mostrou-se apropriada permitindo dimensionar e monitorar defeitos em solda a partir da técnica de ensaio não destrutivo phased array foi concluída.

Os dados obtidos pelas inspeções forneceram elementos suficientes para obtenção da curva da/dN do ensaio de fadiga do corpo de prova em escala real.

A material em estudo apresentou grande atenuação dos sinais dos defeitos gerados durante o ensaio, principalmente para o defeito intencional externo de 4mm que cresceu durante os ciclos finais do ensaio em escala real por fadiga.

O modo de inspeção Lado B_1 foi o modo em que o sinal de difração do topo da trinca gerada por fadiga pode ser melhor visualizado e identificado.

O modo de inspeção Lado B_2 e Lado A_2 foram os modos que possibilitaram uma varredura mais ampla da região em estudo, solda e zona termicamente afetada.

7. SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Inserir dispositivos de instrumentação para monitorar alinhamento do corpo de prova em escala real em relação à máquina de ensaio.

Criar a partir do padrão uma curva DGS (*distance/gain/size*).

Criar outras configurações de defeitos e aplicar a técnica utilizada nesse trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- ABDESSALEM, B. et al. Enhancement of Phased Array Ultrasonic Signal in Composite Materials using TMST Algorithm. **Physics Procedia**, v. 70, p. 488–491, 2015.
- ALSARRAF, J. Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Super Duplex Stainless Steels. 2010.
- ASM. Vol 13 - Corrosion. **ASM Handbook**, p. 3455, 1992.
- ASM HANDBOOK. Metals Handbook - Nondestructive Evaluation and Quality Control. **Technology**, v. 17, n. pag 500, p. 3470, 2001.
- ASTM INTERNATIONAL. E2192-13: Standard Guide for Planar Flaw Height Sizing by Ultrasonics. p. 1–23, 2013.
- ASTM STANDARD E647 – 13A. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. **American Society for Testing and Materials**, p. 1–50, 2014.
- BASH, E. ESTUDO DA TENACIDADE À FRATURA DE UM TUBO SOLDADO DO AÇO SUPERDUPLEX UNS S32760. **PhD Proposal**, v. 1, 2015.
- BUGAEV, V. Mechanism of hydrogen-induced phase transformations in metals and alloys. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 22, n. 2–3, p. 213–218, fev. 1997.
- CHARTIER, C. Phased Array Ultrasonic Detection & Sizing of In-Service Cracks in Heavy Walled Reactor Nozzles -Part 1. **Acuren Group Inc**, 2007.
- CHATILLON, S. et al. Ultrasonic non-destructive testing of pieces of complex geometry with a flexible phased array transducer. **Ultrasonics**, v. 38, n. 1–8, p. 131–134, mar. 2000.
- CHIMENTI, D. E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization. **Ultrasonics**, v. 54, n. 7, p. 1804–16, set. 2014.
- CIORAU, P. A Contribution to Phased Array Ultrasonic Inspection of Welds Part 1: Data Plotting for S-and B-Scan Displays. **NDT.net**, 2007.
- DAYAL, R. K.; PARVATHAVARTHINI, N. Hydrogen embrittlement in power plant steels. **Sadhana**, v. 28, n. 3–4, p. 431–451, 2003.
- DIETER, G. E.; BACON, D. **Mechanical metallurgy** *Journal of the Franklin Institute*, 1988.
- DOWLING, N. E.; IYYER, N. S. Fatigue crack growth and closure at high cyclic strains. **Materials Science and Engineering**, v. 96, p. 99–107, dez. 1987.
- DRINKWATER, B. W.; WILCOX, P. D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation:

A review. **NDT & E International**, v. 39, n. 7, p. 525–541, 2006.

Duplex Stainless Steels. [s.l.] Elsevier, 1997.

DYBEDAL, J.; LØVIK, A.; INGEBRIGTSEN, K. A. A high resolution sonar for sea-bed imaging. **Ultrasonics**, v. 23, n. 2, p. 71–76, mar. 1985.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: [s.n.].

GREGORI, P. W. AND A. Avoiding hydrogen embrittlement stress cracking of ferritic austenitic stainless steels under cathodic protection. **Proceedings of OMAE 2004: 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering Vancouver**, 2004.

HARDIE, D.; CHARLES, E.; LOPEZ, A. Hydrogen embrittlement of high strength pipeline steels. **Corrosion Science**, v. 48, p. 4378–4385, 2006.

LIU, S. W.; DATTA, S. K. Scattering of Ultrasonic Wave by Cracks in a Plate. v. 60, n. 93, p. 2–7, 2016.

MARTINS, M.; CASTELETTI, L. C. Aços inoxidáveis duplex e super duplex – Obtenção e caracterização. **Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo**, v. 169, 2007.

MATEO, A. et al. Cyclic deformation behaviour of superduplex stainless steels. **Materials Science and Engineering: A**, v. 314, n. 1–2, p. 176–185, set. 2001.

MEC, E. Formação de fase sigma em aço inoxidável duplex SAF 2205 – efeito de rápido aquecimento entre. 2004.

METHODS, R.; SIZING, U. C. Defined Procedure For Advanced Ultrasonic Crack Sizing. p. 1–24, 2012.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behavior of Materials**. 2 ed. ed. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2008.

NAGESWARAN, C. Measuring the crack growth rate. **TWI Member Publication**, 2013.

OLDEN, V.; THAULOW, C.; JOHNSEN, R. Modelling of hydrogen diffusion and hydrogen induced cracking in supermartensitic and duplex stainless steels. **Materials & Design**, v. 29, n. 10, p. 1934–1948, dez. 2008.

OLYMPUS NDT. **Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline**. [s.l.: s.n.].

OLYMPUS NDT. **Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications**. [s.l.: s.n.].

POPOV, B. N. **Corrosion Engineering**. [s.l.] Elsevier, 2015.

POPOVYCH, O.; KARPASH, M. Signal Processing Approach for Defect Classification

Detected Using Ultrasonic Phased Array. n. Econdt, p. 1–5, 2014.

RAJU, I. S.; NEWMAN, J. C. Stress-intensity factors for circumferential surface cracks in pipes and rods under tension and bending loads. **ASTM special technical publication**, n. 905, p. 789–805, 1986.

ROBERTSON, I. M. et al. Hydrogen Embrittlement Understood. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 46, n. 6, p. 2323–2341, 2015.

ROGÉRIO DOS SANTOS ALVES; ALEX SOARES DE SOUZA, ET ALL. **Bone Quantitative Ultrasound**. [s.l: s.n.].

SANTIN, J. L. **Ultra-som Técnica e Aplicação**. 2^a edição ed. [s.l: s.n.].

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. K. A: Publishers, 2004.

SERVICE, S. Standard Specification for Castings , Iron-Chromium-Nickel , Corrosion Resistant , for. **October**, v. 14, n. Reapproved 2003, p. 2–5, 2002.

SONG, S.-J.; SHIN, H. J.; JANG, Y. H. Development of an ultra sonic phased array system for nondestructive tests of nuclear power plant components. **Nuclear Engineering and Design**, v. 214, n. 1–2, p. 151–161, maio 2002.

U. KIVISA“KK. Stainless Steels World 99 Conf. p. 519, 1999.

VIJAYALAKSHMI, K.; MUTHUPANDI, V.; JAYACHITRA, R. Influence of heat treatment on the microstructure, ultrasonic attenuation and hardness of SAF 2205 duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 529, p. 447–451, nov. 2011.

WANG, J. Effect of cathodic polarization potential on hydrogen induced stress cracking of duplex stainless steel. **Nace**, n. 2384, p. 1–7, 2013.

WONGWAISAYAWAN, S. et al. Trauma Ultrasound. **Ultrasound in medicine & biology**, v. 41, n. 10, p. 2543–61, out. 2015.