

HENRIQUE DOS REIS

**Monitoramento de corrosão sob tensão por meio dos métodos de ensaios não destrutivos
de emissão acústica e ultrassom *Phased Array***

Guaratinguetá - SP
2021

Henrique dos Reis

**Monitoramento de corrosão sob tensão por meio dos métodos de ensaios não destrutivos
de emissão acústica e ultrassom *Phased Array***

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Coorientador: Prof. Dr. André de Albuquerque Vicente

Guaratinguetá - SP
2021

R375m	Reis, Henrique dos Monitoramento de corrosão sob tensão por meio dos métodos de ensaios não destrutivos de emissão acústica e ultrassom Phased Array / Henrique dos Reis – Guaratinguetá, 2021. 143 f : il. Bibliografia: f. 134-143 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento Coorientador: Prof. Dr. André de Albuquerque Vicente 1. Vasos de pressão. 2. Testes não-destrutivos. 3. Testes de emissão acústica. I. Título. CDU 621.643.2(043)
-------	---

HENRIQUE DOS REIS

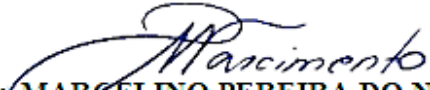
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO**

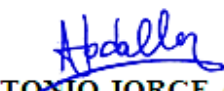
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
Orientador - UNESP
participou por videoconferência


Prof. Dr. LUCIANO BRAGA ALKMIN
CEFET
participou por videoconferência


Prof. Dr. ANTONIO JORGE ABDALLA
IEAv/DCTA
participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

HENRIQUE DOS REIS

NASCIMENTO	27/08/1982 – Santo André/SP
FILIAÇÃO	Jadir Pereira dos Reis Rosa Rodrigues de Queiroz dos Reis
2002/2006	Graduação em Tecnólogo de Soldagem Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP
2007/2011	Graduação em Engenharia Industrial Mecânica Escola de Engenharia Industrial – ETEP
2017/2021	Mestrado em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista – UNESP

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela graça alcançada e pelo objetivo traçado nessa dissertação.

Aos meus queridos pais, Jadir Pereira dos Reis e Rosa Rodrigues de Queiroz dos Reis pelo carinho durante toda a minha vida, formação acadêmica e que sempre incentivaram os filhos nos estudos.

À minha esposa Patrícia Marostica pela perseverança e compreensão e ao meu filho amado, Raul Marostica dos Reis.

À UNESP (Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá), pela estrutura de engenharia adquirida nestes 3 (três) anos e por tornar possível este trabalho.

À UNIFESP (Universidade Federal de São Paulo) por ter cedido o laboratório de preparação metalográfica e todos os equipamentos necessários para analisar minhas amostras.

Ao Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento, pelo aprendizado e experiência transmitida nessa dissertação.

Ao Prof. Dr. André de Albuquerque Vicente, pela orientação firme e detalhada nessa dissertação.

À empresa BASF S/A, em especial, que acreditou em meu potencial e na capacitação técnica representada pelos queridos colegas Francisca Rosa (*in memoriam*), Antônio Carlos Ribeiro, Luciano Rizzo, João Bosco Gualhardo, Luis Cesar Ribeiro, Luis Fernando Siqueira Ayslan Markes, Brendon Máximo, Carlos Garufe, Edson Carlos, José Cleber, Milquezedec Campos e Roney Rosa.

À empresa Nacional Indústria Mecânica, representada pelos colegas Filipe Coelho e Janaina Agra Texeira, por acreditar neste projeto e pelo empréstimo do aparelho de Fluorescência de Raio X na análise do material.

À empresa Brito&Kerche, representada pelos colegas Gustavo Brito e Rodrigo Kerche, por acreditar nesse projeto e pelos profundos ensinamentos das técnicas de ultrassom TFM/FMC.

À empresa Moura&Fiorito, representada pelo colega Nestor de Moura, por acreditar nesse projeto e pela disponibilização dos aparelhos e laboratórios para a realização dos ensaios de emissão acústica.

À empresa UT Quality, representada pelos colegas Otávio Luigi e Eduardo Gazolli, por acreditar nesse projeto e pela disponibilização dos aparelhos e laboratórios para a realização dos ensaios de ultrassom.

RESUMO

Vasos de pressão são recipientes estanques para armazenar, sob pressão, vários tipos de fluidos (gasosos/líquidos). Estes equipamentos são fundamentais em muitos processos industriais e projetados para resistir a elevadas pressões. No entanto, representam alto risco se falhas ocorrerem em sua operação, sendo crucial um plano de inspeção por meio de técnicas de ensaio que garantam seu uso seguro. Devido as condições extremas e ação combinada de agentes agressores no ambiente, trincas oriundas de fenômenos de *Corrosão sob Tensão* (CsT) podem se formar. A CsT é uma das mais comuns e perigosas formas de corrosão, pois combina tensão estática e corrosão em meio fluido, acometendo estruturas/materiais. Caracteriza-se pela formação e propagação rápida de trincas que levam o material à súbita ruptura e falha catastrófica, gerando impactos sociais, econômicos e ambientais. Suas trincas são “rasas” e de difícil detecção via ultrassom convencional. Uma alternativa nova e pouco conhecida para contornar tal situação é a ultrassonografia mecanizada, que utiliza a técnica *Total Focusing Method* (TFM) para uma melhor aquisição de imagem (cada pixel é uma lei focal dedicada à região de interesse) através do pós-processamento de dados coletados pela tecnologia *Full Matrix Capture* (FMC), que captura elementos pulsantes e receptores. Já a Emissão Acústica (EA), detecta falhas através de sensores instalados na estrutura, captando informações de ondas mecânicas elásticas geradas quando uma irregularidade surge/propaga no material, indicando a localização das descontinuidades. Sendo assim, este trabalho surgiu da precariedade atual em dimensionar principalmente a altura de trincas “rasas” em vasos de pressão. A técnica de TFM é útil para dimensionar outros tipos de trincas (superficiais e subsuperficiais) resultantes de outros fenômenos, tais como Fadiga. Tendo o objetivo de empregar os dois NDTs supracitados para detectar, dimensionar e monitorar oito trincas de CsT em um vaso de pressão largamente utilizado na indústria química. Almeja-se assim preencher a lacuna atual no arcabouço acadêmico acerca das técnicas TFM e FMC. Os resultados encontrados evidenciam que o ultrassom mecanizado teve desempenho eficiente, determinando com precisão altura, profundidade e comprimento de oito descontinuidades na chapa do costado do vaso de pressão estudado. Com tal conclusão, etapas de cálculos de Mecânica da Fratura e inspeções em serviço terão maior assertividade na análise destas descontinuidades.

PALAVRAS-CHAVE: Vaso de pressão. Corrosão sob tensão. Trincas rasas. Ultrassom Mecanizado. *TFM/FMC*. Emissão acústica. Ensaio não destrutivo. Phased array.

ABSTRACT

Pressure vessels are watertight containers for storing various types of fluids (gaseous/liquids) under pressure. These equipments are fundamental in many industrial processes and designed to withstand high pressures. However, they represent a high risk if failures occur in their operation, being crucial an inspection plan through testing techniques that guarantee their safe use. Due to extreme conditions and the combined action of aggressive agents in the environment, cracks arising from *Stress Corrosion* (SC) phenomena can form. SC is one of the most common and dangerous forms of corrosion, as it combines static stress and corrosion in a fluid, affecting structures/materials. It is characterized by the formation and rapid propagation of cracks that lead the material to sudden rupture and catastrophic failure, causing social, economic and environmental impacts. Its cracks are “shallow” and difficult to detect via conventional ultrasound. A new and almost unknown alternative to overcome this situation is mechanized ultrasonography, which uses the *Total Focusing Method* (TFM) technique for better image acquisition (each pixel is a focal law dedicated to the region of interest) through the post-processing of data collected by *Full Matrix Capture* (FMC) technology, which captures pulsating elements and receivers. Acoustic Emission (AE) detects faults through sensors installed in the structure, capturing information from elastic mechanical waves generated when an irregularity arises/propagates in the material, indicating the location of discontinuities. Therefore, this work arose from the current precariousness in dimensioning mainly the height of "shallow" cracks in pressure vessels. The TFM technique is useful for dimensioning other types of cracks (surface and subsurface) resulting from other phenomena, such as Fatigue. With the objective of employing the two before mentioned NDTs to detect, size and monitor eight CsT cracks in a pressure vessel widely used in the chemical industry. Thus, the aim is to fill the current gap in the academic framework regarding the TFM and FMC techniques. The results found show that the mechanized ultrasound had an efficient performance, accurately determining height, depth and length of eight discontinuities in the side plate of the pressure vessel studied. With this conclusion, Fracture Mechanics calculation steps and in-service inspections will have greater assertiveness in the analysis of these discontinuities.

KEY WORDS: Pressure vessel. Stress crack corrosion. Shallow cracks. Mechanized ultrasound. TFM/FMC. Acoustic emission. Non-destructive testing. Phased array.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propagação da Onda Longitudinal.....	28
Figura 2 - Propagação da onda transversal.....	29
Figura 3 - Transdutor Normal ou Reto.	30
Figura 4 - Transdutor Angular.....	30
Figura 5 - Transdutor Duplo-Cristal ou SE.	30
Figura 6 - Aparelho EPOCH 6LT.	31
Figura 7 - Cristais com sinal em fase.	33
Figura 8 - Cristais com sinal defasado no tempo.	33
Figura 9 - Esquema da varredura eletrônica (grupos de elementos são sucessivamente ativados para movimentar o feixe ao longo do cabeçote).....	34
Figura 10 - Esquema de focalização eletrônica (aplicação de leis de retardos eletrônicos é usada para focalizar o feixe).....	35
Figura 11 - Deflexão eletrônica (leis de retardo aplicadas para defletir o feixe).	36
Figura 12 - Encoder.	37
Figura 13 - Tipos de Mostradores.	37
Figura 14 - Detecção de quatro furos de broca laterais (a) Princípio da varredura setorial (b) Vista S-scan usando +30°.	38
Figura 15 - Imagem avançada de descontinuidades artificiais empregando dados combinados: descontinuidades existentes e varredura executada (em cima) apresentação B-scan combinada (em baixo).....	39
Figura 16 - Detecção e dimensionamento de descontinuidades mal orientadas pela combinação de ondas longitudinal e transversal com varredura setorial.....	39
Figura 17 - Discriminação (resolução) de grupos de furos (a) vista de topo C-scan (b) vista lateral B-scan.	40
Figura 18 - Múltiplas varreduras e combinação dos dados para uma detecção com mais qualidade e discriminação das descontinuidades.....	40
Figura 19 - Múltiplas varreduras para melhor detecção/discriminação de descontinuidades. .	41

Figura 20 - Aparelho de ultrassom automatizado M2M Mantis.	41
Figura 21 - Aparelho de ultrassom OmniScan MX2 com visualização no modo TOFD.....	42
Figura 22 - Analisador portátil de ligas metálicas por XRF (DELTA, marca Olympus). À direita um esquema onde é possível ver os principais componentes deste equipamento.	43
Figura 23 - Quadros TFM.....	48
Figura 24 - Exemplo de capacidade de cobertura.....	49
Figura 25 - Gráfico mostrando a lei focal aplicada para focar feixe em determinado ponto. ...	50
Figura 26 - Geometria da sonda <i>Phased Array</i> ; (a) linear; (b) matricial; (c) anular.	52
Figura 27 - Geometria interna de uma sonda array linear.	53
Figura 28 - Tipos de Visualização com o sistema phased array. (a) A-Scan; (b) B-Scan; (c) C-Scan; (d) S-Scan.	54
Figura 29 - Formas de varredura com o Phased Array.....	56
Figura 30 - Características de um sinal discreto.....	60
Figura 31 - Princípios do fenômeno de EA e sua detecção.	61
Figura 32 - Sensor de Emissão Acústica da marca Mistras/PASA.	63
Figura 33 - Exemplos de casos onde peças metálicas foram fragilizadas ou se envolveram em eventos de corrosão uniforme, em placas, alveolar, pite, inter e transgranular e filiforme.....	66
Figura 34 - Casos onde peças metálicas foram fragilizadas via corrosão por esfoliação, grafítica, lixiviação seletiva, empolamento de hidrogênio, em juntas soldadas, frestas e fretting.	67
Figura 35 - Condições para o desenvolvimento da corrosão sob tensão.	71
Figura 36 - Características orientacional das trincas oriundas de processo de pitting (acicular) e aquelas vindas de fenômenos de CsT (ramificadas).....	72
Figura 37 - Em a) uma representação esquemática de como seria uma seção cúbica da região de propagação de trincas de CsT em um metal. Em b) está uma microscopia da região de propagação de trincas advindas de Corrosão sob Tensão em um aço inoxidável AISI 316. ...	72
Figura 38 - Em a) Fotografias de reatores estabilizadores de PVC estudados por Ihho Park e colaboradores. Em b) mostra-se a parte superior do reator retirado como amostra (corte).	73

Figura 39 - Em a) tem-se a face interna da amostra de corte evidenciando as trincas e em b) fotografias da seção transversal da amostra de corte onde se vê o padrão ramificado e a profundidade das trincas.....	74
Figura 40 - EDS da área fissurada. Do canto superior esquerdo para o canto inferior direito, imagem do elétron secundário (a), mapas de distribuição elementar de (b) Fe, (c) Cr, (d) O, (e) Cl e (f) Ni. A lacuna gerada pela trinca é preenchida com óxido rico em Cr e o elemento Cl também é enriquecido no óxido.	75
Figura 41 - Efeito do Níquel na Corrosão sob tensão de arames de aço austenítico contendo 18 a 20% de cromo em solução aquecida (154°C) de cloreto de magnésio.....	79
Figura 42 - Trincamento ocorrido em um aço AISI 321 rompido em operação.	82
Figura 43 - Analisador portátil de ligas metálicas por XRF (DELTA, marca Olympus) semelhante ao utilizado no CDP do costado do reator, que posteriormente acabou evidenciando as proporções composicionais que permitiram confirmar a liga de aço inoxidável 316.....	85
Figura 44 - Aparelho de ultrassonografia Phased Array, marca Eddyfi Technologies, modelo M2M Mantis, com 16/64 elementos - utilizado em associação com as técnicas TFM e FMC para a captura das características das trincas nos pontos do CDP (costado do vaso de pressão), cujos quais apresentam tais descontinuidades oriundas de CsT.....	86
Figura 45 - Bloco da calibração de IIW-V1 Asme Ut, semelhante ao usado na calibração do Phased Array.	87
Figura 46 - Etapas de calibração de Sensibilidade, Probe Delay e TCG, respectivamente.....	88
Figura 47 - Mapa de Amplitude para sensibilidade e mapa de percurso para Probe Delay. Registro dos percursos e amplitudes, evidenciando o feixe seguindo a amplitude máxima. ...	89
Figura 48 - Cabeçote do aparelho sensor ressonante de banda estreita DiSP PAC – R15, de elevada sensibilidade, extremamente robusto e confiável, com cavidade usinada em aço inoxidável e face em cerâmica (com chanfro de 30°), isolando eletricamente a cavidade do sensor da estrutura em teste garantindo uma operação de baixo ruído.	90
Figura 49 - Ensaio de EA sendo realizado através da utilização de 4 sensores ressonantes de banda estreita DiSP PAC – R15 sobre parte da chapa do costado/tampo superior do reator (ou vaso de pressão) que se utilizou como amostra. Nesta imagem é possível observar pontos destacados contendo trincas.....	91

Figura 50 - Evidência da aplicação do método de medição de extensometria para determinar a tensão residual apresentada pela chapa amostra do costado do vaso de pressão utilizado neste estudo. No canto superior esquerdo encontra-se esquema elétrico simples do mecanismo.....	92
Figura 51 - Material do costado determinado como aço inoxidável AISI 316 em seis pontos distintos da amostra (chapa do costado do vaso de pressão).....	100
Figura 52 - Registro fotográfico da Amostra 1 (acima) e da amostra 2 (abaixo). Em ambas é possível observar a seção transversal da chapa com o perfil de solda, regiões de corrosão e trincas bem pronunciadas. Nas setas em vermelho pontua-se o início das trincas (de fora para dentro), partindo de um ramo único quase que vertical e irradiando-se em vários veios transversais nas extremidades, tendenciando sua orientação para uma região cada vez mais interna, junto a interface do cordão de solda, material ressolidificado.	102
Figura 53 - Reapresentação das características visuais das trincas encontradas por Ihho Park e colaboradores no reator de aço inox AISI 304, que armazenava uma solução de $MgCl_2$ sob alta temperatura.	103
Figura 54 - Superfície externa da chapa do costado, abaixo da calha suporte do isolamento, onde observou-se a presença de uma área com oxidação, sendo ali realizada uma raspagem para remoção do resíduo e caracterização via EDS.....	103
Figura 55 - Em a) e b) têm-se a microestrutura do material do tampo superior, constituída de austenita e ferrita delta sob aumento de 200x e 500x, respectivamente. Em c) e d) a microestrutura do material da solda do tampo superior/costado, com austenita e ilhas de ferrita, (aumento de 200x e 500x, respectivamente).	105
Figura 56 - Em a) tem-se trincas transgranulares ramificadas originadas na superfície externa do costado (200x). Em b) tem-se trincas de mesma natureza (transgranular, ramificada e da superfície externa), mas na HAZ pela solda (200x). c) Trinca transgranular e ramificada (500x) e em d) a mesma condição (transgranular /ramificada) sob aumento de 500x (regiões adjacentes).....	106
Figura 57 - Espectro EDS do material do tampo superior do vaso de pressão usado como amostra.	107
Figura 58 - Espectro EDS do material da solda tampo/costado do vaso de pressão.	108
Figura 59 - À esquerda análise via espectro EDS do Ponto 1 (no interior da trinca) e à direita a micrografia da mesma região.	109

Figura 60 - À esquerda análise via Espectro EDS do Ponto 2 (no interior da trinca) e à direita a micrografia da mesma região.	109
Figura 61 - À esquerda observa-se o espectro EDS da oxidação raspada da região externa do costado, logo abaixo encontra-se uma micrografia da mesma região.	110
Figura 62 - Esquema de montagem dos sensores para monitoramento do corpo de prova....	112
Figura 63 - Resultados gráficos da EA na Chapa conforme norma ASTM G30 que estabelece correlação entre os parâmetros Counts x Amplitude.....	113
Figura 64 - Resultados gráficos da EA na Chapa conforme norma ASTM G30 que mostra a somatória instantânea dos valores de energia (distribuída) ao longo do tempo de 24 horas e 44 minutos.	114
Figura 65 - Resultados gráficos da EA na Chapa conforme norma ASTM G30 que mostra a somatória instantânea dos valores de energia (acumulada) também ao longo do tempo de 24 horas e 44 minutos.	115
Figura 66 - Vista geral da chapa de teste 1 antes da aplicação do TSA, com os dois primeiros pontos escolhidos.....	116
Figura 67 - Coordenadas dos pontos 1 e 2 da chapa 1, onde mostra regiões inspecionadas..	116
Figura 68 - Característica dos 6 pontos de análise via EA na chapa de teste 2.....	117
Figura 69 - Coordenadas dos pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 das chapas 1 e 2, com as regiões inspecionadas.....	118
Figura 70 - Altura da maior indicação no ponto 1 no modo TT (transdutor-descontinuidade-transdutor) – Altura da Tela igual a espessura da peça. O Detalhe A mostra a chapa 1 com o ponto 1 de onde foi feita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TT.	120
Figura 71 - Altura da maior indicação no ponto 1 no modo TTT. O Detalhe A mostra a chapa 1 com o ponto 1 de onde foi refeita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TTT.....	121
Figura 72 - Altura da maior indicação no ponto 2 no modo TT (1,89 mm de altura). Detalhe A mostrando a região da chapa 1 onde se localiza a descontinuidade do ponto 2.	122
Figura 73 - Altura da maior indicação no ponto 2 no modo TTT (2,10 mm de altura).	122
Figura 74 - Algoritmos de modo sugerido para orientação de falhas específicas.	123

Figura 75 - Altura da maior indicação no ponto 3, vista TTTT. O Detalhe A mostra a chapa 2 com o ponto 3 de onde foi refeita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TTTT.	124
Figura 76 - Altura da maior indicação no ponto 4, vista TTTT. O Detalhe A mostra a chapa 2 com o ponto 4 de onde foi refeita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TTTT.	125
Figura 77 - Altura da maior indicação no ponto 5, vista TTTT. O Detalhe A mostra a chapa 2 com o ponto 5 de onde foi refeita a leitura.	126
Figura 78 - Altura da maior indicação no ponto 6, vista TTT (Espessura rebatida). O Detalhe A mostra a chapa 2 com o ponto 6 de onde foi refeita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TTT.....	127
Figura 79 - Altura da maior indicação no ponto 7, vista TTTT.	128
Figura 80 - Altura da maior indicação no ponto 8, vista TTT (Espessura rebatida).	129

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das trincas oriundas de CsT segundo profundidade.....	22
Quadro 2 - Composição química elementar dos constituintes básicos dos aços austeníticos inoxidáveis do tipo 316 L, segundo a Norma SA-240/SA-240M.	24
Quadro 3 - Compilado das principais propriedades mecânicas e de fabricação encontradas para os inoxidáveis do tipo 316, segundo a Norma SA-240/SA-240M.	25
Quadro 4 - Classificação de fontes de EA.....	62
Quadro 5 - Relação dos principais meios causadores de CsT em aços inoxidáveis austeníticos.	77
Quadro 6 - Valores das cinco medições composicionais feitas com o analisador portátil de ligas por XRF (DELTA, Olympus). A proporção dos elementos característicos da uma liga de aço inoxidável 316.	99
Quadro 7 - Concentrações de agentes agressivos que podem induzir CsT caso em contato com metal susceptível e tensões residuais.....	104
Quadro 8 - Compilado das medições feitas pelas técnicas mencionadas.....	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CsT	Corrosão sob Tensão
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CDP	Corpo de Prova
CFC	Cúbica de Face Centrada
DAC	<i>Distance Amplitude Correction</i> (Correção de Amplitude de Distância)
Dpi	Pontos por Polegada (<i>dots per inch</i>)
EA	Emissão Acústica
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
ENDs	Ensaaios não Destrutivos
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FMC	<i>Full Matrix Capture</i>
HC	Hexagonal Compacta
HAZ	<i>Heat-Affected Zone</i>
MO	Microscópio Óptico
SAFT	<i>Synthetic Aperture Focusing Technique</i>
TCG	<i>Time Corrected Gain</i> (Ganho com Tempo Corrigido)
TFM	<i>Total Focusing Method</i>
ToFD	<i>Time of Flight Diffraction</i>
TSA	<i>Thermal Spray Aluminium</i>
XRF	<i>X-Ray Fluorescence</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
PVC	Policloreto de vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude
Be	Energia de Ligação do Elétron Orbital
Ec	Energia Cinética
dB	Decibel
F	Frequência
H	Constante de Planck
Hz	Hertz
in	Polegada (<i>inch</i>)
kg	Quilograma
kHz	Kilo Hertz
keV	Kilo Elétron-volt
MHz	Mega Hertz
mm	Milímetros
mL	Mililitros
MPa	Megapascal
ppb	Partes por bilhão
ppm	Partes por milhão
rpm	Rotações por minuto
T	Período
λ	Comprimento de Onda
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
μm	Micrometro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	21
1.2	JUSTIFICATIVAS	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	AÇO AISI 316	23
2.2	ULTRASSOM CONVENCIONAL	25
2.2.1	Ondas mecânicas	26
2.2.2	Ondas sonoras	26
2.2.3	Terminologia de ultrassom	26
2.2.3.1	Comprimento de onda (λ)	26
2.2.3.2	Período (T)	26
2.2.3.3	Frequência (F)	27
2.2.3.4	Amplitude (A)	27
2.2.4	Tipos de ondas ultrassônicas	27
2.2.5	Transdutores	29
2.2.6	Acoplante	30
2.2.7	Aparelho de ultrassom	31
2.3	ULTRASSOM PHASED ARRAY	32
2.3.1	Transdutores	32
2.3.2	Varredura eletrônica	34
2.3.3	Focalização eletrônica	34
2.3.4	Deflexão eletrônica	35
2.3.5	Varredura básica e imagens	36
2.3.6	Aparelho de ultrassom Phased Array	41
2.4	ULTRASSOM TOFD	42
2.5	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (XRF)	43
2.6	ULTRASSOM PHASED ARRAY – TFM/FMC	44
2.6.1	Inspeção de ultrassom	46
2.6.2	Terminologia	46
2.6.3	Ultrassom Phased Array – TFM	47
2.7	CARACTERÍSTICAS TFM	47
2.7.1	Características do sinal	47

2.7.2	Parâmetros dos métodos TFM e FMC	47
2.7.3	Capacidade de focagem	48
2.7.4	Capacidade de cobertura	49
2.7.5	Impacto dos parâmetros do quadro na amplitude	49
2.7.6	Funcionamento	50
2.7.6.1	Formas de visualização	53
2.7.7	Método de Focalização Total (TFM)	55
2.8	TIPOS DE VARREDURA	56
2.9	EMISSÃO ACÚSTICA	57
2.9.1	Terminologia	58
2.9.2	Princípios fundamentais de emissão acústica	61
2.9.3	Fontes de emissão acústica	61
2.9.4	Sensores piezoelétricos	63
2.10	CORROSÃO SOB TENSÃO	64
2.10.1	Corrosão e técnicas de análise	64
2.10.2	Corrosão sob tensão (CsT)	68
2.10.3	Características da CsT	70
2.10.4	Fatores influenciadores	78
2.10.5	Mecanismo de trincamento	80
2.10.6	Corrosão sob tensão em meio de ácidos politiônicos	81
3	MATERIAIS E MÉTODOS	84
3.1	MATERIAIS	84
3.1.1	Amostra e corpos de prova	84
3.1.2	Procedimento experimental	84
3.1.2.1	Fluorescência de raios-x (XRF)	84
3.1.2.2	Ultrassom	85
3.1.2.3	Calibração do aparelho de ultrassom phased array	86
3.1.2.4	Emissão acústica	90
3.1.2.5	Revelação das trincas e tensão residual	91
3.1.2.6	Preparação das amostras	93
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4.1	CONFIRMAÇÃO DO MATERIAL POR XRF	99
4.2	COMPROVANDO ORIGEM DAS TRINCAS POR CST	100
4.2.1	Registro fotográfico	101

4.2.2	Análise metalográfica via Microscopia Ótica (MO).....	104
4.2.3	Análise da composição química via EDS.....	106
4.2.4	Comentários gerais sobre análises MO e EDS.....	110
4.3	RESULTADOS DA ANÁLISE DE EA E ULTRASSOM	111
5	CONCLUSÃO	132
	REFERÊNCIAS	134

1 INTRODUÇÃO

Ao especificar materiais na construção de equipamentos ou instalações é necessário verificar se os mesmos resistem à ação do meio à que estarão sujeitos ou expostos, além de apresentar propriedades mecânicas e características de fabricação adequadas (LAZARINI, 2012).

O mesmo vale para equipamentos tais como vasos de pressão. Vasos de pressão são máquinas que servem como recipientes estanques para o armazenamento pressurizado de vários tipos de fluidos (gasosos ou líquidos) podendo se apresentar em diferentes formatos e dimensões. Tais componentes são fundamentais em diversos processos industriais e são projetados para resistir a elevadas pressões internas (HUPPES, R. M., 2009).

No entanto, podem representar alto potencial de risco se quaisquer falhas em sua operação e manutenção ocorrem, sendo crucial um bom plano de inspeção com o emprego de técnicas de ensaio que garantam a operação segura dos equipamentos (HUPPES, R. M., 2009).

Algo bastante desafiador, uma vez que, justamente, devido às condições extremas em que se encontram e ação combinada de agentes agressores presentes no ambiente, trincas oriundas de fenômenos de Corrosão sob Tensão (CsT) podem se formar (JONES, R. H.; *et al.*; 1992).

A *Corrosão sob Tensão* (CsT) é uma das conhecidas, comuns e perigosas formas de corrosão conjunta, isso porque acontece devido a ação de efeitos combinados, nesse caso uma associação entre tensão estática e corrosão, propriamente dita (LAZARINI, J. C.; 2012).

Pode ocorrer em diversos tipos de estruturas construídas em uma ampla classe de materiais, tais como aços inoxidáveis austeníticos, aços ao carbono e ligas de cobre, mas sempre quando estes se apresentam submetidos a tensões primárias e ou secundárias combinadas com o meio (fluido) (JONES, R. H.; 2017).

A CsT se caracteriza metalurgicamente pela formação e propagação rápida de trincas que podem levar o material à ruptura, sendo um dos mecanismos de degradação mais severos que influenciam no tempo de vida da estrutura (LAZARINI, J. C.; 2012).

Na maioria das vezes, as falhas por CsT são súbitas e imprevisíveis, levando muitas vezes a catástrofes, com sérios impactos sociais, econômicos e ambientais (LAZARINI, 2012).

Atualmente, sabe-se que há estudos catalogados no arcabouço acadêmico, onde já tem sido reportada a utilização de ENDs para caracterização de trincas por CsT (MEYER, R. M. *et al.*; 2013).

O trincamento por Corrosão sob Tensão (CsT) em reatores e vasos de pressão, tem sido reportado como uma forma persistente de degradação na indústria, principalmente na nuclear (reatores de água leve) (SCHVARTZMAN, M. A. M.; *et al.*; 2009).

Exemplos de trincas oriundas de CsT podem ser encontrados para uma variedade de materiais em ambientes de reator de água pressurizada e fervente, incluindo aços carbono, aços inoxidáveis e ligas à base de níquel (SCHVARTZMAN, M. A. M.; *et al.*; 2009).

A evolução da CsT é frequentemente caracterizada por um longo estágio de iniciação seguido por uma fase de crescimento mais rápido da trinca até a falha. Isso fornece uma janela de oportunidade relativamente curta para detectar o início da trinca observável e sua progressão da iniciação até a falha – entre os exames subsequentes quando gerenciados – aplicando técnicas de inspeção periódica em serviço (JONES, R. H.; *et al.*; 1992).

Portanto, necessita-se de mais trabalhos que façam a união da teoria com a prática para testar a implementação de paradigmas de gerenciamento com uso/adaptação das tecnologias de medição existentes e o desenvolvimento de novas tecnologias para realizar medições *on-time* durante a operação de reatores/vasos, garantindo detecção oportuna da degradação de material em tempo hábil. Trabalhos como este vem apoiar a implementação de diagnósticos e prognósticos avançados.

O artigo de Jones, R. H.; *et al.* (1992) considera várias tecnologias de ensaios não destrutivos (NDE) com sensibilidade conhecida para detecção de indicadores de iniciação e/ou propagação da CsT e avalia tecnologias com relação à sua capacidade de detectar e caracterizar com precisão a significância de uma trinca (JONES, R. H.; *et al.*; 1992).

No entanto, este estudo por ser antigo não cita TFM/FMC como estratégias potenciais para melhorar o desempenho da inspeção e monitoramento das trincas de CsT. Algo que se busca agora que o avanço dessas técnicas alcançou nível satisfatório.

Mas hoje o panorama é outro, o método de END por Emissão Acústica foi e ainda é aplicado para monitoramento da formação e da propagação das trincas durante experimento realizado em laboratório, conforme Norma ASTM G30 – *Standard Practice for Making and Using U-Bends Stress-Corrosion test Specimens*. Outro método de END que vem sendo aplicado é o Ultrassom Mecanizado *Phased Array* (TFM – *Total Focusing Method*), no qual os dados adquiridos são processados usando um algoritmo otimizado de um método que gera imagens focalizadas dos dados, adquiridos pelo cabeçote matricial (HOLLOWAY, 2021).

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como principal objetivo realizar o monitoramento e determinar as características/dimensões de oito trincas oriundas do fenômeno de Corrosão sob Tensão, através de dois ENDs: o de Emissão Acústica e o Ultrassom *Phased Array – TFM/FMC*.

Sendo assim, será feita uma comparação dos mesmos no âmbito de detectar, dimensionar e monitorar oito trincas de CsT.

Almeja-se ainda preencher a vacância atual no arcabouço acadêmico acerca da correta utilização das técnicas TFM e FMC, evidenciando-as numa situação prática seus resultados.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O conceito de resistência à corrosão de um material está diretamente relacionado com a integridade estrutural de um equipamento ou componente, que, por sua vez, tem importante vinculação com aspectos de confiabilidade operacional e segurança dentro do processo. A corrosão é um fenômeno que está presente em todas as atividades da sociedade, atuando em praticamente todos os tipos de materiais: plásticos, borrachas, concreto, madeira e, principalmente, os metais (FRANCO *et al.*, 1997).

Devido a sua importância, tanto no aspecto econômico quanto de segurança e meio ambiente, a corrosão tem sido motivo de muitos estudos no meio científico, que tem procurado entender os fenômenos que a provocam, para que possam ser definidas ações que eliminem ou minimizem os seus efeitos negativos. A corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio podendo ou não estar associada a esforços mecânicos. Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos, acarretando a perda de suas propriedades mecânicas. Como consequências disto, estes materiais deixam de satisfazer os fins a que se destinam (GENTIL, V., 2011).

Portanto, a previsão da vida útil de um equipamento considerando a resistência à corrosão é de difícil mensuração, uma vez que depende tanto da natureza do meio em que os mesmos ficarão expostos como das condições de exposição. Ao se considerar o emprego de materiais na construção de equipamentos ou instalações, é necessário verificar se os mesmos resistem à ação do meio em que estarão expostos, além de apresentar propriedades mecânicas e características de fabricação adequadas.

A corrosão sob tensão (CsT) é uma das mais comuns e perigosas formas de corrosão conjunta, ou seja, ocorre devido aos efeitos combinados da tensão estática e da corrosão.

Ocorre em diversos tipos de materiais, como os aços inoxidáveis austeníticos, aços ao carbono e ligas de cobre, quando estes se apresentam na forma tensionada (MARIANO, N. A.; 1997). Para prevenir o transtorno ocorrido, a proteção catódica parece uma opção a se considerar (FRANCO *et al.*, 1997).

Em aços inoxidáveis do tipo martensítico e ferrítico sabe-se ser proibitivo esse tipo de proteção devido à polarização catódica que pode induzir à fragilização pelo hidrogênio do material. E até em aços austeníticos (tal como o desta dissertação – AISI 316) há uma certa controvérsia em relação ao processo de fragilização em potenciais catódicos (MARIANO, N. A.; 1997).

FERNANDES (2010) ressalta em sua dissertação que estudos experimentais de problemas decorrentes da corrosão sob tensão são de grande importância à medida que estes permitem fazer uma previsão do comportamento dos materiais expostos ao meio agressivo, avaliando a influência de vários parâmetros que conduzem à iniciação e propagação de trincas por CsT.

Os defeitos oriundos da CsT são de difícil detecção pelo método de ultrassom devido as trincas serem rasas, os refletores não conseguem fazer a reflexão do defeito com máxima amplitude.

Como critério de classificação (Quadro 1), tem-se os estudos de GHOSH, S. *et. al.*, 2010 e o livro de CHENG, Y. F., 2013, que classificam as trincas em três grupos.

Quadro 1 - Classificação das trincas oriundas de CsT segundo profundidade.

	<i>Trincas Superficiais</i>	<i>Trincas Subsuperficiais</i>	<i>Trincas Rasas</i>
Range	até 150 μm	150 μm até 500 μm	500 μm até 15 mm

Fontes: Adaptado de Ghosh *et. al.* (2010) e Cheng (2013).

Sendo assim, o trabalho em questão surgiu da precariedade atual em se fazer confiável dimensionamento de trincas dessa natureza (rasas) – oriundas de CsT – em dispositivos tão críticos (vasos de pressão) utilizando as técnicas convencionais. Mas uma informação é consenso, a partir do desenvolvimento da técnica de TFM/FMC será possível dimensionar os defeitos com registro permanente, podendo-se realizar um verdadeiro acompanhamento da evolução do fenômeno de CsT (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AÇO AISI 316

O aço AISI 316 é um dos inoxidáveis mais utilizados no Brasil, apresentando composição química de 16-18% de cromo, 10-14% de níquel e adição complementar de 2-3% de molibdênio (Norma SA-240/SA-240M [2007] - Quadro 2), sendo, portanto, da família mais comum e aplicável no mundo: a Austenítica (V.V. FREITAS *et al.*, 2017).

O consumo per capita dos aços inoxidáveis no Brasil é de apenas 1,69 kg/ano/habitante [10x menor que a Europa] (ABINOX, 2019) e cerca de 20 a 25% deste consumo é representado pelo aço AISI 316, empregado em inúmeras aplicações. Suas principais características são:

- Elevada resistência à corrosão, principalmente em meios clorados que provocam “*pit*”;
- Excelente desempenho sob ação de água salobra (água do mar);
- Ideal para aplicações em equipamentos usados na indústria farmacêutica e do petrolífera;
- Tanques de transporte e armazenamento de líquidos sob pressão ou não, porém em ambiente com alto potencial/efeito corrosivo;
- Equipamentos em geral para embarcações marítimas;
- Material 100% reciclável, assim como todos os aços inoxidáveis;
- Quando comparado ao aço inoxidável AISI 304, revela-se superior no que tange à adição de Molibdênio e resistência a corrosão.

O aço inoxidável 316 é frequentemente considerado uma das escolhas mais adequadas ao selecionar um aço inoxidável austenítico para aplicações marítimas e indústrias químicas. Outras aplicações comuns do aço inoxidável 316 incluem:

- Equipamento de processamento e armazenamento químico;
- Equipamentos de refinaria;
- Dispositivos médicos;
- Ambientes marinhos, especialmente aqueles com cloretos presentes.

Esse alto desempenho, características e aplicações dos aços inoxidáveis austeníticos da série 3XX se deve ao fato destes possuírem, no mínimo, 11% em massa de teor de Cr, que forma espontaneamente na superfície um filme fino de óxido passivo de cromo (Cr_2O_3), protegendo o *core* do material e permitindo que as ligas sejam altamente resistentes à corrosão geral sob diversas soluções aquosas agressivas, que seriam danosas ao aço convencional (KAIN, V., 2011).

No entanto, os aços inoxidáveis austeníticos, como o AISI 304 e o 316, são conhecidos por sofrerem de corrosão sob tensão – CsT. As características desse tipo de corrosão serão explicitadas melhor na seção 2.10.2. Os Quadros 2 e 3, respectivamente, evidenciam as faixas de composições químicas elementares para o aço 316 e as propriedades mecânicas deste conforme consta na Norma SA-240/SA-240M (2007).

Quadro 2 - Composição química elementar dos constituintes básicos dos aços austeníticos inoxidáveis do tipo 316 L, segundo a Norma SA-240/SA-240M (2007).

Material	Porcentagens elementares (%)								
	<i>Carbono (C)</i>	<i>Manganês (Mn)</i>	<i>Fósforo (P)</i>	<i>Enxofre (S)</i>	<i>Silício (Si)</i>	<i>Cromo (Cr)</i>	<i>Níquel (Ni)</i>	<i>Molibdênio (Mo)</i>	<i>Nitrogênio (N)</i>
<i>Aço Inóx 316</i>	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	16-18	10-14	02-03	0.10

Fonte: Adaptado da Norma SA-240/SA-240M (2007).

Os elementos vistos no Quadro 2 exercem alguma função na conjuntura final de propriedades para esses aços, principalmente o Mo, Cr e o Ni. Por exemplo, sabe-se que a adição de Mo aumenta a resistência à quente, também tem seu papel no aumento da resistência do aço a corrosão por *pitting* e, em presença do Níquel e Cromo, aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento (propriedades vistas no Quadro 3).

Além disso, é importante ressaltar que o elemento mais importante da composição do AISI 316 é o Cromo, aparecendo entre 16-18 % em massa (Quadro 2), pois é este que promove a passivação superficial e confere carácter inoxidável ao aço, que agora passa a ter uma inércia química bastante interessante para diversas aplicações.

Tão importante quanto o Cromo é o Níquel, presente entre 10-14 % em massa (Quadro 2), estabilizando e garantindo microestrutura austenítica ao 316.

Quadro 3 - Compilado das principais propriedades mecânicas e de fabricação encontradas para os inoxidáveis do tipo 316, segundo a Norma SA-240/SA-240M (2007).

<i>Material</i>	<i>Propriedades características</i>					
	<i>Laminação</i>	<i>Diâmetro e Espessura</i>	<i>Resistencia à Tração (MPa)</i>	<i>Limite de Escoamento (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>	<i>Redução de Área (%)</i>
<i>Aço Inóx 316</i>	Frio e Quente	Todos	515	205	30	40

Fonte: Adaptado da Norma SA-240/SA-240M (2007).

O Mo dificulta também o forjamento, mas melhora a temperabilidade, a resistência à fadiga e propriedades magnéticas, exercendo ainda notável influência nas propriedades de soldabilidade, sendo elemento formador de carbonetos diversos (MENEZES, M. F. S. *et al.*, 2019).

2.2 ULTRASSOM CONVENCIONAL

A principal finalidade da inspeção por ultrassom é a detecção de descontinuidades internas em materiais ferrosos, não ferrosos, metálicos e não metálicos, através da introdução de um feixe sônico com características compatíveis com a estrutura do material a ser ensaiado. Este feixe sônico se for introduzido numa direção favorável em relação à descontinuidade (interface), será mostrado na tela do aparelho como um pico (eco) (SANTIN, 2003).

Algumas descontinuidades superficiais também podem ser detectadas através deste ensaio não destrutivo. Para a inspeção são necessários operadores treinados e qualificados, normas técnicas, manuais e procedimentos, além de aparelho, transdutores, acoplantes, blocos de calibração e de referência (SANTIN, 2003).

O ultrassom é uma onda mecânica que vibra em frequências (F) maiores que o alcance auditivo humano (superior a 20 kHz) (DAVID, J e CHEEKE, N., 2002).

É normalmente gerada a partir de transdutores capazes de converter pulsos elétricos em pulsos de vibração mecânica a uma frequência ultrassônica, podendo então se propagar dentro de um meio (SCHMERR, LESTER W., 2016).

Diferentes tipos de ondas podem ser gerados por esses transdutores. As ondas ultrassônicas de interesse dessa pesquisa são classificadas de acordo com a direção de vibração de partícula.

2.2.1 Ondas mecânicas

São aquelas originadas pela deformação de uma região de um meio elástico e para se propagarem necessitam de um meio material. Por isso, as ondas mecânicas não se propagam no vácuo. Quando transmitidas ao nosso sentido da audição, são denominadas som.

"Som" é o fenômeno acústico que consiste na propagação de ondas sonoras produzidas por um corpo que vibra em um meio material elástico. As ondas sonoras propagam-se nos sólidos, líquidos e gases (SANTIN, 2003).

2.2.2 Ondas sonoras

A parte da Física que estuda o som denomina-se acústica. Nela são descritos os fenômenos relacionados com as oscilações mecânicas (vibrações) que originam as ondas sonoras, bem como a propagação dessas ondas nos sólidos, líquidos e gases.

Quando as ondas sonoras têm frequências entre 20 Hz e 20000 Hz são audíveis e classificadas como som. Já quando têm frequências inferiores a 20 Hz são inaudíveis e se classificam como infrassom.

E quando as mesmas têm frequências superiores a 20000 Hz são também inaudíveis e denominadas ultrassom. Para aplicação no ensaio de materiais por ultrassom, a faixa de frequência geralmente utilizada está entre 0,5 MHz e 20 MHz (SANTIN, 2003).

2.2.3 Terminologia de ultrassom

Conforme Leite (1966), tem-se as seguintes definições:

2.2.3.1 Comprimento de onda (λ)

É a distância entre duas cristas ou dois vales consecutivos ou duas zonas de compressão e diluição. Sempre dependerá da frequência e da velocidade (LEITE, 1966).

2.2.3.2 Período (T)

É o menor intervalo de tempo de repetição do fenômeno periódico. Pode ser definido também como o tempo que uma onda completa gasta para percorrer a distância entre duas cristas (ou vales) consecutivos (LEITE, 1966).

2.2.3.3 Frequência (F)

É o número de períodos por segundo, ou portanto, o inverso do período. A unidade de frequência é o Hertz (Hz), que significa "um ciclo por segundo". A frequência (F) depende somente do período (T) — como visto na expressão (1), logo abaixo — e não varia ao passar por meios diferentes (LEITE, 1966).

Quanto maior for a frequência (F), maior será o número de oscilações (ciclos) por segundo, e menor será a distância entre as cristas ou vales, ou zonas de compressão e diluição.

Um transdutor utilizado neste método de ensaio tem a sua frequência fixa, sendo adquirido para ser utilizado em uma determinada frequência, (LEITE, 1966).

$$F = 1/T \quad (1)$$

2.2.3.4 Amplitude (A)

É a elongação máxima, isto é, um ponto de máximo no eixo "Y", (LEITE, 1966).

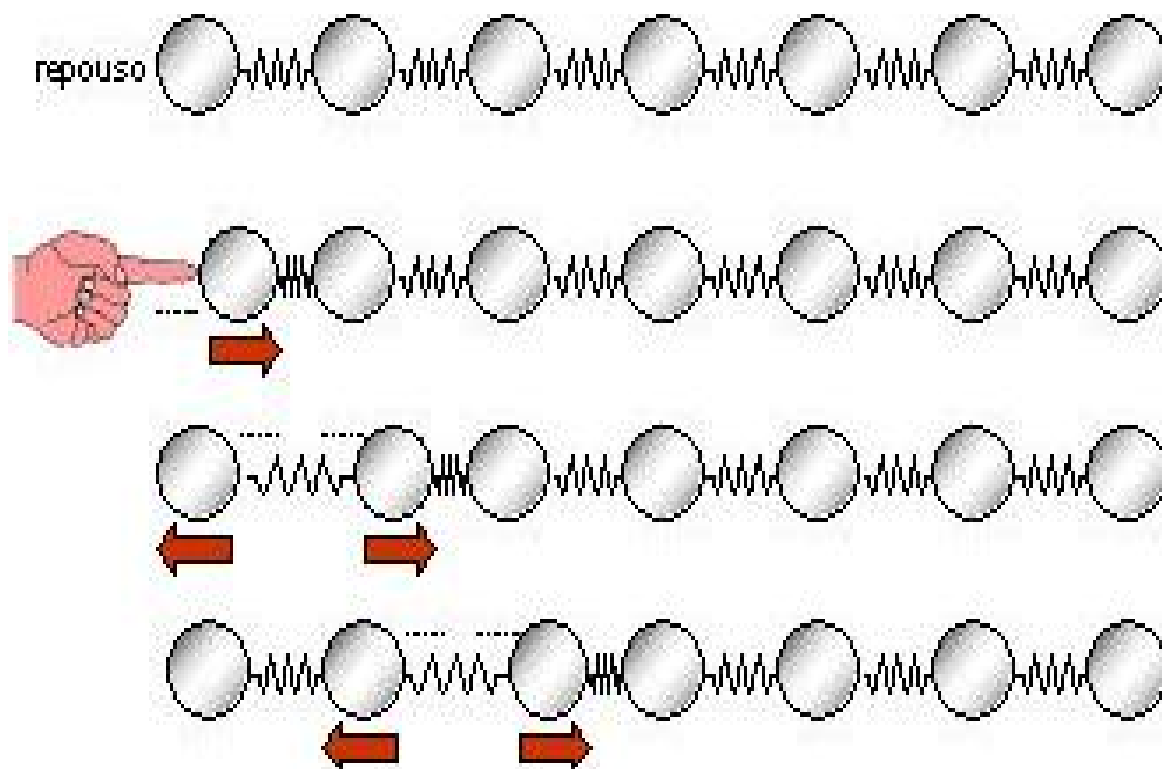
2.2.4 Tipos de ondas ultrassônicas

Os dois tipos de ondas utilizadas neste trabalho estão descritos abaixo.

2.2.4.1 Ondas longitudinais (ondas de compressão)

Uma onda é longitudinal quando as partículas do meio em que esta se propaga vibram na mesma direção de propagação da onda neste meio. Propagando-se nos sólidos, líquidos e gases. É a onda de maior velocidade de propagação (Figura 1) (ANDREUCCI, R. A., 2018).

Figura 1 - Propagação da Onda Longitudinal.



Fonte: Andreucci (2018).

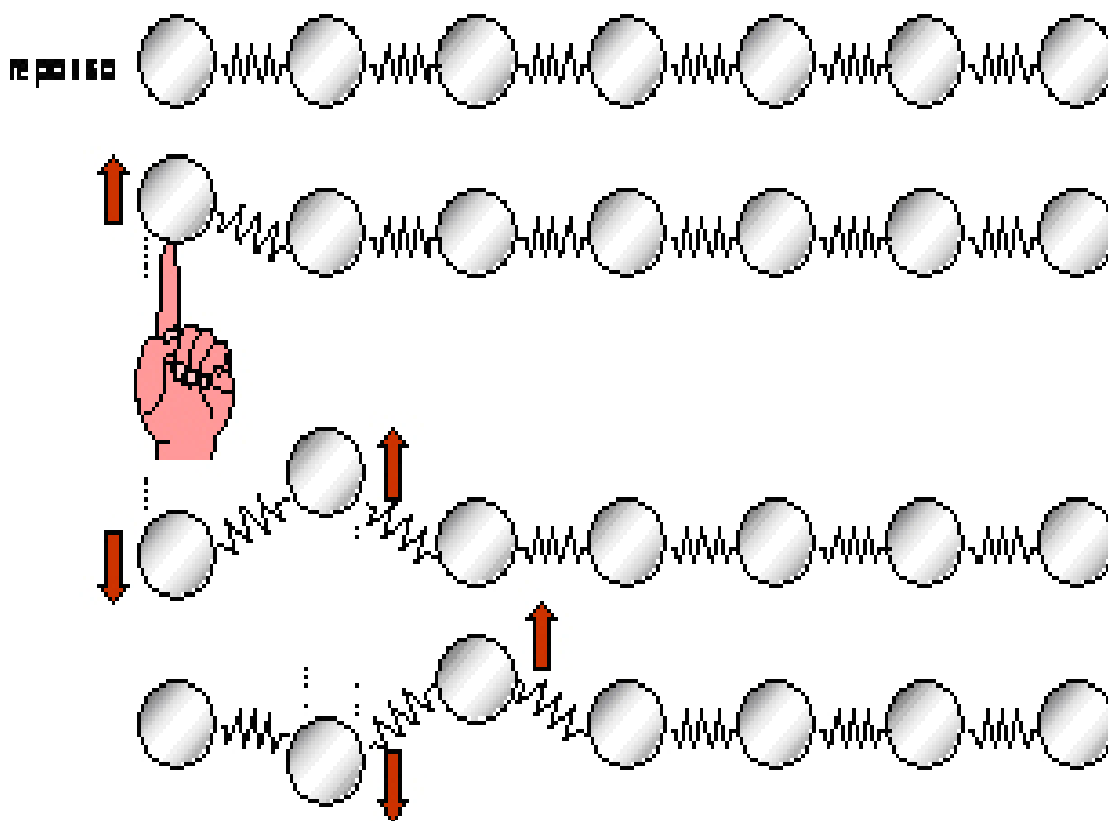
2.2.4.2 Ondas transversais (ondas de corte ou cisalhamento)

A onda é transversal quando as partículas do meio em que ela se propaga vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda nesse meio. Nesse caso, os planos de partículas no meio de propagação mantêm a mesma distância uns dos outros (ANDREUCCI, R. A., 2018).

Não se propagam nos líquidos e nos gases, pois nesses meios não existem ligações mecânicas (ANDREUCCI, R. A., 2018).

Sua velocidade de propagação é aproximadamente a metade da velocidade da onda longitudinal. Este tipo de onda é utilizado no ensaio com transdutores angulares (Figura 2) (ANDREUCCI, R. A., 2018).

Figura 2 - Propagação da onda transversal.



Fonte: Andreucci (2018).

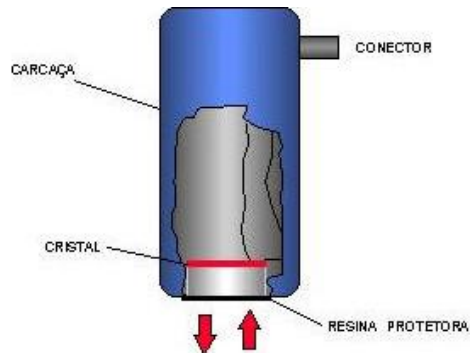
2.2.5 Transdutores

Os transdutores (Figuras 3, 4 e 5) são responsáveis pela emissão das ondas ultrassônicas. Dentro deles está localizado o cristal piezelétrico que vibrará quando estimulado por pulsos elétricos vindos de um dispositivo controlador de pulsos, localizado no aparelho de ultrassom (ANDREUCCI, R. A., 2018).

Os pulsos elétricos são levados aos transdutores pelos cabos coaxiais. São acessórios enquadrados como material de consumo, pois desgastam-se com facilidade se manuseados sem os devidos cuidados (ANDREUCCI, R. A., 2018).

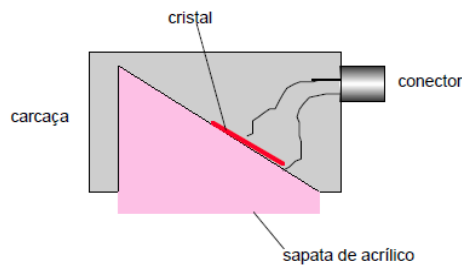
Existem no mercado transdutores de várias formas, tamanhos, ângulos, frequências e preços. Os transdutores são divididos em categorias que são: transdutores normais, transdutores de duplo cristal (S/E), transdutores angulares, transdutores de ondas superficiais e os especiais, para aplicações específicas, conforme (SANTIN, 2003).

Figura 3 - Transdutor Normal ou Reto.



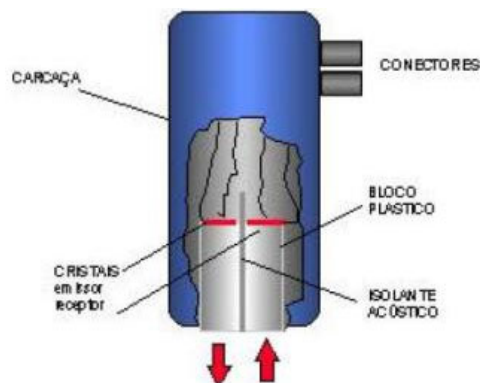
Fonte: Adaptado de Andreucci (2018).

Figura 4 - Transdutor Angular.



Fonte: Adaptado de Andreucci (2018).

Figura 5 - Transdutor Duplo-Cristal ou SE.



Fonte: Adaptado de Andreucci (2018).

2.2.6 Acoplante

Substância líquida ou pastosa, que tem por finalidade favorecer a transmissão das ondas ultrassônicas do transdutor para a peça em ensaio, não deixando ar entre os meios 1 e 2. A escolha do acoplante dependerá das condições superficiais da peça e do tipo de material que se inspecionará (OLYMPUS NDT, 2007).

Numa superfície com bom acabamento bastará uma camada de um óleo fino. Em superfícies com rugosidade excessiva será necessário um acoplante mais viscoso, podendo até ser necessária a utilização de gel ou graxa. Os acoplantes típicos são: água, óleo em geral, gel, graxa, vaselina líquida e em pasta ou uma mistura das duas, metil celulose (não para metais ferrosos). Deve-se verificar a compatibilidade entre o acoplante e o material a ser ensaiado, conforme Santin (2003).

2.2.7 Aparelho de ultrassom

São encontrados no mercado, vários tipos e modelos de aparelhos de ultrassom (Figura 6). Com o desenvolvimento da eletrônica e informática temos aparelhos capazes de fornecer excelentes resultados, com as facilidades de memória para arquivar os dados de calibração e resultados obtidos no ensaio (OLYMPUS, 2010).

Figura 6 - Aparelho EPOCH 6LT.



Fonte: Olympus (2019).

Podem ser acoplados às impressoras ou computadores, permitindo que os registros do ensaio sejam transferidos para os relatórios, com um maior número de informações, evitando falhas ou esquecimento do operador (OLYMPUS, 2010).

Basicamente os aparelhos de ultrassom apresentam os mesmos controles e ajustes, sendo diferenciados apenas no grau de modernização com recursos que agilizam o ensaio (FORCE INSTITUTE, 2000; SANTIN, 2003).

2.3 ULTRASSOM PHASED ARRAY

A técnica não destrutiva de ultrassom *Phased Array* emprega os mesmos princípios do ultrassom convencional, permitindo a detecção de descontinuidades interna nos mais diversos tipos de materiais em substituição ao ultrassom manual e à radiografia, com registro de 100% da área inspecionada.

Esta nova tecnologia de ultrassom originou-se na área médica e foi migrada para área industrial no início da década de 1980.

Na mesma época ocorreu o desenvolvimento de materiais piezo-compósitos permitindo assim a fabricação de transdutores *Phased Array* com forma complexa (OLYMPUS, 2010).

Algumas necessidades de inspeção estão diretamente relacionadas com as características da inspeção por ultrassom por *Phased Array*, que são (MARTIN, César C.; 2012):

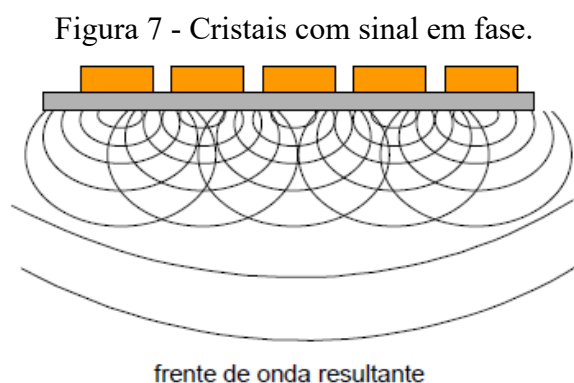
- **Velocidade:** A inspeção por ultrassom *Phased Array* possibilita varredura eletrônica, que possui velocidade de varredura uma ordem de grandeza maior que a varredura mecanizada e mais ainda que a varredura manual;
- **Flexibilidade:** Um único cabeçote *Phased Array* pode cobrir uma grande gama de aplicações diferentemente dos cabeçotes ultrassônicos convencionais;
- **Ajustes Eletrônicos:** Calibrações são realizadas pelo simples carregamento de um arquivo. Diferentes parâmetros de ajuste são possíveis pelo emprego de diferentes arquivos;
- **Cabeçotes de Pequenas Dimensões:** Para algumas aplicações, acesso é a principal dificuldade, e um pequeno cabeçote *Phased Array* pode equivaler a vários cabeçotes convencionais individuais.

2.3.1 Transdutores

Os transdutores *Phased Array* possuem vários (de 10 a 256 elementos) pequenos cristais, cada um ligado a circuitos independentes capazes de controlar o tempo de excitação (propagação de sinais) independentemente um dos outros cristais.

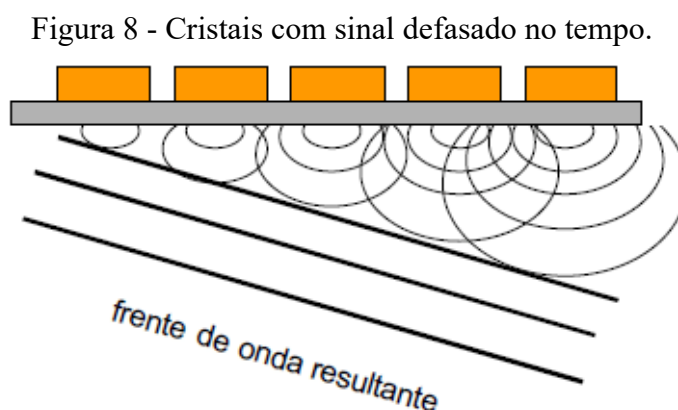
O resultado é a modificação do comportamento do feixe sônico emitido pelo conjunto de cristais ou pelo transdutor (MARTIN, César C.; 2012).

Na Figura 7 observa-se o conjunto de cristais operando em fase, isto é, o aparelho de ultrassom executa a excitação dos cristais todos no mesmo tempo, e o resultado é uma onda perpendicular ao plano da superfície, (ANDREUCCI, R. A., 2018).



Fonte: Adaptada de Andreucci (2018).

Já na Figura 8, o aparelho de ultrassom executa a excitação dos cristais de forma defasada, isto é, o tempo em que cada cristal é excitado é retardado no tempo, e o resultado é uma frente de onda angular à superfície conforme Andreucci (2018).



Fonte: Adaptada de Andreucci (2018).

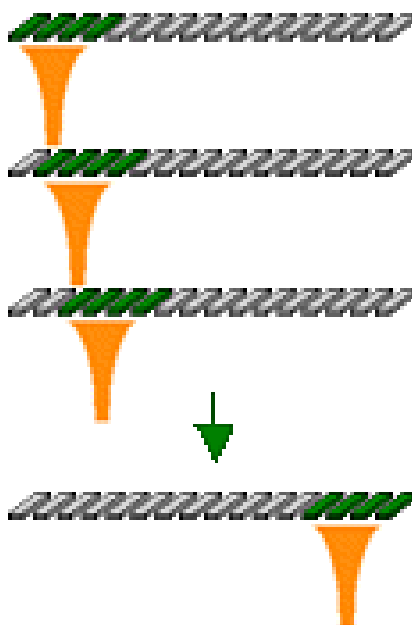
Para determinadas aplicações, a implementação da varredura eletrônica não necessita que todos os elementos do cabeçote sejam utilizados, (ANDREUCCI, R. A., 2018).

Nesse caso a unidade eletrônica emprega multiplexação eletrônica dinâmica para indicar e distribuir momentaneamente os elementos ativos entre todos aqueles existentes no transdutor (GINZEL, 2008).

2.3.2 Varredura eletrônica

A varredura eletrônica é ilustrada na Figura 9 e consiste em movimentar espacialmente o feixe sônico pela ativação de diferentes grupos de elementos (abertura) em diferentes momentos. Esse procedimento permite a substituição de varredura mecânica em um eixo pela varredura eletrônica. Geralmente esse conceito é empregado na inspeção “em linha” na fabricação de chapas, placas, barras e tubos e pode também ser usado na inspeção de soldas (GINZEL, 2008).

Figura 9 - Esquema da varredura eletrônica (grupos de elementos são sucessivamente ativados para movimentar o feixe ao longo do cabeçote).



Fonte: Ginzel (2008).

2.3.3 Focalização eletrônica

A focalização eletrônica (Figura 10), é baseada no emprego de retardos eletrônicos aplicados durante a emissão e a recepção ao longo de cada canal do cabeçote. Esses retardos têm efeito similar a lentes de focalização acústica do feixe, permitindo também a focalização em diferentes profundidades.

A focalização eletrônica permite o uso de apenas um cabeçote (*Phased Array*) ao invés da necessidade de vários cabeçotes convencionais (um único elemento) com diferentes distâncias focais. Essa aplicação é comum na inspeção de chapas grossas, geralmente maiores de 25 mm de espessura (MARTIN, César C.; 2012).

Na Figura 10 tem-se exemplos de geometrias de elementos de cabeçotes *Phased Array* lineares, no qual sua exposição esquemática visa aperfeiçoar a forma e o tamanho do feixe na localização do defeito esperado, melhorando ainda mais a probabilidade de detecção, além do dimensionamento dos defeitos críticos das inspeções volumétricas e a relação sinal-ruído em aplicações complexas (GINZEL, 2008).

Figura 10 - Esquema de focalização eletrônica (aplicação de leis de retardos eletrônicos é usada para focalizar o feixe).



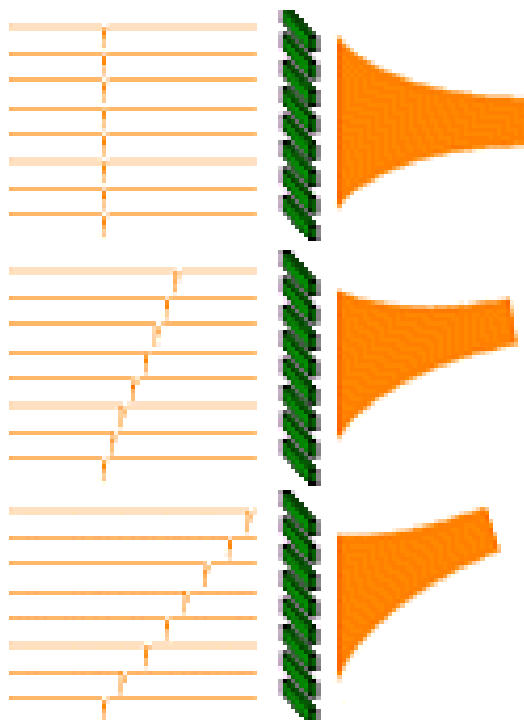
Fonte: Ginzal (2009).

2.3.4 Deflexão eletrônica

A deflexão eletrônica é ilustrada na Figura 11. Emprega as leis de retardo para obter a focalização eletrônica. Nesse caso, as leis são calculadas para obter feixe emitido com um ângulo de incidência que pode ser modificado simplesmente alterando-se a lei de retardo (todos os retardos aplicados a cada um dos canais concernentes) (GINZEL, 2008).

A focalização eletrônica permite que apenas um cabeçote seja utilizado (com múltiplos cristais - *Phased Array*). Adicionalmente a deflexão pode ser conseguida em alguns casos sem a necessidade do uso de uma cunha permitindo a inspeção de regiões restritas (geometria complexa) de peças (GINZEL, 2009).

Figura 11 - Deflexão eletrônica (leis de retardo aplicadas para defletir o feixe).



Fonte: Ginzel (2009).

A varredura, focalização e deflexão eletrônica podem ser combinadas para resolver problemas de inspeção de soldas, pois há uma mescla de informações na qual o avaliador poderá determinar com propriedade as indicações nas juntas soldadas (GINZEL, 2008).

A técnica de inspeção com matriz de transdutores (*Phased Array*) tem a capacidade de alterar as características acústicas normais do feixe ultrassônico produzido, podendo não só modificar o ângulo de refração do feixe como controlar a profundidade do ponto focal (GINZEL, 2008).

Essas características fazem com que a técnica de matriz de transdutores (*Phased Array*) possa ser utilizada na inspeção não intrusiva de vasos de pressão, portanto a avaliação de sua confiabilidade trará benefícios para a comunidade de inspeção de equipamentos (GINZEL, 2008).

2.3.5 Varredura básica e imagens

Durante a varredura com manipulador mecânico, Figura 12, dados são coletados com base na posição indicada por um codificador (*encoder*). Os dados são apresentados em diferentes vistas para interpretação (GINZEL, 2008).

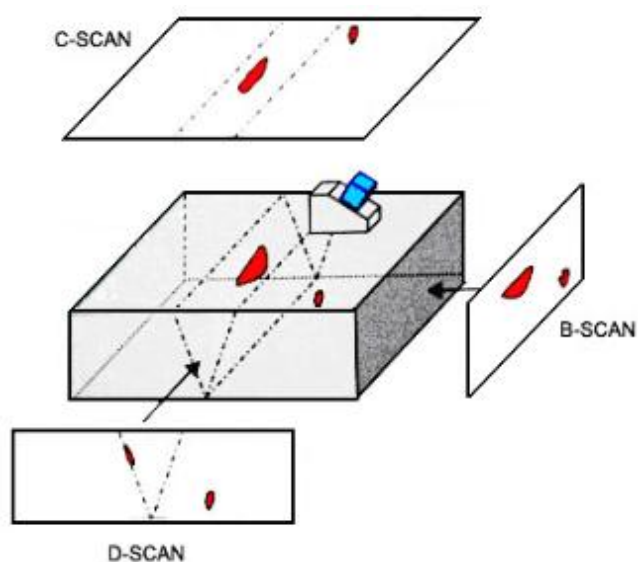
Figura 12 - Encoder.



Fonte: Ginzel (2009).

Tipicamente, sistemas *Phased Array* usam empilhamento de ecogramas (*A-scan*), também chamado *B-Scan*, de diferentes ângulos, tempos de trânsito e atrasos de tempo para cada cristal piezo-compósito (elemento) do cabeçote de matriz de transdutores (*Phased Array*), Figura 13 (GINZEL, 2009).

Figura 13 - Tipos de Mostradores.

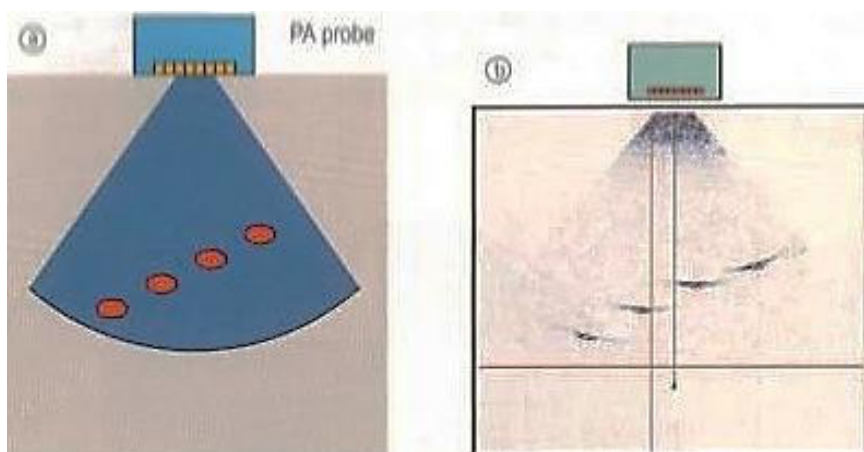


Fonte: Ginzel (2009).

O resultado da inspeção, apresentado em tempo real, contém o número total de sinais representados no modo *A-scan*, que foram obtidos para uma posição específica do cabeçote, mostrados em uma apresentação setorial ou *S-scan*, ou numa apresentação *B-scan*, varredura eletrônica (GINZEL, 2009).

O *S-scan* ou varredura eletrônica fornece uma imagem global da peça e uma rápida informação a respeito do componente e as possíveis descontinuidades detectadas na faixa do feixe selecionada para todos os ângulos e posições (Figura 14). O *S-scan* foi adaptado da área médica para atender os propósitos da inspeção industrial no qual foi adaptada facilmente (GINZEL, 2009).

Figura 14 - Detecção de quatro furos de broca laterais (a) Princípio da varredura setorial (b) Vista S-scan usando +30°.



Fonte: Ginzel (2008).

A apresentação dos dados na forma gráfica em vista 2-D da peça, conhecida como “*S-scan corrigida*”, torna fácil a interpretação e análise dos resultados de ultrassom. A apresentação *S-scan* apresenta os seguintes benefícios (GINZEL, 2008):

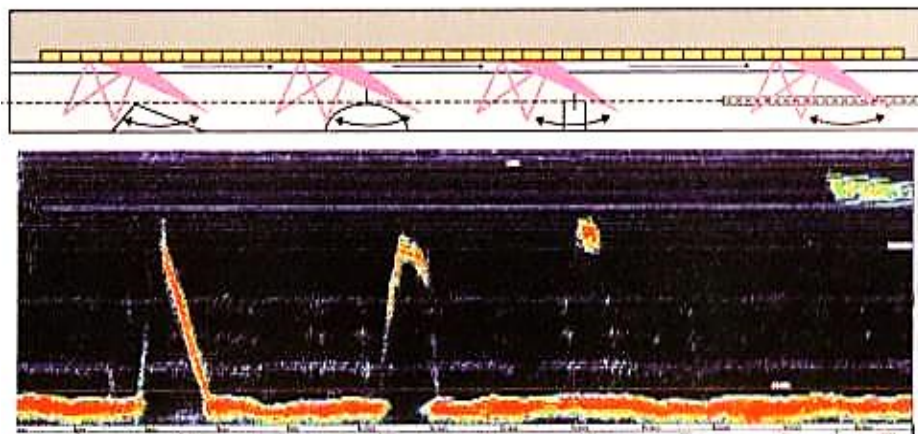
- Apresentação dos resultados durante a varredura;
- Representação da profundidade em verdadeira grandeza;
- Reconstrução volumétrica 2-D.

Vistas com recursos avançados podem ser obtidas pela combinação de varreduras linear e setorial com múltiplos-ângulos durante a movimentação da sonda (GINZEL, 2009).

Vistas *S-scans* combinadas com outras vistas possibilitam a visualização e reconhecimento das descontinuidades existentes, pois permitem verificar a morfologia das descontinuidades (GINZEL, 2009).

Na Figura 15 ilustra-se a detecção de descontinuidades artificiais e a comparação entre as dimensões das descontinuidades (incluindo forma) e os dados B-scan (GINZEL, 2008).

Figura 15 - Imagem avançada de descontinuidades artificiais empregando dados combinados: descontinuidades existentes e varredura executada (em cima) apresentação B-scan combinada (em baixo).



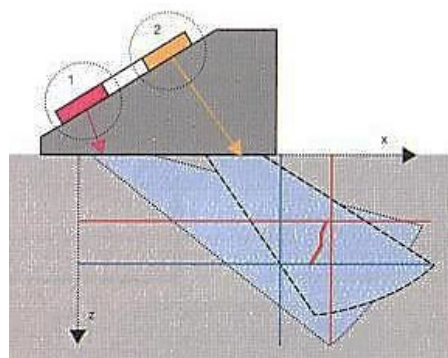
Fonte: Ginzel (2008).

Uma combinação de varreduras longitudinal e transversal pode ser útil para a detecção e o dimensionamento com pequena movimentação requerida do cabeçote (Figura 16) (GINZEL, 2008).

Nessa ajustagem a abertura ativa pode ser movida para otimizar os ângulos de detecção e dimensionamento. Sem dúvida um dos responsáveis pelo consumo de tempo durante a varredura da peça é a necessidade de movimentação transversal do cabeçote para cobrir a seção de interesse, e permitir o dimensionamento, quando trabalhando com cabeçote com ângulo fixo.

A possibilidade de combinação de vários ângulos num mesmo cabeçote minimiza podendo até eliminar em alguns casos a necessidade de varredura transversal (GINZEL, 2009).

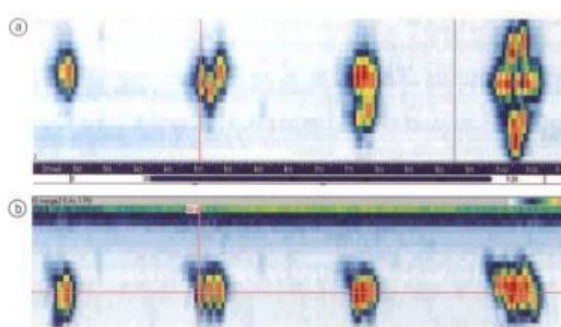
Figura 16 - Detecção e dimensionamento de descontinuidades mal orientadas pela combinação de ondas longitudinal e transversal com varredura setorial.



Fonte: Ginzel (2009).

Focalização cilíndrica, elíptica ou esférica do feixe apresenta uma melhor relação sinal-ruído (capacidade de discriminação) e uma menor divergência do feixe. Na Figura 17 ilustra-se a discriminação de agrupamentos de furos por um feixe cilíndricamente focalizado (GINZEL, 2009).

Figura 17 - Discriminação (resolução) de grupos de furos (a) vista de topo C-scan (b) vista lateral B-scan.

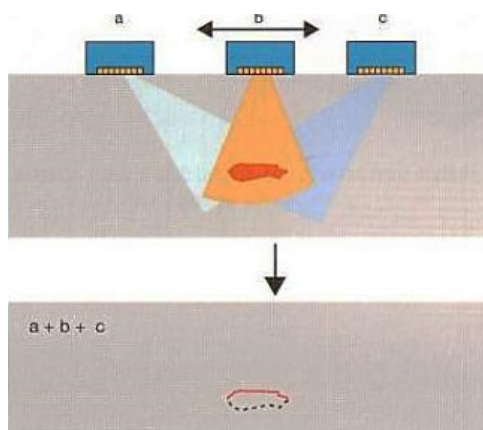


Fonte: Ginzel (2009).

Varredura eletrônica pode ser combinada com movimentação mecânica do cabeçote, e os dados combinados, em vista única (Figura 18). Esse recurso apresenta as seguintes vantagens:

- Alta redundância;
- Localização da descontinuidade;
- Plotagem precisa;
- Imagem do defeito.

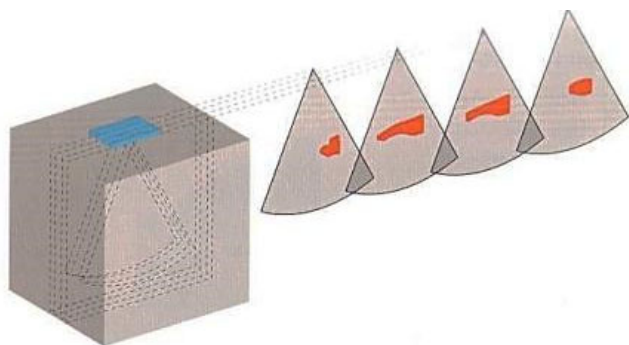
Figura 18 - Múltiplas varreduras e combinação dos dados para uma detecção com mais qualidade e discriminação das descontinuidades.



Fonte: Ginzel (2009).

Como visto na Figura 19, há diversos planos setoriais no volume inspecionado. Cada fatia representa uma seção da descontinuidade em um diferente plano. Essas seções podem ser comparadas a seções metalográficas obtidas durante o dimensionamento e caracterização da descontinuidade, no qual são utilizadas nas qualificações de soldagem e dutos submarinos (GINZEL, 2008).

Figura 19 - Múltiplas varreduras para melhor detecção/discriminação de descontinuidades.



Fonte: Ginzel (2009).

2.3.6 Aparelho de ultrassom *Phased Array*

Um dos aparelhos mais indicados para tais aplicações é o M2M Mantis, da Fabricante *Eddyfi Technologies* (Figura 20). O equipamento tem a capacidade de também realizar a inspeção por ultrassom convencional e ultrassom ToFD.

Figura 20 - Aparelho de ultrassom automatizado M2M Mantis.



Fonte: Eddyfi (2019).

2.4 ULTRASSOM TOFD

A técnica de inspeção ToFD (*Time of Flight Diffraction*), apesar de não utilizada nesta dissertação, é uma técnica muito importante na área de ultrassom e deve ser sempre citada (CARNEVAL, R. O *et al.*, 2007).

A técnica do ToFD (Figura 21), por trabalhar referenciada no nível de difração, proporciona alta sensibilidade ao ensaio e, embora seja uma técnica desenvolvida há muitos anos, teve sua aplicabilidade incrementada nos últimos 10 anos, principalmente pela computadorização dos sistemas de inspeção e maior aplicação de programas de Integridade Estrutural/Mecânica da Fratura (RICHTER, M. R. *et al.*, 2003).

Os programas de Mecânica da Fratura, ao invés de refletividade da descontinuidade, requerem informação da sua altura na direção da espessura, tornando a precisão de dimensionamento fator *sine qua non* para o melhor aproveitamento desta ferramenta.

Comparativamente às outras técnicas de dimensionamento de altura de descontinuidades, nenhuma tem demonstrado o grau de precisão apresentado pelo *Time of Flight Diffraction*, que para descontinuidades internas é da ordem de 0,5 mm e para descontinuidades superficiais na ordem de 1 mm, como já mostrou (CARNEVAL, R. O. *et al.*; 2007).

Figura 21 - Aparelho de ultrassom OmniScan MX2 com visualização no modo TOFD.



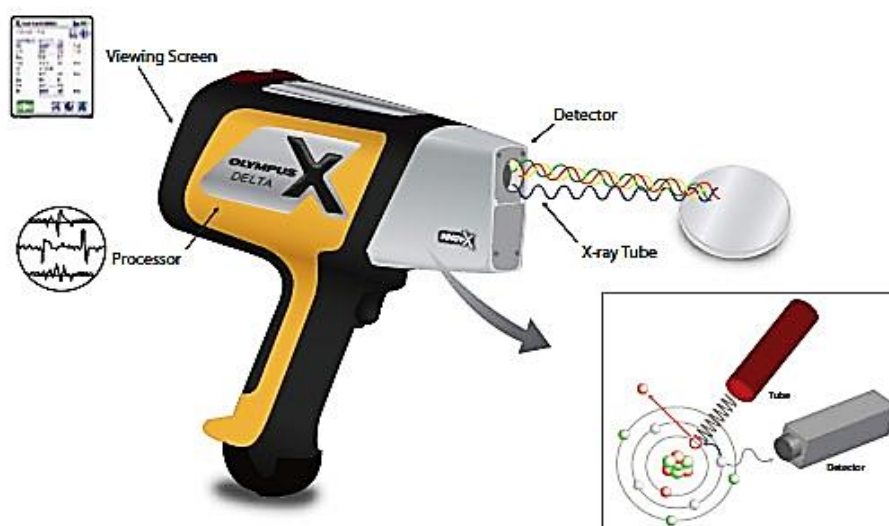
Fonte: Olympus (2019).

2.5 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (XRF)

Trata-se de uma técnica robusta e não destrutiva focada na obtenção da composição elementar de constituintes predominantes ou traços, em partes por milhão (*ppm*) (NAYAK, P. S. *et al.*, 2007).

A análise por XRF pode ter fins qualitativos/quantitativos e se baseia na medição de intensidades dos raios-X discriminantes emitidos por elementos da amostra, quando esta é excitada por partículas (elétrons, prótons ou íons), produzidos, nesse caso, através de tubos de raios-X, esquema à direita da Figura 22 (MELO JÚNIOR, 2007).

Figura 22 - Analisador portátil de ligas metálicas por XRF (DELTA, marca Olympus). À direita um esquema onde é possível ver os principais componentes deste equipamento.



Fonte: Olympus (2019).

Desde a validação de sua confiabilidade, feita na publicação de NAGATA *et al.*, (2001), a XRF passou a ser uma das técnicas mais empregadas, principalmente para aquelas áreas onde a obtenção de rápido perfil de constituintes metálicos/não-metálicos é indispensável.

No entanto, deve-se dizer que a determinação analítica de metais e suas ligas pode ainda se valer das técnicas colorimétricas, espectrometrias de absorção atômica, de fluorescência atômica, de emissão atômica e de massa (SKOOG *et al.*, 2009).

Mas pelas características da amostra, indicou-se fortemente o emprego no material do costado do vaso de pressão (CDP analisado neste trabalho) fosse a técnica de Fluorescência de Raios-X. Os analisadores portáteis oferecem a praticidade de serem utilizados *in loco*, permitindo a obtenção de um resultado imediato, com a precisão e a qualidade de um laboratório.

2.6 ULTRASSOM *PHASED ARRAY* – TFM/FMC

Neste tópico, serão apresentados em detalhes a técnica *Full Matrix Capture* (FMC) e a *Total Focusing Method* (TFM) em testes não destrutivos por ultrassom de fase (PA UT), que acabam por auxiliar no melhoramento do ultrassom feito pelo *Phased Array* convencional.

Pois, como já mencionado, a principal limitação do *Phased Array* (somente) para avaliação de trincas é que a maior parte da trinca se comporta como um refletor especular (com exceção da ponta), produzindo um eco significativo apenas quando a direção do feixe é perpendicular ao trajeto da trinca (RICHTER, M. R. *et al.*, 2003).

Em consequência disso o caminho de propagação da trinca normalmente não pode ser seguido em toda a sua extensão com uma imagem de setor único (S-Scan) (CAMACHO, J.; *et al.*; 2018).

Depois que os dados dessa matriz são coletados, o sinal é processado usando o Método de Foco Total (TFM) para produzir uma imagem (ou quadro) em que cada pixel é uma lei focal dedicada e focada na região de interesse (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021).

Em seguida, uma imagem de baixa resolução é construída por formação de feixe de atraso e soma, e o processo é repetido emitindo com um elemento diferente. Após todos os elementos da matriz terem sido utilizados como emissores, o conjunto de imagens de baixa resolução é calculado para obter uma imagem de alta resolução focada dinamicamente na emissão e na recepção, o que poderia ser considerado o padrão ouro para os formadores de feixe DAS. O conjunto de todos os sinais adquiridos durante o processo é denominado *Full Matrix Capture* (FMC) (CAMACHO, J.; *et al.*; 2017).

Portanto, o *Full Matrix Capture* (FMC) é um processo de aquisição de dados em que cada elemento do *Array* é usado sequencialmente como um único emissor e todos os elementos do *Array* são usados como receptores, criando uma matriz de dados (ZHANG J.; *et al.*; 2010.)

O FMC tem a vantagem de adquirir grandes quantidades de dados que podem ser reutilizados posteriormente de várias maneiras (ZETEC, 2019). O TFM é particularmente útil para reconstruir os dados para caracterização de defeitos superficiais, já que supera a diretividade do feixe, limitação de PA, emitindo com um único elemento e recebendo individualmente de todos eles (HOLMES C.; *et al.*; 2005).

Ou seja, em relação ao *Phased Array* puro e simples (convencional), o TFM tem a vantagem de não ter uma direção de propagação preferencial, muito pelo contrário, a combinação de emissões *omnidirecionais*¹ com todos os elementos da matriz garante que um defeito planar seja detectado independentemente de sua orientação, desde que seu ângulo de inclinação e distância vertical em relação à matriz sejam compatíveis para receber alguma reflexão especular. (CAMACHO J.; *et al.*; 2009.)

Além disso, o foco dinâmico na emissão e recepção evita a complexidade de localizar precisamente o foco de emissão de PA para acompanhar o crescimento da trinca ou, alternativamente, sacrificar a resolução lateral ao reduzir a abertura de emissão para aumentar a profundidade de campo.

Embora o TFM possa fornecer informações precisas do caminho de propagação da trinca e orientação, a estimativa do tamanho da trinca, com base em métodos convencionais de queda de amplitude, pode não atender a demanda em alguns casos muito específicos (WILCOX P.D. *et al.*; 2006). No entanto, tais técnicas têm sido utilizadas para esclarecer as características de trincas geradas por vários modos de falha, inclusive por fadiga e CsT. Inclusive em trabalhos recentes, tais como o de (CAMACHO, J.; *et al.* 2017) propõe-se seu emprego para avaliação de trincas com matrizes e investigação de sua aplicação ao monitoramento *online* da propagação de trincas em testes de fadiga (CAMACHO, J.; *et al.* 2017).

Testes de propagação de trinca por fadiga são realizados para caracterizar a resistência do material de amostras à extensão de trinca estável sob condições de carregamento cíclico (ASTM Committee E08.06 on Crack Growth Behavior. 2013).

O novo método TFM é usado para obter a melhor imagem possível do caminho de propagação da trinca e orientação, não localizando com precisão apenas a posição das pontas. Portanto, ainda são necessárias melhorias na velocidade de inspeção, calibração, validação e no suporte adequado à tecnologia da informação (TI) antes de se tornar totalmente viável (ZETEC, 2019).

Sendo assim, tanto o FMC e TFM são recentes avanços tecnológicos em testes de *Array* em fases. Essa tecnologia já está disponível, mas ainda exige maior uso e pesquisas (tais como

¹ Refere-se à noção de ter as mesmas propriedades em todas as direções. Aparelhos omnidirecionais incluem: (1) Antena omnidirecional, uma antena que emite igualmente em todas as direções, (2) Câmera omnidirecional, uma câmera que pode ver 360 graus à sua volta, (3) Lanterna omnidirecional, uma lanterna que emite luz em todas as direções (4) Microfone omnidirecional, um microfone que capta o som de todas as direções e (5) VOR (VHF Omnidirectional Range), um equipamento eletrônico usado na navegação aérea.

esta) para um refinamento considerável para torná-la implementável industrialmente (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021).

2.6.1 Inspeção de ultrassom

As etapas básicas de uma inspeção de ultrassom são (RICHTER, M. R. *et al.*, 2003):

- Reunir dados úteis e completos - a regra geral é: faça uma vez, faça bem-feito. Verifique se todas as regiões / setores da solda ou do tubo estão cobertos pela inspeção;
- Depois que os dados são adquiridos, transfira os dados para o software de geração de imagens para visualizar os defeitos em uma imagem com código de cores - a imagem é uma parte importante da identificação dos defeitos;
- Produzir um relatório técnico conclusivo.

2.6.2 Terminologia

É importante ter-se um entendimento geral da terminologia ao longo deste trabalho antes de apresentar as técnicas FMC e TFM (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021).

Lei Focal: Um conjunto de atrasos no qual descreve um sinal individual de cada elemento deve ser compensado (ou atrasado) para que uma interferência construtiva seja criada ao longo de um determinado caminho e ponto focal.

Foco de profundidade dinâmica (DDF): Uma variação de uma lei focal. Um único ponto focal ainda é usado para pulsar, mas durante a recepção, as leis de atraso são ajustadas dinamicamente para focalizar em várias profundidades ao mesmo tempo.

Scan resumido: Processamento tradicional de *Array* em fases, em que os sinais de cada elemento são somados usando uma lei focal para gerar um A-Scan.

Scan Elementar: Processamento tradicional de *Array* em fases, em que os sinais de cada elemento são somados usando uma lei focal para gerar um A-Scan.

Captura de matriz completa (FMC): Uma tecnologia de coleta de dados. Cada elemento é pulsado em sequência e os dados elementares do A-Scan são coletados para cada combinação de elementos pulsantes e receptores.

2.6.3 Ultrassom Phased Array – TFM

A técnica de ultrassom teve seus primeiros avanços na área médica, para detecção de tumores e obstetrícia, por exemplo. Em meados dos anos 1980 migrou para a área industrial, sendo empregada inicialmente na inspeção de vasos de pressão nuclear e componentes de turbinas de baixa pressão (LAFONTAINE, G.; *et al.* 2000).

Os avanços no desenvolvimento e fabricação de sondas com materiais piezocompósitos e melhora na capacidade de processamento computacional permitiram o desenvolvimento de sistemas Phased Array (PAS), que já são largamente utilizados na área médica (ZETEC, 2017).

2.7 CARACTERÍSTICAS TFM

2.7.1 Características do sinal

O Método de Focalização Total (TFM) requer varreduras de amplitude para uma reconstrução coerente dos sinais (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021).

Supondo que as varreduras de amplitude estejam adequadas, a reconstrução pode ser realizada no local durante a coleta de dados ou pós-processada durante a análise.

No entanto, o TOFD (*Time of Flight Diffraction*) não suporta esta tecnologia no momento.

2.7.2 Parâmetros dos métodos TFM e FMC

Uma das vantagens da técnica FMC é que um único conjunto de dados pode ser reutilizado várias vezes no método TFM para construir diferentes tipos de resultados conforme necessidade do processo (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021).

Cada aplicação do TFM pode ter parâmetros diferentes a cada reconstrução de dados:

- *Um novo local do quadro;*
- *Um novo tamanho de quadro;*
- *Um modo de reconstrução de caminho diferente;*

É possível reconstruir o caminho direto, mas também os caminhos indiretos, convertidos, e em qualquer combinação (ZETEC, 2017).

Diferentes quadros TFM podem ser mesclados volumetricamente para aprimorar a capacidade de detecção e dimensionamento, conforme Figura 23 (ZETEC, 2017).

Figura 23 - Quadros TFM.



Fonte: Zetec (2017).

2.7.3 Capacidade de focagem

A focalização é quase total ou algo muito próximo de 100%. Será explicitado abaixo o porquê não conseguimos a focalização total (ZETEC, 2017).

Teoricamente, o foco total não é possível. Seguem suas características:

- Cada pixel em um quadro TFM é criado usando uma lei focal dedicada;
- Isso resulta em 1 ponto focal por pixel;
- Em teoria, cada pixel é então perfeitamente focalizado.

No entanto, na prática, as leis da física ainda se aplicam - o comprimento do campo próximo em cada material define a profundidade máxima em que um feixe sonoro pode ser focado - um feixe não pode ser focado além do campo próximo (ZETEC, 2017).

Os parâmetros a seguir são sempre verdadeiros e devem ser considerados (ZETEC, 2017).

- O tamanho da abertura da sonda determina a profundidade do campo próximo;
- Nenhuma sonda pode focalizar além da profundidade do campo próximo;
- Após a profundidade do campo próximo, um pixel ainda terá conteúdo, mas será essencialmente semelhante ao Array em fases regular e não focado.

As leis da física sempre se aplicarão seguindo as relações vistas nas expressões (2) e (3), que se encontram logo abaixo (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021):

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (2) \quad \text{ou} \quad N = \frac{D^2 * F}{4V} \quad (3)$$

Onde:

N = Profundidade do campo próximo

D = Abertura ou diâmetro do elemento

F = Frequência

λ = Comprimento de onda = V/F

V = Velocidade do som na média

2.7.4 Capacidade de cobertura

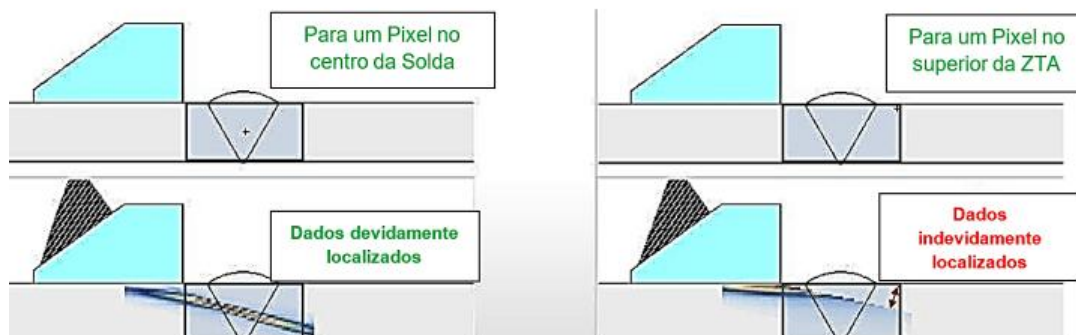
Deve-se ser lembrado que cada pixel em um quadro TFM é criado usando uma lei focal dedicada. Isso resulta em uma área retangular completa com dados de ultrassom e, em teoria, todo pixel é então perfeitamente posicionado (ZETEC, 2017).

Os feixes ultrassônicos são limitados à quantidade de direções que podem ser aplicadas. A quantidade de direções máxima do feixe é uma função da propagação do feixe de uma abertura de elemento único (RICHTER, M. R. *et al.*, 2003).

Após esse ângulo máximo de direções, as leis focais ainda podem ser calculadas, mas o feixe não cobre realmente a área esperada. Isso leva à situação em que os pixels contêm dados relacionados a um local totalmente diferente (ZETEC, 2017).

No exemplo abaixo (Figura 24), os dados estão localizados corretamente no quadro devido à sonda e à configuração da cunha. No exemplo à direita (Figura 24), o defeito está localizado incorretamente na HAZ (*Heat-Affected Zone*) – zona afetada pelo calor (ou Zona Termicamente Afetada) (ZETEC, 2017).

Figura 24 - Exemplo de capacidade de cobertura.



Fonte: Adaptado de Zetec (2017).

2.7.5 Impacto dos parâmetros do quadro na amplitude

Vários fenômenos podem afetar a precisão da leitura de amplitude em um determinado pixel TFM dentro de um quadro:

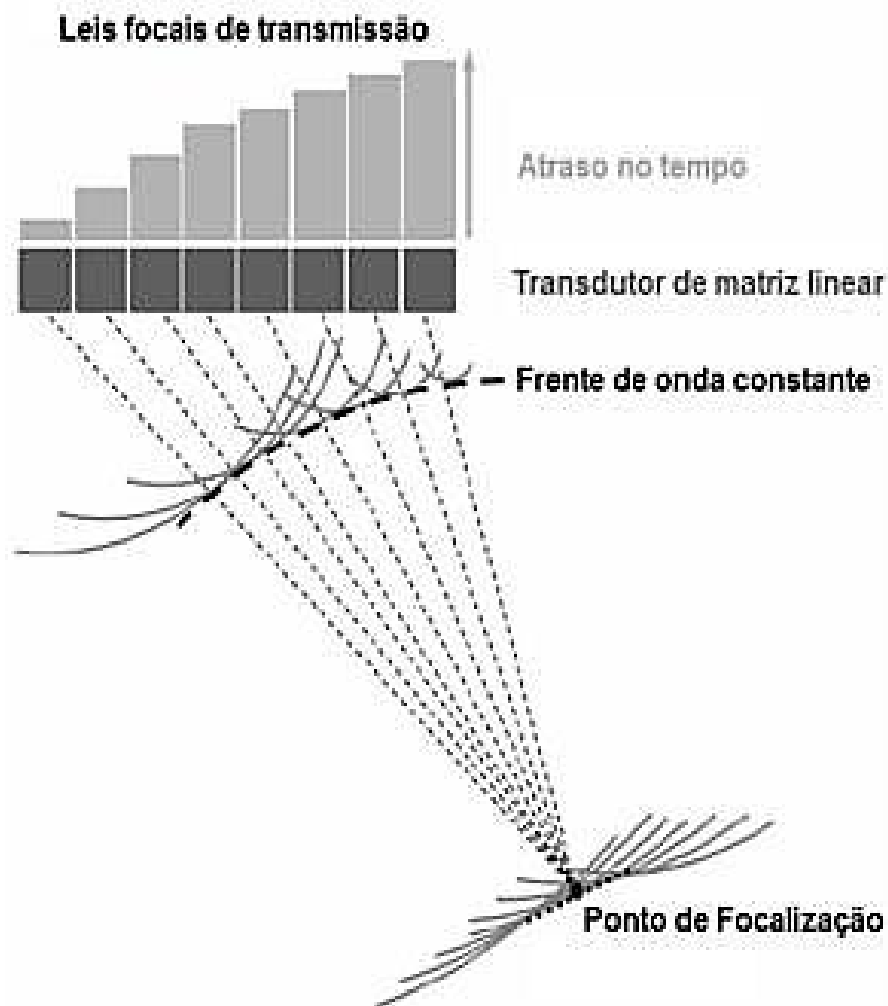
- Efeito da resolução do quadro versus frequência da sonda;
- Efeito no sinal da interface.

2.7.6 Funcionamento

Um transdutor Phased Array é uma sonda com vários elementos piezoelétricos que são excitados por pulsos com atraso no tempo de disparo (*time-delay*). Esse atraso é pré-determinado para determinar a forma como o feixe ultrassônico irá varrer a área de interesse.

Dessa forma, as frentes de onda de cada sinal atrasado resultam em padrões de interferência de Huygens. Quando esses atrasos são ajustados o Phased Array pode direcionar e concentrar os raios ultrassônicos (WOOH, 1999). Esse processo é ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Gráfico mostrando a lei focal aplicada para focar feixe em determinado ponto.



Fonte: Portal M2M do Brasil (2018).

O sistema *Phased Array* apresenta como vantagens (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021):

- Diminuição de configuração e tempo de inspeção;
- Aumento da confiabilidade na varredura;
- Detecção de defeitos com orientação aleatória em diferentes profundidades usando a mesma sonda;
- Diminui exposição do operador a radiação quando comparado a outras técnicas de inspeção não destrutiva;
- Melhor capacidade de inspeção e dimensionamento de soldas;
- Dimensão da sonda reduzida;
- Permite inspecionar componentes com geometria complexa;
- Gera imagens em tempo real, facilitando a inspeção;
- Melhora da relação sinal-ruído.

A principal característica do PA é a excitação controlada por computador, dada por leis focais ou leis de atraso de acordo com o tipo de onda, uso de cunha, profundidade e direção de foco desejado. O feixe gerado é resultado de interferências construtivas e destrutivas, conforme a necessidade (WOOH, 1999).

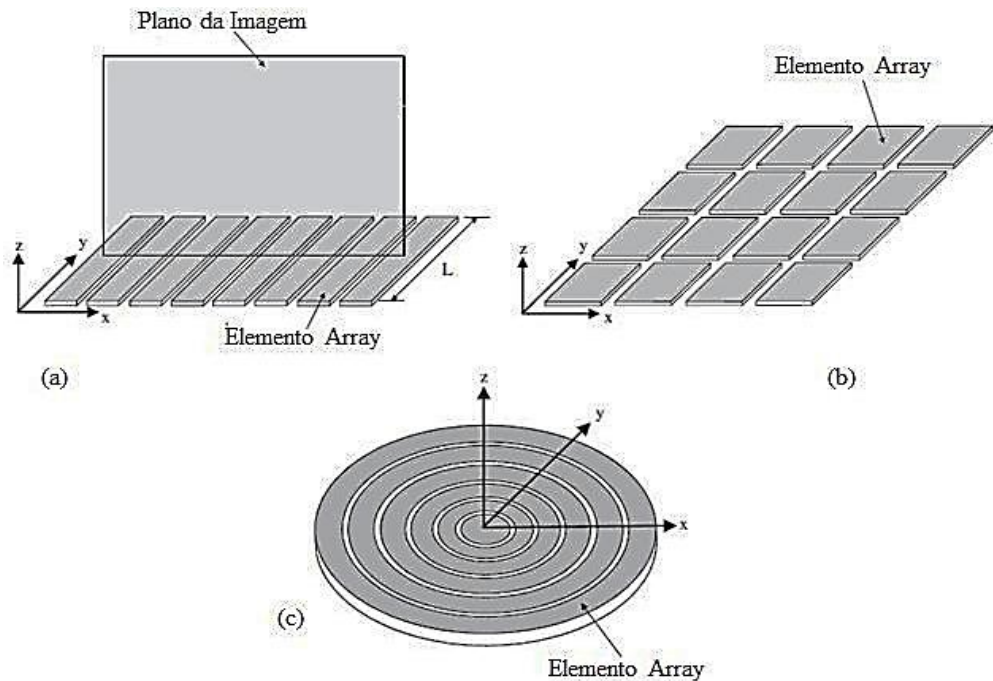
Para um feixe focado, por exemplo, o feixe é ajustado para uma interferência construtiva. As leis de atraso também se aplicam à recepção nos elementos, de modo que os sinais são somados formando um único pulso a ser lido (DRINKWATER, 2006).

A geometria dos transdutores na sonda array pode ser classificada em unidimensional (1-D), bidimensional (2-D) ou anular. A sonda array linear (1-D) é a mais utilizada na indústria (DRINKWATER, 2006).

Esta é apresentada na Figura 26 (a). Seus elementos são distribuídos em uma única direção (direção x na Figura 26). Para o array 2-D mostrado na Figura 26 (b) os elementos são distribuídos de forma matricial no plano x-y, sendo esse tipo de sonda o mais utilizada na área médica (DRINKWATER, 2006).

Já a forma anular, representada na Figura 26 (c), permite a variação na profundidade de focalização, mas não permite essa variação para a direção do feixe (DRINKWATER, 2006).

Figura 26 - Geometria da sonda *Phased Array*; (a) linear; (b) matricial; (c) anular.



Fonte: Adaptado de Drinkwater (2006).

A sonda *Array* linear, que foi utilizada neste trabalho, apresenta vantagens tais como fácil fabricação, fácil aplicação em cunhas, contato direto e imersão, além de relativo baixo custo (DRINKWATER, 2006).

As dimensões dos elementos (Figura 27) devem ser conhecidas para permitir que o equipamento realize os cálculos necessários, aplicando as leis físicas e relações previstas pela expressão (4), logo abaixo.

A abertura ativa, por exemplo, é um parâmetro necessário para chegar à profundidade de foco e lei de atraso. Ela é o comprimento dos elementos excitados para a geração de um pulso e é dada por (OLYMPUS, 2010):

$$A = ne + g(n - 1) \quad (4)$$

As variáveis, indicadas na Figura 26, correspondem a:

A – Abertura ativa;

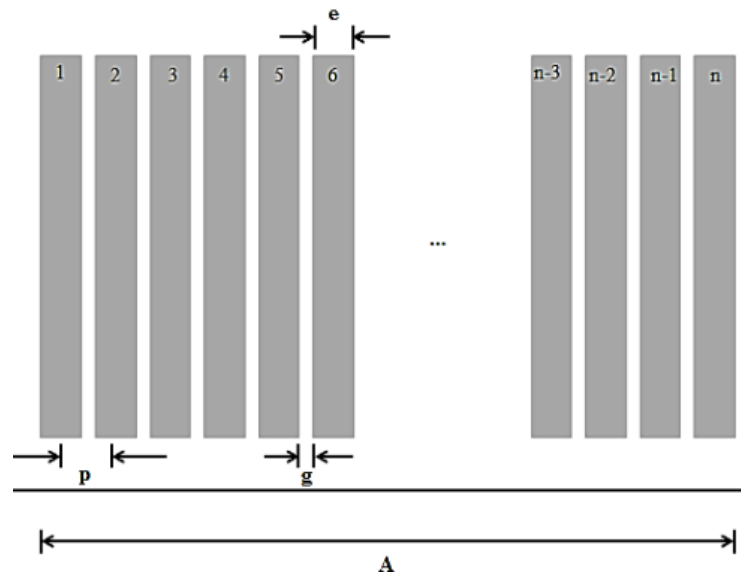
n – Número de elementos ativos;

e – Largura de um elemento;

g – Distância entre dois elementos adjacentes;

p – (pitch) distância entre o centro de dois elementos vizinhos - não é usado na equação.

Figura 27 - Geometria interna de uma sonda array linear.



Fonte: Olympus (2010).

2.7.6.1 Formas de Visualização

O sistema *Phased Array* exibe imagens dos componentes inspecionados em tempo real. Os principais modos de exibição apresentados nos equipamentos são A-scan, B-scan, C-scan e S-scan, conforme Figura 28 (RAWLINGS, 2000; KUNDU, 2007; OLYMPUS, 2010).

A-Scan

É dada pela gravação do sinal ultrassônico em função do tempo para uma determinada localização do receptor (OLYMPUS, 2010).

Permite a obtenção da profundidade e de algumas informações sobre o tamanho do defeito, obtidas da amplitude do sinal. Assim, exibe a amplitude do pulso ultrassônico *versus* o tempo de percurso (TOF) ou caminho ultrassônico (forma de onda) (OLYMPUS, 2010).

B-Scan

O B-scan é uma série de A-scan empilhados. Durante a varredura, o transdutor é movimentado por uma linha sobre a superfície da amostra, sendo que o sinal gravado é plotado contra dois parâmetros, tempo e posição da varredura.

É gerada uma imagem 2-D da seção transversal da amostra, normal à superfície, em que o tempo de percurso é proporcional à sua profundidade (OLYMPUS, 2010).

C-Scan

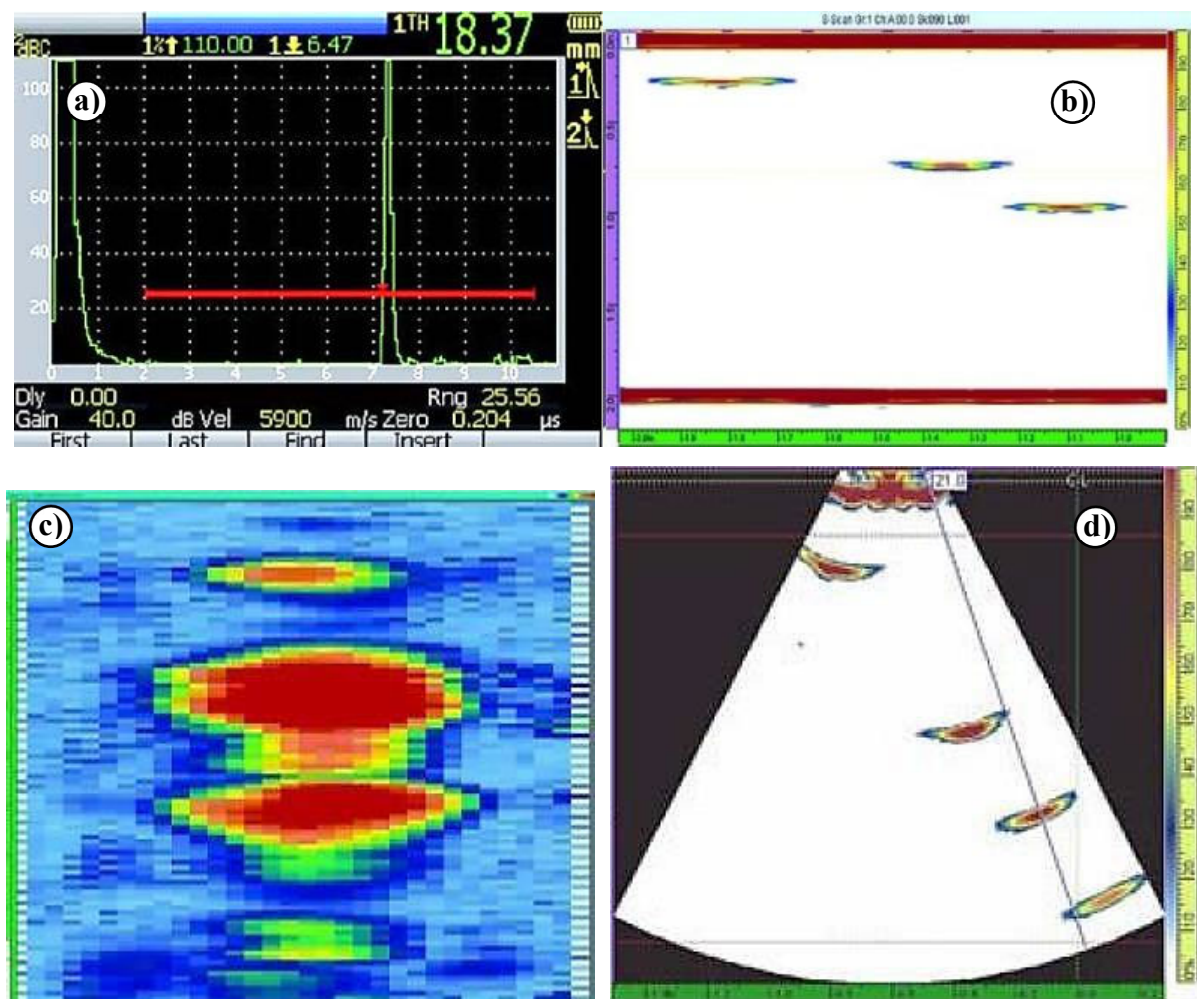
Nesse caso, o transdutor se move sobre um plano paralelo à superfície da amostra, numa varredura retilínea (OLYMPUS, 2010).

Assim, o sinal de pico é plotado como função das posições x e y. Resulta em uma visualização 2-D de um plano da amostra. Somente a máxima amplitude de cada ponto é projetada para representar o plano (OLYMPUS, 2010).

S-Scan

Trata-se de vários A-scans que varrem um intervalo angular com uma mesma distância focal. O eixo vertical indica profundidade, mas sua representação pode ocorrer com diferentes valores neste eixo (Figura 27) (OLYMPUS, 2010).

Figura 28 - Tipos de Visualização com o sistema phased array. (a) A-Scan; (b) B-Scan; (c) C-Scan; (d) S-Scan.



Fonte: Olympus (2010).

2.7.7 Método de Focalização Total (TFM)

Essa é uma das formas de se conseguir imagens com o *Phased Array*. O TFM trata-se de um dos mais eficientes algoritmos para obtenção de imagens, que usa todos os elementos do array para obter os *pixels* de imagem resultando em altas resoluções (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021). A técnica consiste em pós-processamento de dados que são capturados por FMC – *Full Matrix Capture* – procedimento no qual são gravadas todas as formas de ondas possíveis para as combinações de elemento transmissor com o receptor (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021). Através de uma sonda *Array* linear um elemento emite e o sinal recebido por todos os elementos é gravado, em seguida outro elemento transmite e o sinal é gravado novamente por todos os elementos. Isso se repete até todos os elementos terem emitido sinal, resultando no FMC (HOLLOWAY, P. *et al.*, 2021).

Desse modo, a técnica FMC fornece a maior quantidade de informações que está disponível a partir de um sistema de *Phased Arrays*. (SCHMEER Jr., 2015).

O modo de captura por FMC tem como vantagens o fato de permitir que esse conjunto de dados seja aplicado em qualquer algoritmo de imagem e, com isso, possibilita a obtenção de imagens que consumiriam muito tempo ou até mesmo não poderiam ser geradas em tempo real pelo equipamento do *Phased Array* (DRINKWATER, 2013).

Após a gravação de dados através do FMC, pode-se aplicar o método de obtenção de imagem por TFM, em que a intensidade dos *pixels* de imagem é dada por meio do resultado da expressão (5), logo abaixo (DRINKWATER, 2013):

$$I(x, z) = \text{abs} \left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}(t_{x,z}^{ij}) \right| \quad (5)$$

Sendo $I(x, z)$ a intensidade dos pixels de imagem, $h_{ij}(t_{ij})$ sendo a magnitude do sinal no tempo gasto para o sinal sair do elemento emissor i e chegar ao receptor j . Sabendo disso, agora, aplicando-se na expressão (6), onde c é a velocidade da onda longitudinal, x_i e x_j são as localizações dos elementos i e j no eixo x , tem-se o que se vê abaixo (DRINKWATER, 2013):

$$t_{x,z}^{ij} = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + z^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + z^2}}{c} \quad (6)$$

Essa técnica também reduz os ruídos elétricos gerados ao longo do processo de geração e aquisição dos sinais, permitindo que o ruído a ser analisado seja indício de algo estrutural do material (PEREIRA Jr.; 2015).

2.8 TIPOS DE VARREDURA

A escolha da aplicação de determinados tipos de varredura leva em consideração a geometria e as descontinuidades do material a ser inspecionado, bem como a capacidade do aparelho de ultrassom. Para formar os diferentes tipos de varredura, leis focais são aplicadas nos elementos ativos, resultando em defasagens combinadas a cada novo pulso (FERREIRA, 2013). Algumas formas de varredura são descritas a seguir e indicadas na Figura 29.

- ***Varredura linear (eletronic scanning)***

Nessa varredura os elementos ativos transladam ao longo do comprimento da sonda sob a mesma lei focal e o ângulo do feixe permanece constante (OLYMPUS, 2010).

- ***Varredura angular (sectorial scan)***

Neste caso o feixe varre um intervalo angular de interesse para uma determinada profundidade. A lei focal muda as defasagens para cada novo disparo permitindo alterar o ângulo de inspeção (OLYMPUS, 2010).

- ***Profundidade dinâmica com focagem***

A varredura foca em diferentes profundidades, em que a lei focal muda a orientação na recepção para cada uma das profundidades (OLYMPUS, 2010).

Figura 29 - Formas de varredura com o Phased Array.



Fonte: Olympus (2010).

2.9 EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica (EA) é um método de ensaio não destrutivo (END) que detecta diversas falhas, como: trincas, vazamentos, processos corrosivos, descargas parciais, entre outros. Para tal, sensores são instalados na estrutura, captando informações das ondas mecânicas elásticas geradas quando uma irregularidade surge ou se propaga no material (FILIPPIN, C. G. *et al.*, 2017).

O princípio de detecção de descontinuidades através do ensaio de Emissão Acústica (EA) está baseado no fato de que a presença das mesmas gerar uma região de concentração de tensões no material onde, em função de sua morfologia e carregamento aplicado, o nível de tensão mecânica atinge valores superiores à tensão de escoamento do material, causando deformação plástica e/ou crescimento localizado destas trincas em porções das extremidades do corpo (FILIPPIN, C. G. *et al.*, 2017).

Esta mudança de estado do material gera ondas elásticas transientes que se propagam de forma volumétrica e com velocidades conhecidas em materiais isotrópicos.

Este fenômeno assemelha-se ao pulso ultrassônico. O pulso emitido pelo material, que viaja pela estrutura, é capturado por transdutores e transformado em um sinal elétrico que é parametrizado pelo sistema de EA (FILIPPIN, 2017). As informações são então processadas por um *software* de EA, gerando indicadores sobre o tipo de falha e a sua localização, possibilitando com isso o uso pontual de outros métodos de inspeção e de ENDs para avaliar a estrutura. Desta forma, a EA é capaz de detectar a propagação de descontinuidades internas, subsuperficiais ou que aflorem à superfície da estrutura (FILIPPIN, 2017).

As principais vantagens da EA em relação as outras técnicas de ENDs são a capacidade de inspecionar a estrutura em sua totalidade, a possibilidade de monitoramento contínuo em serviço, a execução relativamente rápida, diversidade de materiais e a intrusão mínima no processo. Essa combinação torna a EA uma ferramenta com potencial para diminuir os custos do plano de inspeção e manutenção das plantas industriais uma vez que podemos analisar a integridade sem a parada do equipamento ou processo.

A tecnologia por trás da EA teve seus primeiros passos abordados no trabalho de doutorado de Joseph Kaiser (1950) considerado por muitos o pai dessa técnica. Desde então, diversos outros trabalhos foram desenvolvidos na área, possibilitando a criação dos sensores e *softwares* necessários para a aplicação da metodologia de ENDs por EA em campo (FILIPPIN, 2017).

2.9.1 Terminologia

Para o método de ensaio por EA (emissão acústica), assim como para outros métodos de engenharia ou científicos, a terminologia que padroniza o uso de palavras simples ou compostas, entre textos e documentos sobre o mesmo tema, e empregada como ferramenta para auxiliar a interpretação dos mesmos.

A seguir são definidos alguns termos essenciais à compreensão dos textos aqui expostos. Apesar de alguns termos coincidirem com os apresentados por normas nacionais e internacionais, o glossário aqui apresentado foi concebido para o melhor entendimento da técnica de EA (Norma ABNT NM-302, 2019).

Acoplante: meio interposto entre o sensor e a peça em ensaio para melhorar a transmissão de energia acústica durante o monitoramento;

Amplitude de sinal: maior pico de tensão obtido pela forma de onda do sinal de um evento de emissão, ver Figura 30;

Área/Região examinada: região de uma estrutura que é monitorada por EA;

Atenuação: perda na amplitude do sinal de EA, em decibéis por unidade de distância;

Atividades de EA: ocorrência dos sinais de EA;

Bloco de calibração: peça de metal de um material homogêneo isotrópico elástico (descrita na seção 5.2 da Norma ABNT NBR NM 341), na qual se coloca uma fonte simulada de EA, um sensor de referência e o sensor a verificar;

Canal de EA: montagem em linha contendo um sensor, um pré-amplificador, filtros, amplificadores, outra instrumentação necessária, cabos de conexão e detectores ou processadores de sinais;

Contagem de EA (N): número de vezes que a faixa positiva do sinal de EA excede o valor do limiar de detecção prefixado, durante uma parte do ensaio ou inspeção;

Duração do sinal de EA: tempo entre a primeira e a última vez que o sinal excede o limiar de referência de detecção, ver Figura 30;

Efeito Felicity: detecção de EA significativa em um nível de carga inferior ao nível máximo previamente aplicado – observado nos materiais compósitos, por exemplo;

Efeito Kaiser: ausência de EA detectável em cargas inferiores à máxima previamente aplicada;

Emissão contínua: EA de eventos que não podem separar-se uns dos outros;

Emissão discreta: EA de eventos que podem ser separados uns dos outros;

Energia do evento de EA: energia elástica liberada por um evento de EA;

Estimulação: aplicação de um estímulo – tal como uma força, pressão, calor etc. – ao objeto sob ensaio para produzir a ativação das fontes de EA;

Evento: mudança localizada no material que produz um aumento de EA;

Faixa dinâmica: diferença, em dB, entre nível de sobrecarga e o nível de sinais mínimo (geralmente fixo por um ou mais níveis de ruído, distorção de baixo nível, interferência ou nível de resolução) em um sistema ou sensor;

Fonte: causa física de um ou mais eventos de EA;

Gerador de sinal de EA: gerador eletrônico de forma de sinais ou outro dispositivo que pode introduzir um sinal transitório em um processador de EA com o fim de controlar e verificar o funcionamento da instrumentação;

Guia de onda de EA: dispositivo que permite transferir ao sensor as ondas elásticas do objeto ensaiado. Por exemplo, pode ser uma barra que em uma extremidade está acoplada a estrutura monitorada e na outra extremidade um sensor acoplado;

Hit : detecção e medição de um sinal de EA em um canal;

Limiar de detecção: nível de tensão que deve ser excedido para que um sinal de EA seja detectado e processado, ver Figura 30;

Limiar de referência de avaliação: valor limiar prefixado usado para análises dos dados. Esse valor pode ser maior ou igual ao limiar de detecção. Para propósito de análise, deve ser considerada a dependência dos dados medidos com o limiar de detecção, ver Figura 30;

Emissão acústica (EA): fenômeno onde ondas elásticas transientes são geradas pela liberação rápida de energia de fontes localizadas em um material. A EA é o termo que designa as ondas geradas e o método de END.

Nível de saturação do sinal: nível acima da capacidade de processamento de dados do sistema, o que faz com que a medição deixe de ser satisfatória. Causas: distorção do sinal, superaquecimento/dano do sensor, grande quantidade de ruídos, etc;

Parâmetro externo: variável medida que se deseja correlacionar com a EA, em função de sua causa/relação. Ex. pressão numa prova hidráulica ou o nº de ciclos num ensaio cíclico;

Razão *Felicity*: razão entre as cargas nas quais ocorre o efeito *Felicity*;

Relação sinal ruído: relação entre a amplitude de um sinal de EA e a amplitude média do ruído de fundo;

Ruído de fundo: sinais produzidos por outras causas distintas de EA ou por fontes de EA que não estão relacionadas com o ensaio;

Sapata de Hsu-Nielsen: dispositivo para simular um sinal de EA utilizando a quebra de uma barra de grafite sustentada por um suporte adequado. Na Norma ABNT NM 302, é referenciado como FONTE HSU-NIELSEN;

Sensor de EA: elemento de detecção, geralmente piezoelétrico, que transforma o deslocamento da onda mecânica em um sinal elétrico;

Sensor de referência: sensor de EA cuja resposta foi estabelecida por calibração primária;

Sensor de guarda: sensor utilizado para discriminar fontes oriundas fora da zona de interesse;

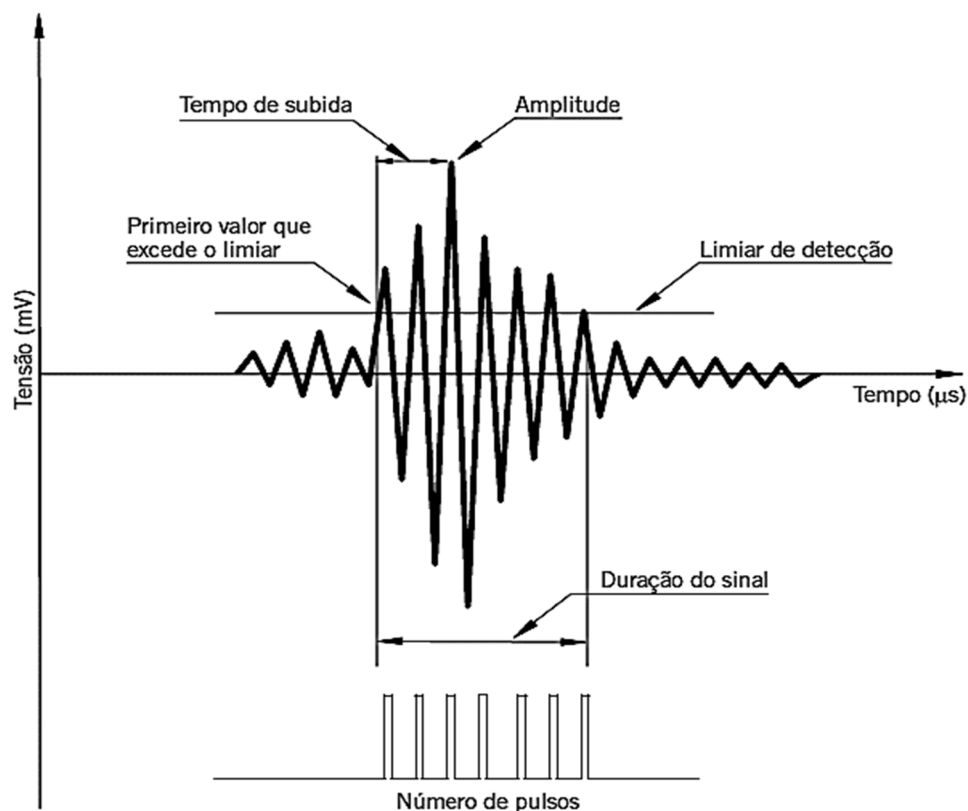
Taxa de *hits*: número de sinais (*hits*) detectados por unidade de tempo;

Tempo de chegada: tempo em que o sinal discreto excede pela primeira vez o limiar de referência de detecção, ver Figura 30;

Tempo morto: qualquer intervalo de tempo durante a aquisição de dados, durante o qual o instrumento ou sistema é incapaz de aceitar novos dados;

Transdutor de EA: elemento ativo em um sensor de EA, geralmente piezoelétrico.

Figura 30 - Características de um sinal discreto.



Fonte: Adaptado de Filippin e Giuseppe (2017).

2.9.2 Princípios fundamentais de emissão acústica

O termo emissão acústico (EA) é utilizado para definir as ondas mecânicas que são geradas devido a uma rápida liberação de energia acumulada.

Essa energia liberada é gerada a partir de fontes inerentes ao material, as quais podem ser originadas de diferentes modos – porém é comum que essas fontes estejam associadas a possíveis falhas do material, como, por exemplo, nas extremidades de uma descontinuidade ou em uma descarga parcial (FILIPPIN, 2017).

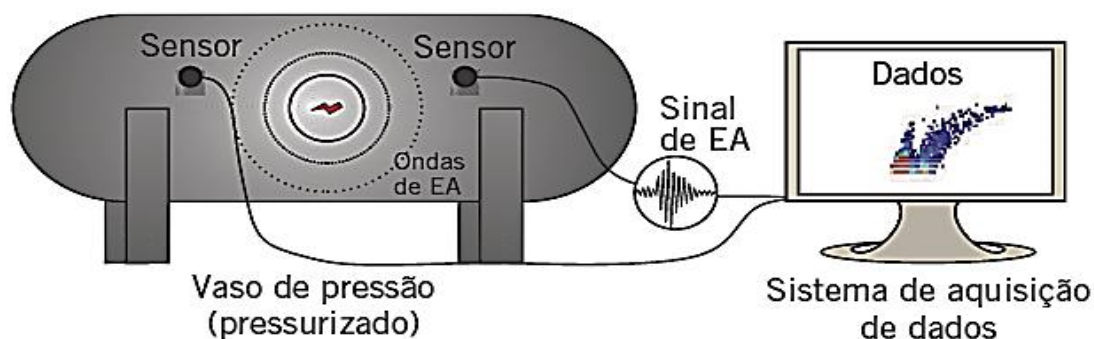
A energia liberada se propaga por todo o material, a partir da fonte, como uma onda esférica. Essas ondas podem ser detectadas com o auxílio de sensores adequados, que convertem as oscilações na superfície do material de ondas mecânicas para sinais elétricos.

Esses sinais são processados para possibilitar a sua análise e localizar as fontes de EA - Figura 31 (FILIPPIN, 2017).

Como apresentado na terminologia, existem dois tipos de fontes de EA, os quais podem ocorrer separadamente ou simultaneamente (FILIPPIN, 2017).

- **Emissão contínua:** são emissões de acontecimentos que não podem ser separados um do outro, tais como: o ruído de um processo, um vazamento de uma válvula ou ainda o fluxo turbulento em uma tubulação;
- **Emissão discreta:** são emissões de eventos transientes que podem ser separados um do outro no tempo, tais como: a propagação de uma trinca, a acomodação plástica de um material ou ainda o processo corrosivo de uma estrutura.

Figura 31 - Princípios do fenômeno de EA e sua detecção.



Fonte: Adaptado de Filippin e Giuseppe (2017).

2.9.3 Fontes de emissão acústica

Partindo do princípio que qualquer sinal sonoro (proveniente de ondas mecânicas) é considerado como emissão acústica, as fontes de EA podem ser diversas, como abalos sísmicos, passagem de fluidos por orifícios (vozes, sons animais, vazamentos), impacto de objetos, arcos e descargas elétricas e até transformações de fase em materiais.

Porém, a atual aplicação da técnica é restrita a uma determinada gama destas ondas mecânicas, relativas à manutenção de equipamentos, estudo de vida útil de estruturas e prevenção de desastres geológicos (VALLEN, 2010).

A emissão acústica pode ser gerada pelo vazamento de fluidos em vasos de pressão e tubulações; por fenômenos que envolvem deformação como escoamento (MOORTHY *et al.*, 1995), maclagem (VALLEN, 2010) e crescimento de trincas em metais, madeira (LANDIS e WHITTAKER, 2000) e concreto (LANDIS; BAILLON, 2002); pelo aparecimento de trincas em revestimentos e também pelo descolamento entre o substrato e os filmes superficiais (PIOTRKOWSKI *et al.*, 2004).

A corrosão em fundos de tanques também pode gerar emissão acústica com o desprendimento da camada de óxido e formação de bolhas de gás (VALLEN, 2010).

RUZZANTE (1998) divide as fontes de EA em dois grupos, o primeiro envolvendo apenas os fenômenos microestruturais e o segundo todos os fenômenos que não estão relacionados com a microestrutura do material (Quadro 4).

Quadro 4 - Classificação de fontes de EA.

<i>Grupo I</i>	<i>Grupo II</i>
Movimento das paredes dos domínios magnéticos	Perdas de gases ou líquidos
Multiplicação e movimento de discordâncias	Processos de soldagem
Transformações martensíticas	Desgaste de rolamentos
Decoação de precipitados	Deteção de peças soltas
Crescimento e propagação de trincas	Deteção de descargas parciais e transformadores de potência
Processos de corrosão	

Fonte: Adaptado de Ruzzante (1998).

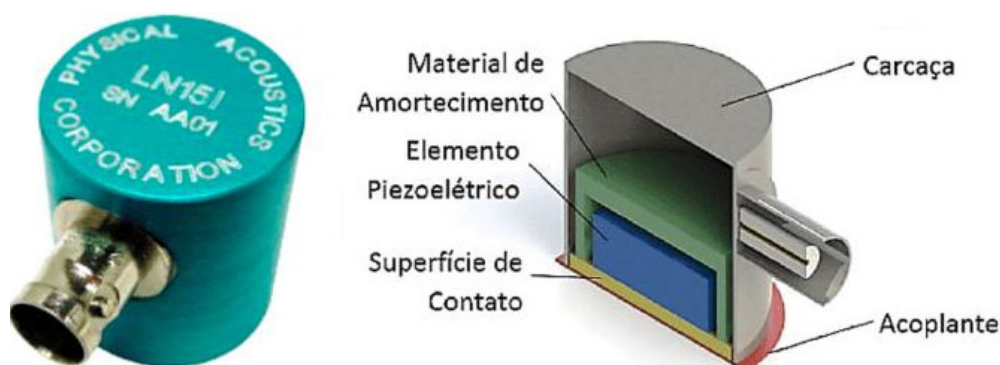
2.9.4 Sensores piezoelétricos

Existem diversos tipos de sensores de EA, com diversas finalidades e aplicações, mas as principais características presentes em um sensor para essa aplicação são a largura de banda, a sensibilidade e as temperaturas máximas de trabalho.

Basicamente, um sensor de EA é composto por um elemento piezoelétrico montado sobre uma superfície dielétrica e rígida, protegido por um encapsulamento que pode ser metálico ou polimérico, dependendo da aplicação (Figura 32).

As diferenças de uso dos sensores quanto à banda de leitura destes estão intimamente ligadas à geometria do elemento piezoelétrico bem como ao arranjo de diversos sensores com bandas diferentes, no caso de sensores ditos “banda larga” (FILIPPIN, 2017).

Figura 32 - Sensor de Emissão Acústica da marca Mistras/PASA.



Fonte: Adaptado de Filippin e Giuseppe (2017).

O coração do sensor de EA é o elemento piezoelétrico, que é uma massa de cristais de cerâmica de *perovskita* (FILIPPIN, 2017).

A estrutura *perovskita* pode ser encontrada com algumas simetrias de rede, tais como cúbica, tetragonal, ortorrômbica, romboédrica ou monoclínica, cada um constituído por um íon metálico tetravalente, usualmente titânio ou zircônio, em uma rede de íons metálicos maiores e divalentes, geralmente chumbo ou bário (FILIPPIN, 2017).

Sob condições que conferem simetria tetragonal ou romboédrica nos cristais, cada cristal tem um momento de dipolo elétrico. Quando um piezoelétrico é colocado sob um estresse mecânico, a estrutura atômica do cristal muda, de modo que os íons na estrutura se separam.

Assim, um momento de dipolo é formado e uma diferença de potencial é verificada nas extremidades do cristal. A resposta em frequência bem como as frequências de ressonância observadas no material está intimamente ligada à massa e à geometria do sensor conforme FILIPPIN, 2017.

2.10 CORROSÃO SOB TENSÃO

2.10.1 Corrosão e técnicas de análise

Corrosão pode ser definida como a deterioração de um determinado material, geralmente metálico, sendo por ação química, eletroquímica ou por esforços mecânicos.

Esse desgaste sofrido pelo material, causado pela interação físico-química entre o material e o seu meio, mostra alterações indesejáveis sofridas pelo material, como desgastes, variações químicas comprometendo a estrutura do material e assim se tornando inadequado para o uso (GENTIL, 2014).

É pertinente classificar a corrosão pela forma como ela se manifesta. Os tipos de corrosão de metais podem ser classificados da seguinte maneira: ataque uniforme, galvânica, em frestas, por pites, intergranular, por lixiviação seletiva, erosão-corrosão e corrosão sob tensão (SHACKELFORD, 2015).

O ataque uniforme é uma forma mais comum de corrosão, ocorre de forma eletroquímica com intensidade semelhante em toda a superfície que está exposta, de um ponto de vista mais específico a oxidação e redução ocorrem aleatoriamente na superfície. A ferrugem no aço e no ferro, o escurecimento em pratarias são exemplos comuns de ataque uniforme (HOMEM, Paula; *et al.*; 2008).

A corrosão galvânica se dá através de dois metais ou ligas de composições diferentes quando interligados eletricamente juntamente a exposição a um eletrólito, ou seja, o metal mais reativo irá sofrer a corrosão no ambiente específico, já o metal mais inerte, o catodo é protegido da corrosão (CALLISTER, 2016).

Corrosão em frestas é localizada em fissuras ou fendas entre duas superfícies metálicas ou entre superfícies metálicas e não metálicas, é um problema que ocorre em materiais relativamente resistentes à corrosão, como aços inoxidáveis, titânio e alumínio (CALLISTER, 2016).

Já a corrosão por pite consiste em formação de pequenos pites ou pontos. Eles entram a partir do topo de uma superfície plana para dentro do material, verticalmente.

O mecanismo de corrosão acontece semelhante a corrosão por frestas no sentido que a oxidação ocorre no interior do próprio pite, com uma pequena redução da superfície (GRAVALOS, M. T.; *et al.*; 2010).

A oxidação dos contornos de grão é chamada de corrosão intergranular que pode ocorrer em algumas ligas em ambientes específicos.

Como em alguns aços inoxidáveis, essas ligas tornam-se sensíveis a esse tipo de corrosão quando aquecidas em temperaturas entre 500 a 800°C em um longo período, isso ocorre pela precipitação do cromo que irá reagir com carbono dos aços inoxidáveis.

Sendo algumas formas de proteção para aços inoxidáveis o tratamento térmico redissolvendo carbetos de cromo, reduzindo o teor de carbono e também podendo adicionar nióbio e titânio que são melhores formadores de carbetos (CALLISTER, 2016).

Lixiviação seletiva geralmente ocorre quando um elemento ou composto é removido por processo de corrosão, um exemplo clássico é a remoção do zinco no latão (também chamada de dezincificação), sendo o zinco lixiviado de uma liga cobre zinco.

Ocorre nas ligas de latão com mais de 15% de zinco (REAGOR, B. T.; *et al.*; 1981).

A erosão-corrosão é o resultado da combinação de um ataque químico e de uma abrasão ou desgaste mecânico, que vem do coeficiente de atrito de um líquido.

Em maior escala esse ataque ocorre em ligas passivadas pela formação de uma película protetora, devido ação abrasiva, deixando a superfície do metal exposta.

Os metais dúcteis como cobre e chumbo por exemplo, são sensíveis a esse ataque. Esse ataque pode ser identificado por ranhuras e ondulações superficiais com contornos característicos do escoamento do fluido conforme (VOLPE, L.; *et al.*; 1989).

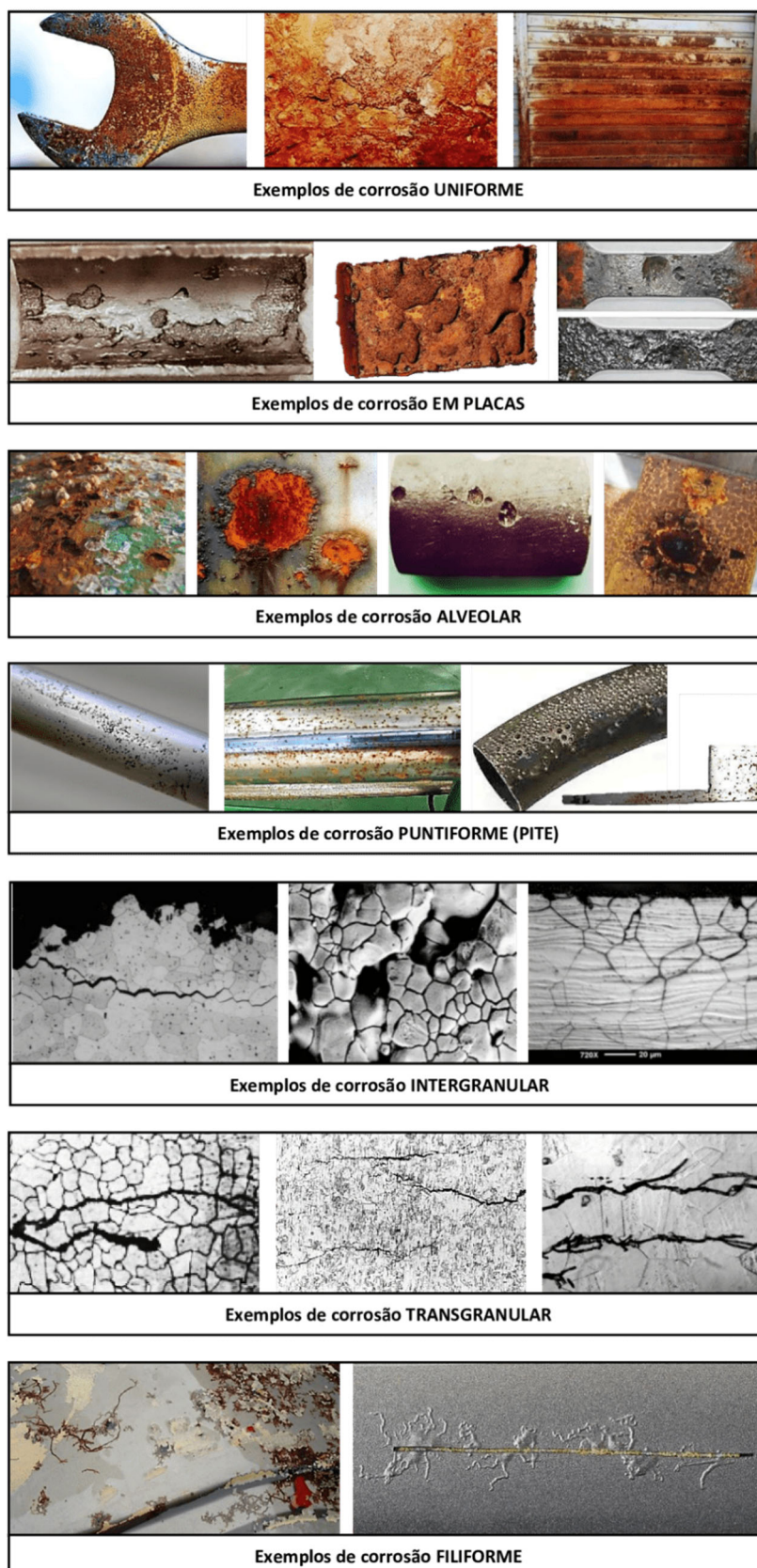
O trincamento por corrosão sob tensão é o resultado da combinação de uma tensão de tração e de um ambiente corrosivo específico. Quando um material não é reativo ao meio corrosivo ele ficará quando sofrer uma determinada tensão de tração (CALLISTER, 2016).

Como os resultados da progressão dos fenômenos de todos os tipos de corrosão são identificados de maneira visual (muitos feitos macro, já outros microscopicamente), decidiu-se expor nas Figuras 33 e 34 uma coletânea de exemplos de várias modalidades do modo de falha de corrosão.

O autor DOMINGUES, M. D. (2021) esclarece que tal imagem (Figura 33) foi confeccionada com contribuições de diversos estudos. Os estudos utilizados como referência foram: TORINO S. A. (2018), PANNONI, F. D., (2009), GENTIL, V. (2014), SANTANA, A. P. (2015), SHREIR, L. L. (2013), VOLPE, L. (1989), GRAVALOS, M. T. (2010), HOMEM, P. (2008), PEDRALI FILHO, J. (2015) e ZUCATO, I. (2000).

Sendo assim, encontra-se na figura 33 uma coletânea contendo exemplos de diferentes formas de corrosão (DOMINGUES, M. D.; 2021).

Figura 33 - Exemplos de casos onde peças metálicas foram fragilizadas ou se envolveram em eventos de corrosão uniforme, em placas, alveolar, pite, inter e transgranular e filiforme.



Fonte: Domingues (2021).

Figura 34 - Casos onde peças metálicas foram fragilizadas via corrosão por esfoliação, gráfica, lixiviação seletiva, em juntas soldadas, frestas e fretting.



Fonte: Domingues (2021).

São diversos os ambientes corrosivos incluindo a atmosfera, soluções aquosas, solos, ácidos, bases, solventes inorgânicos, sais fundidos, metais líquidos, e também o corpo humano. A corrosão atmosférica é a maior responsável pelas perdas materiais nesse sentido porque o oxigênio, presente em mais de 20% da composição do ar, atua como agente corrosivo, além outros elementos presentes (SHACKELFORD, 2015).

A prevenção à corrosão pode se dar por inibidores que são substâncias que diminuem a ação corrosiva dos agentes corrosivos, mas logicamente o tipo de inibidor vai variar de material para material e também do agente corrosivo, pois alguns desses inibidores reagem de forma que irão eliminar quimicamente a solução ativa (como o oxigênio por exemplo) ou ainda como barreira, uma espécie de película protetora muito fina impedindo a ação dos agentes corrosivos (SCHWEITZER, P. A.; 2010).

Além disso, um tipo de proteção largamente empregada em estruturas e superfícies de aço é a proteção catódica. A técnica consiste em energizar suavemente as instalações a serem protegidas, de modo a eliminar totalmente os processos corrosivos. Essa energização pode ser conseguida com o auxílio de ânodos galvânicos de magnésio, zinco ou alumínio (proteção catódica galvânica, a mais conhecida delas é a galvanização de aços.). O procedimento também pode ser executado através de um ou mais retificadores de corrente, complementados com ânodos inertes (proteção catódica por corrente impressa) (ABRANTES, L. M., 2015).

Esta é uma importante técnica para inibir a corrosão de instalações metálicas enterradas ou submersas, isso sem contar o fato de que é grande seu uso na Construção Civil para proteger ferragens de reforço de estruturas de concreto (ARAÚJO, A. *et al.*, 2013).

2.10.2 Corrosão sob tensão (CsT)

A corrosão sob tensão (CsT) é um fenômeno que produz um tipo de fratura, que se desenvolve sob tensões de tração relativamente baixas, quando metais ou ligas susceptíveis são expostos a um determinado meio corrosivo (DAVÓ, 2006).

A CsT é consequência da ação combinada de uma tensão aplicada e um ambiente corrosivo, sendo estes dois fatores o mínimo para a ocorrência do fenômeno (Figura 34).

De fato, alguns materiais que são virtualmente inertes em um determinado meio corrosivo tornam-se susceptíveis a essa forma de corrosão quando uma tensão é aplicada (CALLISTER, 2016).

A susceptibilidade à CsT nas ligas de alumínio é observada em materiais que contêm quantidades significativas de elementos tais como o zinco, cobre, magnésio ou silício, elementos típicos da liga 7050.

A trinca por CsT é um tipo de trinca que se expande em ambientes de corrosão, podendo ser um fio condutor para falha em equipamentos, pois pode causar vazamentos e defeitos repentinos sob tensão de tração. É mais comum em ligas do que em metal puro (MURUGAN, L.M.; 2006).

Sempre existem muitos desafios para descobrir a CsT, especialmente em reatores de parede espessa (aqueles acima de 25 mm), usando técnicas convencionais de NDT e por TOFD devido à orientação complexa da rachadura. No entanto, isso foi superado nos últimos anos com o uso de técnicas ultrassônicas avançadas, como *Phased Array* TFM/FMC (MURUGAN, L.M.; 2006).

Além disso, a caracterização das trincas de CsT pode ser feita com a técnica SAFT (*Synthetic Aperture Focusing Technique* ou Técnica de Focagem de Abertura Sintética), como mostrado nos trabalhos de RIEDER, H. *et al.* (2015) e DOCTOR, S. R. *et al.* (1996).

Para se fazer uma avaliação comportamental de materiais susceptíveis à CsT, tem-se desenvolvido diferentes técnicas experimentais, sendo que algumas retratam o comportamento mais real do material sob esforços mecânicos e meio corrosivo (GENTIL, 2003). Existe uma ação sinérgica da tensão e o meio corrosivo, ocasionando a fratura em um tempo mais curto do que a soma das ações isoladas da tensão e da corrosão. O fenômeno normalmente ocorre em materiais que apresentam boa resistência à corrosão generalizada, tais como ligas de alumínio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio, ligas de níquel (GENTIL, 2003).

Os aços inoxidáveis também estão sujeitos, em função da combinação de riscos relacionados ao meio ambiente, soluções aquosas contendo cloretos ou outro eletrólito. Porém, mais detalhadamente, os agentes que podem vir a causar e/ou agravar os problemas de CsT podem ser resumidos da seguinte forma (GEMELLI, 2011):

- Tensões sustentadas trativas;
- Metalúrgico, susceptibilidade da estrutura do metal ou liga metálica;
- Presença de oxigênio ou outro oxidante;
- Temperatura elevada;
- Potencial eletroquímico favorável;
- Oportunidade de acidez local;
- Tendência de quebra local do filme passivo.

Com relação ao fator meio ambiente, a CsT é normalmente associada com soluções aquosas, mas não se deve tomar isto como base, pois pode ocorrer em líquidos contendo sais fundidos, gases e líquidos não aquosos orgânicos e inorgânicos.

Os casos mais comuns onde ocorre a CsT são os meios contendo cloretos (MARIANO, N. A., 1997). Ao longo dos anos estudos aprofundados evidenciaram a influência deste íon (cloreto) em relação a aparição deste tipo de corrosão em alumínio e aços inoxidáveis (PINTO, Daniel Fraga; 2006) (SHREIR'S; 2010).

O íon cloreto é suprido por diversas fontes, como: água do mar, atmosfera marinha, águas de rios (com mecanismo de concentração de cloretos), mãos suadas, dejetos humanos, comidas salgadas, contaminantes solúveis de isolamentos térmicos, HCl e outros contaminantes contendo cloro, lubrificantes, combustíveis, selantes, produtos da decomposição do PVC em incêndios (CALVIMONTES, 2017).

A CsT observada no alumínio e suas ligas, em meios contendo cloretos, está associada à maioria das falhas em serviço e ocorre por causa da água, vapor de água ou em soluções aquosas contaminadas. Para situações em engenharia, podemos considerar a água como condição em detalhe (MARIANO, N. A., 1997).

A água no estado líquido causa fratura mais rápido que o vapor de água, então, faz-se necessário projetar estruturas de tal forma que não acumule água em bolsas ou fendas, evitando a retenção de sais que se concentram por evaporação e passam a acelerar a CsT.

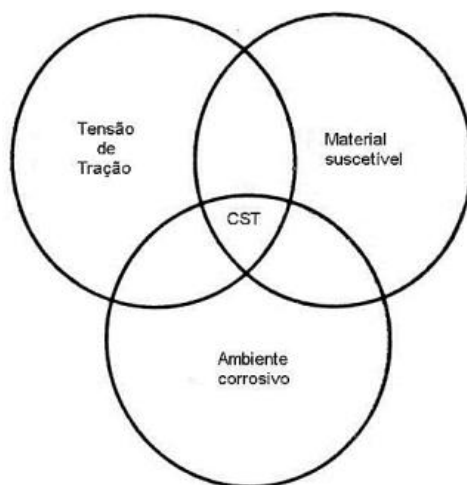
Evitar estes tipos de concentrações são exemplos aplicados em veículos espaciais (CALVIMONTES, 2017). No que diz respeito às tensões que causam a CsT em ligas de alumínio, estas podem estar relacionadas com as tensões de trabalho (tensões de projeto), mas a maioria das falhas em serviço é causada pelo conjunto de tensões aplicadas ou tensões residuais devido ao tratamento térmico ou ambos (CALVIMONTES, 2017).

2.10.3 Características da CsT

A corrosão sob tensão é um processo destrutivo de metal que só ocorre quando os três fatores mostrados na Figura 35 estão presentes.

Entretanto, é necessário que haja também uma especificidade dos pares material/meio, como, por exemplo, ligas de alumínio em meios de cloretos, fluoretos e alcalinos, ligas de cobre em ambientes amoniacais, aço carbono em meios alcalinos e aços inoxidáveis em meio de cloretos, alcalinos e sulfeto de hidrogênio conforme PANOSSIAN (2000).

Figura 35 - Condições para o desenvolvimento da corrosão sob tensão.



Fonte: Adaptado de Panossian (2000).

No entanto, todo cuidado é pouco, já que, eventualmente, pode-se constatar uma aceleração no processo corrosivo normal em um metal/liga que passará a sofrer maior perda de massa devido aos processos eletroquímicos de corrosão normais, sem que, contudo, se verifique o desenvolvimento da CsT.

É o caso, por exemplo, dos aços carbono que não chegarão a sofrer CsT em soluções de NaCl, apesar de apresentarem uma aceleração no processo corrosivo normal, devido à presença de tensões (MARIANO, N. A., 1997).

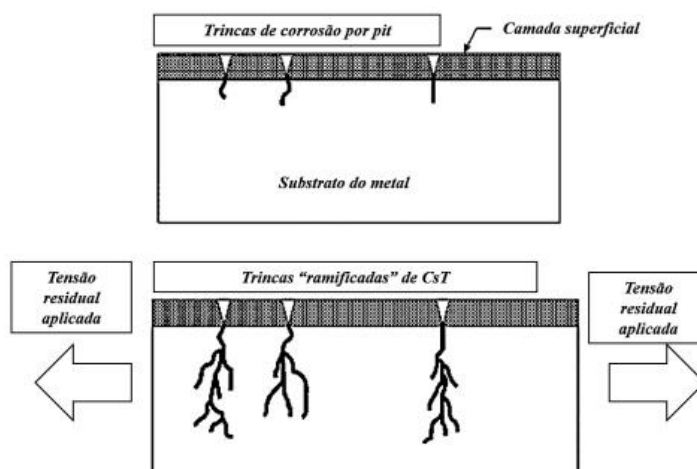
Geralmente a CsT tensão está confinada à região de trincamento, enquadrando-se, portanto entre os diferentes tipos de corrosão localizada, como frestas e pites - o que muda é apenas o perfil ou orientação das trincas formadas (Figura 35) (PANOSSIAN, 2000).

A CsT se caracteriza pela formação de trincas ramificadas a partir do ponto de fissuração (Figura 36) que favorecem a ruptura brusca do material, sendo um dos mecanismos de degradação mais severos que influenciam no tempo de vida de componentes metálicos (STAEHLE, R.W., 1989).

Tais trincas por CsT têm essa orientação devido às tensões residuais e de operação, sendo então perpendiculares à direção destas tensões aplicadas (ramificando-se tridimensionalmente – Figura 35), podendo se propagar para várias direções principais no interior do metal (MATTHEWS, N. *et al.*, 2018).

Quando devidamente observadas com aparelhos potentes que fazem parte do ferramental para investigação ou Análise de Falhas identifica-se ainda que na maioria dos casos estas trincas de CsT são do tipo transgranular (Figura 37).

Figura 36 - Características orientacional das trincas oriundas de processo de pitting (acicular) e aquelas vindas de fenômenos de CsT (ramificadas).

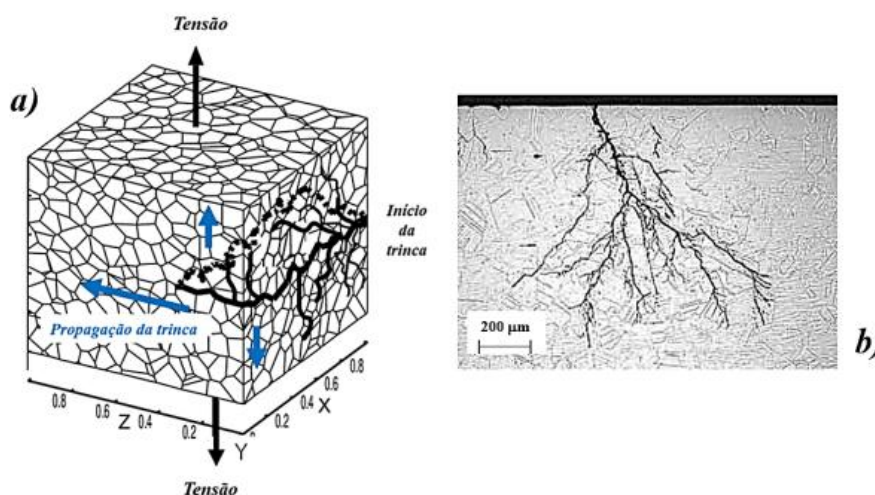


Fonte: Adaptada de Matthews *et al.* (2018).

Para se ter essa confirmação e exemplificação das orientações das fissuras advindas da CsT basta pegar o trabalho de Mitsuhiro Itakura e colaboradores, onde foi feito um estudo completo sobre o Mecanismo de ramificação da propagação de trincas de CsT em aços inoxidáveis (mais especificamente um AISI 316, tal como o usado nessa dissertação de mestrado). Neste trabalho ainda se esquematiza tal propagação em três dimensões (Figura 36 – detalhe *a*) (ITAKURA, M. *et al.*, 2005).

Perceba como a trinca obtida por microscopia de um aço inoxidável AISI 316 (Figura 36 – detalhe *b*) evidencia o padrão ramificado.

Figura 37 - Em *a*) uma representação esquemática de como seria uma seção cúbica da região de propagação de trincas de CsT em um metal. Em *b*) está uma microscopia da região de propagação de trincas advindas de Corrosão sob Tensão em um aço inoxidável AISI 316.



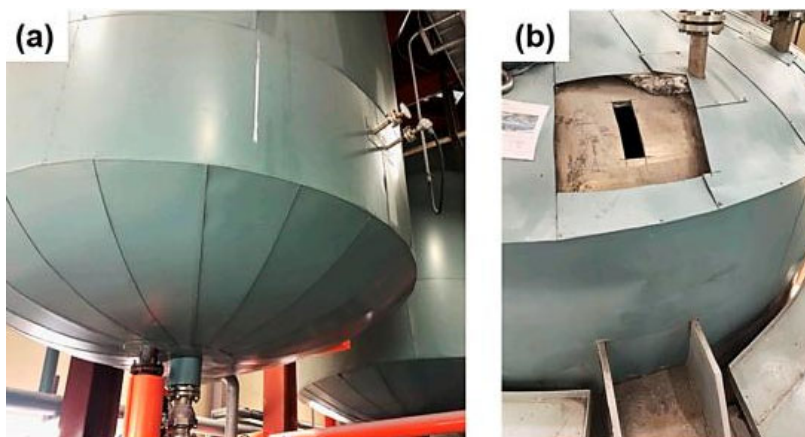
Fonte: Adaptada de Itakura *et al.* (2005)

A susceptibilidade de ligas metálicas à CsT depende de fatores como, composição química, microestrutura, processo de fabricação e tratamento térmico sofrido pelo material. Os teores de C e Cr aparecem como variáveis importantes quando se avalia a composição química. O tamanho de grão e a presença e localização de inclusões e precipitados são também variáveis relevantes na avaliação da resistência de materiais a este fenômeno (DAVIS, J. R., 2008).

Duas principais fontes de tensionamento que são capazes de promover o processo de CsT são as tensões resultantes das condições de operação (pressão, temperatura e carregamento mecânico) e as tensões residuais (provenientes de soldagem, operações de conformação mecânica, tratamento mecânico superficial, transformações de fase, etc.) (SCHVARTZMAN, M. M. A. M. *et al.*, 2010).

As tensões existentes durante a operação são consideradas nos projetos das plantas nucleares e devem obedecer às normas e códigos específicos (SCHVARTZMAN, M. M. A. M. *et al.*, 2010). Entretanto, elevadas tensões residuais podem ser criadas durante os processos de fabricação e de soldagem. As tensões residuais decorrentes da soldagem podem ser maiores do que as tensões de operação e tendem a ser uma força motriz dominante para a iniciação e o crescimento de trincas por CsT (DANKO, J.C., 1992). Outras características bastante relevantes de se considerar durante uma investigação para descobrir se a causa da falha foi de fato CsT advém dos resultados dos testes composicionais no interior das trincas encontradas (PARK, I. *et al.*, 2021). Pois, tal como bem mostrado por Ihho Park e colaboradores, em um estudo recente (de 2021) – onde foi realizada uma investigação microestrutural de regiões próximas as trincas de CsT (CsT era uma “suspeita” naquele momento) em um Reator (Figura 38) feito com AISI 304, que armazenava uma solução de $MgCl_2$ sob alta temperatura.

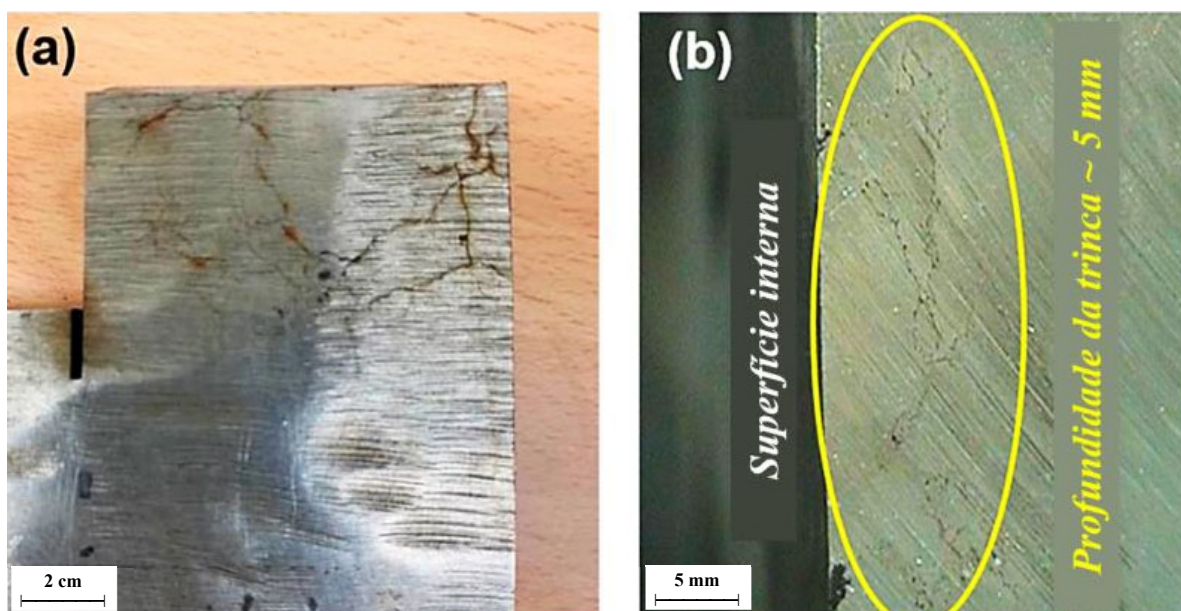
Figura 38 - Em a) Fotografias de reatores estabilizadores de PVC estudados por Ihho Park e colaboradores. Em b) mostra-se a parte superior do reator retirado como amostra (corte).



Fonte: Park *et al.* (2021).

A parte superior do costado do reator cortada como amostra por Ihho Park e colaboradores (Figura 39 b) foi analisada mais detalhadamente e observou-se visualmente trincas na superfície interna (Figura 39 a), com padrão ramificado característico de CsT (perpendicular a tração da chapa – tal como mencionado e exemplificado na Figura 36), aprofundando-se por, aproximadamente, 5 mm, cerca de $\frac{1}{4}$ da espessura da parede do costado do reator, que era de 20 mm (PARK, I. *et al.*, 2021).

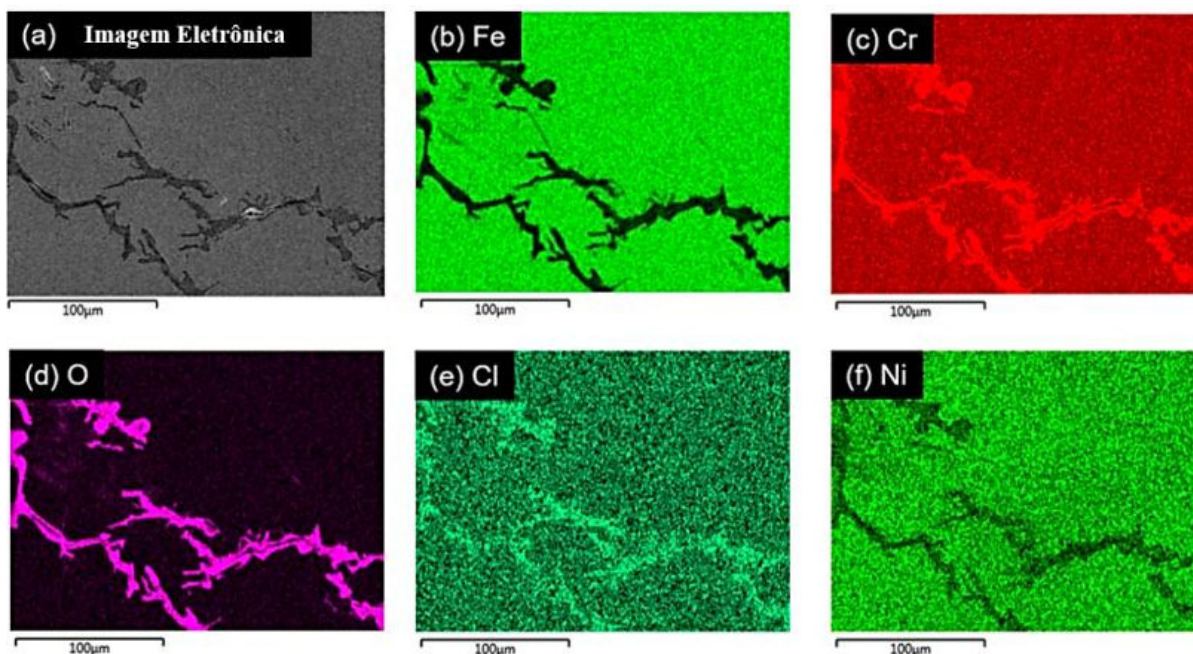
Figura 39 - Em a) tem-se a face interna da amostra de corte evidenciando as trincas e em b) fotografias da seção transversal da amostra de corte onde se vê o padrão ramificado e a profundidade das trincas.



Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2021).

Por fim, Ihho Park e colaboradores decidiram realizar um mapeamento via EDS da área trincada (considerando o interior das trincas também) e observar as características composicionais para discutir (Figura 40). Sendo esta análise foi fundamental para conclusão do estudo, juntamente com o padrão visual ramificado visto na Figura 39 (PARK, I. *et al.*, 2021).

Figura 40 - EDS da área fissurada. Do canto superior esquerdo para o canto inferior direito, imagem do elétron secundário (a), mapas de distribuição elemental de (b) Fe, (c) Cr, (d) O, (e) Cl e (f) Ni. A lacuna gerada pela trinca é preenchida com óxido rico em Cr e o elemento Cl também é enriquecido no óxido.



Fonte: Park *et al.* (2021).

Através do mapeamento via EDS da área trincada feito por Ihho Park e colaboradores foram observadas trincas ramificadas e filmes óxidos no seu interior ricos em Cr, O e Cl, bem como deficiência em Ni e Fe (PARK, I. *et al.*, 2021) (Figura 39).

Segundo (PARK, I. *et al.*, 2021), o óxido rico em Cr encontrado no interior das trincas foi formado após a matriz nua ter sido exposta à solução de $MgCl_2$ (sob alta temperatura) contendo íons Cl e íons metálicos transportados da matriz na parede da trinca (PARK, I. *et al.*, 2021).

Sendo assim, os pesquisadores desse estudo concluíram que as trincas nas regiões do costado do reator feito em inox AISI 304 sofreu de fato trincamento por CsT. Portanto, essa condição indica trincas por CsT. Mais à frente nesta dissertação as mesmas etapas realizadas por Ihho Park e colaboradores (análise visual do padrão das trincas e composicional do interior das mesmas) serão realizadas para as amostras da presente dissertação.

Agora, com a finalidade de sumarizar a maioria das características da CsT, que permitem distingui-la dos demais processos corrosivos, é apresentado abaixo uma coletânea delas (PANOSSIAN, 2000):

- a)* As trincas de CsT desenvolvem-se perpendicularmente à direção do esforço de tração;
- b)* As trincas de CsT podem ser intergranulares, transgranulares ou mistas;
- c)* Apresenta efeito altamente localizado e as trincas são ramificadas;
- d)* Ocorre somente quando existem tensões residuais (ou de serviço), sob concentrações de agentes agressivos responsáveis pela deterioração do material (acima dos valores mínimos) e quando o ambiente é propício (gases e/ou soluções aquosas corrosivas);
- e)* Se a solução agressiva contiver Cl e o metal for inox, no interior das trincas haverá concentração de Cr, O e Cl e deficiência em Ni e Fe;
- f)* Primeiro acontece o período de indução, correspondendo a um lento processo de corrosão que precede a formação de trincas visíveis, e propagação de trincas;
- g)* A fratura causada pela CsT não apresenta estrição e conta com duas zonas distintas: a 1º de caráter frágil, resultante do desenvolvimento das trincas de CsT (deformação plástica). A 2º de caráter dúctil, resultante da ruptura brusca do material causada pelas tensões existentes que, em face da diminuição da seção resistente pelo desenvolvimento das trincas, ultrapassam o limite de resistência do material.

De acordo com a literatura, a correlação entre composição do meio degradante e o tipo de trincamento nos casos mais comuns de CsT para aços inoxidáveis austeníticos estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Relação dos principais meios causadores de CsT em aços inoxidáveis austeníticos.

<i>Meio Corrosivo</i>	Tipo de Trinca
<i>Ácidos politiônicos</i>	Intergranulares
<i>Soluções de cloretos de Mg, Fe (ferroso), Ca, Ba, Co, Zn, Li, NH₄, K, Mn, Ni (isoladas ou misturadas): ação agressiva aumenta com concentração, temperatura, acidez e oxigênio; maior agressividade em temperaturas próximas do ponto de ebulição das soluções</i>	Intergranular ou transgranular
<i>Soluções alcalinas (KOH, NaOH), ação acelerada por agentes redutores (H₂S, Na₂S, fenol e outros compostos orgânicos), concentração e temperatura; são necessários concentrações de íons OH relativamente elevadas</i>	Não relatado
<i>Compostos orgânicos contendo cloretos em presença de umidade</i>	Não relatado
<i>H₂O, em fase líquida ou gasosa, à temperatura elevada e em presença de íons de cloro. Ação acelerada pela pressão, temperatura, oxigênio e acidez.</i>	Não relatado
<i>H₂S + H₂O, em fase líquida ou gasosa e em presença de íons de cloro e oxigênio</i>	Transgranulares ou intergranulares dependendo do tipo de aço
<i>H₃PO₄, ação acelerada pela concentração e temperatura</i>	Transgranulares
<i>H₂SO₄</i>	Transgranulares

Fonte: Panossian (2000).

2.10.4 Fatores Influenciadores

Os principais fatores que influenciam a corrosão sob tensão são os seguintes:

a) Tensão aplicada ou residual

A CsT em determinado metal ou liga, num meio bem definido, depende, fundamentalmente das tensões de tração aplicadas, residuais ou ambas.

As tensões de compressão não causam corrosão sob tensão. Ao contrário, podem prevenir o trincamento ou, eventualmente, protelá-la (SHACKELFORD, 2008).

O efeito das tensões de tração sob a CsT depende de sua intensidade e distribuição. Para que ocorra o trincamento num tempo de significado prático, é necessário que a soma das tensões de tração residuais e aplicadas atinja um valor crítico, pelo menos em alguma parte do material.

Este valor até hoje não foi bem determinado, em face da heterogeneidade da distribuição das tensões residuais.

O efeito da tensão sobre a susceptibilidade de um metal ou liga é, normalmente, medido pelo tempo necessário para ocorrência de ruptura no meio considerado (SHACKELFORD, 2008).

Dentre as tensões residuais internas, as tensões macroscópicas são as que parecem mais influir no desenvolvimento da CsT, como por exemplo: os tratamentos mecânicos (deformação plástica), tratamentos térmicos, soldas, aquecimentos desiguais durante a utilização ou produção da peça (SHACKELFORD, 2008).

b) Estado da Superfície

O estado da superfície do material (rugosidade, ondulações microirregularidades, estrutura da camada superficial etc.) desempenha um papel importante no seu comportamento ante a CsT. A resistência aumenta com a qualidade do estado da superfície. A ação dos tratamentos mecânicos das superfícies metálicas (polimento, usinagem, lixamento) é determinada, aparentemente, pela introdução de tensões residuais na superfície, causadas pelas deformações plásticas heterogêneas e aquecimento localizado irregular (SHACKELFORD, 2008).

c) Composição e estrutura cristalina

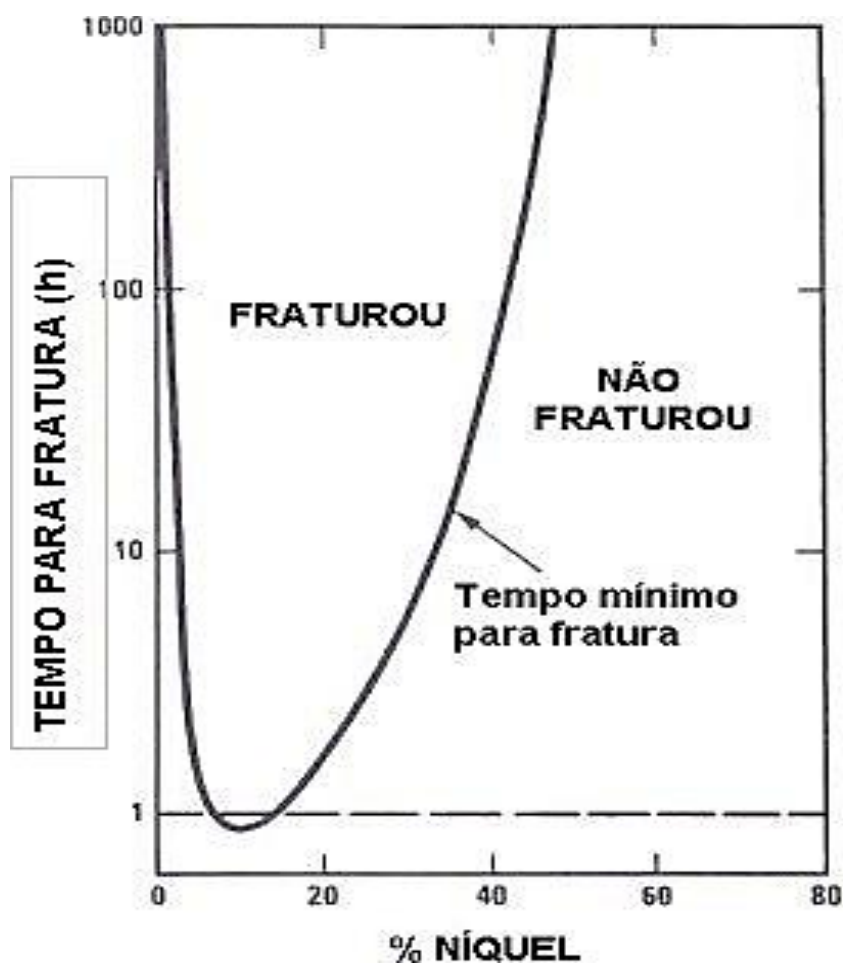
A influência da variação do teor de elementos de liga sobre a CsT pode ser ilustrada com o comportamento dos arames de ligas Fe-Cr-Ni, com diferentes teores de Ni, ensaiados em solução de 42% de MgCl₂. Conforme mostra a Figura 41, as ligas mais susceptíveis à corrosão sob tensão, neste meio, são as que contêm cerca de 8% de níquel.

As ligas com alto teor de níquel são imunes à CsT, porém são menos atraentes devido ao alto custo (SHACKELFORD, 2008).

A estrutura cristalina também influencia a corrosão sob tensão, assim o aço inoxidável ferrítico (CCC) é muito mais resistente à CsT quando exposto a soluções aquosas de cloreto do que o aço inoxidável austenítico (cúbica de face centrada) (FRANCO *et al.*, 1997).

Metais puros são geralmente imunes à CsT, mas, no caso do cobre, traços de impurezas podem torná-lo susceptível (GENTIL, 2003).

Figura 41 - Efeito do Níquel na Corrosão sob tensão de arames de aço austenítico contendo 18 a 20% de cromo em solução aquecida (154°C) de cloreto de magnésio.



Fonte: Adaptado de Jones (1992).

d) Natureza do Meio

A corrosão sob tensão apresenta pouca ou quase nenhuma relação com as demais formas de corrosão no que se refere à natureza do meio. Assim, por exemplo, os aços carbono que são susceptíveis a uma forte corrosão generalizada em soluções de cloreto de sódio, não sofrem, nesses meios, nenhuma corrosão sob tensão. A adição de outras substâncias aos meios que causam CsT pode alterar consideravelmente o tempo necessário para ocorrência da ruptura (PANOSSIAN, 2000).

e) Temperatura e Concentração dos Agentes

Na maior parte das vezes, a ação do meio no desenvolvimento da CsT é acelerada pela elevação da temperatura e concentração dos agentes corrosivos. Além disso, certos metais sofrem CsT, num determinado meio, caso a temperatura do mesmo ultrapasse um determinado valor mínimo. É o que ocorre, por exemplo, com os aços inoxidáveis austeníticos, sendo raros os casos com temperatura abaixo de 80°C (PANOSSIAN, 2000).

2.10.5 Mecanismo de Trincamento

Devido à complexidade que envolve o trincamento por CsT dos metais e ligas não foi possível, até o momento, estabelecer-se um mecanismo universal para formação e desenvolvimento das trincas. Várias teorias foram elaboradas com esse propósito; contudo, nenhuma conseguiu adaptar-se de maneira satisfatória a todos os casos conhecidos de CsT (PANOSSIAN, 2000).

Independentemente do mecanismo atuante, a corrosão sob tensão envolve três estágios principais: período de indução, de iniciação (nucleação da trinca) e propagação da trinca até ocorrer a fratura. O período de indução é definido como o tempo de exposição no meio corrosivo antes da nucleação da primeira trinca; este período é frequente, mas não necessariamente constante em todos os processos (MEYER, R. M.; *et al.* 2013).

O estágio de nucleação corresponde ao crescimento lento da trinca, durante o qual os efeitos combinados de tensão e corrosão promovem a sua propagação, com o consequente aumento da intensidade de tensão na ponta da trinca. O terceiro estágio é atingido quando a intensidade da tensão alcança um valor tal que a fratura rápida passa a ocorrer sob a ação da tensão unicamente (MEYER, R. M.; *et al.* 2013).

De maneira geral, os mecanismos de corrosão sob tensão podem ser agrupados em dois grupos: mecanismo catódico e mecanismo anódico (PINTO, D. F.; 2006).

Nos mecanismos catódicos, também chamados de fragilização por hidrogênio, a polarização catódica dos metais acelera o processo de trincamento, em virtude do hidrogênio que se libera no processo de corrosão. Ocorrem preferencialmente com metais do sistema CCC (cúbico de corpo centrado), tais como os aços inoxidáveis martensíticos (MINGOTTI, Bruna Silva.; 2017).

O aço inoxidável austenítico pode, em algumas circunstâncias ser meta- estável, ou seja, a austenita pode se transformar em martensita do tipo hexagonal compacta (HC), ou do tipo de estrutura cúbica de corpo centrado.

Esta transformação pode ser induzida pela tensão mecânica aplicada ou por tensões induzidas pela presença de hidrogênio (OLIVEIRA, B., 2011).

Os mecanismos de natureza anódica, nos quais a polarização catódica do metal diminui, ou mesmo, detém o desenvolvimento do processo; normalmente, ocorrem em ligas com estrutura CFC (cúbica de face centrada), tais como, aços inoxidáveis austeníticos.

Esse mecanismo, face à possibilidade que existe de controle eletroquímico, normalmente, associa o caminho da trinca com regiões anódicas no restante do material (MINGOTTI, Bruna Silva.; 2017).

Essas regiões são, às vezes, como que distintas do material da matriz, devido à presença de segregações ou fases precipitadas, frequentemente, nos contornos de grão ou nos planos de deslizamentos (SHACKELFORD. J. F.; 2015).

Se as segregações não são anódicas à matriz, as regiões próximas a estas, empobrecidas nos produtos segregados, é que são consideradas anódicas. Forma-se, então, uma célula de corrosão, constituída por uma grande área catódica e uma pequena área anódica, e a dissolução procede através de caminhos ativos do material.

As tensões ajudam a abrir as trincas e permitem expor novas superfícies à ação do meio corrosivo (OLIVEIRA, B., 2011).

2.10.6 Corrosão sob tensão em meio de ácidos politiônicos

A corrosão por meio de ácidos politiônicos surgiu na década de 1950 com a instalação, nas refinarias de petróleo, de unidades de hidrotreatamentos para redução do percentual de enxofre presente no petróleo cru (CANCIAN, R. V.; 2010).

A utilização dos aços inoxidáveis austeníticos era uma prática comum, na época, devido a sua boa resistência ao H_2S presente nas unidades de dessulfurização do petróleo. Entretanto, vários casos de trincamento foram detectados nos aços inoxidáveis austeníticos do tipo AISI

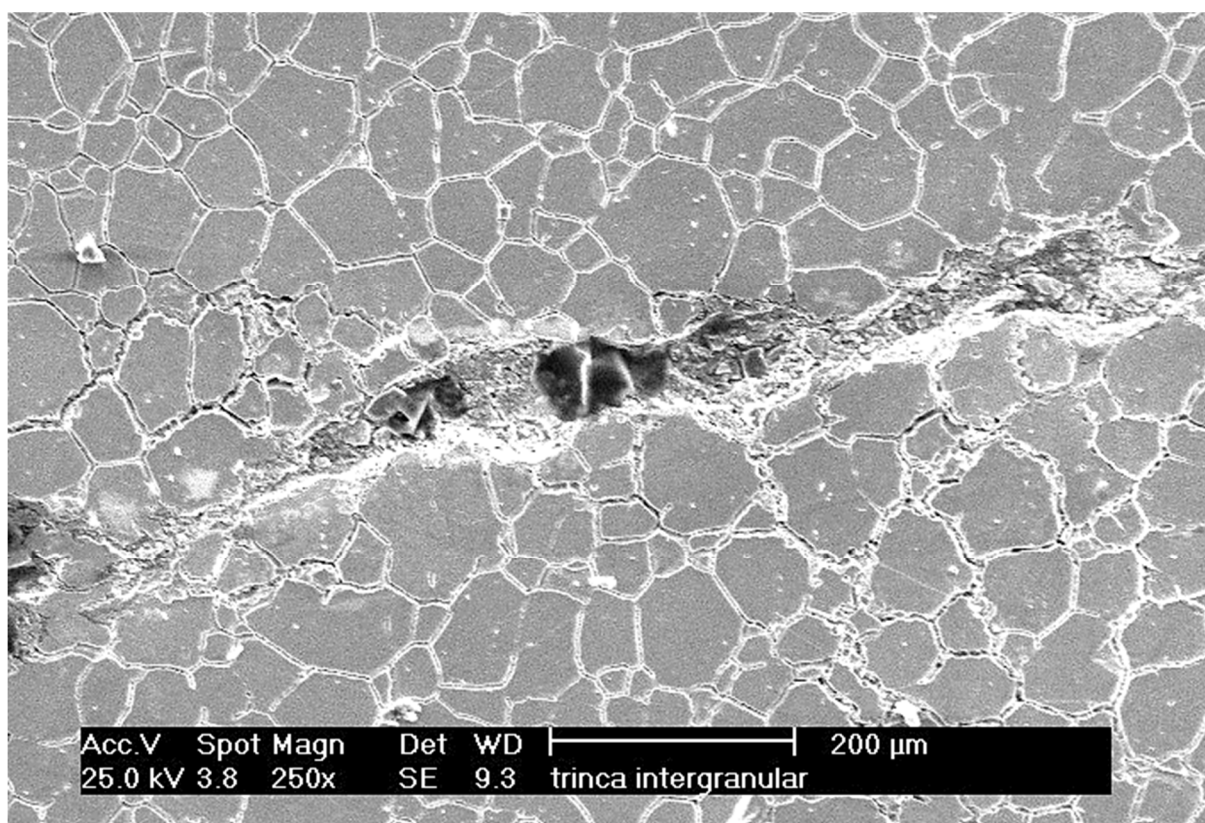
304, principalmente nas regiões adjacentes às soldas. Geralmente as trincas furavam os tubos de 12 mm de espessura em menos de 8 horas (SHIPILOL, 2007).

Estudos posteriores elucidaram o problema tecnológico enfrentado pela indústria do petróleo. Descobriu-se que ácidos politiônicos eram formados pelo seguinte mecanismo: durante a operação em altas temperaturas, o H_2S presente no meio forma sobre o metal uma camada fina de FeS que, por ocasião da parada da unidade, é hidrolisada pela umidade e oxigênio presentes na atmosfera, dando origem à mistura de ácidos politiônicos ($H_2S_xO_6$, onde $x = 3, 4$ ou 5).

Por sua vez, quando esses ácidos entram em contato com aços inoxidáveis sensibilizados devido a exposição à temperatura elevada de operação ou processos de soldagem, dão origem ao trincamento do material. O trincamento é intergranular devido à deficiência de cromo nas áreas adjacentes ao contorno de grão (SHIPILOL, 2007).

Encontra-se na Figura 42 a morfologia do trincamento ocorrido em um tubo de aço AISI 321 em meio de ácido politiônico (GARVERICK; 1994).

Figura 42 - Trincamento ocorrido em um aço AISI 321 rompido em operação.



Fonte: Garverick (1994).

A minimização dos efeitos do ácido politiônico segue duas linhas: na primeira trata-se de evitar a entrada de ar nas tubulações durante as paradas, injetando-se gás inerte sob pressão e também eliminando-se fontes externas que possam vir a depositar enxofre sobre os equipamentos em questão; a outra linha é de ordem metalúrgica e baseia-se na utilização de aços inoxidáveis estabilizados com Ti (AISI 321) e Nb (AISI 347) (JONES, 2017).

O tratamento térmico de estabilização de aços inoxidáveis austenísticos (pelo qual também passa o AISI 316) consiste em submeter a liga à temperaturas entre 870 e 900°C, por cerca de 2 a 4 horas, seguido de seu resfriamento em ar, água ou óleo.

Este tratamento de estabilização visa então promover a máxima precipitação de carbonetos de titânio ou nióbio (TiC ou NbC, respectivamente) evitando a formação de carbonetos de cromo (tais como o Cr_{23}C_6) e retirando ainda todo o carbono de solução sólida (SHIPILOL, 2007).

O uso de água ou óleo como fluido de resfriamento é a prática mais segura e mais indicada, pois os aços devem ser resfriados rapidamente a fim de manter os carbonetos TiC e NbC, em solução) (NETTO, H. V. C., 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Amostra e corpos de prova

O material do CDP utilizado neste trabalho foi retirado da amostra de costado de um vaso de pressão que se descobriu via EDS (Figura 55) [será visto na seção 4.2.3] ser fabricado em aço inoxidável AISI 316 (UNS – S31600), o qual tem muita empregabilidade na indústria química e petroquímica, justamente nestes equipamentos devido a sua alta resistência à corrosão pela formação de uma camada de passivação composta por óxidos de cromo (ASTM A967).

O material de amostra e os CDPs que dele foram coletados, foram adquiridos através da seção do costado de um reator desativado devido a identificação de Corrosão sob Tensão (CsT), sendo este reator oriundo de uma indústria química.

Abaixo seguem as especificações de operação e dados do material (informados pela Indústria Química) – material que foi confirmado via EDS na seção 4.2.3, como será visto.

Dados operacionais:

Pressão de Operação: 0.441 MPa;

Temperatura de Operação: 90° C;

Material: ASTM-A-249 TP 316.

3.1.2 Procedimento Experimental

3.1.2.1 Fluorescência de Raios-X (XRF)

Para confirmar e evidenciar que tal costado era de fato de origem do aço AISI 316, buscou-se inicialmente determinar a composição química do material, utilizando a técnica de Fluorescência de Raios-X (XRF), ou *X-Ray Fluorescent*.

Para a coleta dos resultados que serão expostos mais adiante no trabalho (Figura 48, mais precisamente) o equipamento utilizado pelo autor desta dissertação foi o modelo DELTA, da marca *Olympus*, conforme evidencia a Figura 43.

Figura 43 - Analisador portátil de ligas metálicas por XRF (DELTA, marca Olympus) semelhante ao utilizado no CDP do costado do reator, que posteriormente acabou evidenciando as proporções composicionais que permitiram confirmar a liga de aço inoxidável 316.



Fonte: Olympus (2019).

3.1.2.2 Ultrassom

Para a análise do método de ultrassom neste trabalho foi feita a utilização do aparelho *Phased Array*, da marca *Eddyfi Technologies*, modelo M2M Mantis, com 16/64 elementos, conforme Figura 44.

A faixa de temperatura de trabalho deste equipamento é de -10° C até 60° C, com uso da bateria. O equipamento tem a capacidade de também realizar a inspeção por ultrassom convencional e ultrassom ToFD, conceito já explicado em seções anteriores (RICHTER, M. R. *et al.*, 2003).

A norma de referência para este método é o ASME Sec. V 2017 – *Non-Destructive Examination*.

Figura 44 - Aparelho de ultrassonografia Phased Array, marca Eddyfi Technologies, modelo M2M Mantis, com 16/64 elementos - utilizado em associação com as técnicas TFM e FMC para a captura das características das trincas nos pontos do CDP (costado do vaso de pressão), cujos quais apresentam tais descontinuidades oriundas de CsT.

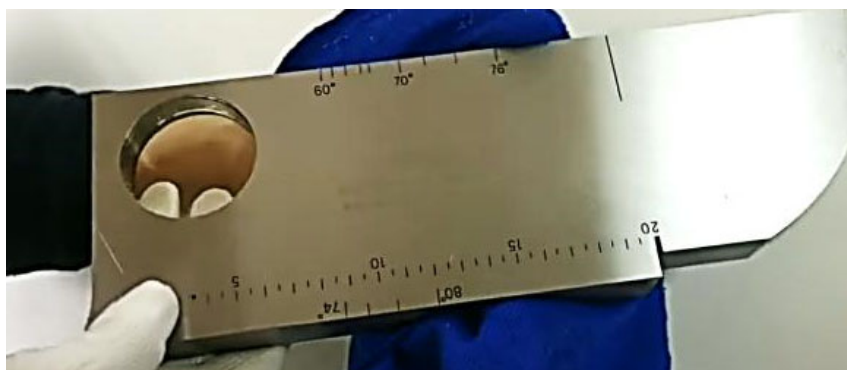


Fonte: Eddyfi Technologies (2019).

3.1.2.3 Calibração do Aparelho de Ultrassom Phased Array

O sistema de ultrassom e o conjunto dos seus componentes devem ser operados de acordo com parâmetros de ajustagem aprovados para inspeção/calibração e suas tolerâncias associadas, sendo utilizados durante todas as inspeções. As calibrações devem ser realizadas a partir da superfície do bloco de calibração que corresponda à superfície do componente a inspecionar (Figura 45) (HUATEC; 2019).

Figura 45 - Bloco da calibração de IIW-V1 Asme Ut, semelhante ao usado na calibração do Phased Array.



Fonte: HUATEC (2019).

Os blocos da calibração são materiais suplementares importantes nos testes ultrassônicos, sendo extremamente úteis no momento de calibrar a sensibilidade do detector ultrassônico da falha e a ponta de prova ultrassônica, sendo utilizados para executar verificação do ângulo de feixe, calibração para o atraso da cunha, calibração da sensibilidade, executando DAC/TCG², e muito mais (HUATEC; 2019).

- **Verificação da Calibração de velocidade do Phased Array e retardo da sapata**

As ajustagens de velocidade do feixe de ultrassom *Phased Array* e do retardo da sapata devem ser verificadas no bloco de calibração que vai ser utilizado para inspeção, pela utilização dos ângulos de sapata refratada, mais baixo, mais alto, e natural, como detalhados nos Plano de Varredura aplicáveis para inspeção (RICHTER, M. R. *et al.*, 2003).

Um refletor de referência deve indicar a profundidade correta e o *index offset* na máxima amplitude de pico quando avaliado com os ângulos de verificação.

Um desvio na profundidade da posição acima de 10% da real espessura de parede do bloco de calibração, ou um *index offset* excedendo 1 mm da distância até a superfície, em relação ao ideal, deve exigir ajustes corretivos aplicáveis na velocidade ou no retardo da sapata.

A calibração da velocidade deve sempre acontecer antes daquela feita na *Probe Delay* (Figura 46).

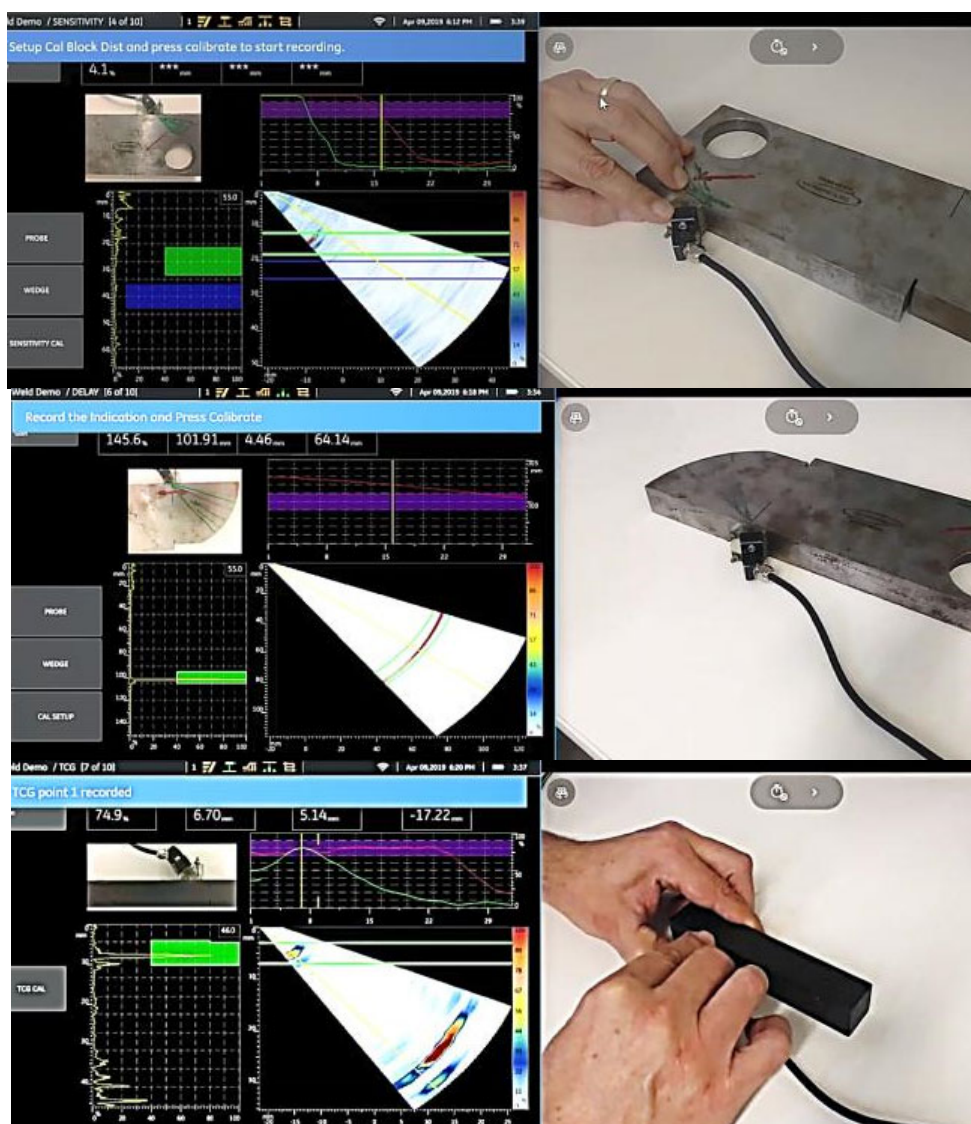
² DAC (Distance Amplitude Correction) é utilizada para o dimensionamento de descontinuidades. Semelhante à curva DAC, a TCG (Time Corrected Gain) também é um fator de correção aplicado ao dimensionamento de descontinuidades. Entretanto, ao invés de uma curva de referência, a TCG funciona alterando o ganho para que uma mesma descontinuidade se apresente com a mesma amplitude em diferentes profundidades.

- **Calibração da sensibilidade do Phased Array**

Os grupos de inspeção *Phased Array* devem ser calibrados quanto ao Ganho com Tempo Corrigido (TCG) compensados para atenuação no material, nas trajetórias do som utilizadas durante a calibração e a inspeção. Isso deve ser identificado como a “sensibilidade de referência” (HUATEC, 2019).

Para registrar os percursos e amplitudes, o feixe deve sempre seguir a amplitude máxima. Isso pode ser verificado no mapa de Amplitude para sensibilidade e no Mapa de Percurso para *Probe Delay* (WAYGATE TECHNOLOGIES, 2019).

Figura 46 - Etapas de calibração de Sensibilidade, Probe Delay e TCG, respectivamente.



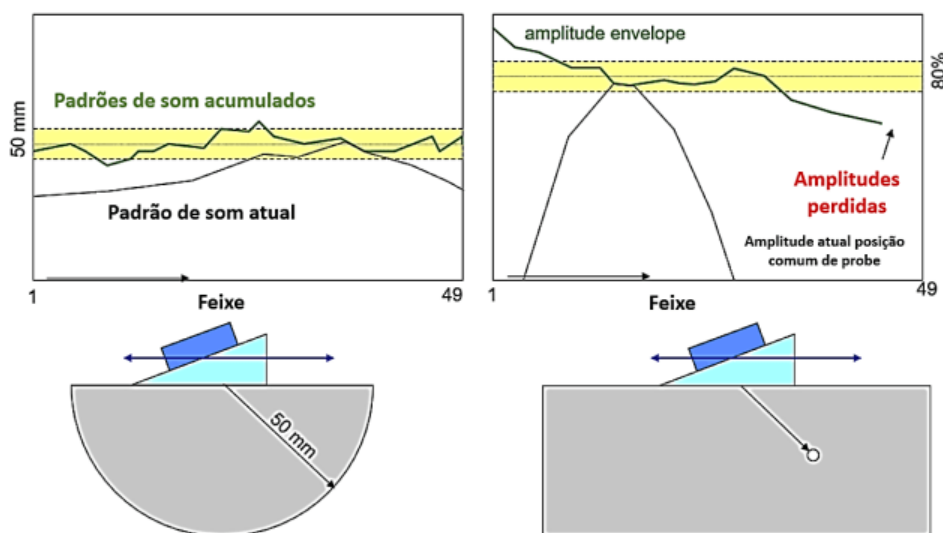
Fonte: WAYGATE TECHNOLOGIES (2019)

• Particularidades dos Blocos de Calibração

Uma calibração TCG deve ser realizada de forma que cubra o volume de interesse, durante inspeção, pela utilização de furos laterais usinados, para cada ângulo de inspeção utilizado.

Cada refletor deve ser ajustado para produzir um sinal de resposta de 80% de altura de tela plena (FSH) $\pm 5\%$ FSH (Figura 47). Os atrasos correspondentes ou os valores de compensação de ganho para cada feixe são armazenados no instrumento.

Figura 47 - Mapa de Amplitude para sensibilidade e mapa de percurso para Probe Delay. Registro dos percursos e amplitudes, evidenciando o feixe seguindo a amplitude máxima.



Fonte: Adaptado de WAYGATE TECHNOLOGIES (2019).

• Intervalos entre calibração

A calibração do sistema de ultrassom deve ser realizada (RICHTER, M. R. *et al.*, 2003):

- Antes do início das inspeções diária;
- Sempre que as ajustagens de sensibilidade parecem exceder a tolerância;
- A cada quatro horas desde a última calibração válida;
- Após qualquer situação com falta de energia elétrica;
- Após a troca de inspetor;
- Ao término de uma série de atividades de inspeção.

Nenhum ajuste deve ser feito para obter uma calibração aceitável após inspeções de soldas.

3.1.2.4 Emissão Acústica

O princípio de detecção de descontinuidades através do ensaio de Emissão Acústica (EA) está baseado no fato de que a presença das mesmas gerar uma região de concentração de tensões no material onde, em função de sua morfologia e carregamento aplicado, o nível de tensão mecânica atinge valores superiores à tensão de escoamento do material, causando deformação plástica e/ou crescimento localizado destas trincas em porções das extremidades do corpo.

Esta mudança de estado do material gera ondas elásticas transientes que se propagam de forma volumétrica e com velocidades conhecidas em materiais isotrópicos.

Este fenômeno assemelha-se ao pulso ultrassônico. O pulso emitido pelo material, que viaja pela estrutura, é capturado por transdutores e transformado em um sinal elétrico que é parametrizado pelo sistema de EA. Desta forma, a EA é capaz de detectar a propagação de descontinuidades internas, subsuperficiais ou que aflorem à superfície da estrutura. Na inspeção de EA realizada nas regiões da amostra desse trabalho foi utilizado o aparelho do fabricante *Physical Acoustic Corporation* (PAC) (Figura 49), semelhante ao modelo da Figura 48. Seus dados operacionais se encontram abaixo:

Dados operacionais:

- Modelo: DiSP, com 04 canais com sensores PAC – R15;
- Pico de Frequência: 150 kHz;
- O range de temperatura: -65° a 175° C.

Figura 48 - Cabeçote do aparelho sensor ressonante de banda estreita DiSP PAC – R15, de elevada sensibilidade, extremamente robusto e confiável, com cavidade usinada em aço inoxidável e face em cerâmica (com chanfro de 30°), isolando eletricamente a cavidade do sensor da estrutura em teste garantindo uma operação de baixo ruído.



Fonte: Physical Acoustic Corporation (PAC), (2019).

3.1.2.5 Revelação das trincas e tensão residual

A chapa utilizada nesta dissertação foi retirada de um reator (vaso de pressão “aposentado”) no qual foram identificados diversos pontos com trincas através do END de líquido penetrante. O monitoramento via EA *in natura* foi obtido em diversas sessões de EA (Figura 49), porém espaçadas por um longo espaço de tempo (aproximadamente 45 dias). Mostrou-se também que a tal chapa do costado do vaso de pressão tinha uma tensão residual da ordem de 110 MPa (Figura 50).

Figura 49 - Ensaio de EA sendo realizado através da utilização de 4 sensores ressonantes de banda estreita DiSP PAC – R15 sobre parte da chapa do costado/tampo superior do reator (ou vaso de pressão) que se utilizou como amostra. Nesta imagem é possível observar pontos destacados contendo trincas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

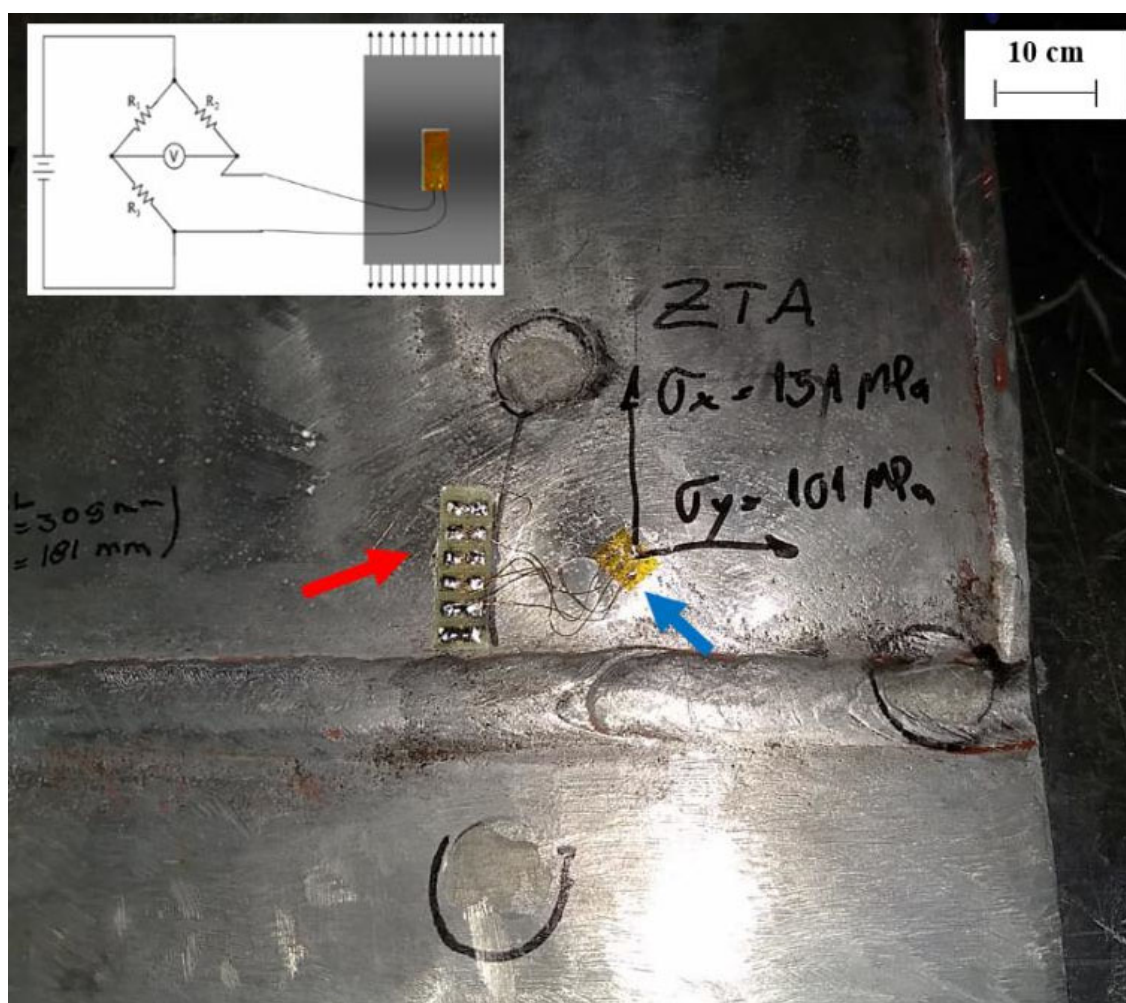
A tensão residual dessa chapa foi medida pelo autor deste trabalho utilizando-se uma das técnicas mais aplicadas para medição de tensões em equipamentos industriais, que é a Extensometria. Para extrair os valores de tensão na chapa essa técnica se utiliza extensômetros de resistência elétrica, mais conhecidos como *strain gages* (Figura 50).

O principal equipamento da extensometria é o condicionador (ou indicador de deformações – destacado pela seta vermelha na Figura 50), que contém uma ou mais *Pontes de Wheatstone*, nas quais são ligados os extensômetros (detalhe superior da Figura 50).

O condicionador permite a determinação das mudanças de potencial geradas pelas variações de resistências elétricas dos sensores, induzidas pelas variações de seus comprimentos.

No detalhe no canto superior esquerdo da Figura 50 evidencia o esquema elétrico simplificado das resistências que faz o mecanismo funcionar, através das *Pontes de Wheatstone*.

Figura 50 - Evidência da aplicação do método de medição de extensometria para determinar a tensão residual apresentada pela chapa amostra do costado do vaso de pressão utilizado neste estudo. No canto superior esquerdo encontra-se esquema elétrico simples do mecanismo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Vale ressaltar que o autor tomou o máximo de cuidado para realização correta da coleta dos dados, pois embora a extensometria seja uma técnica já consolidada e bastante confiável, ela exige grande habilidade por parte de seu executor, que deve cumprir com máximo esmero as etapas de marcação, preparação da superfície (lixamento e limpeza), colagem (seta azul da Figura 50) e deve conhecer muito bem os equipamentos utilizados (AMOROS, T. R., 2008).

A fim de se conseguir um resultado mais rápido foi introduzida uma fonte de calor representada pela utilização de lâmpadas que promoveram aquecimento que passou dos 60° C na superfície, adicionando ainda *ppm* de solução de Cloreto de Sódio (NaCl).

Com esta combinação de tensão residual da chapa, trincas pré existentes, adição de NaCl e uso de fonte de calor, foram obtidas atividades de EA mais severas, as quais tiveram os resultados gráficos evidenciados nas Figuras 63, 64 e 65 (explicados na seção 4 desta dissertação - Resultados e Discussão).

Após estas medições de tensão residual na parede do costado, das informações obtidas pela empresa sobre o equipamento e as condições de uso do mesmo, suspeitou-se de serem trincas rasas com origem em fenômenos de Corrosão sob Tensão (CsT).

Pois tal como já mostrado por estudos renomados (como o de Ihho Park e colaboradores), tensão residual em vasos de pressão combinada com solução rica em cloretos em contato com aço inox gera um ambiente perfeito para ocorrência da CsT (PARK, I. *et al.*, 2021).

Baseando-se no estudo de Ihho Park e colaboradores também foi realizada a constatação da CsT através do emprego de Microscopia Óptica e EDS, aplicado sobre as amostras retiradas da chapa em regiões contendo tais evidências. Essas conclusões estão na seção 4 – Resultados e Discussão.

3.1.2.6 Preparação das amostras

A preparação metalográfica dessas amostras foi feita em cima dos preceitos contidos na Norma ASTM E3-11 (2017) e sua observação através do MO foi realizada nas instalações do laboratório de metalografia do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), da Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP, em São José dos Campos – SP.

- **Corte**

Inicialmente, determinou-se as porções da chapa a serem cortadas, suas formas geométricas e principalmente a localização das mesmas perante a superfície superior do costado do vaso de pressão, priorizando as regiões com trincas ideais para análise.

Escolheu-se os pontos com trincas visíveis e próximos ao cordão de solda. Logo depois executou-se a operação de corte desta amostra (transversalmente) utilizando-se a cortadeira *cut off* da fabricante AROTEC (modelo Orocor 80). Durante todo o tempo de execução desta etapa garantiu-se o aporte de fluido refrigerante no ponto onde o disco de corte encontrava-se com a amostra, para que não houvesse um superaquecimento da região e possível danificação da amostra metálica, já que altas temperaturas poderiam induzir mudanças de fases e no dimensional das descontinuidades, alterando assim as características estruturais das amostras.

Além disso, manter a temperatura baixa nessa região preservou a lâmina de corte do disco da máquina, prolongando sua vida útil.

- **Embutimento**

Já com as amostras cortadas, começou-se o procedimento de embutimento, que basicamente consiste em encaixar e cravar a amostra em uma base de polímero termorrígido (no caso em questão, a baquelite) com a finalidade de proporcionar um manuseio/manejo facilitado e seguro das amostras. Inicialmente levou-se as amostras para a embutidora metalográfica da fabricante TECLAGO (modelo EM30D) e logo depois foi feito o correto posicionamento das mesmas no êmbolo da máquina, cuidando para que as faces escolhidas estivessem voltadas para baixo. Após isso, o êmbolo foi baixado lentamente (através do acionamento da válvula de alívio de pressão) até se obter um espaço suficientemente grande para a deposição do pó de baquelite.

Com o auxílio de um béquer de 50 mL acrescentou-se 20 mL do pó de baquelite utilizando espátula, transferindo-se tal volume cuidadosamente para o espaço disponível, fechando-o.

A pressão adequada para essa operação foi ajustada para 110 bar durante o ciclo de aquecimento, configurado para a temperatura de 174 °C com duração de 3 minutos e 24 segundos. Ao final desse período de aquecimento e fusão do termorrígido, cada uma das amostras embutidas foi destinada a etapa de resfriamento. Então, o compartimento foi aberto e com o auxílio de uma luva termo restringente e retirou-se as mesmas, já embutidas em baquelite. Posteriormente, realizou-se o lixamento de tais amostras para iniciar a preparação exigida pela análise em MO.

- **Lixamento**

Antes de iniciar o processo de lixamento das amostras metálicas em si foi feito a quebra dos “cantos vivos” no disco de baquelite resultante do embutimento e tal operação exigiu a montagem da lixa #180 na politriz lixadeira de velocidade variável TECLAGO modelo PW-300, o que permitiu a suavização das arestas cortantes para maior conforto e segurança.

A sequência de lixamento iniciou-se pela montagem de uma lixa mais fina (#320) na politriz e logo em seguida configurou-se a politriz para a rotação de 306 rpm. A torneira lateral foi aberta para fornecer a vazão necessária de água (para o resfriamento, lubrificação e remoção de material) e a politriz foi finalmente colocada em funcionamento.

Pressionando o disco de baquelite com a superfície da amostra metálica voltada para baixo (contra a lixa abrasiva) garantiu-se a pressão adequada para planificação e remoção de partículas. Para as demais lixas (#600 e #1200) exatamente os mesmos passos foram executados, com a ressalva de que a cada troca a amostra foi enxaguada tanto em água corrente como em álcool, além de ter sido secada com secador/soprador de ar a 45° de inclinação.

Também se executou a observação da evolução da quantidade e disposição dos riscos antes de seguir para as demais lixas. Um ponto importante executado foi a mudança de angulação da amostra a cada troca de lixa, variando 90° de uma para outra a fim de eliminar os riscos deixados pela lixa anterior e permitir preservação das trincas e uma observação mais clara de suas morfologias.

Ao final, as superfícies preparadas no lixamento foram avaliadas no Microscópio Óptico convencional *Feldmann Wild Leitz* (modelo FWL 3500 POL) e decidiu-se que as amostras estavam prontas para o polimento, ou seja, sem marcas profundas das lixas anteriores. Porém, antes do início dessa próxima etapa foi feita a lavagem e secagem de cada lixa utilizada (#180, #320, #600 e #1200) além de ter sido realizada a limpeza da politriz.

- **Polimento**

Utilizando o mesmo equipamento (politriz semiautomática) deu-se prosseguimento ao processo de aplainamento e regularização das superfícies, porém agora visando um acabamento superficial final polido. Iniciou-se com o polimento “grosseiro” e para isso executou-se a montagem do pano de polimento amarelo (com trama de 1 μm) no disco de rotação da politriz.

Logo depois foi realizada a umidificação do pano com pouca água e efetuou-se a deposição de uma certa quantidade de fluido de polimento (suspensão abrasiva de Al_2O_3) sobre o mesmo.

Para que a solução abrasiva não fosse dispersada do pano pela ação força centrífuga durante a rotação configurou-se a velocidade da politriz para apenas 150 rpm e durante o tempo do polimento a torneira permaneceu fechada.

Tendo sido ajustados todos esses detalhes foi iniciado de fato o polimento “grosseiro” das amostras pressionando-as contra o tecido e, ao contrário do que aconteceu no lixamento, aqui no polimento as amostras foram movimentadas contra o sentido de rotação do disco por meio de movimentos circulares, visando uma melhor eficiência desta etapa.

Uma averiguação do estado das superfícies foi efetuada no microscópio óptico convencional Feldmann Wild Leitz modelo FWL 3500 POL e viu-se apenas poucos riscos. Sendo assim, as amostras foram lavadas em água corrente, entraram em contato com álcool e partiram para a secagem no soprador de ar posicionado a 45°, enquanto isso realizou-se a troca dos panos de polimento e lavou/secou o pano amarelo até que toda a suspensão de alumina fosse removida.

O polimento fino se iniciou por meio da deposição de um novo fluido abrasivo [suspensão coloidal de sílica – (OPS)] com granulometria menor (0,25 μm) sobre o pano de polimento OPCHEM.

Novamente a máquina foi ligada em rotação baixa (150 rpm), com aporte de água mínimo apenas para a umidificação inicial do OPCHEM e a partir disso cada uma das amostras foram pressionadas contra o pano, sofrendo rotações no sentido contrário ao disco e observadas ao microscópio óptico convencional Feldmann Wild Leitz modelo FWL 3500 POL a cada ciclo [para acompanhar a evolução do padrão dos riscos]. Ao final do polimento fino realizou-se tanto a lavagem e secagem das amostras e do pano OPCHEM, bem como a limpeza, desligamento e fechamento da politriz.

Como era de se esperar, foi constatado que as amostras apresentavam grande quantidade de impurezas residuais deixadas pelo processo lavagem ineficiente e optou-se por fazer, antes do ataque químico, a submissão das amostras a um procedimento de esterilização em banho de acetona PA 99,5 % com incidência de ultrassom. A cuba foi preenchida com acetona e o equipamento da marca SCHUSTER L100 foi ligado, sendo configurado para um tempo de 480 segundos de permanência.

- ***Observação da amostra polida (sem ataque)***

Após já ter sido feita a verificação através do microscópio óptico convencional Feldmann Wild Leitz modelo FWL 3500 POL de que as amostras se encontravam isentas de riscos e resíduos, realizou-se uma observação mais detalhada no microscópio óptico com aquisição de imagem ZEISS modelo AXIO Scope. A1, onde as amostras foram colocadas sobre a base rolante, posicionadas, atingidas pela luz e previamente observadas por meio das lentes oculares.

Após ter sido feita a regulação da aproximação, do foco da região escolhida (com o maior número de informações) e do aumento de 200x, imagens capturadas pela câmera foram transmitidas ao computador e fotomicrografias foram obtidas.

- ***Ataque químico***

Num processo metalográfico como este a etapa de ataque químico é essencial, uma vez que esta tem o objetivo de permitir uma melhor visualização dos contornos dos grãos, descontinuidades, aumentar o contraste entre fases presentes na microestrutura, facilitando a análise.

Fazendo uso dos EPI's necessários (luvas, jaleco e óculos) transportou-se as amostras para a capela e iniciou-se a preparação da solução de ataque (Ácido Oxálico 10% Eletrolítico).

O ataque eletrolítico foi realizado em uma solução aquosa de Ácido Oxálico 10% utilizando-se uma densidade de corrente de 1 A/cm^2 , por um período de 1 minuto (tempo medido com o cronômetro). Ensaio realizado conforme procedimento da Prática A da norma ASTM A262 (ZUCATO, Igor; *et al.*, 2000).

As amostras foram levadas para observação no microscópio óptico com aquisição de imagem ZEISS modelo AXIO Scope. A1 e constatou-se que esse primeiro ataque já tinha sido suficiente.

Durante a imersão e ataque Ácido Oxálico 10% eletrolítico, a superfície é atacada e ocorre uma série de transformações eletroquímicas com os grupos, aumentando o contraste por meio das diferenças de potencial químico de cada componente do material, trazendo mais nitidez ao contorno e características das trincas.

O ataque com ácido oxálico revela os contornos de grão austeníticos, facilitando a extração se determinada trinca rompeu ou não esses contornos, levemente atacados.

- ***Observação da amostra (depois do ataque)***

Após ter sido realizada a averiguação prévia da condição das amostras no microscópio convencional Feldmann Wild Leitz modelo FWL 3500 POL, verificando que sua microestrutura estava bem definida e que não seriam necessários novos ataques, efetuou-se as observações principais sob o microscópio óptico com aquisição de imagem ZEISS modelo AXIO Scope. A1 e as peças foram avaliadas em toda a sua extensão.

Usou-se para isso lentes objetivas com diversos aumentos (50x, 100x, 200x e 500x), configurou-se o foco e o filtro.

Depois, sabendo que quando a luz incide sobre uma superfície metálica plana e polida ocorre além de difração uma reflexão bastante uniforme dos raios e que esse fenômeno dificulta tanto a visualização como a análise dos aspectos da estrutura/composição do material buscou-se contornar a situação e conseguiu-se obter melhorias no contraste das fases presentes através da utilização de alguns recursos oferecidos pelo microscópio ZEISS, como aumento da intensidade de luz incidida, uso de filtro e configurações na escala de cores no software do fabricante.

Apenas após terem sido ajustados todos esses parâmetros é que se fez a obtenção das fotomicrografias, para cada um dos aumentos (adicionando ainda a escala ideal) e a partir destas foram coletadas/anotadas as informações observadas relevantes sobre as características microestruturais, que serão discutidas e justificadas posteriormente, na seção 4 desta dissertação - Resultados e Discussão.

De acordo com as características observadas nas fotomicrografias geradas via MO com aquisição de imagem ZEISS modelo AXIO Scope. A1, e resultados da análise da composição química via EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) constatou-se que de fato as trincas existentes foram decorrentes do mecanismo de CsT, principalmente aquelas nas proximidades da solda, devido à presença de cloretos (ABINOX, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONFIRMAÇÃO DO MATERIAL POR XRF

A análise por XRF pode ter fins qualitativos/quantitativos e se baseia na medição de intensidades dos raios-X discriminantes emitidos por elementos da amostra, quando esta é excitada por partículas (elétrons, prótons ou íons), produzidos, nesse caso, através de tubos de raios-X (Figuras 22 e 43) (MELO JÚNIOR, 2007).

Desde a validação de sua confiabilidade, feita na publicação de NAGATA *et al.*, (2001), a XRF passou a ser uma das técnicas mais empregadas, principalmente para aquelas áreas onde a obtenção de rápido perfil de constituintes metálicos/não-metálicos é indispensável. No entanto, deve-se dizer que a determinação analítica de metais e suas ligas pode ainda se valer das técnicas colorimétricas, espectrometrias de absorção atômica, de fluorescência atômica, de emissão atômica e de massa (SKOOG *et al.*, 2009).

O resultado obtido da determinação da análise química feita no CDP da amostra foi satisfatório, uma vez que se confirmou que o material do costado e tampo do vaso de pressão ensaiado era de fato o AISI 316 (Quadro 6) (UNS-S31600).

Como pode ser visto na sequência de tomadas de composição, compiladas no Quadro 6, com o aparelho analisador de liga metálicas por XRF, as proporções dos elementos químicos característicos ficaram dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma SA-240/SA-240M (2007) (Quadro 2), combinação que o classifica na família austenítica (ABINOX, 2021). De forma que tais evidências são suficientes para a tarefa de caracterização de composição e comprovação do material usado (Aço Inoxidável AISI 316).

Quadro 6 - Valores das cinco medições composicionais feitas com o analisador portátil de ligas por XRF (DELTA, *Olympus*). A proporção dos elementos característicos da uma liga de aço inoxidável 316.

<i>Elementos</i>	<i>Percentual dos elementos identificados</i>					<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
	<i>Medição 1</i>	<i>Medição 2</i>	<i>Medição 3</i>	<i>Medição 4</i>	<i>Medição 5</i>		
<i>Fe</i>	66,81%	68,60%	67,73%	67,61%	66,68%	67,49%	0,78%
<i>Cr</i>	18,65%	18,83%	18,34%	18,69%	19,84%	18,87%	0,57%
<i>N</i>	11,68%	9,16%	10,45%	10,85%	10,31%	10,49%	0,91%
<i>Mo</i>	1,87%	1,70%	1,96%	1,83%	2,14%	1,90%	0,16%
<i>Mn</i>	0,59%	1,41%	1,51%	0,59%	0,90%	1,00%	0,44%
<i>Cu</i>	0,40%	0,31%	0,00%	0,43%	0,14%	0,26%	0,18%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para tanto realizou-se a *[1] observação sob o Microscópio Óptico de amostras contendo tais trincas*, obtidas a partir do corte/secionamento de regiões específicas do tampo (principalmente aquelas que estão próximas do cordão de solda, porções instáveis) e realizou-se também a *[2] análise da composição química via EDS do pó resultante da corrosão superficial* de certas regiões do tampo. Pó este que foi removido mecanicamente por raspagem.

A preparação de tais amostras para essa análise ao MO com aquisição de imagem ZEISS modelo AXIO Scope. A1 e para a análise da composição química via EDS, estão detalhadamente comentadas na seção anterior (3 – Materiais e Métodos).

4.2.1 Registro fotográfico

Na Figura 52 é possível ver duas das amostras cortadas/preparadas metalograficamente para serem analisadas via MO (Figura 52 – percebe-se que é uma região de cordão de solda com trincas adjacentes). É importante enfatizar que no vaso de pressão utilizado neste estudo, as trincas aparecem tanto na parte interna quanto externa do costado.

Acredita-se que as trincas que surgiram do lado interno foram provocadas pelo contato direto com o fluido agressivo contido no interior do vaso de pressão.

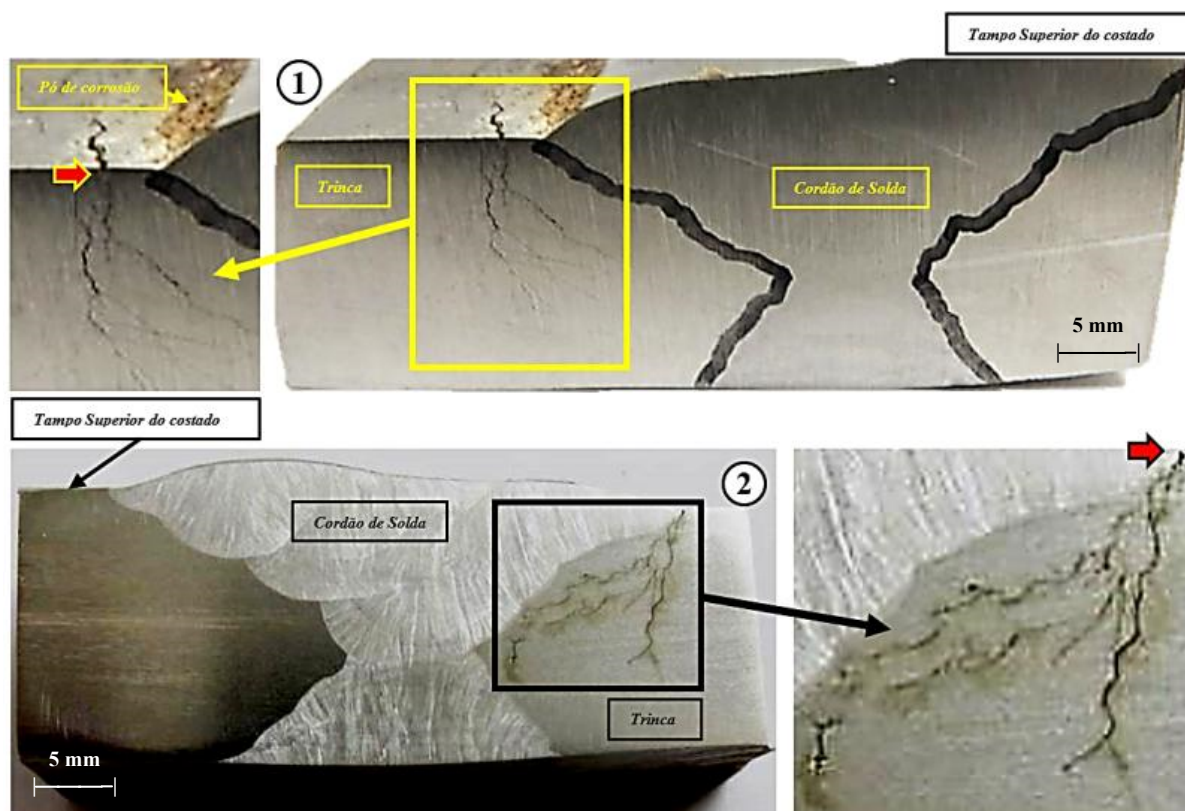
Esta não é uma situação corriqueira, no entanto, após coleta de informações *in loco*, verificou-se que, com o passar dos anos de utilização do equipamento, houve um aumento nos índices de Cloretos do fluido, acima dos níveis previamente projetados para o material do costado.

Isso ocorreu pelo fato de o vaso de pressão ter sido adquirido de uma outra empresa e, como dito, pela modificação do processo (que acabou por passar a empregar líquidos armazenados com maiores teores de Cloretos).

Já as trincas externas, ou seja, que se encontram do lado externo do costado do vaso de pressão (podem ser vistas na Figura 52) têm origem no contato com a manta de lã de rocha — que faz parte do sistema de isolamento térmico — uma vez que a mesma quando em condições úmidas, libera *ppm* de Fluoreto e Cloreto, condicionando assim a situação que gerou o aparecimento de tais trincas superficiais (OLIVEIRA, K. A., 2014).

As trincas que serão vistas a seguir (Figura 52) são aquelas existentes na parte externa do costado.

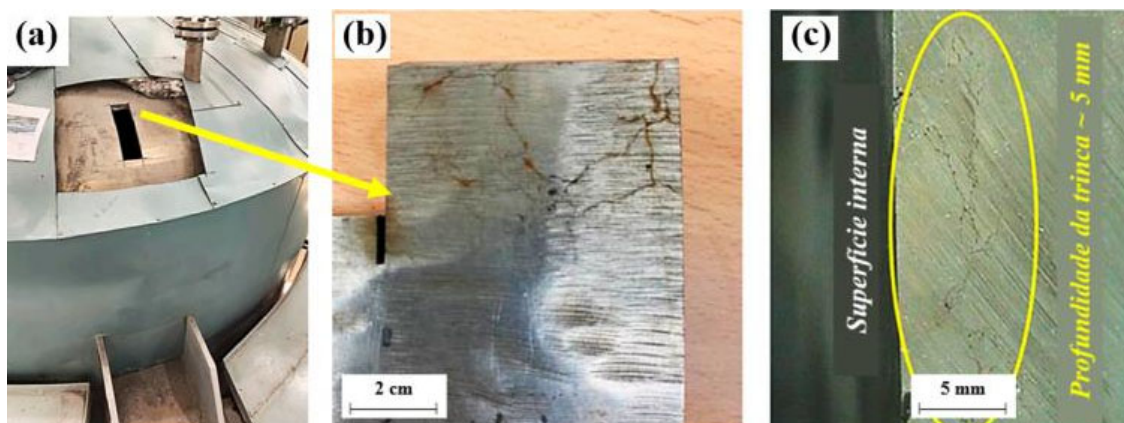
Figura 52 - Registro fotográfico da Amostra 1 (acima) e da amostra 2 (abaixo). Em ambas é possível observar a seção transversal da chapa com o perfil de solda, regiões de corrosão e trincas bem pronunciadas. Nas setas em vermelho pontua-se o início das trincas (de fora para dentro), partindo de um ramo único quase que vertical e irradiando-se em vários veios transversais nas extremidades, tendenciando sua orientação para uma região cada vez mais interna, junto a interface do cordão de solda, material ressolidificado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

É possível notar pelas fotografias uma similaridade entre as trincas das duas amostras com o padrão ramificado (característico de CsT) das Figuras 36 e 37, bem como com as amostras do costado do reator do estudo de Ihho Park e colaboradores (Figuras 39 e 53) [seção 2.10.3 - Características da CsT] (PARK, I. *et al.*, 2021).

Figura 53 - Reapresentação das características visuais das trincas encontradas por Ihho Park e colaboradores no reator de aço inox AISI 304, que armazenava uma solução de $MgCl_2$ sob alta temperatura.



Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2021).

As trincas da amostra desta dissertação (Figura 52) apresentam as mesmas características das de Ihho Park e colaboradores (Figura 39) [seção 2.10.3 - Características da CsT], no entanto, estas foram originadas entre a solda da calha do suporte do isolamento térmico e a solda tampo superior/costado. Como mencionado pelo trabalho de Ihho Park e colaboradores – assim como em outros estudos – a solda é uma fonte de tensão residual e o fato de as trincas terem aparecido próximas a essa região não caracteriza surpresa (PARK, I. *et al.*, 2021).

Na Figura 54 é possível ver uma área (sem trincas) aleatória do tampo de onde foi removido (por raspagem) o pó oxidado abaixo da lã de rocha que, posteriormente, foi analisado via EDS (Figura 60 – perceba que esse material óxido se desprende facilmente da chapa e pode ser coletado).

Figura 54 - Superfície externa da chapa do costado, abaixo da calha suporte do isolamento, onde observou-se a presença de uma área com oxidação, sendo ali realizada uma raspagem para remoção do resíduo e caracterização via EDS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os resíduos desta raspagem foram submetidos ao EDS e os valores de Cloretos foram identificados (Figura 60) [seção 4.2.3 – Análise da composição química via EDS].

Essa raspagem foi realizada para verificar os níveis de Cloreto encontrados na região (oxidada) logo abaixo da manta de lã de rocha com a finalidade de justificar este evento com a teoria proposta por Kamila Oliveira, que explicaria o motivo de origem e formação das trincas na parte externa do costado do vaso de pressão (OLIVEIRA, K. A., 2014).

Kamila Oliveira propõe que a lã de rocha quando em condições úmidas (tais como a do caso discutido na presente dissertação) libera *ppm* de Fluoreto e Cloreto, condicionando assim a situação que gerou o aparecimento de tais trincas superficiais (OLIVEIRA, K. A., 2014).

Essa informação é importante porque de acordo com o Mônica M. Schwartzman e colaboradores concentrações pouco acima de 50 *ppb* de cloretos já são suficientes para induzir fenômenos de CsT (Quadro 7), caso os componentes (1) *material* (susceptível) e (2) *tensões residuais também* estejam presentes (SCHVARTZMAN, M. M. A. M. *et al.*, 2010).

Quadro 7 - Concentrações de agentes agressivos que podem induzir CsT caso em contato com metal susceptível e tensões residuais.

<i>Parâmetro de controle</i>	<i>Valores</i>
Cloretos (<i>ppb</i>)	>50
Fluoretos (<i>ppb</i>)	>50
Sulfatos (<i>ppb</i>)	>50
Boro (<i>ppm</i>)	1200
Lítio (<i>ppm</i>)	2,2

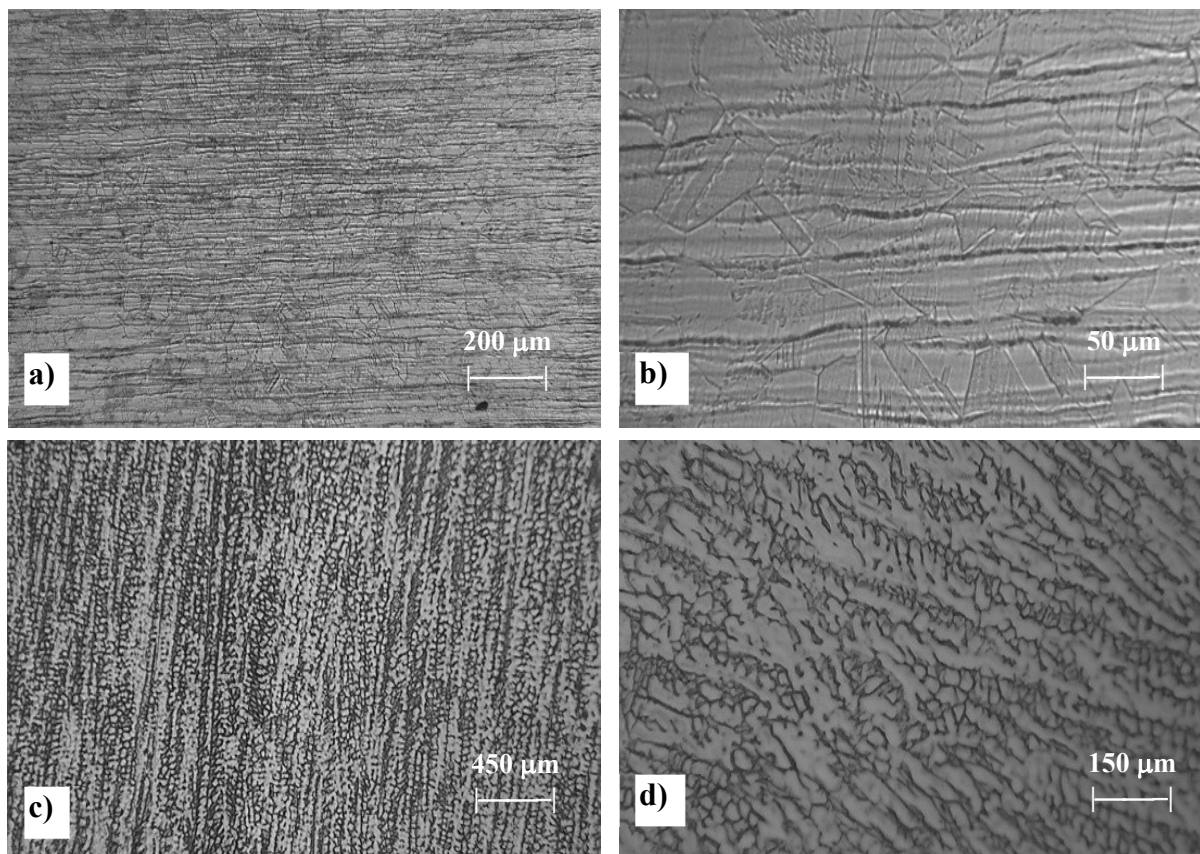
Fonte: Schwartzman *et al.* (2010).

4.2.2 Análise metalográfica via Microscopia Ótica (MO)

Como mencionado, as amostras tiveram suas características observadas ao Microscópio Óptico com aquisição de imagem ZEISS modelo AXIO Scope. A1 e as fotomicrografias obtidas se encontram na coletânea resumida nas Figuras 55 e 56, que teve tanto a microestrutura ao entorno como as trincas focalizadas.

Nas fotografias a) e b) (Figura 55) ilustram-se a microestrutura do material do tampo superior e as fotografias c) e d) (Figura 55) mostram a microestrutura da solda do tampo/costado. Nestas últimas percebe-se que a solda apresenta microestrutura típica, não sendo constatada anormalidades. Todas as fotomicrografias foram feitas após o ataque com ácido oxálico 10% eletrolítico, tal como explicado na seção 3.

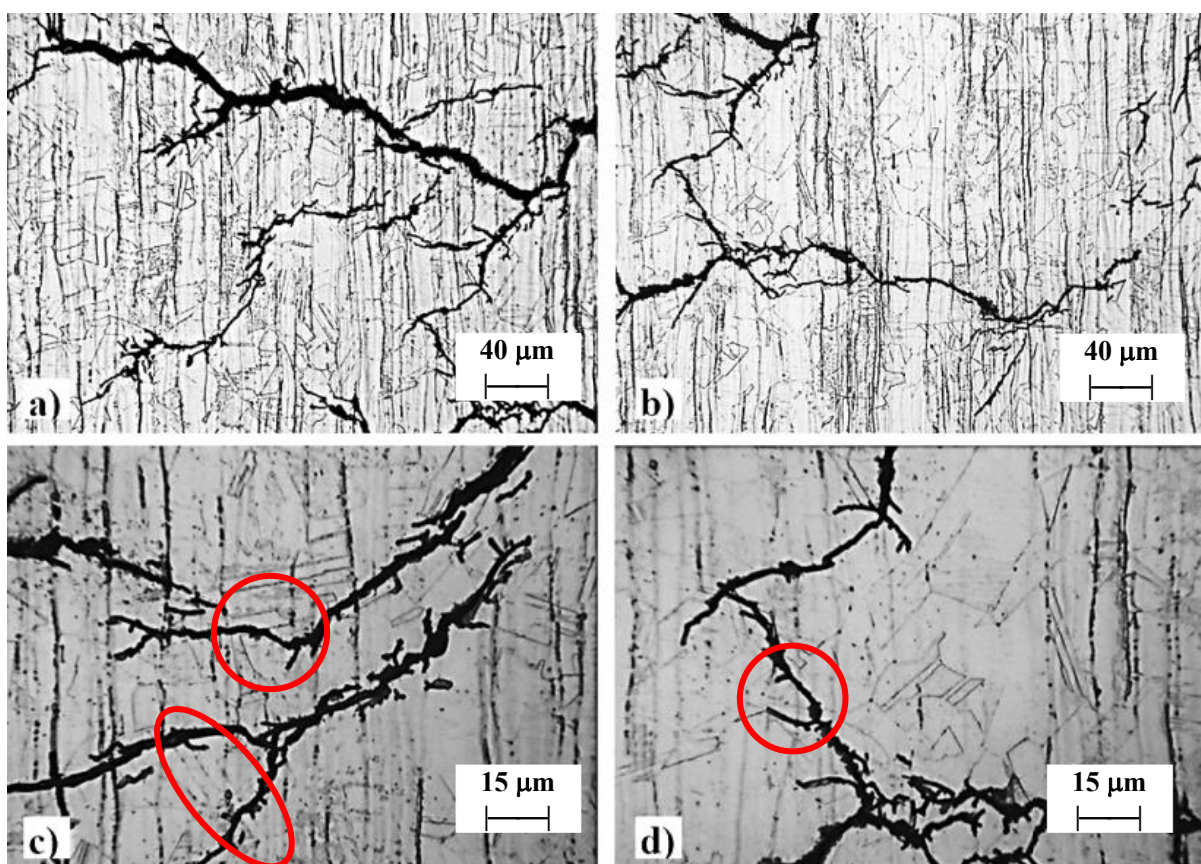
Figura 55 - Em a) e b) têm-se a microestrutura do material do tampo superior, constituída de austenita e ferrita delta sob aumento de 200x e 500x, respectivamente. Em c) e d) a microestrutura do material da solda do tampo superior/costado, com austenita e ilhas de ferrita, (aumento de 200x e 500x, respectivamente).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Analisando as fotografias de a) a d) (Figura 56), percebe-se que o perfil das trincas são transgranulares e ramificadas (padrão visto mais claramente nos círculos em vermelho – Figuras 56c e 56d), características de Corrosão sob Tensão, tal como bibliografia exposta na seção 2.8.2, e, sendo assim, provocadas muito provavelmente por cloretos em aços inoxidáveis austeníticos (família da qual a liga do caso abordado nesta dissertação – aço inox 316 – adequa-se perfeitamente).

Figura 56 - Em a) tem-se trincas transgranulares ramificadas originadas na superfície externa do costado (200x). Em b) tem-se trincas de mesma natureza (transgranular, ramificada e da superfície externa), mas na HAZ pela solda (200x). c) Trinca transgranular e ramificada (500x) e em d) a mesma condição (transgranular/ramificada) sob aumento de 500x (regiões adjacentes).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.3 Análise da composição química via EDS

Para se apoiar numa afirmação ainda mais concreta teve-se o cuidado de executar mais uma análise, a fim de confirmar as trincas advindas por CsT; a composicional de Espectroscopia de Energia Dispersiva – EDS.

Para tanto, certa quantidade de pó do óxido oriundo do processo corrosivo visto na chapa (Figura 54) foi raspado e levado ao equipamento de EDS, para então ser excitada pela fonte de energia.

O objetivo era a partir da posição dos picos no espectro identificar a presença de certos elementos característicos, enquanto a análise da intensidade do sinal corresponde à concentração deste(s) elemento(s).

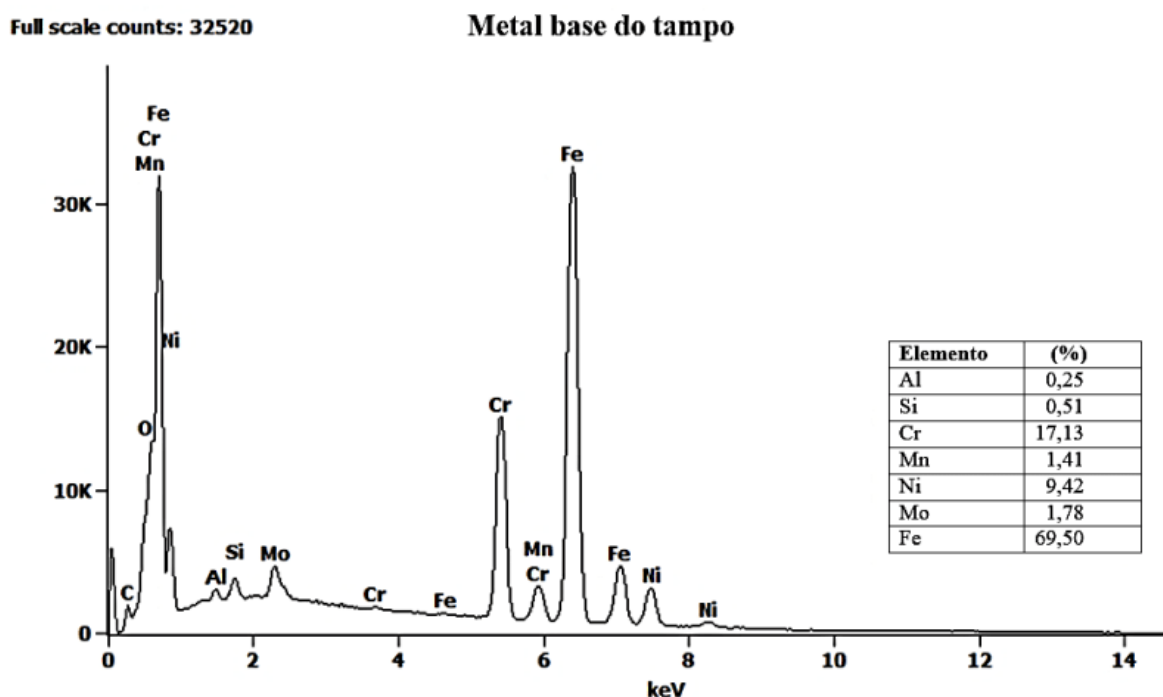
Fez-se então a caracterização material de regiões importantes:

- (1) tampo superior do costado;
- (2) solda;
- (3) produtos depositados no interior da trinca e;
- (4) resíduo externo costado.

Foi realizada uma análise elementar semiquantitativa, utilizando espectrômetro de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplado a um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Jeol 6610 LV.

Como já era de se esperar (haja vista a análise por XRF – Quadro 6), através dos espectros na Figura 57, é possível concluir que a composição química do tampo superior é equivalente ao aço inoxidável austenítico AISI 316, mesmo com sutis diferenças encontradas no Ni e Mo, inferiores ao mínimo da Norma SA-240/SA-240M (2007), mas que estão dentro da faixa de erro da técnica EDS (uma vez que é semiquantitativa).

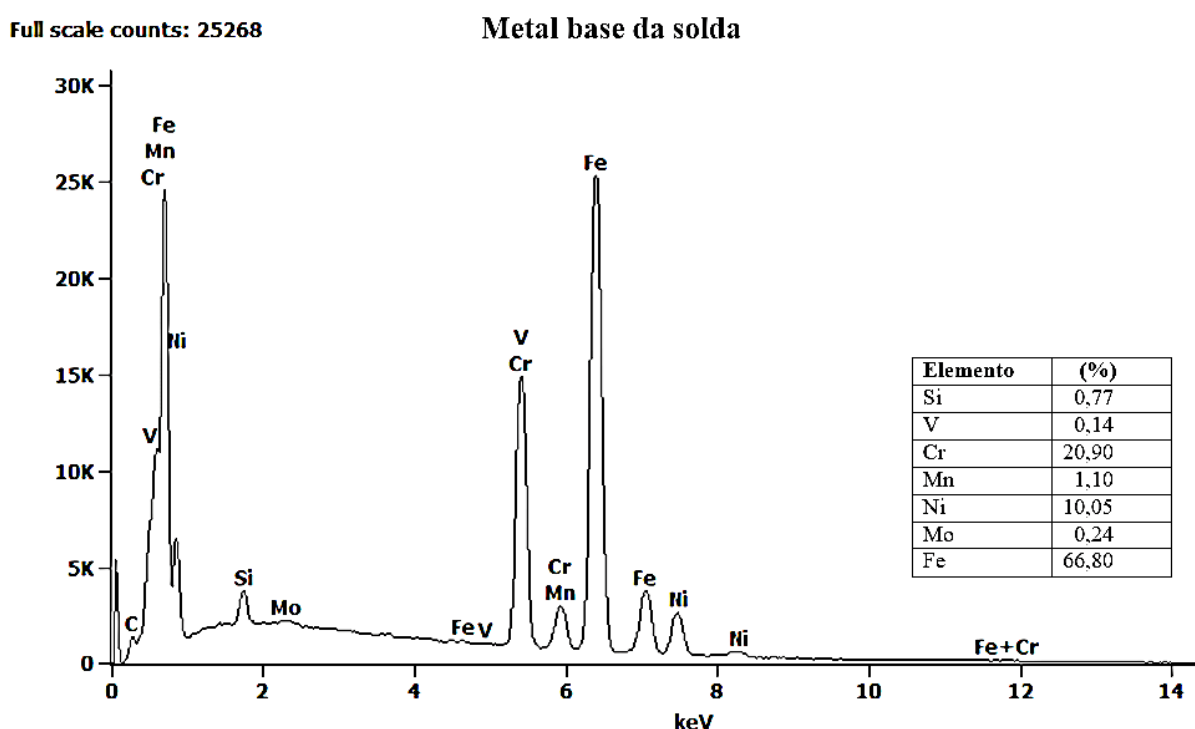
Figura 57 - Espectro EDS do material do tampo superior do vaso de pressão usado como amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por meio dos espectros vistos na Figura 58, percebe-se que o material da solda tampo/costado é equivalente ao aço inoxidável austenítico AISI 304L, também com leves alterações no Ni, porém ainda dentro da faixa de erro da técnica. Apesar de não ser mandatório, considera-se uma boa prática na soldagem a utilização do mesmo material nesses cordões, sendo o ideal então o aço inoxidável AISI 316 L.

Figura 58 - Espectro EDS do material da solda tampo/costado do vaso de pressão.

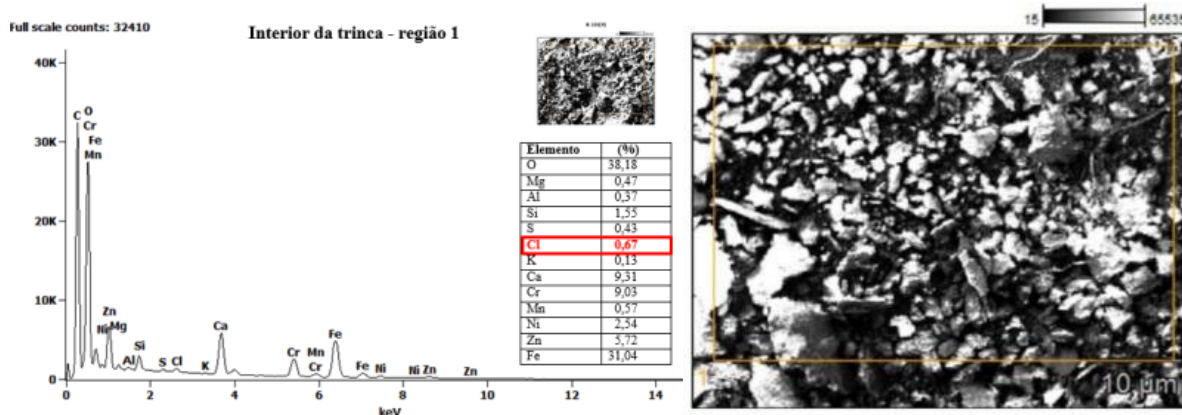


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Então, resolveu-se registrar o espectro do material encontrado no interior das trincas (visto na Figura 52) em dois pontos (Figuras 59 e 60).

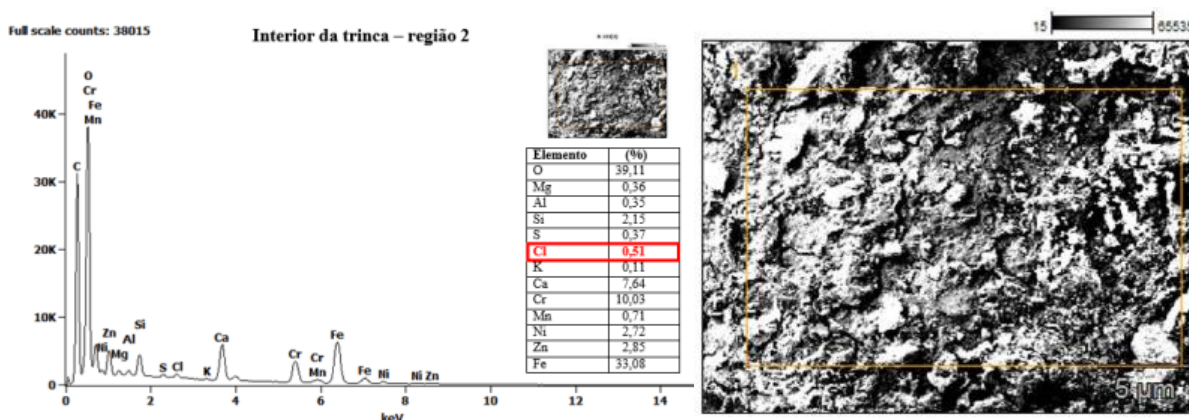
As micrografias dos pontos 1 e 2 estão expostas a seguir juntamente com os espectros (nas Figuras 59 e 60, respectivamente).

Figura 59 - À esquerda análise via espectro EDS do Ponto 1 (no interior da trinca) e à direita a micrografia da mesma região.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 60 - À esquerda análise via Espectro EDS do Ponto 2 (no interior da trinca) e à direita a micrografia da mesma região.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

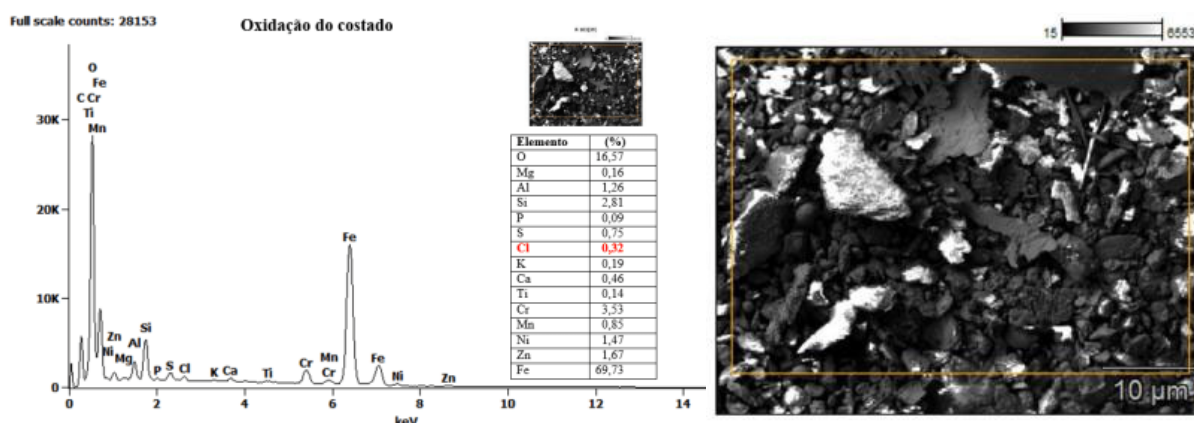
Foram analisadas 7 regiões no interior da trinca tendo sido encontrado teores de cloretos consideráveis, variando entre 0,36% e 0,76%. Os demais elementos são constituintes do material do costado (Fe; Cr; Ni; Mn; Si e Al) e do material do isolamento térmico (Ca; Si; S; Zn; Mg; K e Al), e não são elementos conhecidos como agressivos aos aços inoxidáveis austeníticos.

Assim como visto no estudo de Roberto Moreira Schroeder (1982), intitulado “Contribuição ao estudo da susceptibilidade à corrosão-sob-tensão do aço inoxidável austenítico AISI 304 em meios aquosos contendo cloretos”, o oxigênio (O) que aparece em concentrações elevadas no interior das trincas (Figuras 59 e 60) indica presença de produtos de corrosão (SCHROEDER, R. M., 1982).

Como já mencionado, na superfície externa do costado, abaixo da calha suporte do isolamento, observou-se a presença de uma área com oxidação (Figura 54).

Foi realizada raspagem para remoção do resíduo e caracterização via EDS, o resultado está apresentado na Figura 61, logo a seguir.

Figura 61 - À esquerda observa-se o espectro EDS da oxidação raspada da região externa do costado, logo abaixo encontra-se uma micrografia da mesma região.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Assim como nas regiões internas das trincas, em várias análises feitas no material raspado da oxidação, encontrou-se teores consideráveis de cloretos, variando entre 0,24% e 0,44%. Mais um forte indicativo de as trincas terem ocorrido por CsT.

4.2.4 Comentários gerais sobre análises MO e EDS

A CsT é uma das variantes mais comuns e perigosas da corrosão, pois ocorre devido aos efeitos combinados da tensão estática e corrosão localizada. Pode acontecer em vários tipos de materiais, inclusive nos aços inoxidáveis austeníticos (como o 316).

Essa corrosão se manifesta na forma de trincas ramificadas intergranulares ou transgranulares, que podem ser catastróficas ou não, sendo também difícil de se prever a vida útil do equipamento (LAZARINI, J. C., 2012).

A ocorrência por CsT está associada à presença simultânea de três fatores: tensão, temperatura e meio agressivo. Mas, basta a inexistência de um deles para que o processo não ocorra. No caso das amostras advindas das chapas do vaso de pressão analisado aqui as três condições são atendidas plenamente, uma vez que a temperatura de trabalho era em torno de 100°C; havia presença de cloretos (como indica a própria empresa e as análises em MO e EDS) e existência de tensões residuais (soldagem costado-tampo + conformação costado-tampo).

Identificou-se que as soldas foram feitas utilizando o material aço inoxidável AISI 304L, diferente do metal base de todo o vaso de pressão (o AISI 316).

Apesar de não ser indicativo direto, esse fato pode ser uma causa contributiva por trás das razões que levaram a falha dos reatores em um tempo de operação inferior a vida útil total.

Portando, tendo visto essa coletânea de evidências, conclui-se que as trincas – presentes em várias porções das amostras (Figura 45) são de fato causadas pela evolução ao longo do tempo do fenômeno de Corrosão sob Tensão (CsT).

Já que se encontrou indícios suficientes de cloretos em aço inoxidável austenítico AISI 316, as trincas são do tipo transgranular e ramificadas, se ramificando inclusive no interior do metal. Esse fenômeno está, portanto, bastante evidenciado da Figura 52 até a Figura 61.

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DE EA E ULTRASSOM

Os resultados apresentados evidenciam a evolução da CsT nos dois corpos e podem ser divididos em dois mecanismos predominantes. O primeiro desses mecanismos é a evolução da corrosão causada pela presença de compostos que detém do elemento químico Cloro (Cl) em sua estrutura, que reage com os elementos de liga do Aço Inox 316 (e com o AISI 304, das soldas) em temperaturas superiores a 50°C.

Ambas as condições ocorrem diariamente no ambiente onde estes vasos de pressão desempenham suas funções, pois a vizinhança contém substâncias cloradas e alcança elevadas temperaturas.

Estas características formam um padrão de sinais caracterizados por baixas amplitudes, baixa energia e alta taxa de contagem no ensaio de Emissão Acústica.

Num segundo momento, o material já fragilizado pela presença da corrosão e submetido a tensões mecânicas secundárias ou induzidas, perde a coesão e se desintegra em regiões (descontinuidades ou trincas) fazendo com que seja liberada “fontes” de sinais transientes e aleatórios, com características de média e alta amplitudes, altas energias e taxa de contagem de sinais menores.

Como já mencionado na seção 3 (Figura 48) o ensaio de EA se deu sobre uma porção da chapa do reator (vaso de pressão), seguindo os preceitos da Norma ASTM G30, da maneira vista na Figura 62.

Figura 62 - Esquema de montagem dos sensores para monitoramento do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Procurou-se emular ao máximo a condição prática ao qual os vasos estão empregados. Sendo assim, tal como foi descrito na seção 3 (Materiais e Métodos) providenciou-se uma fonte de calor, que nesse caso foi representada pelas lâmpadas que promoveram aquecimento maior que 60° C na superfície e adicionou-se ainda 1 ppm de solução aquosa de Cloreto de Sódio (NaCl). A tensão residual já estava no tampo do corpo devido as operações de manufatura (laminação de chapas, corte e dobra, união por solda).

Por todas as características já citadas nas páginas acima (comparadas com o estudo de PARK, I. *et al.*, 2021) de serem trincas com morfologia ramificadas, estarem localizadas próximas a regiões com tensão residual comprovada, além dos EDS confirmando no mapa composicional elevadas concentrações de Cr, O e Cl e deficiência em Ni e Fe (todos esses fortes indicativos de trincas por CsT), então suspeitou-se de serem trincas rasas com origem em fenômenos de Corrosão sob Tensão (CsT).

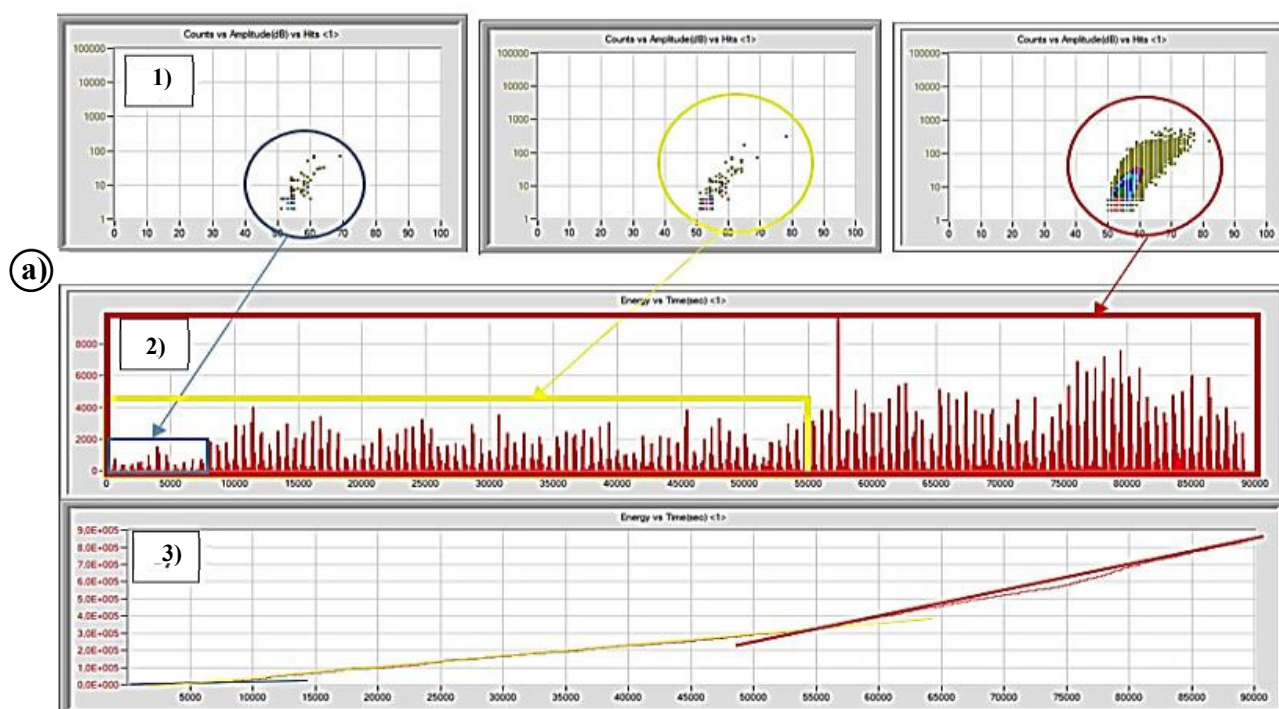
E a constatação veio através do emprego de Microscopia Óptica aplicado sobre as amostras retiradas da chapa em regiões contendo tais evidências, tal como feito por PARK, I. *et al.*, em 2021 e FRANCO *et al.*, em 1997.

Com esta combinação de tensão residual da chapa, trincas pré existentes, adição de NaCl e uso de fonte de calor – condições mais severas – foram realizadas as atividades de EA mais severas.

Vale salientar que os resultados da EA não dão a localização exata dos defeitos e nem suas dimensões, mas sim uma região/área delimitada onde o mesmo pode estar. Essa área pode ser um raio de 300 mm à 500 mm e depende do transdutor utilizado, da sua frequência e da quantidade de canais (de 8 à 100), podendo chegar até 1 m de raio sinalizado. Os resultados de EA mostram de fato a evolução dos danos com o tempo. Após as atividades de EA, obteve-se as respostas e resultados gráficos vistos abaixo (Figuras 63 até 65). Antes de cada gráfico há uma breve explicação de cada etapa do mesmo.

- a) Primeiramente, na Figura 63 é possível observar gráficos sequenciais que permitem fazer a correlação entre os parâmetros *Counts* x *Amplitude* – São evidenciadas as características de evolução do mecanismo de dano em fase inicial (formação da corrosão), intermediária (crescimento da corrosão e início do processo de enfraquecimento do material) e final (somatório da primeira e segunda fase somada ao crescimento de trincas), nos três gráficos (Figura 63a 1, 2 e 3);

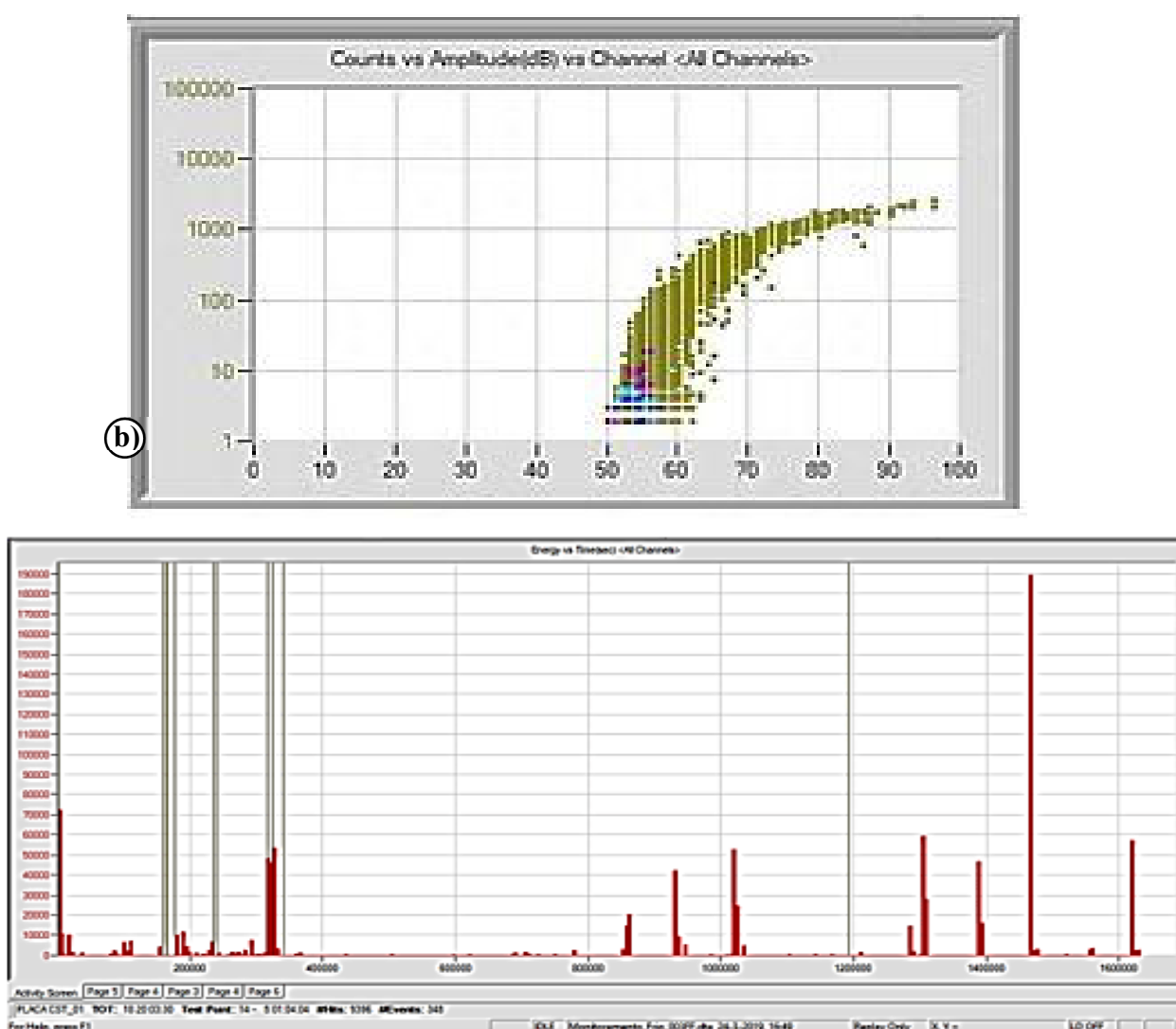
Figura 63 - Resultados gráficos da EA na Chapa conforme norma ASTM G30 que estabelece correlação entre os parâmetros *Counts* x *Amplitude*.



Fonte: Autor (2019).

- b)** Logo em seguida, na Figura 64, observa-se o gráfico da somatória instantânea dos valores de energia distribuída ao longo do tempo de 24 horas e 44 minutos. – Neste gráfico é possível observar o crescimento dos valores da energia liberada ao longo do tempo e correlacionar com as fases da evolução da degradação do material;

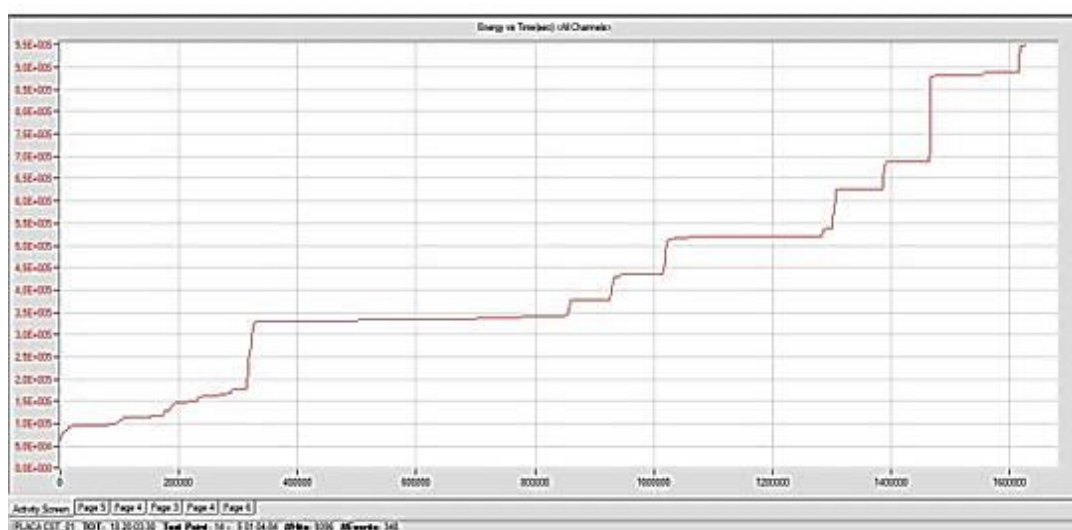
Figura 64 - Resultados gráficos da EA na Chapa conforme norma ASTM G30 que mostra a somatória instantânea dos valores de energia (distribuída) ao longo do tempo de 24 horas e 44 minutos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

- c) Já na Figura 65 encontra-se o gráfico da somatória acumulada de energia distribuída ao longo do tempo de 24 horas e 44 minutos. – Neste gráfico é possível correlacionar as taxas de sinais nas três fases de evolução do mecanismo de dano.

Figura 65 - Resultados gráficos da EA na Chapa conforme norma ASTM G30 que mostra a somatória instantânea dos valores de energia (acumulada) também ao longo do tempo de 24 horas e 44 minutos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A eficácia do método de Emissão Acústica consiste no fato de o monitoramento estar diretamente correlacionado com a dinâmica de crescimento do dano.

No método de ultrassom pela técnica (FMC/TFM – *Full Matrix Capture/Total Focusing Method*) teve-se como objetivo detectar e dimensionar trincas superficiais internas nas regiões mapeadas pelo método de EA.

Neste cenário foi aplicado o *Thermal Spray Aluminium* – TSA (Alumínio por Aspersão Térmica). O propósito deste revestimento foi simular a realização do ensaio sobre a camada de tinta nos equipamentos. Neste trabalho a película de TSA ficou com 100 µm.

Realizou-se então a inspeção destes dois primeiros pontos escolhidos aleatoriamente pelo mestrando, conforme a Figura 66 (a seguir, nomeadas como pontos 1 e 2). As coordenadas de localização aproximada destes dois primeiros pontos estão na Figura 67 e 69.

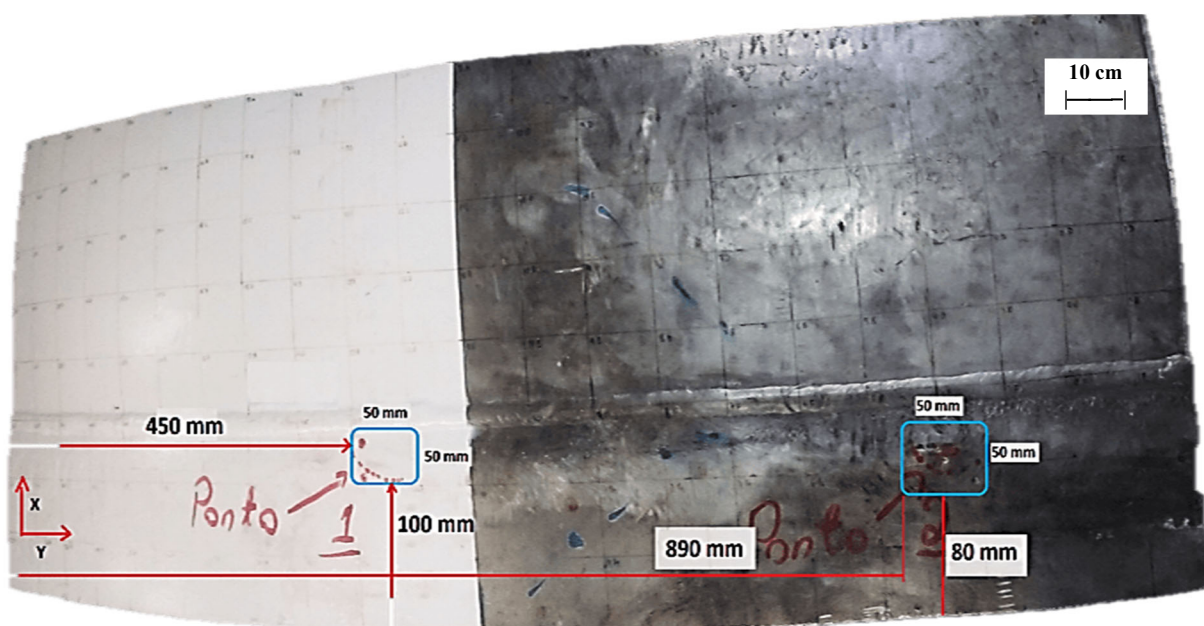
Porém, uma outra chapa do mesmo vaso de pressão também foi analisada, e nesta segunda (chapa de teste 2) escolheu-se aleatoriamente mais 6 pontos (Figura 68). Ou seja, este trabalho todo envolveu a análise de 8 pontos, distribuídos em duas chapas (chapa de teste 1 e chapa de teste 2).

Figura 66 - Vista geral da chapa de teste 1 antes da aplicação do TSA, com os dois primeiros pontos escolhidos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 67 - Coordenadas dos pontos 1 e 2 da chapa 1, onde mostra as regiões inspecionadas.



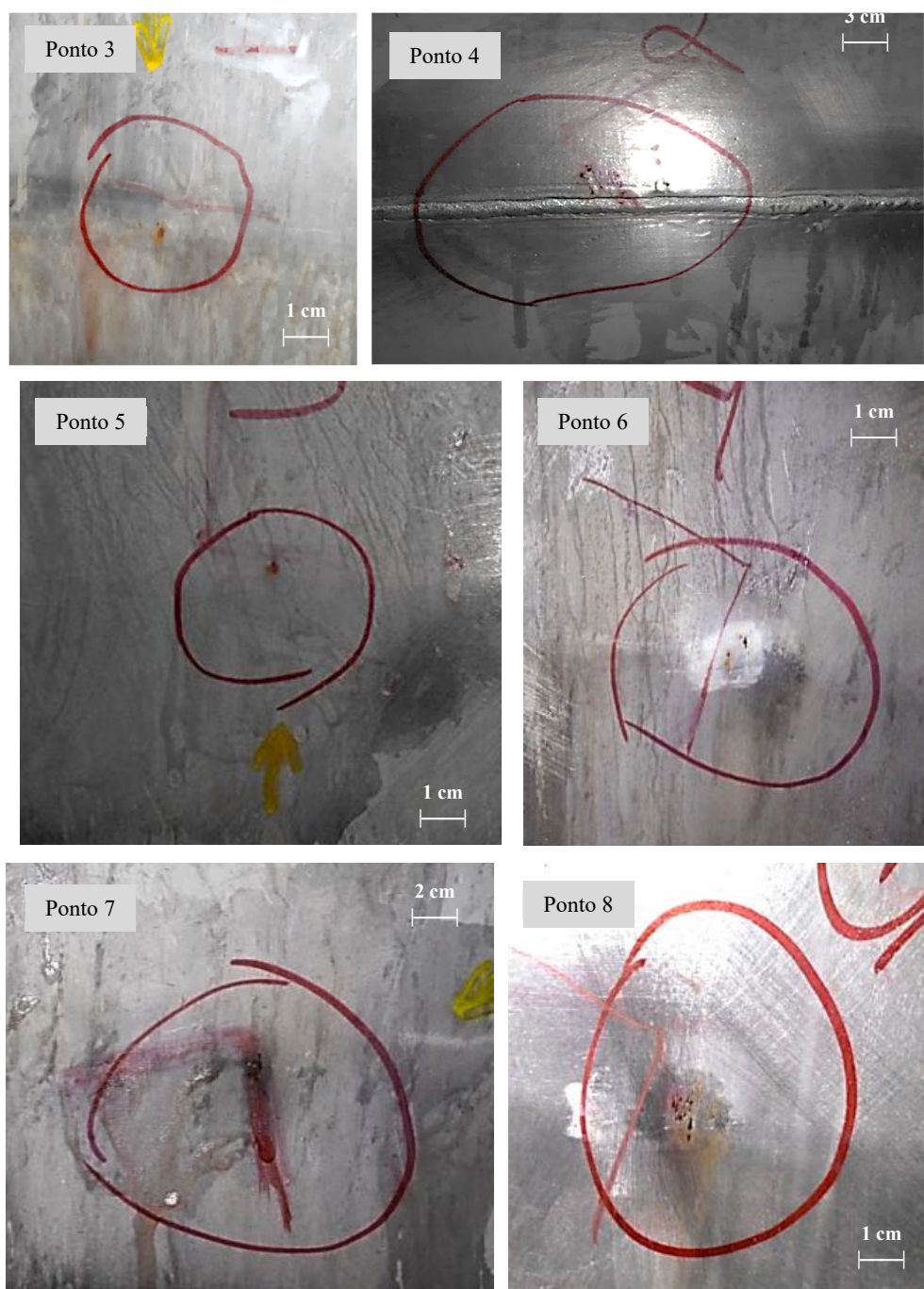
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na técnica de dimensionamento da altura utilizada nesta inspeção foi conforme morfologia e localização do defeito.

Porque há variações dos módulos e visualizações conforme região do defeito. Este processo é um recurso do aparelho e da técnica (TFM/FMC).

No dimensionamento da profundidade dos defeitos foi adotada a técnica também. Em relação ao comprimento, não foi possível o dimensionamento devido haver várias trincas aglutinadas. A chapa de teste 2, que como dito faz parte do mesmo vaso de pressão, teve demarcações em 6 pontos (Figura 68), foram escolhidos mediante suas características.

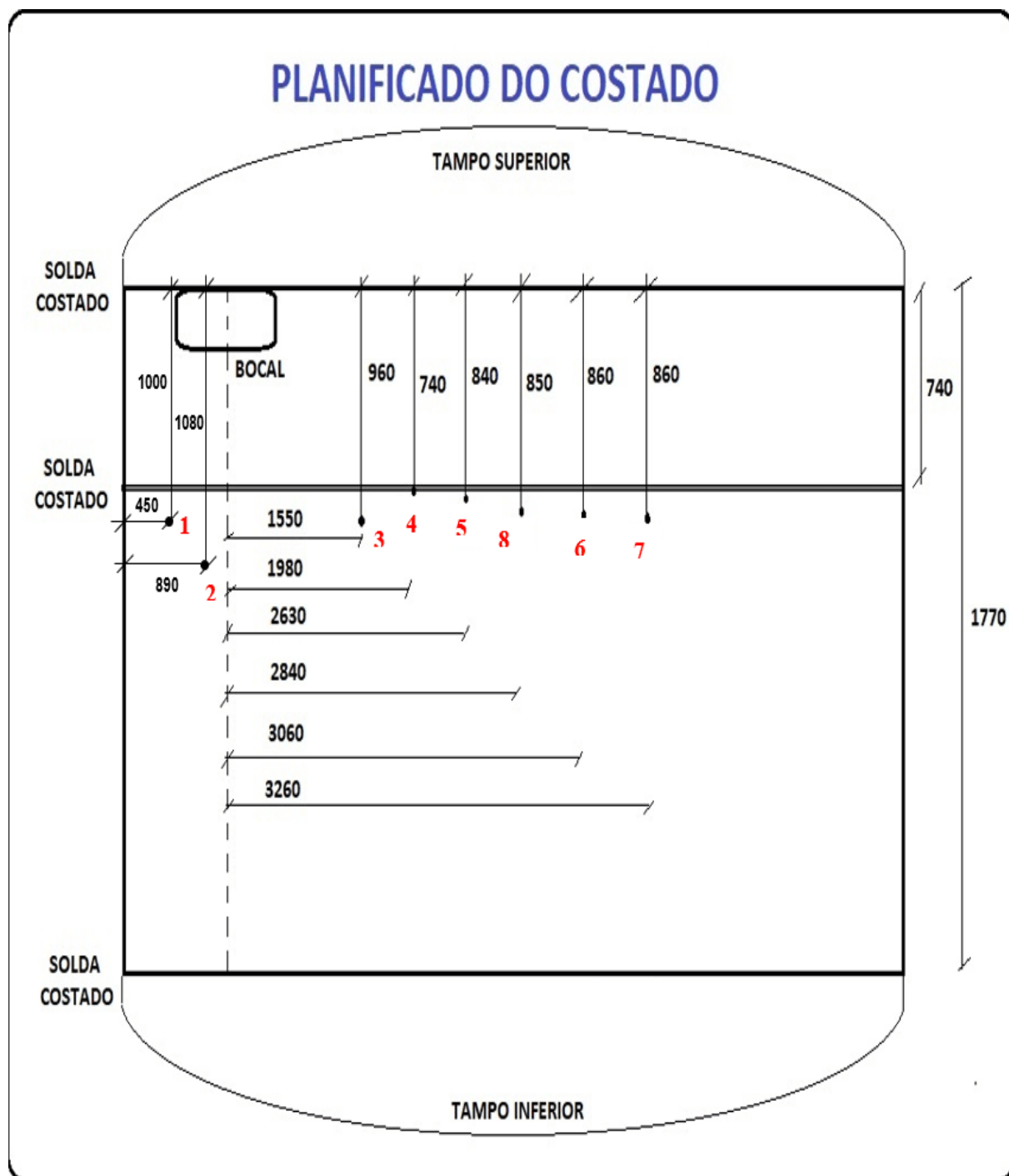
Figura 68 - Característica dos 6 pontos de análise via EA na chapa de teste 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Abaixo (Figura 69) segue a localização referencial dos seis pontos da chapa de teste 2 (Figura 68) juntamente com os outros dois pontos da chapa 1 (Figura 67), ambos oriundos do mesmo vaso de pressão do costado.

Figura 69 - Coordenadas dos pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 das chapas 1 e 2, com as regiões inspecionadas.



Uma vez tendo sido identificados todos esses pontos com descontinuidades no costado do vaso de pressão estudado empregaram-se nos mesmos as técnicas combinadas de TFM/FMC para determinar suas características dimensionais de comprimento, profundidade e altura (principalmente altura de trincas rasas pois estas eram a grande dificuldade de NDTs aplicados à trincas rasas).

O resultado das profundidades e demais características dimensionais (altura e comprimento) foi fruto da interpretação dos gráficos e testes feitos com diferentes modos (do TT até TTTT).

Foi uma atividade árdua pois para cada ponto fez-se a aplicação do teste com três modos diferentes (TT, TTT e TTTT), para que assim pudesse ser identificado qual apresentava a melhor performance e fornecia a maior altura.

As análises e descrições de cada interpretação em particular foi colocada nas páginas seguintes.

No geral o ensaio de ultrassom computadorizado FMC/TFM (*Full Matrix Capture/Total Focusing Method*) se mostrou bastante útil em determinar as alturas das trincas.

Para evidenciar isso serão evidenciadas nas Figuras 70, 71, 72 e 73 as imagens obtidas dos oito pontos (chapas 1 e 2) no qual extraiu-se as informações relevantes utilizando-se o aparelho de ultrassom e descobriu-se o potencial da técnica de TFM.

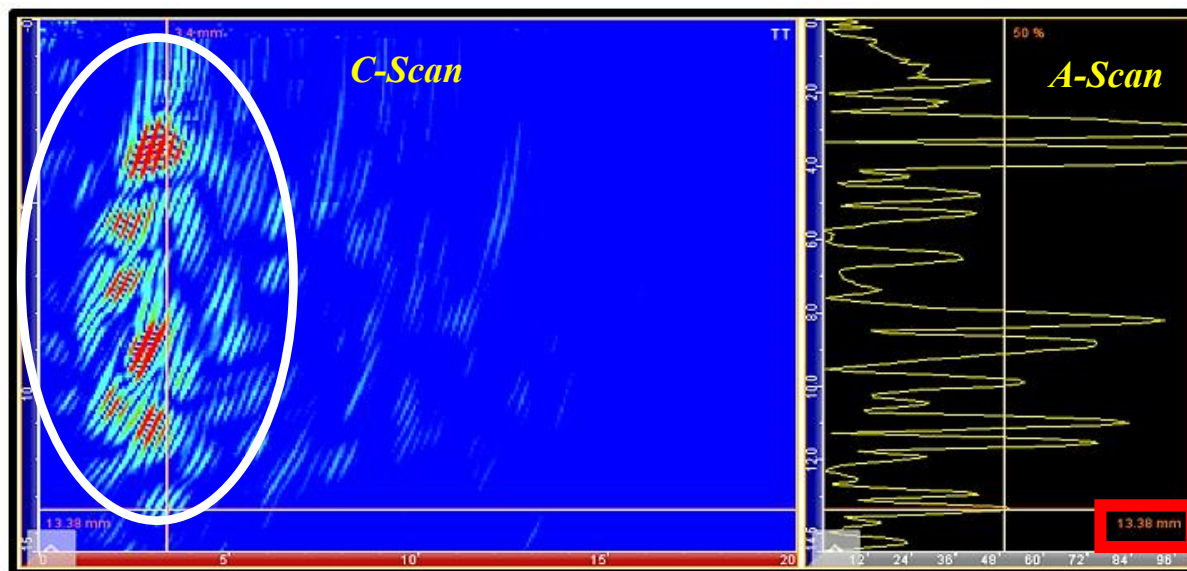
Nesta coletânea de figuras existe leitura, correlação e interpretação de imagens A-Scan, C-Scan e B-Scan (estas relacionadas a morfologia, porém não mostradas).

Um aprendizado interessante que se teve foi que para determinados tipos de trincas o modo TTT pode ser melhor que o TT, como foi o caso da aplicação de TFM para o ponto 1 (chapa 1) (detalhe A da Figura 70).

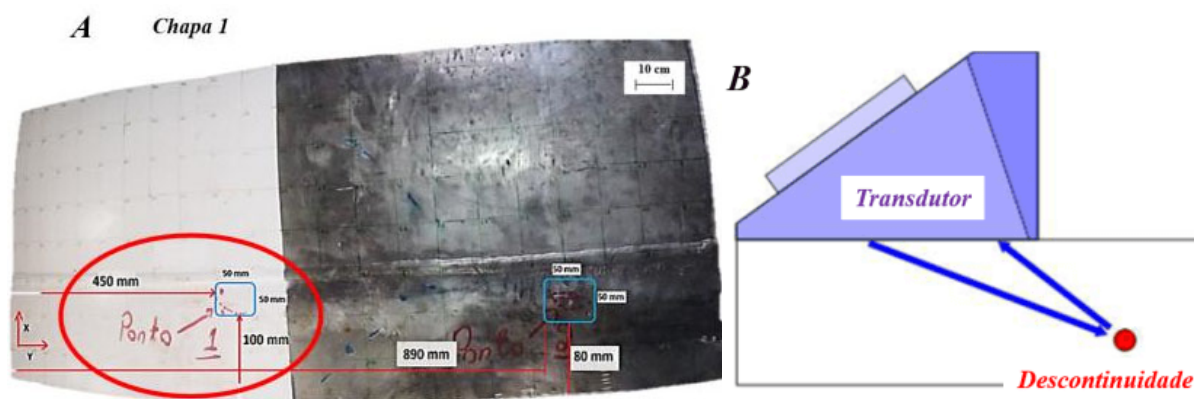
Para este ponto em específico realizou-se a primeira tentativa com o modo TT (Figura 70), que consiste no modo onde o sinal sai do transdutor, passa pela descontinuidade e volta para o transdutor (detalhe B da Figura 70).

Neste modo TT a descontinuidade do ponto 1 foi caracterizada como tendo uma altura de 13,38 mm (Figura 70).

Figura 70 - Altura da maior indicação no ponto 1 no modo TT (transdutor-descontinuidade-transdutor) – Altura da Tela igual a espessura da peça. O Detalhe A mostra a chapa 1 com o ponto 1 de onde foi feita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TT.



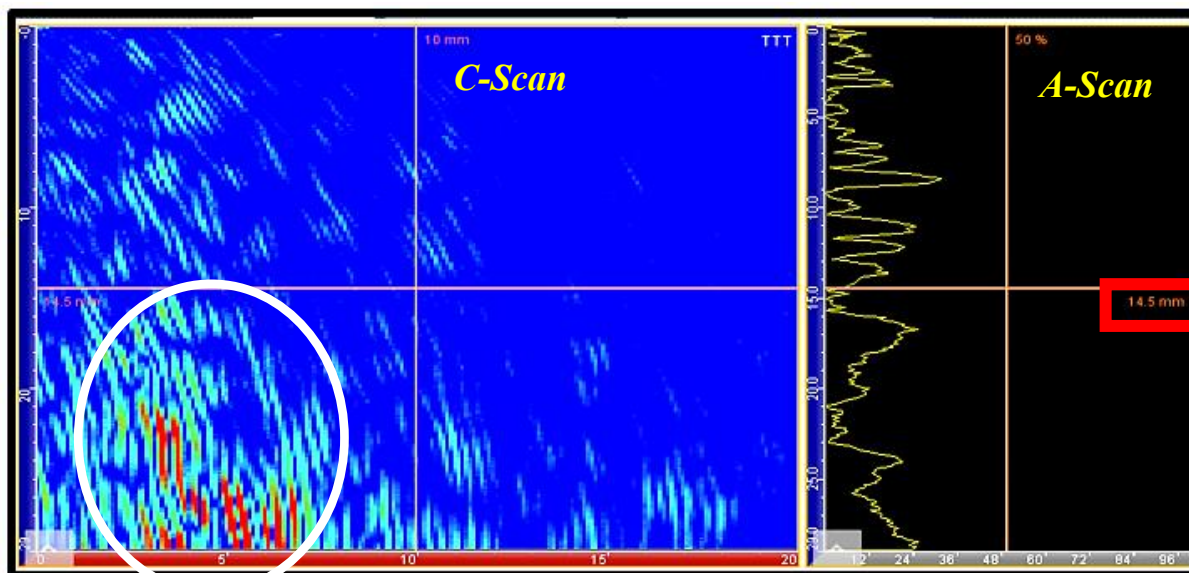
Ponto 01 – Modo TT – 13.38 mm de Altura



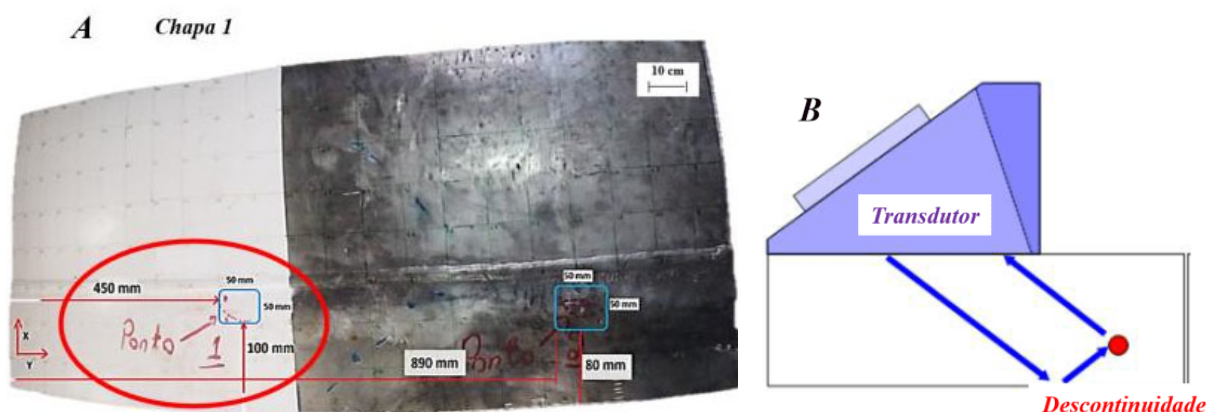
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Depois de várias tentativas de outros modos para a descontinuidade do ponto 1, chegou-se à aplicação do modo TTT (Figura 71), que após a correlação e interpretação das imagens *A-Scan*, com a imagem planificada do *Phased Array C-Scan* e morfologia por *B-Scan* (não evidenciada aqui) a altura detectada aumentou no ponto 1 subiu para 14,5 mm, ou seja, o método TTT foi o mais eficaz para o ponto 1.

Figura 71 - Altura da maior indicação no ponto 1 no modo TTT. O Detalhe A mostra a chapa 1 com o ponto 1 de onde foi refeita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TTT.



Ponto 01 – Modo TTT – 14.50 mm de Altura

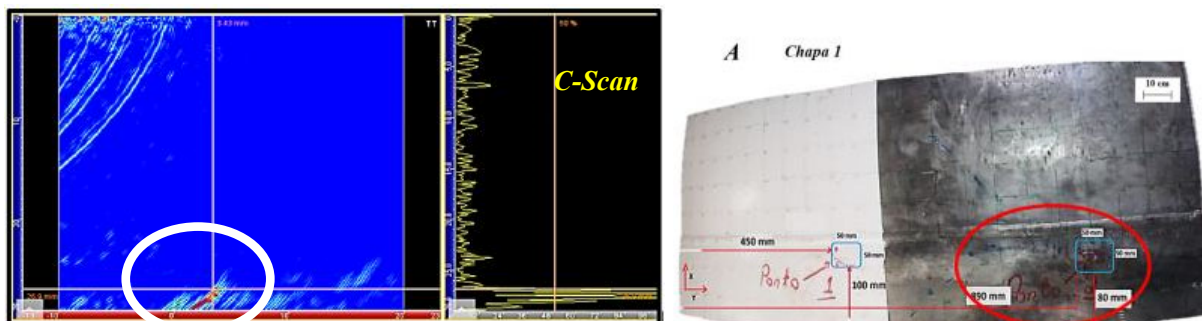


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O mesmo se mostrou verdade para o ponto 2 (também localizado na chapa 1) onde o modo TTT (Figura 73) indicou altura de 2,10 mm e se mostrou mais eficaz do que o TT (Figura 72).

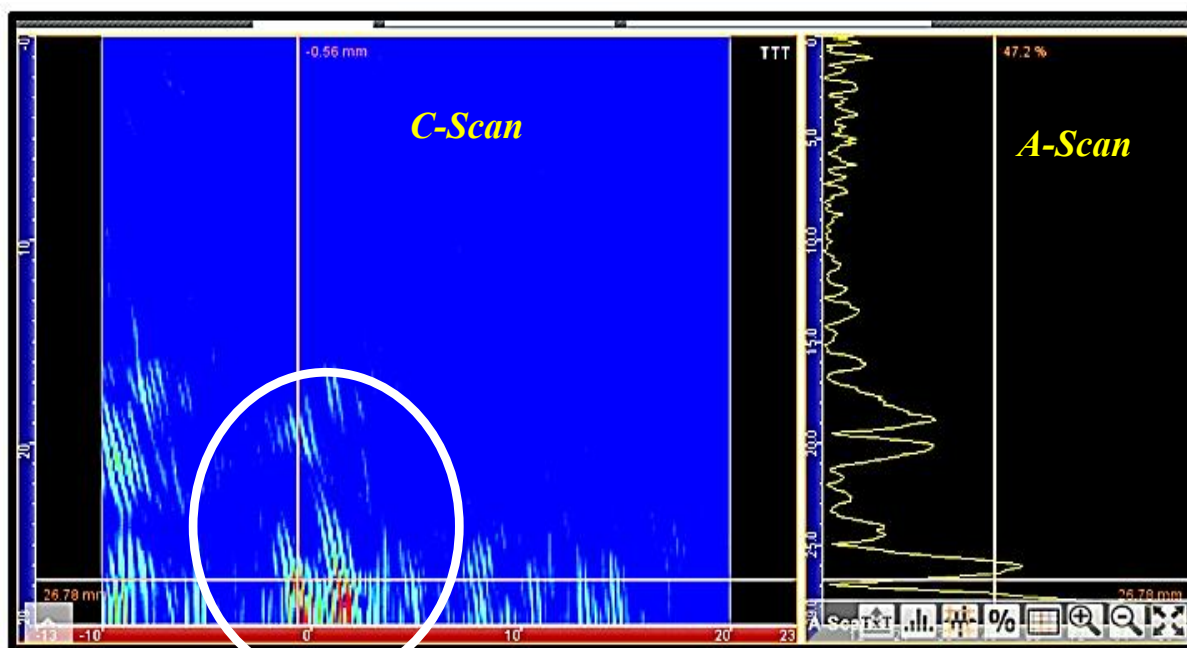
Algo importante de se citar é que se focou a atenção na obtenção das alturas das descontinuidades, pois era uma característica que não se conseguia obter com clareza sem a técnica TFM/FMC (comprimento já era obtido por END de líquidos penetrantes para trincas superficiais). Esse avanço contribui muito para os estudos de Mecânica da Fratura, sendo essa a vantagem dessa nova técnica.

Figura 72 - Altura da maior indicação no ponto 2 no modo TT (1,89 mm de altura). Detalhe A mostrando a região da chapa 1 onde se localiza a descontinuidade do ponto 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 73 - Altura da maior indicação no ponto 2 no modo TTT (2,10 mm de altura).



Ponto 02 – Modo TTT – 2.10 mm de Altura

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

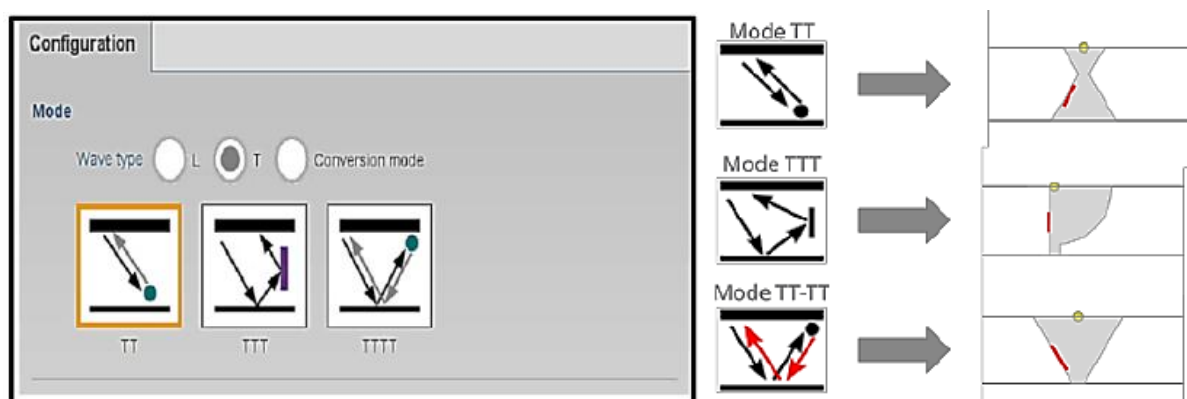
Nas avaliações dos defeitos mencionados (Figuras 70, 71, 72 e 73) foram utilizados os métodos de inspeção no qual o aparelho fornece. É importante explicar que vários ensaios com diferentes algoritmos TFM foram testados antes de gerar tais imagens.

Cerca de dez modos de propagação foram testados usando o conjunto de dados FMC brutos no *software* de análise da M2M Mantis+, e o TTT apresentou os melhores resultados.

Para inspeção em chapas, ao usar ondas transversais, a conversão de modo é um fator relevante a considerar. Por causa das diferentes orientações dos defeitos e suas características

de geometria, alguns algoritmos TFM (modos) são mais adequados do que outros (Figura 74). Desta forma não se tem um único modo de avaliação, dependendo então da morfologia do defeito e a sua posição geométrica.

Figura 74 - Algoritmos de modo sugerido para orientação de falhas específicas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Sendo assim, tal como feito para os dois primeiros, agora para os pontos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 (chapa de teste 2), as alturas das trincas presentes no reator foram medidas pelo ensaio de ultrassom computadorizado com a técnica FMC/TFM.

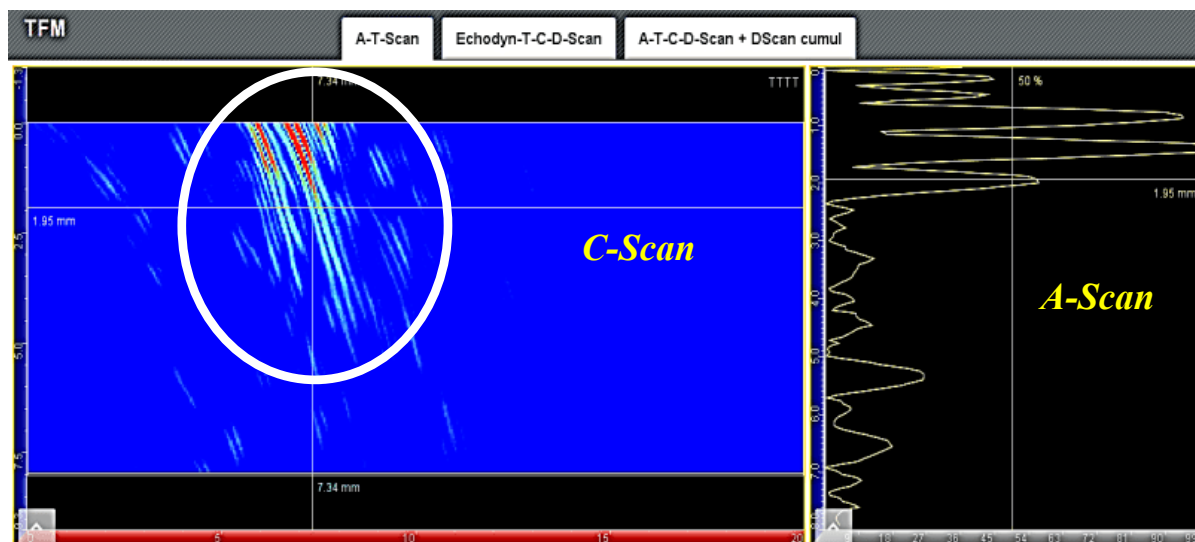
Em razão da natureza e densidade das trincas presentes nesses pontos, não foi possível efetuar um dimensionamento individualizado, tendo sido pesquisada, localizada e relatada a maior altura encontrada em cada região inspecionada.

Pelo mesmo motivo, o comprimento foi considerado como o perímetro das trincas na posição onde foi encontrada a maior altura.

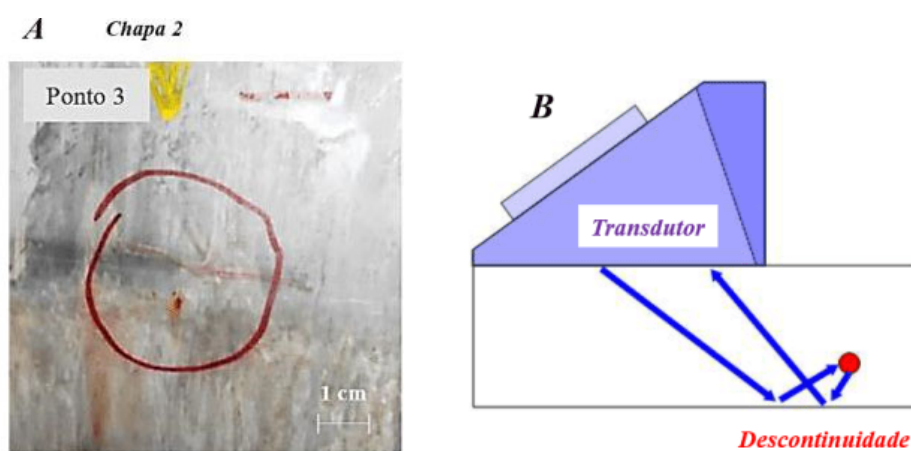
Tendo sido feitas estas configurações, serão agora evidenciadas as imagens obtidas dos pontos 3 a 8 (Figuras 75 a 80), no qual podemos extrair os recursos do aparelho de ultrassom e descobrir recursos através da técnica de TFM.

Já no ponto 3 (chapa de teste 2) não se conseguiu obter a altura pelo modo TTT, tendo que se aplicar o modo TTTT (Detalhe B da Figura 75) para que se chegasse num valor adequado de altura para a descontinuidade nesta região (Detalhe A da Figura 75), que foi de 1,95 mm como mostra as imagens A-Scan e C-Scan.

Figura 75 - Altura da maior indicação no ponto 3, vista TTTT. O Detalhe A mostra a chapa 2 com o ponto 3 de onde foi refeita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TTTT.



Ponto 03 – Modo TTTT – 1.90 mm de Altura

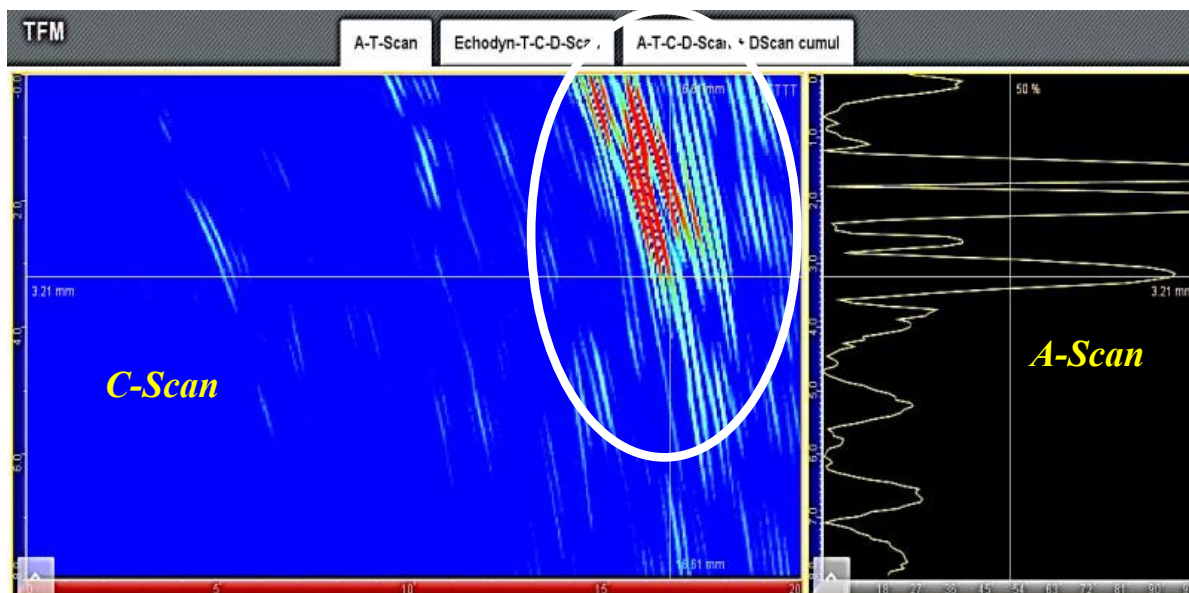


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

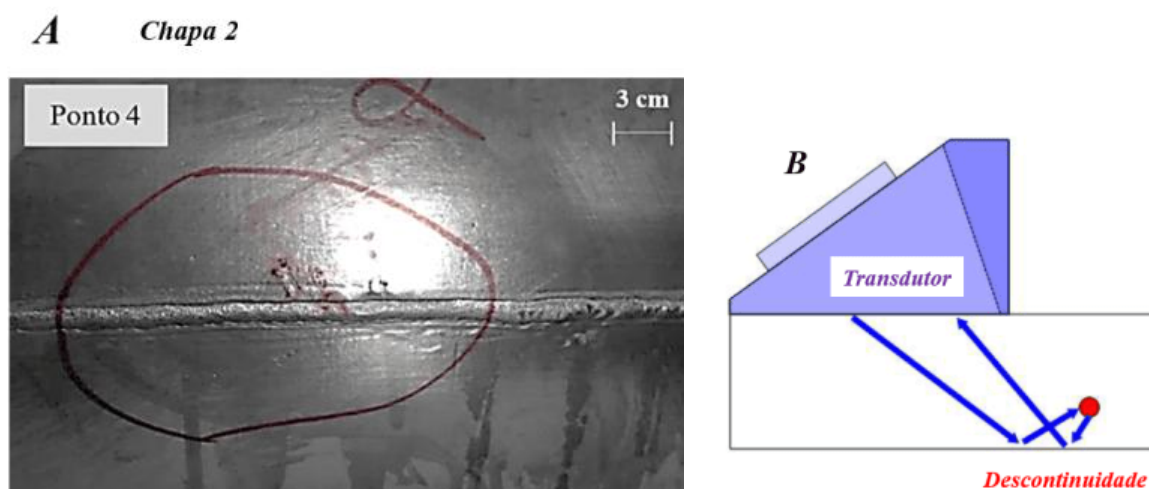
No ponto 4 (Detalhe A da Figura 76) o modo TTT também não foi tão eficaz quando o modo TTTT, sendo este mais indicado. Essa descontinuidade teve uma altura identificada como 3,2 mm. Como pode ser visto no detalhe A da Figura 76 esse ponto em específico encontra-se próximo ao cordão de solda do costado do vaso de pressão estudado, uma região de difícil interpretação pois a leitura do A-Scan e C-Scan (Figura 76) pode sofrer interferência de ruídos oriundos do processo de soldagem (para não enfrentar essa dificuldade foi feita uma limpeza desta imagem).

A melhor altura para essa descontinuidade do ponto 4 foi de 3,2 mm (Figura 76).

Figura 76 - Altura da maior indicação no ponto 4, vista TTTT. O Detalhe A mostra a chapa 2 com o ponto 4 de onde foi refeita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TTTT.



Ponto 04 – Modo TTTT – 3.2 mm de Altura

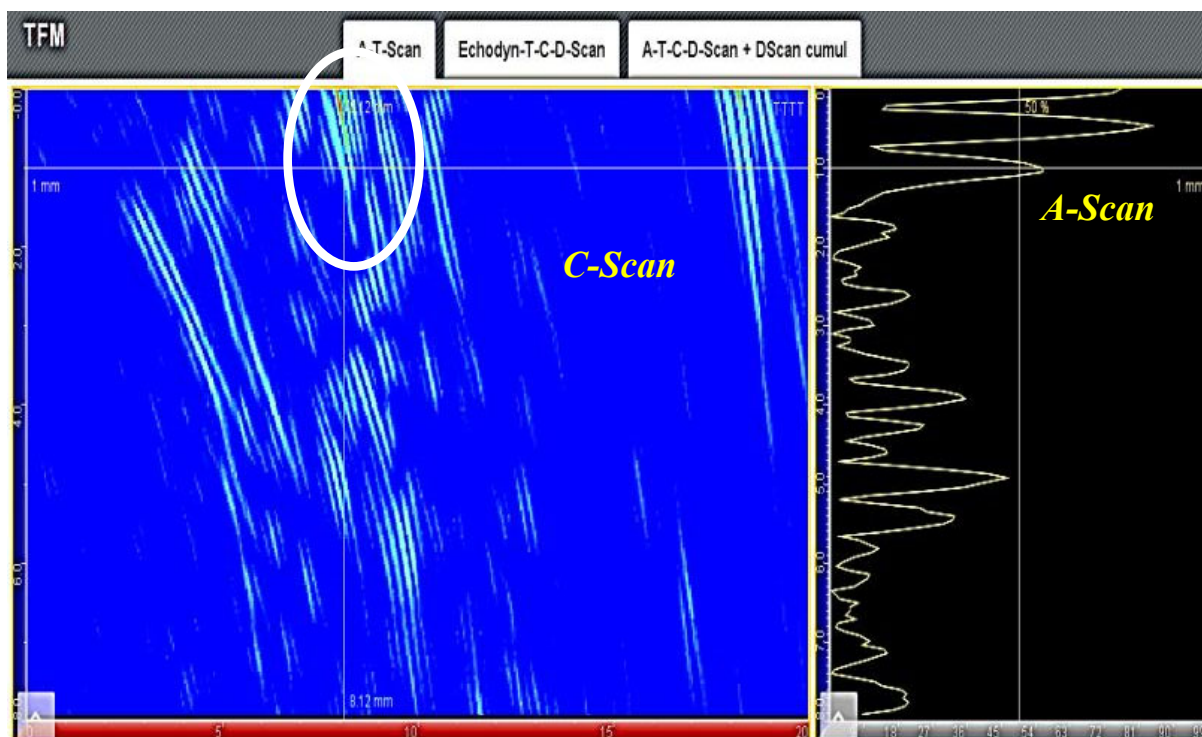


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na Figura 77 encontra-se o ponto 5, que foi uma das descontinuidades mais críticas de se conseguir fazer a leitura em função da pouca profundidade (uma das trincas mais rasa daquelas encontradas no costado do vaso de pressão estudado).

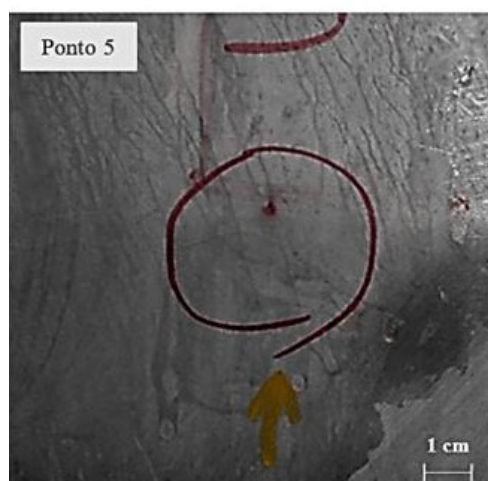
Sendo este tipo de característica um verdadeiro desafio e prova evidente do potencial da técnica FMC/TFM combinadas, pois a altura lida via modo TTTT foi de cerca de 1,0 mm.

Figura 77 - Altura da maior indicação no ponto 5, vista TTTT. O Detalhe A mostra a chapa 2 com o ponto 5 de onde foi feita a leitura.



Ponto 05 – Modo TTTT – 1.0 mm de Altura

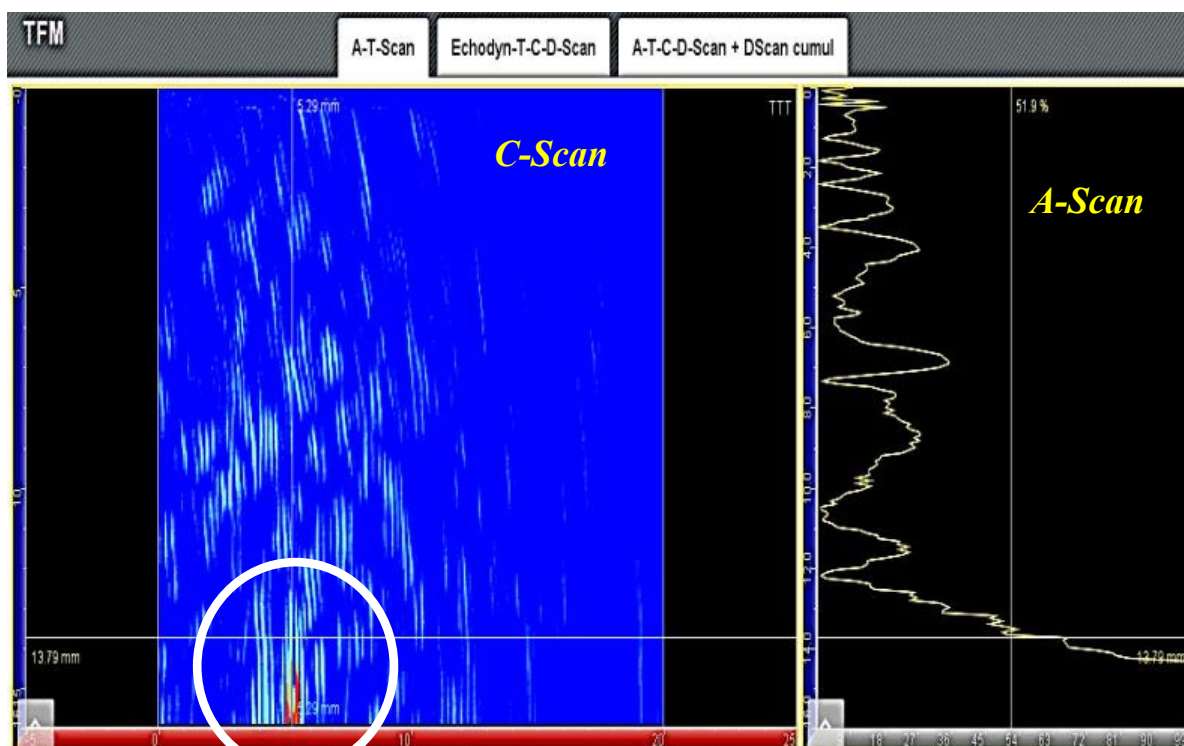
A Chapa 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

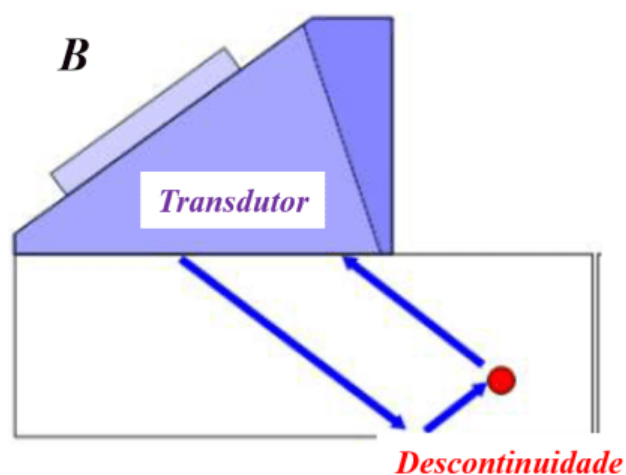
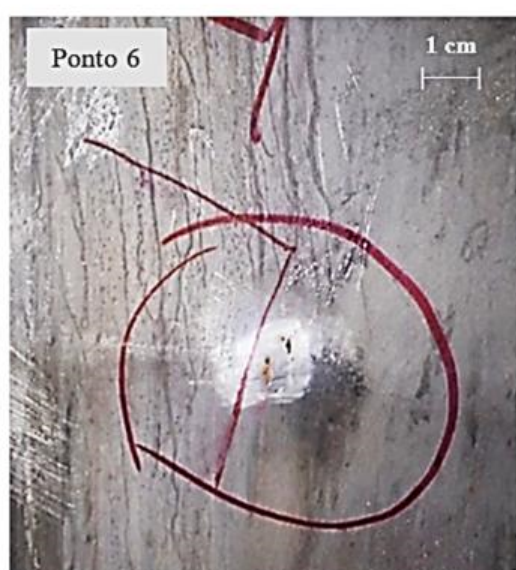
Na análise do ponto 6 (detalhe A da Figura 78) via FMC/TFM a altura voltou a ser novamente detectada pelo modo TTT (detalhe B da Figura 78), resultando em 2,2 mm.

Figura 78 - Altura da maior indicação no ponto 6, vista TTT (Espessura rebatida). O Detalhe A mostra a chapa 2 com o ponto 6 de onde foi refeita a leitura e o Detalhe B mostra o esquema do funcionamento do modo TTT.



Ponto 06 – Modo TTT – 2.2 mm de Altura

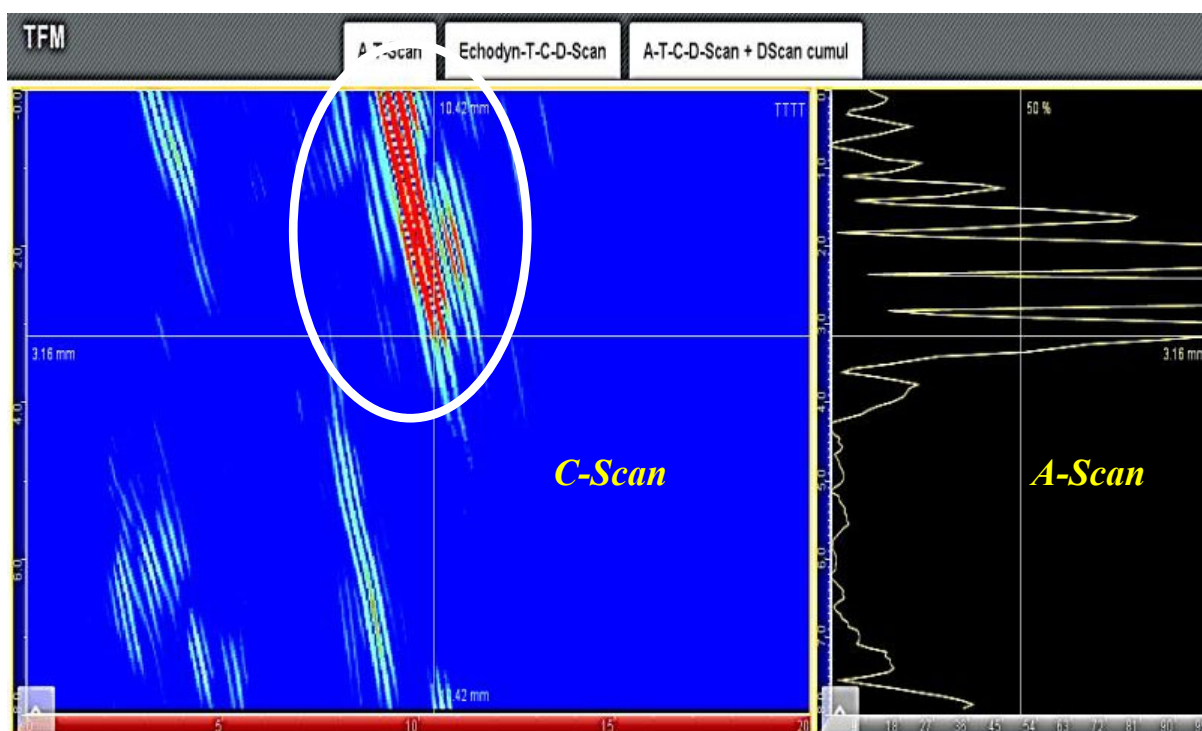
A Chapa 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

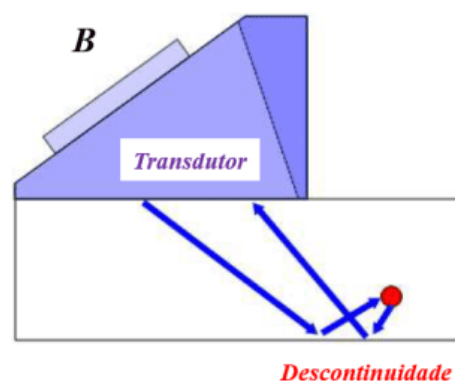
No ponto 7 (Detalhe A da Figura 79) o modo TTT também não foi tão eficaz quando o modo TTTT, sendo este mais indicado. Essa descontinuidade teve uma altura identificada como 3,2 mm, bem semelhante a análise feita no ponto 4 (Figura 76), onde tanto o modo TTTT foi usado quanto à altura, que foi a mesma.

Figura 79 - Altura da maior indicação no ponto 7, vista TTTT.



Ponto 07 – Modo TTTT – 3.2 mm de Altura

A Chapa 2

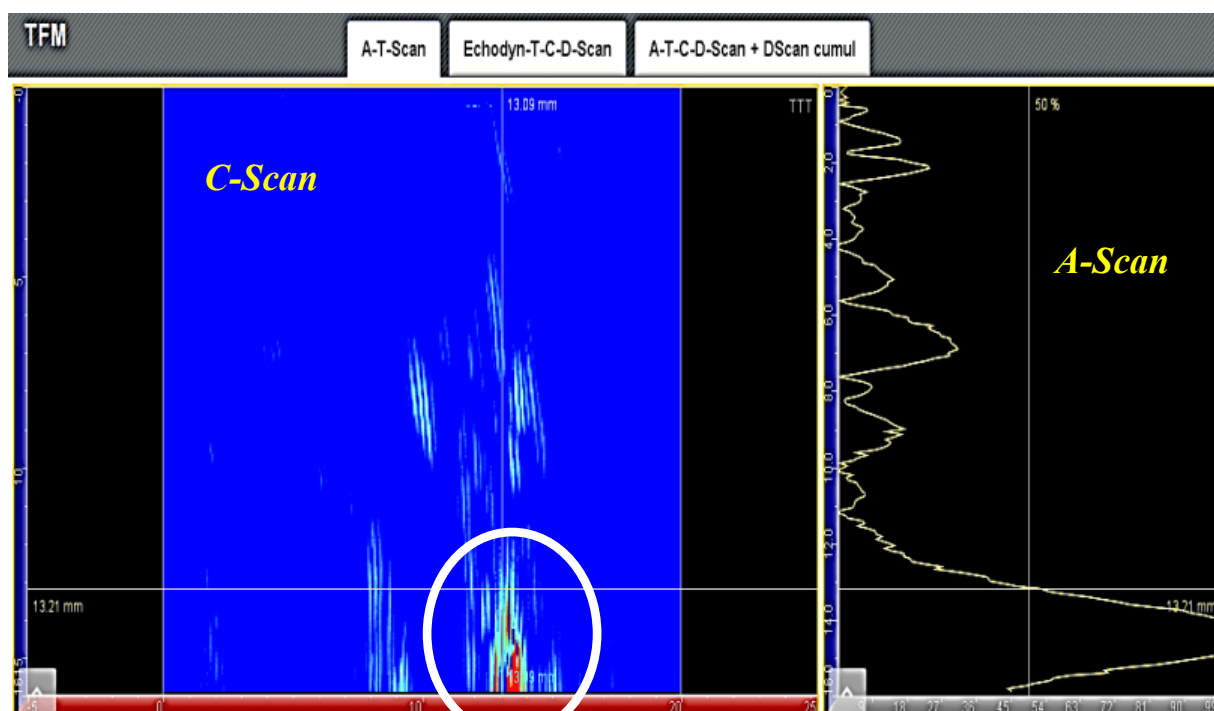


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Finalmente, para a análise e obtenção das características dimensionais da descontinuidade encontrada no ponto 8 (detalhe A da Figura 80) realizou-se novamente a técnica TFM/FMC no modo TTT (performou melhor do que os outros nesse caso).

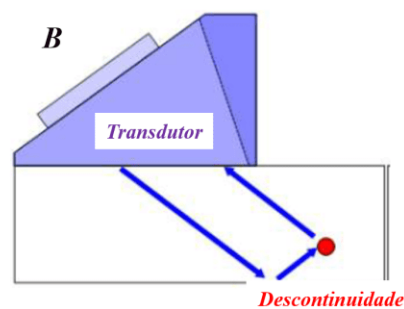
Essa descontinuidade teve sua maior altura identificada como 2,8 mm (Figura 80).

Figura 80 - Altura da maior indicação no ponto 8, vista TTT (Espessura rebatida).



Ponto 08 – Modo TTT – 2.8 mm de Altura

A Chapa 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ao final da corrida de testes, considerou-se que, no geral, o ensaio de ultrassom computadorizado FMC/TFM (*Full Matrix Capture/Total Focusing Method*) se mostrou bastante útil em determinar as características dimensionais das descontinuidades dos oito pontos (principalmente a altura, uma dificuldade que parecia intransponível para os outros NDTs aplicados em casos de trincas rasas).

Tendo sido esclarecido essas informações, buscou-se resumir no Quadro 8 as características dimensionais dos oito pontos analisados (duas da primeira chapa e mais seis da segunda) via EA e sistema computadorizado M2M – Mantis, com a técnica FMC/TFM (*Full Matrix Capture/Total Focusing Method*), visto nas Figuras 70 até 80 (páginas anteriores).

Quadro 8 - Compilado das medições feitas pelas técnicas mencionadas.

<i>Características dimensionais</i>			
<i>Local (pontos)</i>	<i>Profundidade em relação à superfície externa (mm)</i>	<i>Altura Máx. (mm)</i>	<i>Comprimento (mm)</i>
1	14,50	14,50	***
2	2,10	2,10	***
3	6,10	1,90	5,0
4	4,80	3,20	30,0
5	7,00	1,00	5,0
6	5,80	2,20	12,0
7	4,80	3,20	25,0
8	5,20	2,80	15,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

- **NOTA 1:** No ponto 1 (Figura 67), além da indicação clara da trinca aberta à superfície, as imagens também apresentam sinais de trinca ao longo de toda a espessura, confirmada por dois métodos de inspeção TFM. No ponto 2 (Figura 67) a trinca está aberta à superfície confirmada também por dois métodos de inspeção TFM.
- **NOTA 2:** Nos pontos 3 e 4 (Figura 68), além da indicação das trincas abertas à superfície, é evidenciado nas fotografias que no item 8 também há sinais ao longo da espessura que podem ser atribuídas a sinais espúrios. Estes sinais possivelmente decorrem de problemas de acoplamento do cabeçote devido à ondulação superficial (falta de planicidade) decorrente de contrações de soldagem da cantoneira externa.

Por fim, pode-se resumir então que aqui nesta dissertação os resultados obtidos foram bastante animadores, pois conseguiu-se realizar o dimensionamento das oito trincas de CsT com considerável precisão, por meio do emprego do método de ultrassom pela técnica de *Phased Array* + TFM/FMC.

É interessante explicar que vários ensaios com diferentes algoritmos TFM foram testados antes de gerar essas imagens. Dez modos de propagação foram testados usando o conjunto de dados FMC brutos no software de análise da M2M Mantis +, e os modos de propagação TTT e TTTT apresentaram os melhores resultados.

Para inspeção em chapas, ao usar ondas transversais, a conversão de modo é um fator importante a considerar. Por causa da orientação de defeito diferente e características de geometria, alguns algoritmos TFM (modos) são mais adequados do que outros. Desta forma não temos um único modo de avaliação, isto irá depender da morfologia do defeito e a sua posição geométrica

Através deste registro permanente de resultados é que se tornou possível fazer o monitoramento e realizar os cálculos de Mecânica da Fratura com maior acurácia (precisão melhor, comodidade e facilidade) do que era feito no passado, já que antes não era possível fazer o dimensionamento através de ENDs.

Pois como mostrou o trabalho de (CARNEVAL, R. O. *et al.*; 2007), muitas dessas técnicas de END quando eram empregadas, não apresentavam eficácia satisfatória para a maioria dos casos, funcionando parcial e somente em casos bem específicos. Inclusive neste trabalho de CARNEVAL *et al.* (apresentado na IV Conferência Panamericana de END - Buenos Aires) a própria técnica de *Phased Array*, naquela época ainda em desenvolvimento, se mostrou pouco eficiente.

O que acaba por valorar ainda mais a presente dissertação de mestrado dentro do arcabouço acadêmico-científico atual, pois agora com o auxílio das tecnologias TFM/FMC se conseguiu provar que a técnica de *Phased Array* se aprimorou e consegue - atualmente - ser empregada para entregar dados de altura mesmo para trincas rasas (extremamente difíceis de serem dimensionadas por outros NDTs), favorecendo então o monitoramento de tais trincas, algo importante para uma classe de equipamentos tão utilizada na indústria de petróleo/gás (os vasos de pressão).

5 CONCLUSÃO

Conclui-se ao final desta dissertação que o ensaio de Emissão Acústica (para configurações de alta severidade) se mostrou eficaz no tocante ao mapeamento da localização e detecção de trincas de CsT na chapa de aço inoxidável AISI 316 (ASTM-A-249). A comprovação do fenômeno de CsT veio através de ensaios nas trincas e defeitos existentes no vaso de pressão estudado, comparação com ampla bibliografia da área e análise dos resultados. Informações coletadas na empresa detentora do vaso de pressão também permitiram racionalizar houve a combinação dos 3 fatores necessários para a ocorrência da CsT.

Além disso, utilizando o método de ultrassom *TFM (Total Focusing Method)* e *FMC (Full Matrix Capture)* também conseguiu-se dimensionar a altura das trincas de CsT, usando o software de análise com algoritmos de modos da M2M Mantis +.

Na inspeção e análise das técnicas de TFM/FMC, testou-se vários modos para que se chegasse no resultado ideal a fim de caracterizar dimensionalmente da melhor maneira tais trincas/descontinuidades (altura, profundidade e comprimento), estudando a eficácia de vários modos (TT, TTT ou TTTT) com cada classe ou tipo de descontinuidade. Vale salientar ainda que mesmo que tais técnicas ainda tenham muito a evoluir em seu desenvolvimento, com tal estudo já foi notado que para cada tipo de morfologia, dimensão e material, dever-se-á analisar caso a caso para se definir a abordagem dedicada mais eficaz para a detecção dos defeitos a serem investigados.

Ficou evidente ainda que a TFM/FMC preenche uma lacuna não suportada por outros NDTs (tais como Líquidos Penetrantes/Partículas Magnéticas), uma vez que estes apresentavam grande dificuldade em dimensionar trincas rasas (características de CsT).

Porém, reforça-se que aqui não se empenhou em provar que uma ou outra técnica foi melhor/pior, mas se fixou em fornecer ao investigador/perito/engenheiro mais uma ferramenta a ser utilizada na Análise de Mecânica da Fratura, comprovando para isso a eficácia da combinação do Ultrassom *Phased Array TFM/FMC* e Emissão Acústica, determinantes na localização e dimensionamento das trincas, respectivamente. Principalmente porque, quando comparada a outros estudos dedicados exclusivamente ao tema, esta dissertação evidenciou que o *Phased Array* se aprimorou (+TFM/FMC) e pode ser empregado na detecção, dimensionamento e monitoramento de trincas em vasos de pressão feitos com materiais com alto grau de susceptibilidade a CsT.

Por fim, pode-se dizer então que aqui neste estudo contribuiu-se bastante para que engenheiros e responsáveis pela integridade de equipamentos (tais como vasos de pressão) possam fazer um acompanhamento eficiente das trincas através do monitoramento, alcançando a previsibilidade de eventos sem maiores danos/perdas.

Constituindo-se então como uma importante contribuição dentro do cenário acadêmico-científico atual.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO - ABENDI. **PR-151 REV. 1**. São Paulo: Abendi, 2018.

ABRANTES, L. M. Proteção catódica. **Revista de Ciência Elementar**, v. 3, n. 2, 2015. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2015/132/>. Acesso em: 27 dez. 2019.

AMOROS, T. R. **Avaliação de tensões residuais em chapas planas de aço carbono, destinadas a processos de corte a laser, pelo método da anisotropia planar**. 2008. Dissertação (Mestrado Profissional em Geração e Transferência de Tecnologia) – Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <https://lactec.org.br/wp-content/uploads/2021/04/026-Dissertacao-Roberto-Torres-Amoros-1.pdf>. Acesso em: 15 maio 2021.

ANDREUCCI, R. A. **Aplicação industrial: ensaio por ultrassom**. São Paulo: ABENDI, jun. 2018. Disponível em: http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostila_us_2018.pdf. Acesso em: 11 jan. 2021.

ARAUJO, A. de; PANOSSIAN, Z.; LOURENÇO, Z. Proteção catódica de estruturas de concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 6, p. 178-193, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM standard E 647-13ae1**: standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. West Conshohocken: ASTM International, 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/11475552/Standard_Test_Method_for_Measurement_of_Fatigue_Crack_Growth_Rates. Acesso em: 10 out. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM G30-97**: standart practice for making and using u-bends stress-corrosion test specimens. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken: ASTM International, 2015. Disponível em: <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmg30972015>. Acesso em: 24 abr. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM E3-11**: preparation of metallographic specimens 1. Area, v. 3, n. July, 2001. West Conshohocken: ASTM International, 2001. Disponível em: https://www.academia.edu/35989703/ASTM_E_3_01_Standard_Guide_for_Preparation_of_Metallographic_Specimens_1. Acesso em: 14 fev. 2020.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME. **ASME SA-240/SA-240M**: specification for chromium and chromiumnickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications. Section II, PART A. 2007. Disponível em: <https://www.asiamzsteel.com/uploads/ASME-SA240.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2021.

CARVALHO, J. A. N. **Corrosão em aços inoxidáveis: corrosão sob tensão**. São Paulo: ABINOX, [2021]. Disponível em: <https://www.abinox.org.br/site/capacitacao-aprenda-com->

especialista-corrosao-em-acos-inoxidaveis-detalhes.php?cod=433&codSerie=395. Acesso em: 12 out. 2021.

CAMACHO, J. *et al.* Ultrasonic crack evaluation by phase coherence processing and TFM and its application to *online* monitoring in fatigue tests. **NDT and E International**, Reino Unido, v. 93, jan. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869516303073>. Acesso em: 28 out. 2018.

CAMACHO J.; PARRILLA M.; FRITSCH C. Phase coherence imaging: IEEE Trans ultrason ferroelectric frequency control. **NDT and International Book**, Reino Unido. v. 56, 2009. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/improvement-of-ultrasonic-cross-sectional-imagery-via-the-application-of-coherence-weighting-and-the-total-focussing-method>. Acesso em: 15 set. 2020.

CAMPINHO, H. S. **Aplicação do ultrassom automatizado na inspeção de solda circunferencial em dutos na indústria de petróleo e gás**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté - UNITAU, Taubaté, 2007. Disponível em: <https://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-85513/aplicacao-do-ultra-som-automatizado-na-inspecao-de-solda-circunferencial-em-dutos-na-industria-de-petroleo-e-gas>. Acesso em: 12 nov. 2021.

CANCIAN, R. V. **Estudo da distribuição de enxofre em frações destiladas de petróleos e análise multivariada das frações**. 2010. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória, 2019. Disponível em: http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/4658/1/tese_4510_.pdf. Acesso em: 6 set. 2019.

CARNEVAL, R. de O.; MOREIRA, A. B.; SOUZA, C. Uso das técnicas de end: ultra-som (TOFD e phased array), radiografia, partículas magnéticas e ACFM na avaliação de juntas soldadas com trincas de fadiga. In: CONFERÊNCIA PANAMERICANA DE END, 4., 2007, Buenos Aires. **Proceedings** [...]. Buenos Aires: AAENDE (Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales), 2007.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CALVIMONTES, S. C. *et al.* Cracking factors evaluation flash-butt welding of 600 grade dual phase steel. In: COBEM – INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 4., 2017, Gramado – RS. **Trabalhos apresentados** [...]. Gramado – RS: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM. ABCM Symposium Series in Mechatronics, 2017. v. 4.

CHARLESWORTH, J. P.; TEMPLE, J. A. G. Engineering applications of ultrasonic time-of-flight-diffraction. 2nd ed. **The e-Journal of Nondestructive Testing**. Upton, Oxfordshire – UK, 2001. Disponível em: <https://www.ndt.net/article/v07n06/temple/temple.htm>. Acesso em: 4 jul. 2019.

CHENG, Y. F. **Stress corrosion cracking of pipelines**. Calgary, Canada: John Wiley & Sons, 2013. (Wiley Series in Corrosion). Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Stress+Corrosion+Cracking+of+Pipelines-p-9781118537084>. Acesso em: 14 maio 2018.

DANKO, J. C. **Corrosion in the nuclear power industry**. In: METALS Handbook. 9th ed. Colorado: American Society for Metals, 1992. v. 13.

DAVIS, J. R. **Corrosion: understanding the basics**. 4th ed. Ohio: ASM International, 2008.

DAVÓ, B. Stress corrosion cracking of B13, a new high strength aluminium lithium alloy. **Corrosion Science**, Kentucky, v. 48, n. 12, p. 4113-4126, 2006.

DAVID, J.; CHEEKE, N. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**. 2nd ed. USA: CRC Press, 2002.

DOCTOR, S. R.; SCHUSTER, L. D.; HALL, T. E. - **Real-time 3D SAFT UT system evaluation and validation**. USA: Report Pacific Northwest National Laboratory, 1996.

NUREG/CR-6344 PNNL-10571. Disponível em:

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/037/28037517.pdf. Acesso em: 27 jun. 2021.

DOMINGUES, M. S. **Metodologia para a análise dos modos de falhas aplicada a metais**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Instituto de Ciência e Tecnologia – ICT, São José dos Campos, 2021. Disponível em:

<https://repositorio.unifesp.br/xmlui/bitstream/handle/11600/39188/COMFOR-GDIE%20Mod5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 dez. 2021.

DRINKWATER, B.; WILCOX, P. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review. **NDT & E International**, Bristol – UK, v. 39, n. 7, p. 525-541, 2006.

EDDYFI TECHNOLOGIES – **Aparelho M2M Mantis**. Disponível em:

<https://www.eddyfi.com/en/product/gekko>. Acesso em: 15 nov. 2021.

FRANCO, O. C.; SCHROEDER, R. M., MÜLLER, I. L. **Susceptibilidade à corrosão-sob-tensão e fragilização por hidrogênio do aço AISI 304 e 316 em potenciais catódicos e anódicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1997.

FILIPPIN, C. G. *et al.* **Emissão acústica: conceitos e aplicações**. Curitiba, PR: Institutos Lactec; Araucária, PR: UEG, 2017. Disponível em: https://lactec.org.br/wp-content/uploads/2021/01/LIVRO-EMISSAO-ACUSTICA-_CONCEITOS-E-APLICACOES_R_Digital.pdf. Acesso em: 5 mar. 2021.

GEMELLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 2011.

GENTIL, V. **Corrosão, livros técnicos e científicos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

GINZEL, E. A.; JOHNSON, D. Phased-array resolution assessment techniques. Materials Research Institute, NDT.net - **The e-Journal of Nondestructive Testing**. Waterloo, Ontario, Canada. 2008. Disponível em: <https://www.ndt.net/article/v13n07/ginzel.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2021.

GINZEL, E. A. NDT adapts to Phased Array: price reductions and user-friendly options have allowed not to warm up to advanced ultrasonic testing technology, including phased-array and

tine of flight diffraction. **Quality Magazine**, Waterloo, Ontario, Canada, v. 48, n. 2. feb. 2009.

GHOSH, S.; KAIN, V. Microstructural changes in AISI 304L stainless steel due to surface machining: effect on its susceptibility to chloride stress corrosion cracking. **Journal of nuclear materials**, Mumbai – India, v. 403, n. 1-3, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022311510002424?via%3Dihub>. Acesso em: 9 fev. 2019.

GRAVALOS, M. T.; MARTINS, M.; DINIZ, A. E. Influência da rugosidade na resistência à corrosão por pite em peças torneadas de aço inoxidável superaustenítico. **Inox: corrosão. REM: Revista Esc. Minas, Ouro Preto**, v. 63, n. 1, p. 077-082, mar. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/wz4R5h43W5Ct4ZHjJ7hPsHv/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 29 dez. 2021.

HOLLOWAY, P.; GINZEL, E. TFMiTM: using intermodal analysis to improve TFM imaging. **e-Journal of Nondestructive Testing (NDT)**. Georgetown, Ontario, Canada: NDT.net Journal, 2021. Disponível em: <https://www.ndt.net/search/docs.php?id=26036>. Acesso em 24 ago. 2021.

HOLMES C.; DRINKWATER B.; WILCOX P. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation. **NDT and E International Book**, Bristol – UK, v. 38, n. 8, p. 701–11, 2005. Disponível em: <https://research-information.bris.ac.uk/en/publications/post-processing-of-the-full-matrix-of-ultrasonic-transmit-receive>. Acesso em: 24 maio 2021.

HOMEM, P.; FONSECA, I.; CAVALHEIRO, J. O escurecimento do altar de prata da Sé do Porto: um caso de corrosão atmosférica. **Corrosão e Proteção de Materiais**, Lisboa – Portugal, v. 27, p.82-86, 2008. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/37238/1/Amaral_2017.pdf. Acesso em: 25 abr. 2021.

HUPPES, R. M. **Análise de falha em vaso de pressão**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25829/000753977.pdf?sequence=1>. Acesso em: 8 mar. 2019.

ITAKURA, M.; KABURAKI, H.; ARAKAWA, C. Branching mechanism of intergranular crack propagation in three dimensions. **Physical review**, Tokyo, 2005. Disponível em: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.71.055102>. Acesso em: 25 maio 2020.

JONES, R. H. **Stress-corrosion cracking, materials performance and evaluation**. Tampa – USA: ASM international, 2017. p. 257-271.

JONES, R. H.; FRIESEL, M.A. Acoustic emission during pitting and transgranular crack initiation in type 304 stainless steel. **Corrosion**, Houston, Texas, v. 48, n. 9, p. 751, 1992. Disponível em: <https://onepetro.org/corrosion/article-abstract/116906/Acoustic-Emission-During-Pitting-and-Transgranular>. Acesso em: 17 ago. 2019.

KAIN, V. **Stress corrosion cracking (SCC) in stainless steels in stress corrosion cracking**. São Paulo: Woodhead Publishing, 2011. p. 199-244. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845696733500055>. Acesso em: 23 abr. 2021.

KUNDU, T. **Advanced ultrasonic methods for material and structure inspection**. Colorado: ISTE, 2007.

LAFONTAINE, G.; CANCRE, F. Potential of ultrasonic phased arrays for faster, better and cheaper inspections. *In: WORLD CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING*, 19., 2016, Brescia. **Proceedings [...]**. Brescia – Italy: NDT.net, v. 5, n. 10, out. 2000. Disponível em: https://visco.com.vn/download/Advances_In_Phased_Array_Ultrasonic_Technology_Applications.pdf. Acesso em: 4 set. 2019.

LANDIS, E. N.; BAILLON, L. Experiments to relate acoustic emission energy to fracture energy of concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, Reston, v. 128, p. 698-702, 2002.

LAZARINI, J. C. **Materiais e corrosão**. Rhodia Paulínia - SP, 2012. (apostila do curso de Materiais e Corrosão).

LEITE, P. G. **Curso de ensaio não destrutivos**. 8. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (ABM), 1966.

MARTIN, C. C. **Ultrassom**. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção – ABENDI, 2012.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engeneering and science**. CRC Press LLC, 2000.

MATTHEWS, N. *et al.* Application of SPD to enhance the structural integrity of fuseage skins and centre barells. *In: AIRCRAFT sustainment and repair*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018. cap. 17. p. 907-929.

MARIANO, N. A. **Corrosão sob tensão de um aço inoxidável austenítico em soluções aquosas contendo cloretos**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997. Disponível em: DOI:10.11606/T.18.2017.tde-03102017-142025. Acesso em: 30 mar. 2021.

MELO JÚNIOR, A. S. **Análise quantitativa do material particulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron**. 2007. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <https://sil0.tips/download/universidade-estadual-de-campinas-faculdade-de-engenharia-civil-arquitetura-e-ur-12>. Acesso em: 16 abr. 2019.

MEYER, R. M. *et al.* Assessment of NDE technologies for detection and characterization of stress corrosion cracking in LWRs. **Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)**, Richland, Washington, USA. IAEA-CN-194-066, 2013. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/130/43130395.pdf. Acesso em: 7 jun. 2019.

MINGOTTI, B. S. **Fragilização por hidrogênio em aços de baixa liga destinados ao transporte de óleo e gás.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2017. p. 65-67. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/156955>. Acesso em: 26 jun. 2019.

MOORTHY, V.; JAYAKUMAR, T.; RAJ, B. Acoustic emission technique for detecting micro- and macroyielding in solution annealed AISI type 316 austenitic stainless steel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, New Delhi, India. v. 64, p. 161-168, 1995.

MENEZES, M. F. S.; GALVES, V.; SILVA, M. M. P. Aplicação do aço AISI 316 em titulações potenciométricas como eletrodo indicador. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA - COBEQ. 2019. **Proceedings** [...].Uberlândia, MG: Departamento de Engenharia Química, 2019. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobecic2019/EMN25.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2020.

MURUGAN, L. M. Phased array UT application on in service heavy wall reactors. *In*: NON-DESTRUCTIVE EVALUATION 2019. **Proceedings** [...]. Bangalore – India: ASNT NDT Level III RT, UT, MT, PT, VT, ET. API -510,653,570, AWS-CWI. 2006. Disponível em: https://isnt.in/wp-content/uploads/2020/09/NED19_Souvenir.pdf. Acesso em: 2 jul. 2019.

NASCIMENTO, C. L. **Diagnóstico de corrosividade em eletrodo de aterramento elétrico cobreado.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/browse?type=advisor&value=Silla+Junior%2+Carlos+Nascimento>. Acesso em: 20 maio 2018.

NAGATA, N.; BUENO, M. I. M. S.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Métodos matemáticos para correção de interferências espectrais e efeitos interelementos na análise quantitativa por fluorescência de raios-x. **Química Nova**, Campinas, v. 24, n. 4, p. 531-539, 2001.

NAYAK, P. S.; SINGH, B. K. Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. **Bulletin of Materials Science**, Madhya Pradesh, v. 30, n. 3, p. 235-238, 2007.

NETTO, H. V. C. **Influência da temperatura de ensaio e de tratamento térmico na resistência à corrosão por pite dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316.** 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória, 2009. Disponível em: https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/pg-hugo_vergilio.pdf. Acesso em: 8 jul. 2019.

NDT TESTER. **Posto em fase:** põe o bloco da calibração para a calibração do atraso da cunha, executando DAC/TCG. Disponível em: <http://portuguese.ndttester.com/sale-7645427-phased-array-calibration-block-for-wedge-delay-calibration-performing-dac-tcg.html>. Acesso em: 16 out. 2021.

NORMA PETROBRAS. **N-1594**. REV. E. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2003.

NUNES, L. P. **Fundamentos de resistência à corrosão**. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.

OLYMPUS. **Tutorial do phased array – índice: calibração e normalização**. Tokyo – Japan, [2021]. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/calibration/calibrationnormalization/>. Acesso em: 28 out. 2021.

OLYMPUS. **Acoplantes ultrassônicos: notas de aplicação**. Tokyo – Japan, [2021]. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/applications/ultrasonic-couplant/>. Acesso em: 18 nov. 2021.

OLYMPUS NDT. **Advances in phased array ultrasonic technology applications**. Waltham, Massachusetts – USA, 2007. Disponível em: <https://www.ndt.net/news/2007/20070401olympusndt1.htm>. Acesso em: 7 dez. 2018.

OLYMPUS NDT. **Introduction to phased array ultrasonic technology applications**. Waltham, Massachusetts – USA, 2004. Disponível em: https://visco.com.vn/download/Introduction_to_Phased_Array_Ultrasonic_Technology_Applications.pdf. Acesso em: 24 abr. 2019.

OLYMPUS NDT. **Phased array basic theory for industrial applications**. Waltham, Massachusetts – USA, 2010. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-testing/>. Acesso em: 25 fev. 2021.

OLIVEIRA, P. C. A.; BERTAZZOLI, R. Determinação da densidade de corrente de corrosão em meios de baixa condutividade: uso de microeletrodos para minimizar a queda ôhmica. **Química Nova**, Barueri, v. 34, n. 2, 2011.

OLIVEIRA, R. G. **Produção e reciclagem de aços inoxidáveis**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003735.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2020.

OLIVEIRA, K. A. de. **Caracterização e classificação do resíduo de lã de rocha para utilização em indústria cimenteira**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Santa Catarina, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/2438>. Acesso em: 14 jan. 2021.

PANOSSIAN, Z. Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas. **IPT**, São Paulo, v. 2, 2000.

PANNONI, F. D. **Projeto e durabilidade**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia, Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2009. Disponível em: http://mkestruturasmetalicas.com.br/mk-manuais/Manual_Projeto_Durabilidade.pdf. Acesso em: 26 abr. 2021.

PARK, I.; KIM, E. Y.; YANG, W. J. Microstructural investigation of stress corrosion cracking in cold-formed AISI 304 reactor. **Metals**, v. 11, n. 1, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/1/7>. Acesso em: 1 maio 2019.

PEDRALLI FILHO, J.; ESCHER, K. C. K. Estudo da corrosão por fresta no aço inoxidável AISI 409 tratado por SHTPN. *In*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA CONTECC, 2016, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. Disponível em: <https://www.confea.org.br/sites/default/files/uploads-imce/contecc2016/mecanica/estudo%20da%20corros%20a3o%20por%20fresta%20no%20a%20inoxid%20a1vel%20aisi%20409%20tratado%20por%20shtpn.pdf>. Acesso em: 7 set. 2019.

PEREIRA JÚNIOR, P. **Influência da anisotropia gerada por laminação sobre a medição de tensões por ultrassom em ligas de alumínio 7050**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PINTO, D. F. **Comportamento em corrosão sob tensão de um aço inoxidável ferrítico AISI 444 soldado com aço inoxidável austenítico AISI 316L, em meios contendo cloretos**. 2006. Mestrado (Dissertação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2479>. Acesso em: 16 fev. 2019.

REAGOR, B. T.; SINCLAIR, J. D. Tarnishing of silver by sulfur vapor: film characteristics and humidity effects. **Journal of the Electrochemical Society**, n.128, p.701-705. 1981.

RHODIA PAULÍNIA. **Relatório de Atividades**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 2013. Disponível em: https://issuu.com/ibp_pub/docs/relatorio_2013. Acesso em: 2 set. 2021.

RICHTER, M. R.; CAMPINHO, H. S. Aplicação prática de ultrassom computadorizado na inspeção de vasos de pressão, baseado no "code case" 2235. *In*: CONGRESSO PAN-AMERICAN CONFERENCE OF NON-DESTRUCTIVE TEST – PANNDT, 3., 2003, Rio de Janeiro. **Proceedings [...]**. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <https://docplayer.com.br/amp/29777031-Conaend-iev-qualificacao-de-procedimento-de-ultrassom-phased-array-para-inspecao-de-juntas-soldadas-com-geometria-complexa-tipo-boca.html>. Acesso em: 25 out. 2021.

RIEDER, H. *et al.* Ultrasonic imaging and sizing of stress corrosion cracks in welded austenitic components using the synthetic aperture focusing technique. 2015. NDT.net. **The e-Journal of Nondestructive Testing**, Upton, Oxfordshire – UK. 2015. Disponível em: <https://www.ndt.net/article/jrc-nde2013/papers/243.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2020.

RUZZANTE, J. E. **Ondas elásticas, sensores y emissão acústica**. 1998. IT/A 69/98 Apostila.

SANTIN, J. L. **Ultrassom: técnica e aplicação**. 2. ed. Curitiba: Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.

SANTANA, A. P. *et al.* **Princípios de corrosão: tipos de corrosão**. IFMA - Campus Barra do Corda – MA, 2015. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/jhogenesrp/tipos-de-corrosoifma>. Acesso em: 4 ago. 2020.

SCHMERR, L. W. **Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation**. 2nd ed. Springer, 2016.

- SCHROEDER, R. M. **Contribuição ao estudo da susceptibilidade à corrosão-sob-tensão do aço inoxidável austenítico AISI 304 em meios aquosos contendo cloretos**. 1982. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/130506/000011772.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 fev. 2020.
- SCHVARTZMAN, M. M. A. M. *et al.* Avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão da ZAC do aço inoxidável AISI 316L em ambiente de reator nuclear PWR. **Soldagem Insp.**, São Paulo, v. 14, n. 3, p.228-237, 14 jul. 2009.
- SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; MATIAS, A.; CRUZ, J. R. B. Avaliação da corrosão sob tensão em aço inoxidável AISI 321 em ambiente de reator nuclear. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 15, n.1, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762010000100006>. Acesso em: 13 jul. 2019.
- SCHWEITZER, P. A. **Fundamentals of corrosion: mechanisms, causes, and preventative methods**. New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2010.
- SHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials science for engineers**. 8th ed. California: Pearson Higher, 2015.
- SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6th ed. California: Pearson Prentice Hall. 2008.
- SHIPILOL, S. A. Solving some key failure analyses problems using advanced methods for materials testing. **Engineering failure analysis**, v. 14, n. 8, 2007.
- SHREIR, L. L.; COTTIS, R. A. **SHREIR'S Corrosion**. 4th ed. London: Elsevier, 2010. *Ebook*. Disponível em: <https://www.worldcat.org/title/shreirs-corrosion/oclc/648875984>. Acesso em: 19 maio 2020.
- SHREIR, L. L. **Corrosion: corrosion control**. 2nd ed. London: Newnes, 2013.
- STAEHLE, R.W., Understanding situation-dependent strength: a fundamental objective in assessing the history of stress corrosion cracking. *In: PROCEEDINGS OF ENVIRONMENT-INDUCED CRACKING OF METALS*, p. 561-612, Houston - TX, **Anais [...]**. Houston – TX. 1989. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/000/26000314.pdf. Acesso em: 29 jan. 2020.
- SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise instrumental**. 5th ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. p. 31-36.
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Nondestructive examination**. ASME section V. Nova Iorque: ASME, 2018. Disponível em: <https://nexnor.com/wp-content/uploads/2020/01/ASME-V-2019.pdf>. Acesso em: 3 out. 2018.
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME VIII Div.1**. Nova Iorque, 2018. Disponível em: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes->

standards/bpvc-viii-1-bpvc-section-viii-rules-construction-pressure-vessels-division-1. Acesso em: 27 abr. 2020.

TORINO SOLUZIONI AMBIENTALI (TSA). **Tipos de corrosão**: saiba como diferenciar cada processo corrosivo. Barra da Tijuca, 2018. Disponível em: <http://www.tsambientali.com.br/tipos-de-corrosao-saiba-como-diferenciar-cada-processo-corrosivo/>. Acesso em: 05 nov. 2021.

VALLEN, H. **AE testing fundamentals, equipment, applications**. Wolfratshausen, Alemanha: Vallen Systeme GmbH, 2014. Disponível em: <http://www.schallemission.de/zdownload/pdf/sea204E.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2021.

VOLPE, L.; PETERSON, P. J. The atmospheric sulfidation of silver in a tubular corrosion reactor. **Corrosion Science**, Chicago, v. 29, p.1179-1196. 1989.

FREITAS V.V.; ALVES, K. J. B.; ROMEU, M. F. Estudo comparativo da passivação do aço 316-L com ácido nítrico e ácido sulfúrico em diferentes temperaturas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 12., 2017, São Carlos – SP. **Proceedings [...]**. São Carlos: COBEQ, 2017. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/estudo-comparativo-da-passivao-do-ao-aisi-316-l-com-cido-ntrico-e-cido-sulfrico-em-diferentes-temperaturas-25936>. Acesso em: 19 jul. 2019.

WILCOX P.D.; HOLMES C.; DRINKWATER B. Enhanced defect detection and characterisation by signal processing of ultrasonic array data. *In*: EUROPEAN CONFERENCE ON NDT – ECNDT, 9., 2006, Berlin (Germany). **Trabalhos apresentados [...]**. Berlin (Germany), 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/239583509_Enhanced_Defect_Detection_and_Characterisation_by_Signal_Processing_of_Ultrasonic_Array_Data. Acesso em: 22 mar. 2019.

ZETEC, Inc. **Fundamental principles of FMC and TFM technologies in ultrasonic inspection**. Washington. 2017.

ZHANG J.; DRINKWATER B. W.; WILCOX P.D.; HUNTER A. J. Defect detection using ultrasonic arrays: the multi-mode total focusing method. **NDT and E International Book**. Bristol – UK. v. 43, n.2, p. 123–133, 2010.

ZUCATO, I. *et al.* Caracterização microestrutural das transformações de fase que provocam susceptibilidade à corrosão intergranular em um aço inoxidável dúplex UNS S31803. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14., 2000, São Caetano do Sul – SP. **Anais [...]**. São Caetano do Sul: Escola de Engenharia Mauá (Praça Mauá), 2000. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2000/Docs/TC301-081.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2018.