



**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
EM GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

ÉMERSON SILVA MOTA

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ULTRASSOM POR *PHASED ARRAY*
PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO**

**Salvador
2020**

ÉMERSON SILVA MOTA

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ULTRASSOM POR *PHASED ARRAY*
PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Rodrigo Santiago Coelho

**Salvador
2020**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

M917a Mota, Emerson Silva

Análise da aplicação do método de ultrassom por phased array para avaliação da eficiência de juntas soldadas de aço inoxidável austenítico / Emerson Silva Mota. – Salvador, 2020.

148 f.: il. color.

Orientador: Prof Dr. Rodrigo Santiago Coelho

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial - GETEC) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2020.

Inclui referências.

1. Ensaio de gamagrafia. 2. Ensaio de ultrassom. 3. PHASED ARRAY. 4. Austenítico. 5. Solda. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Coelho, Rodrigo Santiago. III. Título.

CDD: 620.1123

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada "AVALIAÇÃO PRÁTICA DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO UTILIZANDO O MÉTODO DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM PHASED ARRAY" apresentada no dia 19 de dezembro de 2019, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador:


Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho
SENAI CIMATEC

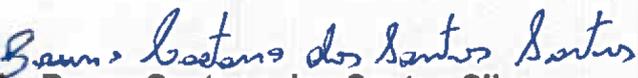
Membro Interno:


Prof. Dr. Guilherme Oliveira de Souza
SENAI CIMATEC

Membro Externo:


Prof. Dr. Ivan Costa da Silva
IFBA

Membro Externo:


Prof. Me. Bruno Caetano dos Santos Silva
FIEB

Membro Externo:


Prof. Me. Erick Cerqueira das Neves
FIEB

*A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas
pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo
mundo vê.*

Arthur Schopenhauer

The science of today is the technology of tomorrow.

Edward Teller

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha esposa Carla, pelo apoio incondicional e por estar ao meu lado.

Aos meus filhos, Mariana e Lucas, por serem quem são.

Aos meus pais, Nilton e Consuelo, por estarem sempre presentes na minha vida.

Ao Prof. Dr. Ing. Rodrigo Coelho, pela orientação e entusiasmo neste projeto.

Ao SENAI/CIMATEC, em nome da Prof^ª. Dra. Josiane Dantas, pelo incentivo financeiro.

Ao Amauri Amorim da APEIRON, pelo tempo dedicado e pelo suporte técnico, imprescindível para essa pesquisa.

Aos ilustres Venício Acherman, Irlando Lima, Luiz Eduardo Oliveira e Gustavo Snoeck, da empresa MKS Soluções Integradas S.A., pela receptividade e disponibilidade no atendimento aos serviços solicitados por mim.

Por fim, quero deixar o meu profundo agradecimento a todos que, de alguma forma, participaram dessa jornada.

RESUMO

Atualmente o ensaio de ultrassom para avaliação da eficiência de junta soldada em materiais austeníticos, tanto para equipamentos, quanto para tubos das usinas nucleares, indústria química, petroquímica e de petróleo, tem sido limitado por motivo de baixa confiabilidade dos laudos. A zona fundida dos materiais austeníticos possui interfaces de compostos intermetálicos, além de características metalúrgicas próprias devido aos grãos dendríticos maiores e heterogêneos, causando maior atenuação sônica, o que dificulta o laudo do exame de inspeção e, por este motivo, a gamagrafia é o que se pratica para este tipo de solda. Por sua vez, a avaliação da integridade mecânica das juntas soldadas pelo método de ultrassom traz benefícios diversos, principalmente quanto à saúde dos trabalhadores, devido ao fato de não haver riscos de exposição a fontes radioativas, que são cancerígenas. Outros benefícios são: (i) não há isolamento da área no raio calculado, com possibilidade da realização de outras atividades circunvizinhas; (ii) sem impacto no prazo do cronograma quando se trata de paradas de manutenção ou de obras de montagem de médio ou grande porte; (iii) em geral, não há restrição de liberação para a execução do ensaio de inspeção por ultrassom (US), ao passo que para gamagrafia, pode haver a impossibilidade da execução, por razões diversas e (iv) menor complexidade para a execução da atividade. Estas vantagens foram os principais motivos para o desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo é apresentar uma avaliação do ensaio de inspeção por ultrassom, pelo método *Phased Array*, para soldas de materiais austeníticos. A prática mais utilizada quanto ao aço inoxidável austenítico nos tipos citados de indústrias foi o único critério adotado para a seleção da especificação do material da chapa dos corpos de prova, das espessuras, dos processos de soldagem e dos ensaios de inspeção. O método utilizado nesse trabalho é a experimentação prática em oficina e a realização de ensaios de inspeção pelos métodos de gamagrafia, de ultrassom convencional A-Scan e de ultrassom por *Phased Array* em juntas soldadas com a inclusão de defeitos e posterior comparação entre os resultados dos mesmos, de modo a verificar a eficácia da técnica do *Phased Array* quanto aos laudos emitidos. Todas as etapas realizadas nesta pesquisa, que vão desde os materiais utilizados até os laudos dos ensaios de inspeção, estão de acordo com normas técnicas reconhecidas. Os resultados obtidos com o *Phased Array* foram promissores, apesar das divergências quanto ao critério de aprovação das descontinuidades. Estas discussões foram tema deste trabalho e poderão abrir um caminho para a mudança nesta cultura da gamagrafia, o que, certamente, trará benefícios tangíveis e intangíveis quanto à avaliação da eficiência das juntas soldadas. Espera-se que este estudo de pesquisa possa motivar o uso desta tecnologia de inspeção pelas indústrias em geral, com confiabilidade dos resultados, maior facilidade na execução em si, menor perda de produtividade pela interrupção de atividades e, acima de tudo, sem expor a saúde das pessoas a riscos de radiações.

Palavras-chave: *Phased Array*; ensaio de ultrassom; austenítico; solda.

ABSTRACT

Currently, the ultrasound test for the evaluation of welded joint efficiency in austenitic materials, both for plates and tubes, has not been performed in the chemical, petrochemical and petroleum industries, due to the reliability of the reports. The fused zone of austenitic materials has its own metallurgical characteristics that cause greater sonic attenuation that makes the inspection examination report difficult and, for this reason, what is practiced for these types of weld inspection is radiography. In turn, the evaluation of the mechanical integrity of welded joints by the ultrasound method has several benefits, especially regarding the health of workers, due to the fact that there is no risk of exposure of radioactive sources, which are carcinogenic. Other advantages are: (i) conducting the test without the need for area isolation, used as a procedure to protect the worker against radioactivity; (ii) there is no isolation of the area within the calculated radius, with the possibility of other surrounding activities; (iii) no implication of schedule deadlines when it comes to maintenance shutdowns for medium or large assembly works; (iv) no release restriction for performing the gamma inspection test on both pipelines and equipment required in design or technical standards. These benefits were the main reasons for the development of this work, whose objective is to present an evaluation of the ultrasonic inspection test, by the *Phased Array* method, for welding of austenitic materials. The only criterion adopted in the selection of material for the plate specification, thickness, welding processes and inspection tests was practice in the oil and gas, petrochemical and chemical industries. The method used in this work is the practical experimentation in the laboratory and the performance of *Phased Array* inspection tests on specimens made from welded joints with the inclusion of defects and subsequent comparison with the results of the radiography test in order to verify the effectiveness of this method with respect to the reports issued. All steps performed in this research, ranging from materials used to inspection test reports, are in accordance with recognized technical standards. The results obtained with the *Phased Array* were promising, despite disagreements about discontinuities approval criterion. These points were discussed in this study and may open the way for a change in this culture of radiography, which will certainly bring tangible and intangible benefits in the evaluation of the efficiency of welded joints. It is hoped that this research study will motivate the use of this inspection technology by industries in general, with reliable results, easier execution itself, less productivity loss due to interruption of activities and, above all, without exposing the health of people from radiation hazards.

Keywords: *Phased Array*, ultrasonic examination, austenitic, welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Produção mundial de aços inoxidáveis.	20
Figura 2- Vantagens do US por Phased Array	25
Figura 3- Número de publicações com combinação de palavras-chave	26
Figura 4- Número acumulado de publicações com as palavras-chave soldagem, austenítico e US Phased Array.....	27
Figura 5- Aplicações dos aços inoxidáveis em 2018.....	29
Figura 6- Crescimento anual médio da produção dos materiais no período de 1980 a 2018... 30	30
Figura 7- Principais grupos de aços inoxidáveis, seus tipos e aplicações.....	32
Figura 8- Produção anual dos aços inoxidáveis por grupo.....	32
Figura 9- As regiões da solda e suas formações microestruturais no MS dos austeníticos.. ...	38
Figura 10- Diagrama esquemático pseudo-binário do sistema ternário Fe-Cr-Ni.....	39
Figura 11- Morfologias da ferrita σ na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos.....	39
Figura 12- Mapa das regiões suscetíveis a mecanismos de danos.....	40
Figura 13- Aço 304L como recebido (13a) e sensibilizado (13b) (500X).....	42
Figura 14- Fase σ na interface α/γ de um aço duplex.	46
Figura 15- Técnica de ensaio radiográfico na indústria.	48
Figura 16- Esquema de separação das radiações alfa, beta e gama.	49
Figura 17- Irradiador gama específico para fontes radioativas de Irídio-192.	50
Figura 18- Desenho esquemático das frequências do som em Hz.....	52
Figura 19- Propagação de uma onda longitudinal em um corpo de massa.	55
Figura 20- Propagação de uma onda transversal em um corpo de massa.	55
Figura 21- Variação da sensibilidade de detecção em função da divergência.	61
Figura 22- Reflexão e transmissão das ondas incidentes.	64
Figura 23- Funcionamento do ultrassom.....	66
Figura 24- Técnica do US pelo Impulso-Eco.	67

Figura 25- US pela técnica de transparência.	68
Figura 26- Avaliação de integridade por ultrassom.	69
Figura 27- Transdutor angular e seus componentes.	70
Figura 28- Realização de END por US Phased Array.	70
Figura 29- Princípio de emissão e recepção de pulsos do Phased Array.	74
Figura 30- Varredura do tipo linear.	76
Figura 31- Varredura do tipo setorial com onda angular.	76
Figura 32- Varredura do tipo DDF com ondas focais.....	77
Figura 33- Configurações de varredura.....	77
Figura 34- Sapatas utilizadas na inspeção por ultrassom Phased Array	78
Figura 35- Dados gerais de projeto.....	82
Figura 36- Diagrama da Metodologia da Pesquisa.....	86
Figura 37- Dimensões das chapas de teste.....	88
Figura 38- Defeitos de solda a serem introduzidos.....	91
Figura 39- Mapa de defeitos marcados nas chapas.....	91
Figura 40- Máquina de solda Muller.	92
Figura 41- Certificado de aferição da máquina de solda.....	92
Figura 42- Marcação dos defeitos a serem introduzidos.....	95
Figura 43- Aparelho de ultrassom convencional A-Scan.	98
Figura 44- Aparelho de ultrassom Phased Array	98
Figura 45- Programação da varredura feita no ScanPlan.....	99
Figura 46- Máscara com o resultado do END de gamagrafia do CP-01.....	101
Figura 47- Gabarito com o resultado do END de gamagrafia do CP-02.....	102
Figura 48- Resultado do Ultrassom Convencional do CP-01, Relatório APEIRON N° UT-CP1.18.....	103
Figura 49- Resultado do US Convencional do CP-02, Relatório APEIRON N° UT-CP2.18.	104

Figura 50- Resultado do US Phased Array do CP-01 / Relatório APEIRON N° PA-CP1.18.	105
Figura 51- Imagens do defeito do ponto 1 do Relatório APEIRON N° PA-CP1.18 ref. ao CP-01.....	106
Figura 52- Imagens do defeito do ponto 6 do Relatório APEIRON N° PA-CP1.18 ref. ao CP-01.....	106
Figura 53- Resultado do US Phased Array do CP-02 / Rel. APEIRON N° PA-CP2.18 fl. 1/7.	107
Figura 54- Resultado do US Phased Array do CP-02 / Rel. APEIRON N° PA-CP2.18 P. 2/7.	108
Figura 55- Imagens do defeito do ponto 1 do Rel. APEIRON N° PA-CP2.18 ref. ao CP-02.	109
Figura 56- Imagens do defeito do ponto 5 do Relatório APEIRON N° PA-CP2.18 ref. ao CP-02.....	109
Figura 57- Imagens do defeito do ponto 6 do Relatório APEIRON N° PA-CP2.18 ref. ao CP-02.....	110
Figura 58- Imagens do defeito do ponto 13 do Relatório APEIRON N° PA-CP2.18 ref. ao CP-02.....	110
Figura 59- Quadro esquemático com os resultados dos END's realizados no CP-01 (1/4").	112
Figura 60- Quadro esquemático com os resultados dos END's realizados no CP-02 (1/2").	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Quantidade de ativos de equipamentos e tubulações da Empresa A.....	31
Tabela 2- Composição química dos principais grupos de aços inoxidáveis.	33
Tabela 3- Principais propriedades mecânicas das fases microestruturais dos aços inoxidáveis.	33
Tabela 4- Composição química dos principais aços austeníticos.....	34
Tabela 5- Características do aço inoxidável austenítico.	35
Tabela 6- Classes de filmes industriais.	51
Tabela 7- Velocidades em ondas longitudinais e transversais de alguns materiais.....	56
Tabela 8- Comprimentos mínimos de detectabilidade das descontinuidades para ondas longitudinais.	58
Tabela 9- Comprimentos mínimos de detectabilidade das descontinuidades para ondas transversais.	58
Tabela 10- Resultados da atenuação x tamanho de grão:.....	59
Tabela 11- Valores de atenuação para aços Cr-Ni para três processos de fabricação.	59
Tabela 12- Valores de “k” em função da redução da intensidade sônica.	61
Tabela 13- Impedância acústica de alguns materiais e acoplantes.	65
Tabela 14- Comparativo dos cristais pela frequência em MHz.	71
Tabela 15- Características dos cristais utilizados como transdutores.....	71
Tabela 16- Principais diferenças entre as técnicas de US.	79
Tabela 17- Quadro comparativo de quesitos gerais entre gamagrafia e ultrassom:	85
Tabela 18- Materiais e Métodos.	87
Tabela 19- Características dimensionais das chapas utilizadas.....	89
Tabela 20- Quadro resumo com dados técnicos da soldagem.....	93
Tabela 21- Condições radiográficas do END de gamagrafia.	96
Tabela 22- Especificações dos equipamentos de US e seus acessórios.....	97

Tabela 23- Resultado do END de gamagrafia do CP-01.	101
Tabela 24- Resultado do END de gamagrafia do CP-02.	102
Tabela 25- Resultados do ensaio da gamagrafia, do US convencional e do US Phased Array	111
Tabela 26- Quadro resumo dos resultados dos ensaios de US em relação à gamagrafia do CP- 01	114
Tabela 27- Quadro resumo dos resultados dos ensaios de US em relação à gamagrafia do CP- 02	117
Tabela 28- Quadro comparativo de improdutividade, custos e perda de faturamento	119

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineering</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BS	<i>British Standard</i>
CFC	Cúbica de Face Centrada
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CP	Corpo de Prova
CST	Corrosão Sob Tensão
DDF	Dynamic Depth Focusing
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
E	Eficiência da Junta Soldada
END	Ensaio Não Destrutivo
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPE	Equipamento de Proteção Especial
EPS	Especificação de Procedimento de Soldagem
ER	Eletrodo Revestido
FBTS	Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem
GMAW	<i>Gas-Shielded Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HHM	<i>High Hazard Material</i>
ISSF	<i>International Stainless Steel Forum</i>
MB	Metal de Base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MS	Metal de Solda
NR-13	Norma Regulamentadora de Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques.

PH	Profissional Habilitado (conforme a NR-13)
PIT	Plano de Inspeção e Testes
PPM	Partes por milhão
PT	Permissão de Trabalho
RQPS	Registro de Qualificação de Procedimentos de Soldagem
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ToFD	<i>Time of Flight Diffraction</i>
US	Ultrassom
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVO	22
1.2 JUSTIFICATIVA.....	22
1.3 REVISÃO SISTEMÁTICA.....	25
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	27
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	29
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	29
2.2 SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.....	35
2.2.1 Descontinuidades encontradas nas soldas dos processos TIG e ER	42
2.2.2 Mecanismos de danos da soldagem de austeníticos	42
2.2.3 Sensitização	44
2.2.4 Fase sigma	45
2.2.5 Anisotropia	46
2.3 ENSAIOS DE INSPEÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS JUNTAS SOLDADAS.....	47
2.4 GAMAGRAFIA.....	47
2.4.1 Radiação gama (γ)	48
2.4.2 Equipamentos da gamagrafia	50
2.4.3 Filmes radiográficos	50
2.5 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM	51
2.5.1 Breve histórico do ensaio por ultrassom	52
2.5.2 Princípios físicos do ultrassom	53
2.5.2.1 Frequência, velocidade de propagação e comprimento de onda	57
2.5.2.2 Atenuação sônica no austenítico	58
2.5.2.3 Absorção	59
2.5.2.4 Dispersão	60
2.5.2.5 Divergência.....	60
2.5.2.6 Impedância acústica ou efeitos da interface entre os materiais	62
2.5.2.7 Fatores de reflexão (R) e transmissão (T) em aços inoxidáveis austeníticos	63
2.5.2.8 Lei de Snell.....	64

2.5.2.9	Acoplantes	65
2.5.3	Princípio de funcionamento do ensaio por ultrassom.....	65
2.5.4	Técnicas da inspeção por ultrassom	66
2.5.4.1	Técnica de pulso-eco ou de impulso-eco	657
2.5.4.2	Técnica de transparência	65
2.5.5	Equipamento do ultrassom.....	68
2.5.6	Transdutor	69
2.5.7	Ultrassom por <i>Phased Array</i>	72
2.5.7.1	Breve histórico	72
2.5.7.2	Ultrassom <i>Phased Array</i> em soldas austeníticas	72
2.5.7.3	Funcionamento do ultrassom por <i>Phased Array</i>	73
2.5.8	Tipos de varredura	75
2.5.9	Principais tipos de sapatas para <i>Phased Array</i> utilizadas na indústria	77
2.5.10	Visualização dos sinais ultrassônicos	78
2.5.11	Comparativo entre a técnica convencional e a técnica por <i>Phased Array</i>	79
2.6	PLANO DE INSPEÇÃO	80
2.6.1	Caso real dos ativos de uma empresa de grande porte.....	83
2.6.2	Pipe-spec e sua importância	83
2.7	VANTAGENS DO ULTRASSOM SOBRE A GAMAGRAFIA	84
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	86
3.1	CHAPAS	88
3.2	PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	90
3.3	DEFEITOS DE SOLDA.....	90
3.4	SOLDAGEM	92
3.5	DEFEITOS INTRODUZIDOS.....	94
3.6	GAMAGRAFIA.....	95
3.7	ULTRASSOM CONVENCIONAL E <i>PHASED ARRAY</i>	96
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	100
4.1	RESULTADO DO END DE GAMAGRAFIA	100
4.1.1	Resultado do END de gamagrafia do CP-01	100
4.1.2	Resultado do END de gamagrafia do CP-02	101
4.2	RESULTADOS DO END DE ULTRASSOM	102

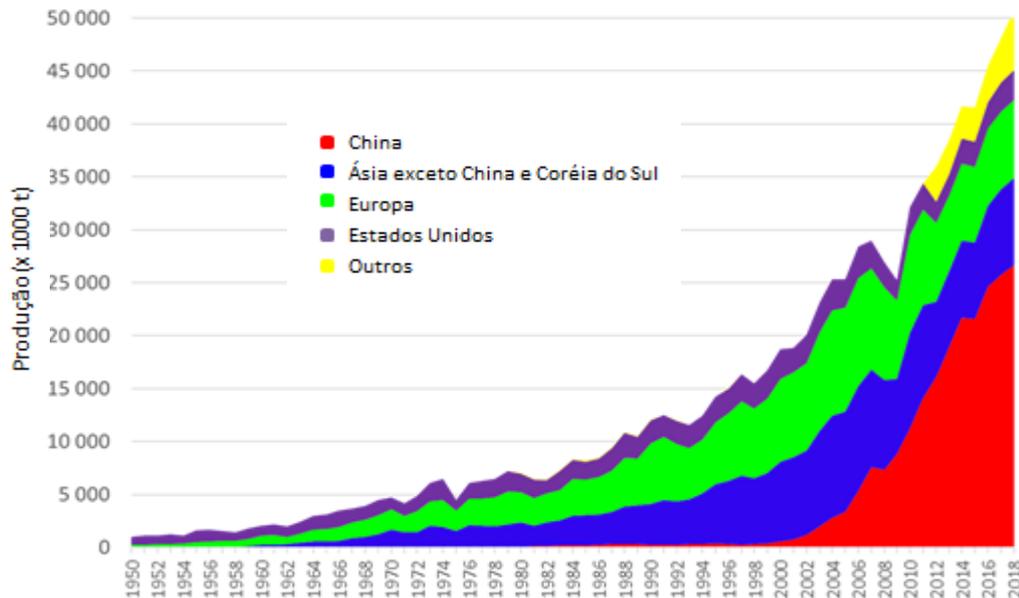
4.2.1 Resultado do END de ultrassom convencional A-Scan com ondas transversais do CP-01 para chapa de espessura de 1/4" (6,35) com acabamento da solda.....	102
4.2.2 Resultado do END de ultrassom convencional A-Scan com ondas transversais do CP-02 para chapa de espessura de 1/2" (12,7) com acabamento da solda.....	104
4.2.3 Resultado do END de ultrassom <i>Phased Array</i> com ondas transversais do CP-01 para chapa de espessura de 1/4" (6,35 mm) com acabamento da solda.....	105
4.2.4 Resultado do END de ultrassom <i>Phased Array</i> com ondas transversais do CP-02 para chapa de espessura de 1/2" (12,7 mm) com acabamento da solda.....	107
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	110
4.3.1 Análise comparativa dos resultados para a chapa de 1/4" (6,35 mm).....	113
4.3.1.1 US A-Scan x gamagrafia para a chapa de 1/4" (6,35 mm)	113
4.3.1.2 US <i>Phased Array</i> x gamagrafia para a chapa de 1/4" (6,35 mm).....	113
4.3.1.3 Análise comparativa dos resultados para a chapa de 1/2" (12,7 mm)	114
4.3.1.4 US A-Scan x gamagrafia para a chapa de 1/2" (12,7 mm)	116
4.3.1.5 US <i>Phased Array</i> x gamagrafia para a chapa de 1/2" (12,7 mm).....	116
4.4 GESTÃO TECNOLÓGICA	117
4.4.1 Saúde do trabalhador.....	118
4.4.2 Efeitos biológicos da radiação ionizante.....	118
4.4.3 Improdutividade, custos e perdas de produção/faturamento.....	118
4.4.4 Complexidade para a realização do ensaio de gamagrafia	120
4.4.5 Liberação da Operação (PT) para a realização do ensaio.....	120
4.4.6 Laudos	121
5 CONCLUSÃO.....	122
6 TRABALHOS FUTUROS.....	124
REFERÊNCIAS.....	125
ANEXO I – CERTIFICADO CHAPA 0316-2017 (6,3 MM).....	130
ANEXO II – CERTIFICADO CHAPA RIR-0364-2017 (12,7 MM)	131
ANEXO III – RELATÓRIO EVS 001-2019	132
ANEXO IV – RELATÓRIO LP 001-2019	133
ANEXO V – CERTIFICADO REMOVEDOR LP METALCHECK 0002-2018.....	134

ANEXO VI – CERTIFICADO PENETRANTE LP METALCHECK 0003-2018	135
ANEXO VII – CERTIFICADO REVELADOR LP METALCHECK 0001-2018	136
ANEXO VIII – RELATÓRIOS DE GAMAGRAFIA 1/2	137
ANEXO VIII – RELATÓRIOS DE GAMAGRAFIA 2/2	138
ANEXO IX – FILME GAMAGRAFIA CP-01	148
ANEXO X – FILME GAMAGRAFIA CP-02.....	149
ANEXO XI – CERTIFICADO VARETA ER 308L RIR-0023-2018	150
ANEXO XII – EPS TE-0005-AI	151
ANEXO XIII – RQPS TE-01-AI.....	152
ANEXO XIV – US A-SCAN CP 01	153
ANEXO XV – US PA CP 01.....	154
ANEXO XVI – US A-SCAN CP 02	155
ANEXO XVII – US PA CP 02.....	156
ANEXO XVIII – EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	157

1 INTRODUÇÃO

A produção mundial dos aços inoxidáveis cresce a cada ano: em 2018 foi produzido um total de 50,7 milhões de toneladas em todo o mundo e, no período de 2012 a 2018, houve um aumento na produção de 48,49% (ISSF – *International Stainless Steel Forum*, 2019), conforme ilustrado na curva de produção da Figura 1.

Figura 1- Produção mundial de aços inoxidáveis.



Fonte: (ISSF, 2019).

Os aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco famílias básicas: ferrítico, martensítico, austenítico, dúplex e endurecível por precipitação.

Os aços inoxidáveis austeníticos da Série 300 da ASTM - *American Society for Testing and Materials*, a principal norma americana de materiais, representam mais de 50% da produção total de todos os aços inoxidáveis em geral, como os da Série 200, 400 e especiais e, por sua vez, dentre os aços inoxidáveis austeníticos, a especificação 304/304L – também conhecida por aço 18-8 – é a mais empregada nas indústrias de óleo e gás, químicas, petroquímicas, usinas nucleares, entre outras, por dispor de uma melhor relação custo-benefício, possuindo uma excelente resistência à corrosão a um custo não muito elevado (FERRARESI, 2013).

Os equipamentos e tubulações metálicos das indústrias supracitadas são fabricados, em sua quase totalidade, com o uso das técnicas de soldagem a arco elétrico, cuja eficiência da junta soldada é uma variável utilizada no cálculo do projeto mecânico dos mesmos, de acordo com os códigos de projeto ASME Section VIII, Divisão 1 e 2, para vasos de pressão e ASME B31.3, para tubulações.

Nas soldas que envolvem materiais ferríticos ou martensíticos, os tipos de ensaios mais praticados são a gamagrafia ou o ultrassom, porém, quando se trata de solda em austenítico, o ultrassom, ainda não é praticado em regra, devido à dificuldade de se laudar, uma vez que a atenuação da zona fundida do austenítico é maior por motivos de anisotropia dos grãos, interfaces metálicas na malha do austenítico e tamanhos de grãos maiores pela presença ferrita.

Atualmente, a avaliação da eficiência das juntas soldadas em materiais austeníticos é feita através do ensaio não destrutivo (END) de gamagrafia, por meio do qual é possível detectar defeitos como trinca, porosidade, falta ou excesso de penetração, falta de fusão, rechupe, sobreposição, inclusão de escória e mordedura. As fontes utilizadas na gamagrafia são isótopos radioativos que emitem radiação ionizante e oferecem riscos sérios à saúde das pessoas expostas à incidência das mesmas, devido a sua capacidade de destruição das células humanas (OKUNO, 2013). Diante deste cenário, surge outro aspecto negativo quanto ao procedimento prático para a realização deste tipo de ensaio, que é a necessidade de evacuação durante a emissão da fonte, cujo raio da área é calculado em função da intensidade da radiação no dia do ensaio.

O teste não destrutivo das soldas de aço inoxidável austenítico do sistema de tubulação de refrigerante primário é um problema significativo para a indústria nuclear. Técnicas ultrassônicas seriam muito úteis para detectar, localizar e dimensionar defeitos em potencial, mas, infelizmente, as soldas austeníticas são de granulação grossa, heterogêneas e anisotrópicas (CHASSIGNOLE et al, 2010).

Surge, então, a necessidade de se analisar um método de END por US para juntas soldadas em inox austenítico, que traga resultados confiáveis.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade de se utilizar a técnica de ultrassom por *Phased Array* para avaliação das juntas soldadas de aço inoxidável austenítico, como uma alternativa para o ensaio de gamagrafia.

Ao longo dessa pesquisa, para se atingir o objetivo geral citado acima, faz-se necessário desenvolver alguns itens sob variados aspectos, representados aqui como objetivos específicos. São eles:

- a) Avaliar os resultados do exame de ultrassom com reforço e sem reforço da solda;
- b) Comparar os resultados dos ensaios de inspeção realizados para verificação da eficiência da junta soldada;
- c) Comparar os custos indiretos para a realização dos END's de gamagrafia e ultrassom *Phased Array*;
- d) Fazer uma análise macro das perdas de produção por motivos de evacuação em serviços maiores, como parada geral de manutenção e projetos de montagem.

Não faz parte deste projeto qualquer atuação junto aos profissionais das empresas usuárias destes ensaios de inspeção, mesmo diante do fato de que o mercado industrial ainda não tem a cultura de US para juntas soldadas em austenítico, apesar dos avanços de estudos e pesquisas nesse sentido, mas pode representar uma proposta de uso da técnica de ultrassom por *Phased Array* para detecção de defeitos em juntas soldadas de aços inox austeníticos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A grande maioria dos produtos industrializados de uso da população, de um simples lápis a um navio transatlântico, utiliza produtos químicos ou petroquímicos como insumos básicos na sua montagem ou fabricação. Esses produtos passam por equipamentos estáticos e tubos de condução, onde são realizadas etapas do processo produtivo como reação, craqueamento, destilação, armazenamento e condução, entre outras.

No processo de fabricação e montagem de tubulações e de equipamentos, a principal técnica utilizada para a união de suas partes ou dos seus componentes é a soldagem e, tanto nesses processos, quanto nos serviços de rotina da manutenção, como substituição de trechos de tubulações ou reparos em equipamentos, os processos de soldagem mais utilizados nas

indústrias de petróleo, química e petroquímica para solda de tubos e chapas em aço austenítico são o TIG (*Tungsten Inert Gas*), o eletrodo revestido (ER) e o MIG/MAG (*Metal Inert Gas e Metal Active Gas*) pela qualidade da solda, mobilidade dos equipamentos e grau de facilidade na execução da atividade.

A qualidade da junta soldada, tanto de fabricação, quanto de manutenção, dos equipamentos ou tubulações é garantida através de um PIT (Plano de Inspeção e Teste), estabelecido em função dos riscos inerentes ao sistema operacional, que consiste na aplicação de ensaios não destrutivos (END's), de modo a examinar se em suas juntas soldadas há a presença de descontinuidades ou defeitos não aceitáveis pelos códigos aplicados. Trata-se, portanto, de uma medida de segurança relacionada diretamente à integridade mecânica do equipamento ou tubulação, de modo a mitigar os riscos do processo e proporcionar maior proteção às pessoas, ao meio ambiente e aos ativos da unidade industrial.

Diante de sua importância, a eficiência das juntas soldadas (E) é uma variável utilizada nos códigos de projeto para o cálculo das espessuras mínimas requeridas dos equipamentos ou tubulações. O *ASME Section VIII Divisão 1* ou *2* é um código de projeto americano para vasos de pressão utilizado em todo o mundo, sendo que o percentual de juntas soldadas a serem examinadas por gamagrafia ou US é definido de acordo com os riscos inerentes ao fluido e ao próprio processo produtivo a que a tubulação ou o equipamento esteja inserido. Dessa forma, os riscos citados são estabelecidos a partir de uma combinação de fatores como características dos fluidos, especificação dos materiais de aplicação e condições do processo como pressão e temperatura de projeto. Tudo isso em prol da segurança das pessoas e dos processos de produção.

Esse mesmo critério de fabricação e montagem referente à eficiência da junta aplica-se, também, às juntas soldadas de manutenção, reparo ou alteração dos equipamentos e tubulações industriais, segundo normas técnicas específicas.

Já os END's são técnicas de inspeção utilizadas para o controle de qualidade das juntas soldadas, que permitem detectar e dimensionar descontinuidades mecânicas tanto na superfície, quanto no interior das soldas, sem alterar as propriedades mecânicas ou características físicas e geométricas dos materiais ensaiados. As técnicas mais utilizadas dos END's são inspeção por exame visual, líquido penetrante, partícula magnética, gamagrafia, radiografia, termografia, ultrassom, correntes parasitas e emissão acústica (FERREIRA, 2013).

A determinação de qual END aplicar é feita com base no tipo de solda, geometria da peça a ser examinada, características físicas dos metais de base (MB) e metal de solda (MS), localização de onde se quer ensaiar, se apenas na superfície ou no interior da solda, tipo de acabamento da superfície e outras variáveis. Em se tratando de equipamentos e tubulações, um tipo de solda comum é a solda de topo, na qual os END's mais utilizados para garantir a eficiência da junta soldada são a gamagrafia e o ultrassom (US), com características distintas entre si.

Estes dois tipos de ensaios são utilizados para os materiais ferríticos e martensíticos, ao passo que, para a avaliação da eficiência de junta soldada em materiais austeníticos, o ensaio de US não tem sido praticado nas indústrias químicas, petroquímicas e de petróleo, por motivo de confiabilidade dos laudos (FERREIRA, 2013).

O aço inoxidável austenítico é um material específico e utilizado amplamente em usinas nucleares e indústrias em geral. Por razões de segurança, é de grande importância avaliar a integridade estrutural da solda deste material. No entanto, devido à alta anisotropia e à falta de homogeneidade do metal de solda austenítico, existem dificuldades ao usar a técnica de ultrassom para inspecionar tal estrutura metalográfica. Além da atenuação, as ondas ultrassônicas são desviadas, tornando os resultados dos testes imprecisos. Desta forma, o desenvolvimento de um método por ultrassom capaz de avaliar a integridade mecânica das soldas de aço inoxidável austenítico tornou-se uma necessidade urgente (GUO et al, 2019).

O austenítico também é amplamente utilizado para portões de barragens e rios, ainda sendo praticada a gamagrafia para a detecção de falhas na inspeção de juntas soldadas. Quando a fonte de radiação e o filme não podem ser instalados nas superfícies das juntas internas, devido a restrição física da estrutura, o ultrassom configura-se no principal método de inspeção alternativo. No entanto, no metal de solda do aço inoxidável austenítico, a dispersão e a atenuação das ondas ultrassônicas aumentam devido à sua forte anisotropia acústica, causada pela presença da microestrutura dendrítica (OSHIMA et al, 2018).

Assim, o que se deseja a partir deste trabalho são os ganhos relativos ao método de ensaio de inspeção por ultrassom em substituição à gamagrafia, no que tange à saúde humana, à facilidade de sua aplicação, ao mesmo potencial de detectabilidade de discontinuidades, à rapidez nos resultados, sem evacuação de pessoas e sem interrupção de qualquer trabalho que esteja sendo executado em regiões adjacentes.

A Figura 2 ilustra as principais vantagens dessa técnica de inspeção em relação à gamagrafia.

Figura 2 - Vantagens do US por *Phased Array*



Fonte: Autor.

Todos esses fatores proporcionariam, além da eliminação de um fator de risco à saúde das pessoas, a segurança do processo de inspeção, a redução de custos diretos, pela própria realização desse ensaio, e custos indiretos, por redução do prazo total das atividades, com aumento da produção.

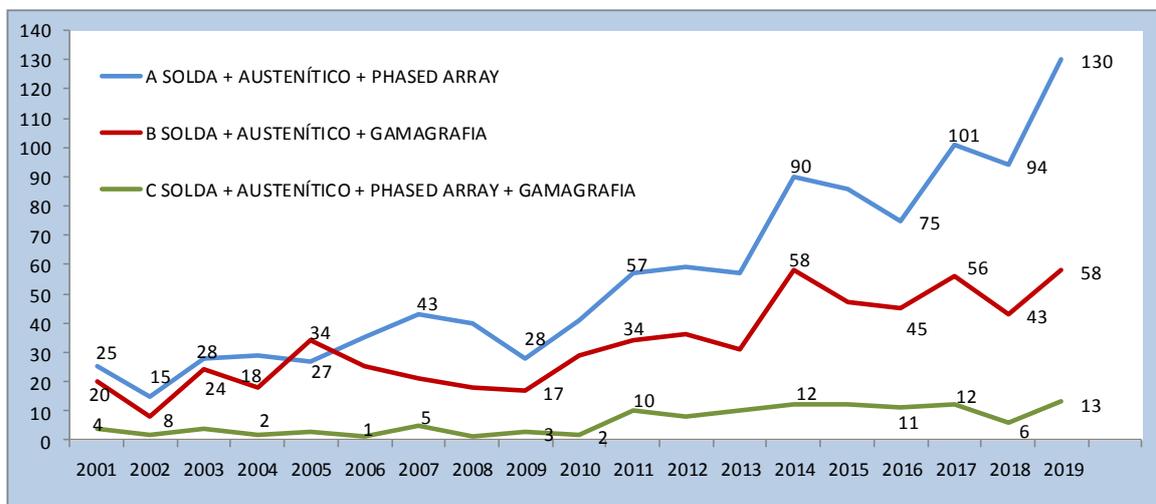
1.3 REVISÃO SISTEMÁTICA

A Figura 3 exibe o resultado da pesquisa do número de publicações científicas, ano a ano, utilizando as combinações das seguintes palavras-chave: soldagem, austenítico, *Phased Array* e gamagrafia. A curva A do gráfico indica, no período de 2001 a 2019, o número de trabalhos de pesquisa envolvendo soldagem, austenítico e o método de ensaio de inspeção por ultrassom com a técnica do *Phased Array*. Nele, nota-se que a quantidade de trabalhos encontrada ao longo de todo este período, mais que quintuplicou, saindo de 25 para 130, com taxa média de crescimento anual de 9,6%. Mostra, também, a progressão das publicações em escala logarítmica entre 2013 e 2014 e nos últimos dois anos, onde o aumento foi em torno de 50%, o que pode indicar uma tendência para os próximos anos, devido às vantagens do US em relação à gamagrafia, bem como, por outro lado, através deste método de US, os resultados ficam armazenados em arquivos eletrônicos, diferente do US convencional, onde os registros dos ensaios não ficam arquivados.

Na curva B do mesmo gráfico, o ultrassom por *Phased Array* é substituído pela gamagrafia, mantendo-se as demais palavras-chave, onde se observa o crescimento discreto da gamagrafia ao longo destes anos, onde o número de publicações de 2019 cresceu menos de três vezes, de 20 a 58, com taxa de crescimento de 15,3% ao ano, sem sinais de tendência, uma vez que a quantidade em 2014 foi a mesma de 2019 (58).

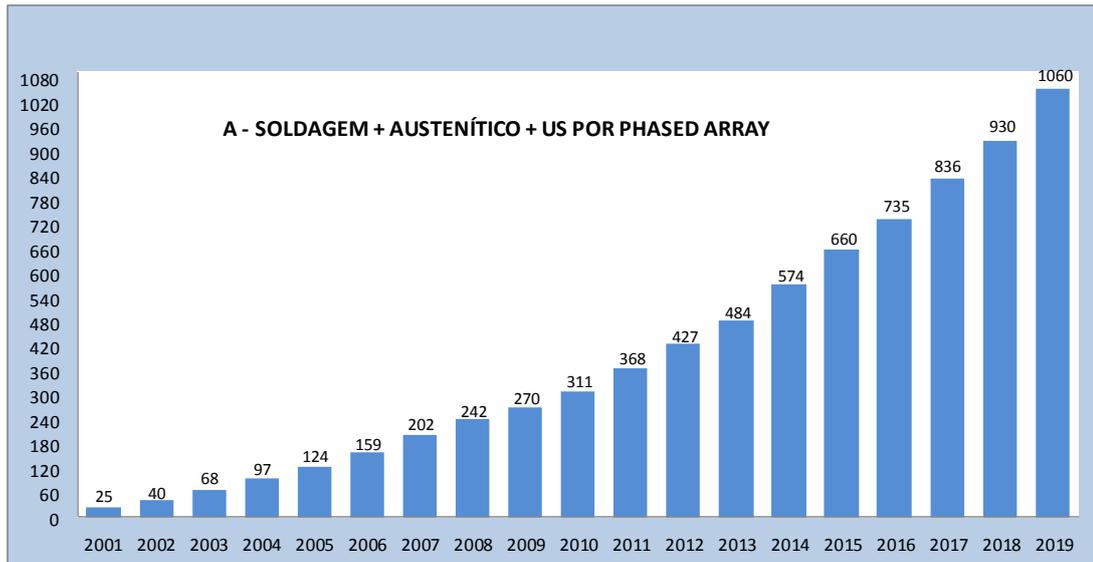
Já a curva C, referente às quantidades de publicações com as quatro palavras-chave acima, mostra quantidades mínimas de documentos, sem perspectivas de crescimento.

Figura 3- Número de publicações com combinação de palavras-chave



Fonte: (SCIENCEDIRECT, 2019).

A Figura 4 ilustra a quantidade acumulada de trabalhos publicados com as palavras-chave da curva A, na qual se percebe um crescimento constante e com tendência logarítmica.

Figura 4 - Número acumulado de publicações com as palavras-chave soldagem, austenítico e US *Phased Array*

Fonte: (SCIENCEDIRECT, 2019).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Nesta linha de entendimento, este trabalho está dividido conforme segue:

- O Capítulo 1 aborda a contextualização do tema onde são citados, de forma sumária, os fatos mais relevantes e diretamente alinhados com o assunto no estágio atual, as principais causas e efeitos e sua importância no que concerne à segurança das pessoas.

Nessa parte, também são descritos os objetivos, subdivididos em geral e específicos, bem como uma síntese da metodologia utilizada neste trabalho de análise de um método alternativo de END para avaliação da integridade das juntas soldadas em materiais austeníticos, igualmente eficaz quanto à detectabilidade dos defeitos existentes nas soldas analisadas.

- O Capítulo 2 descreve a revisão bibliográfica dos assuntos chave dessa dissertação, de modo a facilitar o entendimento dos trabalhos desenvolvidos. Nesta divisão, foram explorados os itens com aplicabilidade direta ao tema, com o intuito de dar base teórica às atividades práticas realizadas, às análises feitas e às respectivas conclusões obtidas ao longo do trabalho. Assim, estão fundamentados neste capítulo os seguintes assuntos: (i) aços austeníticos; (ii) soldagem dos aços austeníticos; (iii) inspeção de juntas soldadas, que contém gamagrafia e ultrassom

no método convencional e por *Phased Array*; (iv) plano de inspeção com conceito de pipe-spec, sua importância, riscos dos fluidos, riscos das condições de operação e mecanismos de falhas principais no austenítico encontradas tanto nos metais de base, quanto nos metais de solda.

- O Capítulo 3 traz a metodologia utilizada no que se refere à descrição da estratégia experimental, os materiais escolhidos, a soldagem com seus parâmetros e os ensaios de inspeção aplicados. Aqui é feita uma breve explicação dos motivos de cada decisão quanto aos materiais e métodos selecionados.
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões para cada etapa do trabalho como a soldagem do aço austenítico, os laudos obtidos dos END's aplicados e o comparativo dos resultados.
- O Capítulo 5 está direcionado à gestão tecnológica no que tange à segurança das pessoas, à produção industrial e aos custos comparativos, assuntos de vital importância para qualquer empresa com fins lucrativos.
- O Capítulo 6 apresenta as conclusões e considerações finais deste projeto de pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

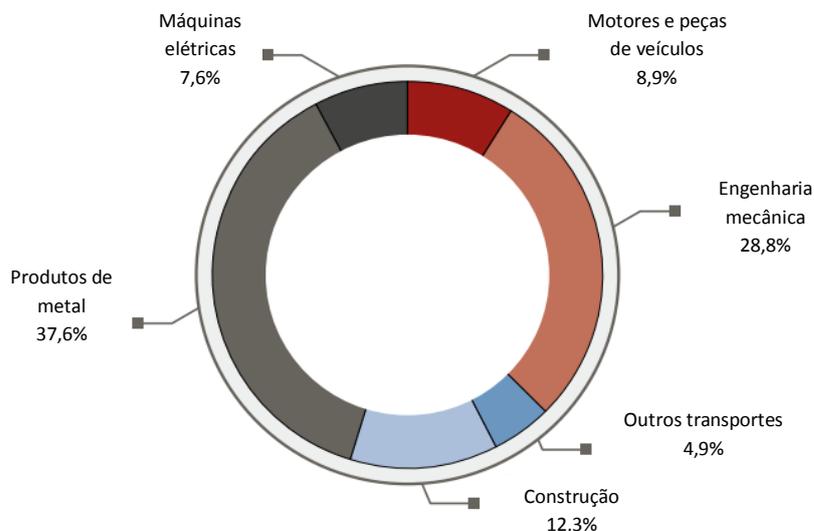
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

O desenvolvimento dos aços inoxidáveis é relativamente recente, apesar de ter sido descoberto por Berthier, em 1821. Sua aplicação prática veio quase um século depois, em 1912, ano da primeira patente industrial de um aço inoxidável, de autoria do Harry Brearley (TELLES, 2003).

Aços inoxidáveis, em geral, são aqueles com teores de cromo em solução sólida na matriz, superiores a 10,5% e que têm a capacidade de formar camada superficial Cr_2O_3 , autorregenerativa, chamada de película passiva; tal camada protege o aço da ação de agentes corrosivos (atmosfera, meios aquosos, sais ou produtos orgânicos). Esses aços, deste modo, recebem a denominação de inoxidáveis (PADILHA, 2011).

A Figura 5 ilustra a distribuição dos aços inoxidáveis nas diversas aplicações. Esses aços são utilizados nas indústrias alimentícia, de bebidas, farmacêutica, hospitalar, química, petroquímica, de papel e celulose, transportes, aeroespacial, de óleo e gás e outras. Dentre as aplicações do inox austenítico tipo 304/304L nessas indústrias, encontram-se os tubos de condução e as chapas usadas para fabricação de equipamentos como colunas, reatores, vasos de armazenamento de processo, permutadores de calor, filtros, tanques, outros.

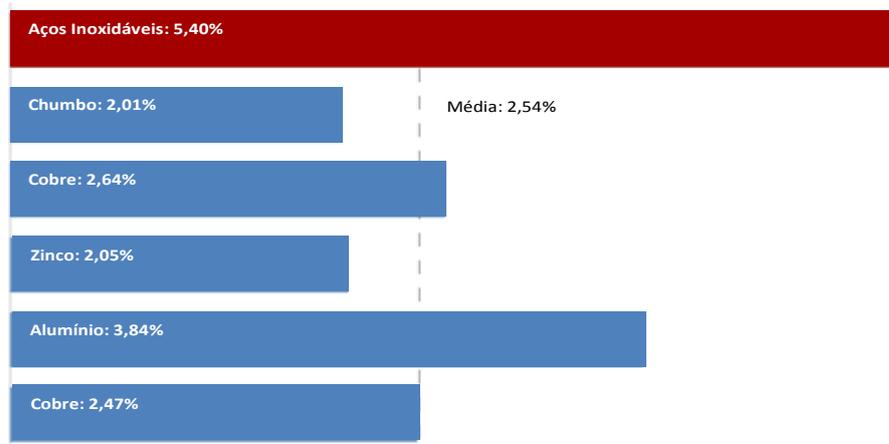
Figura 5 - Aplicações dos aços inoxidáveis em 2018



Fonte: (ISSF, 2019, adaptado).

A Figura 6 mostra o comparativo de crescimento entre os principais materiais utilizados no mercado industrial, onde se vê que a produção do aço inoxidável no período de 1980 a 2018 teve um crescimento anual médio de 5,4%, o que representa mais que o dobro do crescimento médio anual de 2,54% na produção dos demais materiais comercializados no mundo (ISSF, 2019).

Figura 6 - Crescimento anual médio da produção dos materiais no período de 1980 a 2018.



Fonte: (ISSF, 2019) adaptado.

Aços inoxidáveis austeníticos são os “burros de carga” das indústrias nucleares devido à sua elevada resistência à corrosão, além da alta resistência mecânica e resistência à fluência à temperaturas elevadas (KUMAR et al, 2019).

Nas empresas químicas e petroquímicas, a maioria das tubulações e equipamentos fabricados em inox austenítico utilizam as especificações 304/304L ou 316/316L, sendo que, entre essas duas, há a predominância dos inox 304/304L. Um exemplo real disso é mostrado na Tabela 1, onde a Unidade A1 da Empresa A possui 28,9% das tubulações em inox 304/304L, ao passo que o inox do tipo 316/316L, possui 9,8%. Outro exemplo real são as fábricas de eteno, onde são utilizadas tubulações construídas de material 304/304L em quase sua totalidade das linhas austeníticas para os gases do processo de aromáticos, principalmente os criogênicos.

Tabela 1- Quantidade de ativos de equipamentos e tubulações da Empresa A.

ATIVOS DA EMPRESA A				
PLANTA	EQUIPAMENTOS	TUBULAÇÕES (TAG DE LINHAS)	EM INOX AUSTENÍTICO	%
UNIDADE A1	1057	6667	2502	37,5%
UNIDADE A2	358	2959	987	33,4%
UNIDADE A3	163	975	18	1,8%
TOTAL	1578	10601	3507	33,1%

OBS: Nomes e detalhes da Empresa A mantidos sob confidencialidade.

Fonte: Autor.

Diante da quantidade de equipamentos e tubulações construídos em aço inoxidável austenítico do tipo 304L, este material foi o selecionado para o estudo dessa pesquisa.

Nas normas de materiais como a ASTM, a *Deutsches Institut für Normung* (DIN), a *British Standard* (BS) e outras, existem uma grande variedade de aços inoxidáveis austeníticos. Somente a ASTM traz mais de 80 tipos diferentes de aços inoxidáveis, sendo que os tipos convencionais costumam ser classificados em três grupos principais, de acordo com sua microestrutura cristalina predominante na liga à temperatura ambiente:

- Austeníticos: formado basicamente de ligas Fe-Cr-Ni e são não temperáveis;
- Ferríticos: composto basicamente de ligas Fe-Cr e são não temperáveis;
- Martensíticos: composto basicamente de ligas Fe-Cr e são temperáveis.

Existem aços inoxidáveis com microestrutura cristalina mista, do tipo intermediária ferrítico-austenítica e ferrítica-martensítica. Além dos tipos convencionais, tem sido apresentados aços inoxidáveis especiais, como os aços duplex austeno-ferríticos, desenvolvidos para se obter maior resistência mecânica aliada à resistência química (TELLES, 2011).

A Figura 7 ilustra esses principais tipos, suas aplicações e especificações.

A Tabela 2 mostra a composição química desses principais grupos de aços inoxidáveis, onde os teores de cromo variam de 12% a 28% e os de níquel, de 1,25%, (para o aço inoxidável martensítico) a 26% (para o austenítico).

Tabela 2 - Composição química dos principais grupos de aços inoxidáveis.

TIPO DE AÇO	FAIXA DE COMPOSIÇÃO			TEMPERÁVEL	MAGNÉTICO
	% C	% Cr	% Ni		
FERRÍTICO	< 0,08	12-14	-	NÃO	SIM
	< 0,10	16-19	-		
	< 0,25	24-28	-		
MARTENSÍTICO	> 0,09	12-14	-	SIM	SIM
	0,17	16-18	1,25-2,5		
AUSTENÍTICO-FERRÍTICO	< 0,10	24-27	4,5-7	NÃO	SIM
AUSTENÍTICO	< 0,10	16-26	7-26	NÃO	NÃO

Fonte: (MODENESI, 2014).

Principais elementos de liga dos aços inoxidáveis:

- **Ferritizantes** – também denominados alfaógenos, favorecem a formação e estabilizam a ferrita (fase alfa α): Cr, Si, Al, Mo, W, Ti, Nb;
- **Austenitizantes** – também denominados gamaógenos, favorecem a formação e estabilizam a austenita (fase gama γ): Ni, Mn, N, C, Cu, Co.

O grau de atenuação do sinal do ultrassom nas soldas de aços inoxidáveis austeníticos é determinado por dois fatores principais: a velocidade de resfriamento e, principalmente, pela composição química presente nos metais de base soldados.

A Tabela 3 traz o qualitativo das principais propriedades mecânicas e químicas das fases microestruturais dos aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 3 - Principais propriedades mecânicas das fases microestruturais dos aços inoxidáveis.

CLASSE	RESISTÊNCIA À CORROSÃO	RESISTÊNCIA MECÂNICA	RESISTÊNCIA À ALTA TEMPERATURA	RESISTÊNCIA AO IMPACTO
AUSTENÍTICOS	EXCELENTE	BAIXA	EXCELENTE	EXCELENTE
FERRÍTICOS	MÉDIA	BAIXA	BOA	MÉDIA
MARTENSÍTICOS	MÉDIA	EXCELENTE	MÉDIA	BAIXA

Fonte: Autor.

Segue a Tabela 4 com a composição química dos principais aços inoxidáveis austeníticos. O Anexo XVIII mostra os principais efeitos dos elementos químicos na

microestrutura metalúrgica dos aços inoxidáveis austeníticos, o que ajuda a entender os fenômenos conhecidos que ocorrem nesse tipo de aço.

Tabela 4 - Composição química dos principais aços austeníticos.

TIPO	C _{max.}	Mn _{max.}	Si _{max.}	P _{max.}	S _{max.}	Cr	Ni	Mo	N _{2max.}
304	0,08	2	1	0,045	0,03	18,00 a 20,00	8,00 a 10,50		0,1
304L	0,03	2	1	0,045	0,03	18,00 a 20,00	8,00 a 12,00		0,1
316	0,08	2	1	0,045	0,03	16,00 a 18,00	10,00 a 14,00	2,00 a 3,00	0,1
316L	0,03	2	1	0,045	0,03	16,00 a 18,00	10,00 a 14,00	2,00 a 3,00	0,1

Fonte: (ASME, 2017).

Em relação à quantidade de carbono, distinguem-se três principais grupos de aços austeníticos:

- Aços de carbono normal: com até 0,08% de C. Ex.: tipos 304, 316, 321, 347, cujo limite de resistência mínimo é de 53 kgf/cm²;
- Aços de baixo carbono: com até 0,04% de C, designados na norma de materiais ASTM pela letra L de *low (carbon)* após o número da especificação. Ex.: tipos 304L, 316L, 321L, 347L, com menor resistência mecânica, porém com maior resistência química à corrosão;
- Aços de carbono controlado, denominados pela letra H após o numeral da especificação ASTM, para os quais são limitados tanto o teor máximo de carbono, em 0,10%, quanto o mínimo, em 0,04%. Esse tipo de aço é submetido a um tratamento especial, para a obtenção de grãos grossos, de modo a adquirir uma maior resistência a fluência.

Esses aços apresentam estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e possuem altos teores de elementos estabilizadores da austenita. Tais aços têm grande ductilidade e tenacidade, além de boa soldabilidade, mas, no entanto, são susceptíveis à corrosão intergranular.

A aparência externa de todos os aços inoxidáveis é praticamente a mesma e, por este motivo, torna-se difícil a distinção entre os tipos diversos de aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma microestrutura formada por Ferro Gama (Fe_γ) em qualquer temperatura, não tendo, assim, a transformação de fase. A fase foi

denominada em homenagem a um metalúrgico inglês, sir William Chandler Roberts-Austen (1843-1902) (ROBERTS-AUSTEN, 2013).

Dessa forma, não são temperáveis por tratamento térmico, porém, podem ser endurecidos por martelamento ou trabalho de deformação a frio. Essa estabilização da austenita é obtida através da adição de, no mínimo, 7% de Ni e Mn; o acréscimo de pequenas quantidades de nitrogênio também contribui para esse fenômeno (TELLES, 2003).

Um dos problemas dos aços inoxidáveis austeníticos é o da ação corrosiva provocada pelo ânion cloreto, Cl(-). Dependendo da concentração de cloretos no meio, da temperatura e do pH, três formas de corrosão podem ocorrer: por pites, por frestas e sob tensão. Dessas três formas de corrosão, os ferríticos também são propensos às duas primeiras e podemos dizer que, em geral, os austeníticos possuem melhor resistência que os ferríticos às corrosões por pites e em frestas (devido à ação do níquel, que favorece a repassivação do material nas regiões onde o filme passivo foi quebrado por estas formas de corrosão), ao passo que os ferríticos são imunes à CST (GENTIL, 2011).

A Tabela 5 mostra as principais características do aço inoxidável austenítico.

Tabela 5- Características do aço inoxidável austenítico.

CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS AUSTENÍTICOS	
✓ Boa relação custo/benefício	✓ Elevada tenacidade
✓ Elevada resistência à oxidação e à corrosão	✓ Elevada ductilidade
✓ Não magnéticos	✓ Boa soldabilidade
✓ Boa resistência mecânica	✓ Alta durabilidade
✓ Resistência à altas temperaturas	✓ Indicado para serviços de criogenia
✓ Várias possibilidades de acabamentos superficiais	✓ Fácil higienização pela baixa rugosidade superficial
✓ Não endurecíveis por variações de temperatura, mas, sim, por trabalho a frio	✓ Boa usinabilidade

Fonte: (PADILHA, 2011).

2.2 SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

De uma forma geral, pode-se definir soldagem como a união de dois componentes de modo a manter a continuidade das propriedades mecânicas dos mesmos. A *American Welding Society* (AWS) estabelece o conceito de soldabilidade como sendo a capacidade de um

material, normalmente metálico, ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica, projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço.

Deste último, pode-se extrair a seguinte pergunta: o que é necessário para se obter uma solda adequada? Em resposta rápida e lógica, é importante conhecer os materiais e como eles se comportam a nível microestrutural, quando submetidos a elevadas temperaturas, o que pode ser formado e quais as consequências disso tudo no que se refere às propriedades mecânicas da solda. Por outro lado, deve-se conhecer, também, os processos de soldagem com suas variáveis e implicações causadas por cada parâmetro de soldagem.

O que se busca com o processo de soldagem é uma junta soldada com características semelhantes aos dos metais de base do projeto para o qual foram designados. Contudo, no processo de soldagem a arco elétrico ocorre a fusão tanto do metal de solda, quanto dos metais de base e essa mudança da fase sólida para a líquida resulta não só em microestruturas distintas entre esses componentes, como também, pode introduzir descontinuidades do tipo trincas, inclusões, vazios, etc. Daí surge a importância do conhecimento científico citado no parágrafo acima (MODENESI, 2014).

Segundo Modenesi, apesar de ser suscetível à trinca a quente, a soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos é considerada boa, pelos motivos abaixo:

- Não há formação de martensita;
- Boa tenacidade, semelhante ao do metal de base;
- Baixa sensibilidade à formação de poros;
- Sem tendência de trinca causada por hidrogênio, conhecidas, também, como trinca a frio, uma vez que não há transformação da austenita em martensita, aliada a sua boa tenacidade;
- Não requer pré ou pós-aquecimento durante a execução da soldagem;
- Dispensa o tratamento térmico de alívio de tensões (pós-soldagem);
- Fácil soldagem, sem maiores complexidades para a realização da solda.

Apesar destas vantagens, requerem cuidados especiais para se evitar mecanismos de danos que comprometam a qualidade das soldas. Somado a isso, deve-se considerar as propriedades físicas específicas deste material, como menor temperatura de fusão, menor condutividade térmica, maior coeficiente de expansão térmica e maior resistência elétrica.

Devido às características acima, recomenda-se realizar a solda com menor corrente de soldagem para menor aporte térmico (*heat input*), maior velocidade de deslocamento, melhor fixação das peças a serem soldadas, principalmente para chapas finas (MODENESI, 2014).

O sucesso de uma junta soldada depende do processo de soldagem ser ER ou TIG ou outro, mas depende, sim, do atendimento a uma combinação de requisitos técnicos como:

- Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem (RQPS);
- Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS), incluindo-se as técnicas de soldagem como preparação e limpeza dos metais de base e do metal depositado, passe oscilante ou estreito, velocidade de deslocamento do consumível, outras;
- Metal de base com composição química conforme especificado e sem descontinuidades;
- Consumíveis de solda aprovados por inspeção de recebimento (inspeção visual, com certificado de qualidade);
- Consumíveis de solda armazenados de forma correta, acondicionados em embalagem adequada e em ambiente com umidade e temperatura devidamente controladas;
- Máquina de solda aferida;
- Soldador qualificado de acordo com o ASME Section IX;
- Habilidade e experiência do Soldador no tipo de serviço a ser realizado.

Dentre os diversos tipos de processo de soldagem para os aços inoxidáveis austeníticos, os mais utilizados são o Shield Metal Arc Welding (SMAW), mais conhecido no Brasil por eletrodo revestido (ER), o Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), conhecido por TIG (Tungsten Inert Gas) e o Gas-Shielded Metal Arc Welding (GMAW), chamado aqui apenas de MIG/MAG (Metal Inert Gas e Metal Active Gas). Neste trabalho, foram utilizados os processos TIG para a chapa de 1/4" de espessura e a combinação dos processos TIG e ER para a chapa de 1/2" de espessura, sendo o TIG na raiz e o ER no enchimento e acabamento.

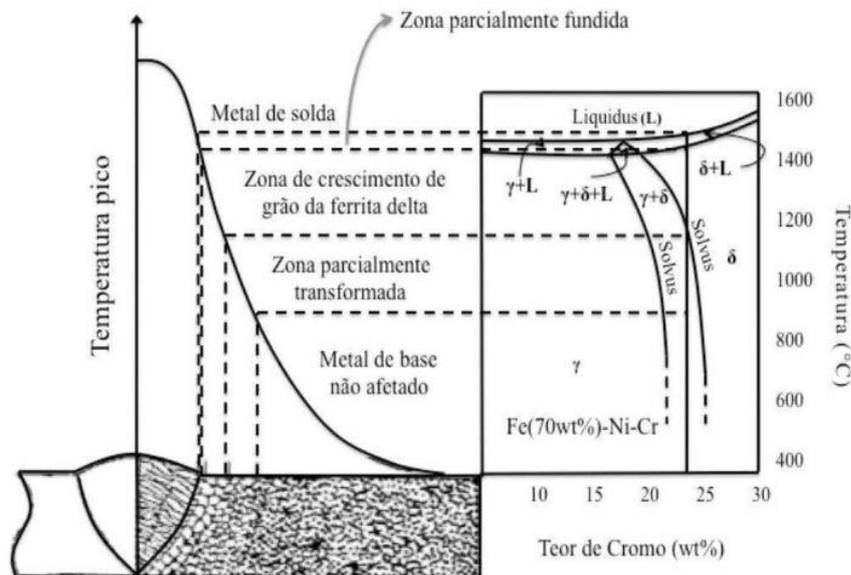
No campo da metalurgia da soldagem, a depender de sua composição química, o metal de solda pode solidificar-se principalmente em três microestruturas principais: completamente austenita, austeno-ferrítica ou completamente ferrita. No primeiro caso, a solda fica sensível ao aparecimento de trincas durante a solidificação e isso pode ser

minimizado pela seleção de metal de adição que resulte em 4% a 10% de ferrita na solda à temperatura ambiente. No caso de projetos para ambientes altamente corrosivos ou de aplicações criogênicas em que há a necessidade de uma microestrutura completamente austenita, consumíveis de solda com baixos teores de enxofre e fósforo e uma elevada relação Mn/S devem ser utilizados juntamente com um procedimento de solda que minimize o nível de tensões residuais na solda (MODENESI, 2014).

A Figura 9 associa as regiões da solda às suas formações microestruturais no metal de solda dos aços austeníticos, onde se pode ver que, independente da temperatura, a relação Cr/Ni, está diretamente proporcional à quantidade de ferrita predominante na microestrutura cristalina da zona fundida, ou seja, quanto maior a quantidade de Cr, maior a de ferrita.

No processo de soldagem TIG, a quantidade de ferrita também está associada aos parâmetros de soldagem como a corrente elétrica e o número de passes no enchimento do chanfro (KESSAL et al, 2019).

Figura 9 - As regiões da solda e suas formações microestruturais no MS dos austeníticos..

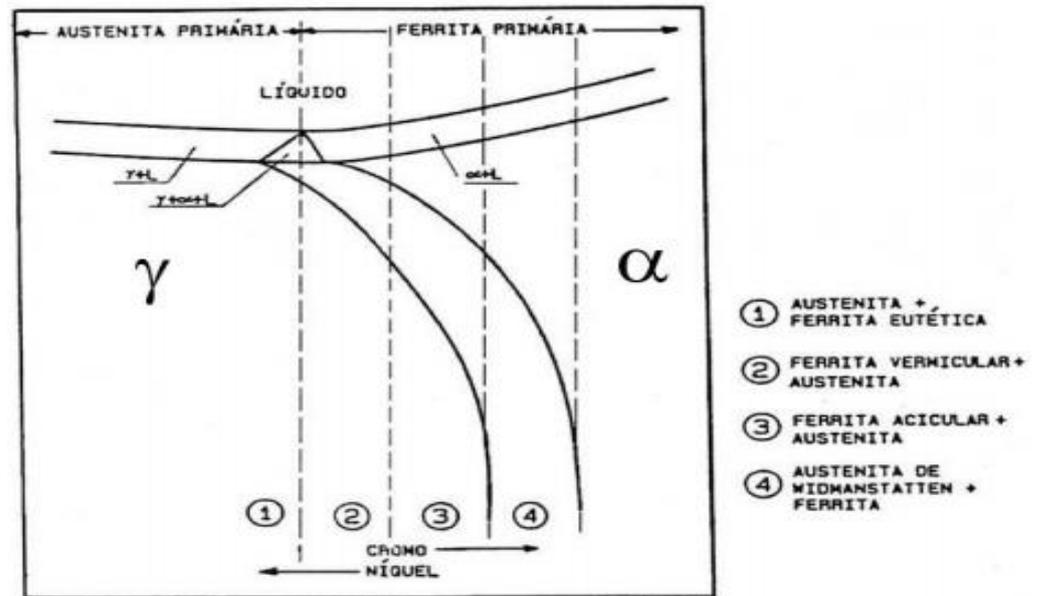


Fonte: (MODENESI, 2014).

As Figuras 10 e 11 ilustram de forma mais clara o efeito da composição química na morfologia austeno-ferrita, onde a ferrita em espinha é também chamada de vermicular pelo seu aspecto geométrico e a ferrita em placas é também chamada de laminar ou rendilhada.

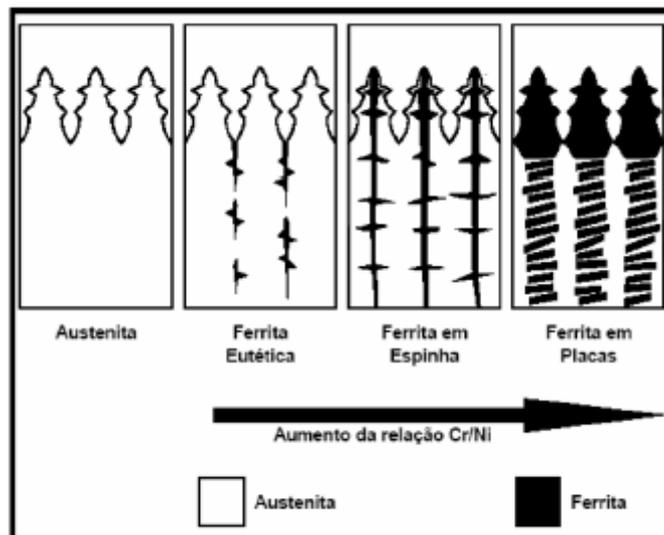
A Figura 10 mostra o efeito da composição na morfologia austenita-ferrita em soldas de aços inoxidáveis austeníticos, enquanto que a Figura 11 indica as morfologias da ferrita nas zonas fundidas.

Figura 10 - Diagrama esquemático pseudo-binário do sistema ternário Fe-Cr-Ni.



Fonte: (MODENESI, 2014).

Figura 11- Morfologias da ferrita σ na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos.



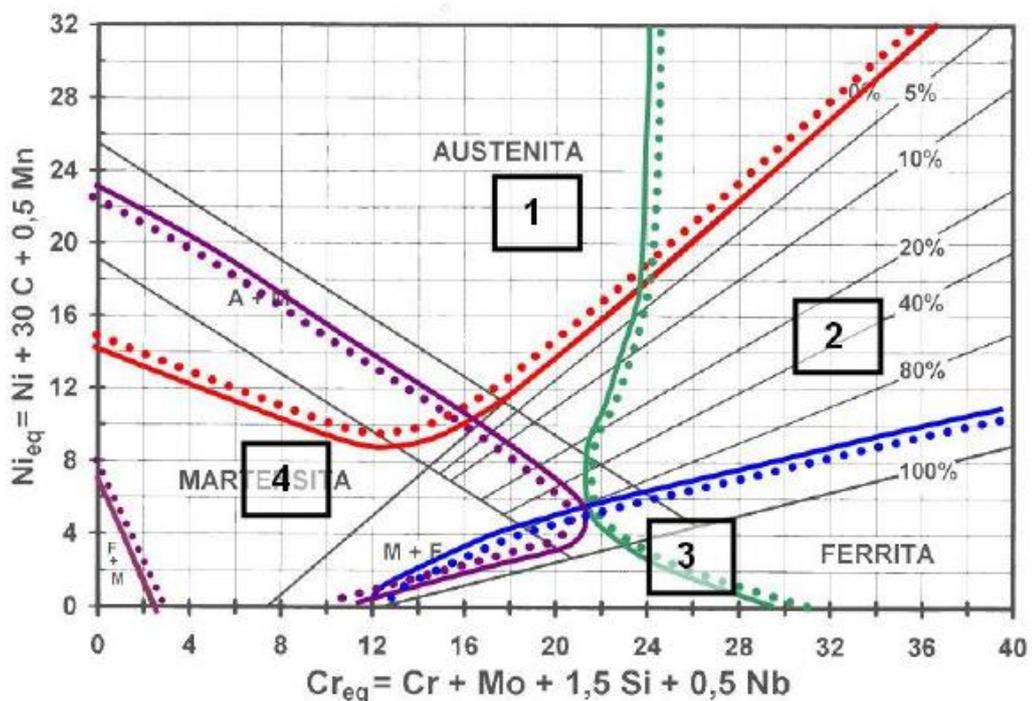
Fonte: (MODENESI, 2014).

Os resultados da razão Cr_{eq}/Ni_{eq} estão relacionados com a caracterização microestrutural e o modo de solidificação da solda austenítica, que variam com parâmetros de soldagem como voltagem, corrente elétrica e velocidade da solda. Outro fator determinante na microestrutura é o número de ferrita (FN), medido através do Ferritoscópio (SOMANI et al, 2019). O Diagrama de Schaeffler está representado na Figura 12 e determina as fases presentes no aço inoxidável depositado por soldagem, em função dos teores equivalentes de cromo e de níquel (eixos horizontal e vertical, respectivamente).

A Figura 12 indica as regiões suscetíveis a mecanismos de danos, conforme numerado:

- Região 1: formação de trincas de solidificação;
- Região 2: fragilização por formação de fases intermetálicas entre 450 °C e 900 °C;
- Região 3: fragilização por crescimento de grãos;
- Região 4: fragilização e fissuração por formação de martensita.

Figura 12- Mapa das regiões suscetíveis a mecanismos de danos.



Fonte: (MODENESI, 2014).

Por ser gamágeno, uma importante influência do carbono nos aços inoxidáveis austeníticos seria de estabilizar a estrutura austenítica, assim como o manganês, o nitrogênio e

outros já citados anteriormente. No entanto, o limite de solubilidade do C é de aproximadamente 0,05% a 1100 °C e, portanto, teores de C acima disso provocariam a retirada do cromo e a formação de precipitados de carbonetos, de solução sólida. Esse fenômeno é chamado de sensitização (PADILHA, 2011).

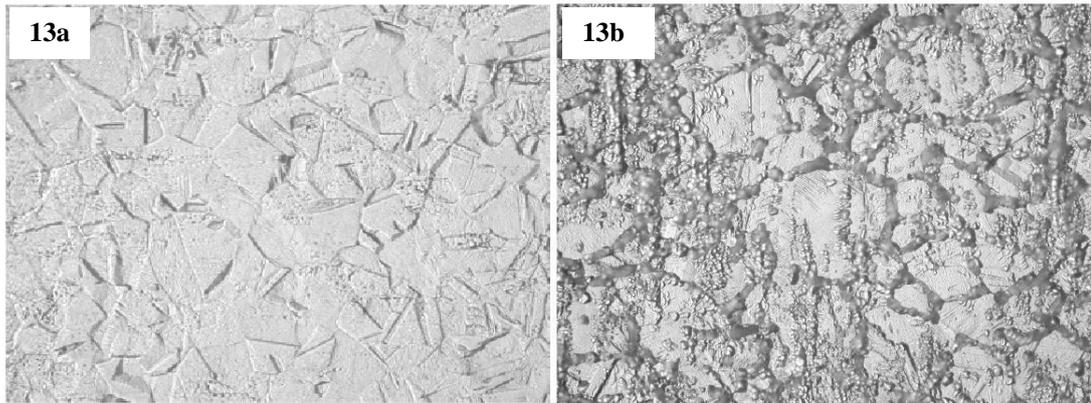
O principal mecanismo de dano associado à formação de carbonetos de cromo em aços inoxidáveis austeníticos, principalmente, é o empobrecimento do cromo nas regiões vizinhas ao carboneto, reduzindo a resistência ao processo corrosivo através da chamada corrosão intergranular. Esse carboneto nucleia preferencialmente nos contornos de grão da austenita, como partículas facetadas ou como uma variedade complexa de dendritas. Essa precipitação poderá causar um efeito adverso nas propriedades mecânicas (PADILHA, 2011).

Existem algumas técnicas utilizadas para se reduzir a formação de Cr_{23}C_6 (LUZ, 2002).

- Tratamento térmico de solubilização após a soldagem, onde se aquece toda a região da solda a uma temperatura entre 950°C e 1100 °C, seguido por um resfriamento rápido;
- Utilização de aços com baixo carbono, que pode ser reduzido para teores de aproximadamente 0,03%. Para uma completa imunidade à corrosão intergranular, o nível de carbono não pode exceder a 0,02%;
- Utilização de elementos químicos Nb e Ti para estabilização do cromo. O nióbio e o titânio formam carbonetos que são mais estáveis que Cr_{23}C_6 e são preferencialmente combinados com o carbono, diminuindo assim a possibilidade de haver a nucleação do carboneto de cromo;
- Controle da cinética de reação do Cr_{23}C_6 – adicionando molibdênio ao aço inoxidável austenítico, alonga-se notadamente o tempo requerido para ocorrer o fenômeno da dessensitização.

Na Figura 13 é possível observar a malha cristalina de um inox 304L como fabricado (13a) e sensitizado com a presença de carbonetos de cromo nos contornos dos grãos, em forno a 675°C por 20h (13b).

Figura 13– Aço 304L como recebido (13a) e sensitizado (13b) (500X).



Fonte: (LUZ, 2002).

Esse fenômeno representa um fator desfavorável à inspeção por ultrassom em juntas soldadas austeníticas.

Outra característica típica da zona fundida e da ZTA das soldas dos aços inoxidáveis austeníticos, que dificulta o ensaio de ultrassom é a anisotropia.

2.2.1 Descontinuidades encontradas nas soldas dos processos TIG e ER

Independente do processo de soldagem, as descontinuidades mais comuns encontradas nas soldas são: porosidade, falta de fusão, falta de penetração, concavidade e sobreposição, trincas, mordedura, inclusão de escória (apenas no processo ER) e inclusão de tungstênio, detectada somente no TIG. Em geral, todas elas são causadas por falha humana do Soldador.

2.2.2 Mecanismos de danos da soldagem de austeníticos

Ferraresi estudou alguns mecanismos de danos específicos de soldagem em aços inoxidáveis austeníticos, a saber.

a) Trincas de Solidificação

Os principais fatores que afetam a integridade da solda, quanto às trincas de solidificação, também chamadas de trincas a quente, são:

- a estrutura de solidificação: quanto maior o teor de ferrita, maior a resistência às trincas de solidificação;
- o nível de impurezas: as soldas com solidificação em austenita primária precisam ter teores inferiores a 100 ppm de P (fósforo) e S (enxofre);
- as tensões desenvolvidas na solda durante a solidificação da poça de fusão: para aços de solidificação completamente austenítica, é recomendado uma relação de Mn/S (manganês/silício) maior que 35, a fim de se evitar a fissuração a quente, uma vez que o manganês combina com o enxofre, formando um sulfeto de maior temperatura de solidificação.

Um estudo realizado sobre o efeito dos carbonetos nas trincas de solidificação, concluiu que, quanto maior a quantidade e mais rápida a formação dos carbonetos, maior a suscetibilidade a trincas, sendo que a temperatura inicial para a formação da fase secundária na solidificação varia em função do tipo do elemento de liga (KADO et al, 2020).

b) Corrosão Intergranular

As soldas de materiais austeníticos não estabilizados são suscetíveis à corrosão intergranular, causada pela precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão. As regiões mais sensíveis são as que permanecem maior tempo a temperaturas em torno de 500 °C e 700 °C e a severidade é tanto maior, quanto maior for o teor de carbono e a agressividade do meio.

Os aços austeníticos com teores de carbono de até 0,03% ou os que são estabilizados ao nióbio ou titânio são, em geral, imunes a este tipo de mecanismo de dano.

c) Fissuração por Corrosão sob Tensão (CST)

A CST pode ocorrer nos aços inoxidáveis austeníticos sujeitos a tensão de tração e a ambientes corrosivos contendo cloretos. Esse tipo de corrosão é caracterizado por trincas

intergranulares, ramificadas, que podem surgir em pouco tempo quando o material está em contato com soluções concentradas a temperaturas elevadas ou em mais tempo, no caso inverso, em soluções diluídas a temperaturas mais baixas.

Ferraresi conclui que os aços ferríticos ou austeno-ferríticos tem melhor resistência do que os austeníticos apenas e, também, que os aços com teores de Ni (níquel) acima de 40% ou abaixo 5% são mais resistentes a esse tipo de corrosão.

Dessa forma, as técnicas recomendadas para se evitar a CST são:

- Tratamento térmico de alívio de tensões a uma faixa de temperatura entre 900 °C e 1000 °C, com resfriamento forçado para se evitar a precipitação de carbonetos de cromo;
- Substituição dos aços inoxidáveis austeníticos por ligas mais ricas em Ni ou por aços inoxidáveis ferríticos ou duplex;
- Eliminação do componente ambiental crítico;
- Controle da energia de soldagem para reduzir as tensões residuais da solda.

2.2.3 Sensitização

Os aços inoxidáveis austeníticos embora resistentes à corrosão, são susceptíveis à chamada corrosão intergranular, causada pelo empobrecimento em cromo das regiões adjacentes aos contornos de grão, devido à precipitação do carboneto $M_{23}C_6$ ($M = Cr, Fe, Mo$).

A sensitização, caracterizada pela precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, ocorre quando um aço inoxidável austenítico é aquecido a uma faixa de temperatura de 490 °C a 920 °C, por um período de tempo. O tempo e a temperatura podem determinar a quantidade de carbonetos precipitados. Quando o carboneto de cromo precipita nos contornos de grão, a área imediatamente adjacente a esses contornos sofre um empobrecimento de Cr, tornando o material suscetível a corrosão intergranular.

O contorno de grão é uma região de diferentes orientações cristalográficas, favorável a formação de campos de segregação de vários elementos ou a precipitação de componentes metálicos, como é o caso dos carbonetos de cromo e das fases sigmas. Em função disto, essas regiões são atacadas preferencialmente pela corrosão. Este tipo de ataque corrosivo é denominado de sensitização (LUZ, 2002).

A sensitização também está associada à trinca de corrosão sob tensão intergranular e, em estudos feitos com a técnica de difração de elétrons retro-espalhados (EBSD) em microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi feita uma correlação entre contornos de grãos sensitizado e tamanhos de grãos para avaliar o grau de suscetibilidade à trinca de corrosão sob tensão. Nesta pesquisa, os tratamentos térmicos foram aplicados para aumentar a resistência à trinca de corrosão sob tensão causada por sensitização (RAHIMI et al, 2020)

2.2.4 Fase sigma

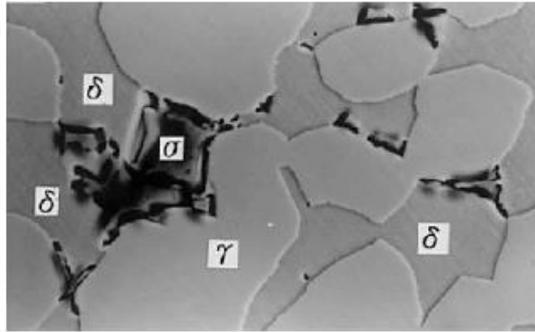
Os aços austeníticos, por serem materiais com matrizes ligadas, desenvolvem fases intermetálicas com características de dispersão para se conseguir alta resistência a temperaturas elevadas. Três tipos de fases intermetálicas ocorrem mais frequentemente em aços inoxidáveis austeníticos: fase σ , fase χ e fases de Laves.

A fase σ – mostrada na Figura 14 – é a mais estudada e foi constatada no sistema Fe-Cr já em 1907 por Tammann e Treischke, sendo identificada em 1927 por Bain e Griffiths. A fase σ tem estrutura tetragonal com 30 átomos por célula unitária (PADILHA, 2011).

Ela é uma fase com empacotamento determinado por fatores eletrônicos e ocorre com uma relação elétron/átomo entre 5, 6 e 7 e relações de raio (para sistemas binários) entre 0,93 e 1,16. Sua cinética de precipitação é bastante lenta, pois ela tem dificuldade de nucleação (nucleia sempre incoerentemente com a matriz em locais de alta energia, tais como junções triplas de grãos, contornos de grão e contornos de macla) e de crescimento (depende da baixa difusividade dos elementos substitucionais). Como ela não dissolve elementos intersticiais (carbono, boro e provavelmente nitrogênio), há necessidade do empobrecimento prévio da matriz nestes elementos (através da precipitação de carbonetos e boretos) para sua posterior precipitação (PADILHA, 2011).

A presença da fase σ é indesejada por dois motivos: fragiliza o material e empobrece a matriz em Cr, Mo, Ti, Nb e V. (PADILHA, 2011), tornando-o suscetível aos processos de corrosão.

Figura 14- Fase σ na interface α/γ de um aço duplex.



Fonte: (LUZ, 2002).

2.2.5 Anisotropia

A malha cristalina, independente do tipo, é composta por uma grande quantidade de grãos, cujos planos e direções cristalinas têm uma orientação diferente de grão para grão, com diferenças de orientação da ordem de dezenas de graus (DIETER, 1981). Esse desalinhamento dos grãos ocorre durante o crescimento dos mesmos e, por este motivo, as zonas fundidas da solda são mais vulneráveis a esse fenômeno físico em relação aos metais de base, pelo fato de sofrerem ciclos térmicos da ordem de 2000 °C na poça de fusão. Porém, o fato de que os metais de base sofrem apenas o ciclo térmico no seu processo de fabricação, não é suficiente para se afirmar que estes sejam isotrópicos.

Devido às rápidas taxas de aquecimento e resfriamento do processo de soldagem, a zona de fusão mostra propriedades anisotrópicas nas direções da soldagem e a microestrutura nesta condição provoca mais transformação de austenita em ferrita (LUO; ZHANG, 2019).

Assim como as propriedades mecânicas sofrem influência dessa orientação espacial, o mesmo ocorre com a transmissão do ultrassom nos austeníticos, principalmente quando há mais formação de ferrita, fato que faz com que haja mais perda de decibéis durante a realização do ensaio causada pela anisotropia. Um exemplo disso são os materiais austeníticos fundidos que possuem grãos de ferrita e austenita e cujas propriedades mecânicas são distintas. Nessa teoria, quanto maior o tamanho do grão relativo ao comprimento da onda, maior será a perda da transmissão por atenuação causada pela anisotropia (COSTA, 2011).

2.3 ENSAIOS DE INSPEÇÃO PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS JUNTAS SOLDADAS

Nos projetos dos equipamentos estáticos e de tubulações novas em que haja ligação entre chapas ou tubos por meio de solda com penetração total, há uma variável utilizada para o cálculo da espessura mínima requerida, chamada de eficiência da junta soldada, que, por sua vez, é definida de acordo com o risco do fluido do processo ou das condições de operação (temperatura e pressão) (*ASME Section VIII Division 1, 2017, ASME Section VIII Division 2, 2017, ASME B31.3, 2016*).

Na manutenção das indústrias, existe um plano de inspeção e solda elaborado pelo time de integridade mecânica da empresa, por recomendação do time de projeto corporativo ou pela própria tecnologia industrial utilizada no projeto da planta, pelo qual são definidos os ensaios de inspeção exigidos para as juntas soldadas. O critério utilizado para estabelecer esse plano também é o risco do fluido do processo ou das condições de projeto e operação do ativo.

Assim, toda e qualquer solda realizada em projetos novos, alterações ou reparos de manutenção, tanto em equipamentos, quanto em tubulações, é submetida a um plano de inspeção, pelo qual a eficiência da junta soldada pode variar de 70% a 100%.

2.4 GAMAGRAFIA

A descoberta dos Raios “X” pelo cientista Roëntgen em 1895, seguida da descoberta da radioatividade um ano depois, trouxeram ao conhecimento humano duas novas e poderosas ferramentas para a ciência e tecnologia, cujas potencialidades foram imediatamente exploradas. O entusiasmo deste pesquisador não foi acompanhado por medidas de segurança correspondentes e em consequência, a história de aplicações das radiações ionizantes em diagnósticos, terapêuticas, de pesquisa e indústria está cheia de casos de danos à saúde das pessoas, doenças e mortes (RALPHO, s.d).

Tornar visível o invisível a partir de uma imagem radiográfica ainda é o grande trunfo dessa técnica de inspeção, capaz de detectar as descontinuidades existentes nos materiais metálicos como as trincas, imperfeições de solda e outras (ABENDI, 2018).

A gamagrafia é então usada para detectar variação de uma região de um determinado material que apresenta uma diferença em espessura ou densidade comparada com uma região

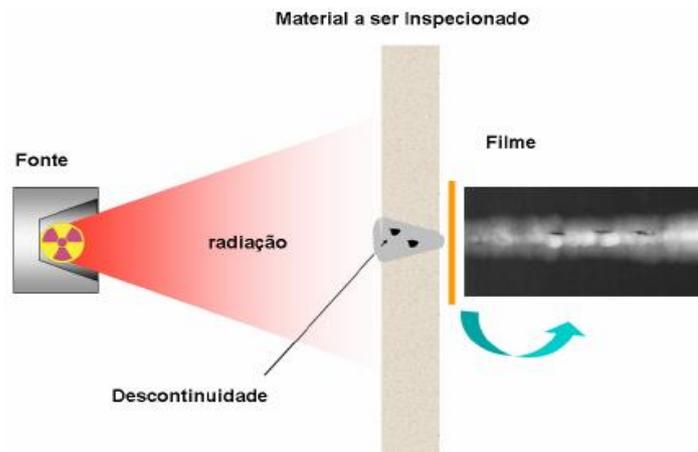
vizinha, em outras palavras, a gamagrafia é um método capaz de detectar discontinuidades volumétricas com boa sensibilidade, conforme ilustrado na Figura 15 (ANDREUCCI, 2014).

Radiação é energia que se propaga a partir de uma fonte emissora através de qualquer meio. Ela apresenta-se sob a forma de partícula atômica ou subatômica energética tais como partículas alfa, elétrons, prótons, nêutrons, etc, que podem ser produzidos em aceleradores de partícula ou em reatores. Essas partículas também podem ser emitidas espontaneamente de núcleos de átomos radioativos (OKUNO, 2013).

2.4.1 Radiação gama (γ)

Apesar dos átomos serem eletricamente neutros, outras forças atuam na estrutura dos mesmos, como as que mantêm unidas as partículas que formam seus núcleos. Se estas forças permanecem em equilíbrio, diz-se que o átomo é estável. Contudo, se algum fator rompe esse equilíbrio de forças, o átomo passa ao estado excitado. Como toda matéria tende a buscar sua forma mais estável, o núcleo do átomo excitado elimina o excesso de energia em forma de radiação gama, também chamado de fóton.

Figura 15- Técnica de ensaio radiográfico na indústria.



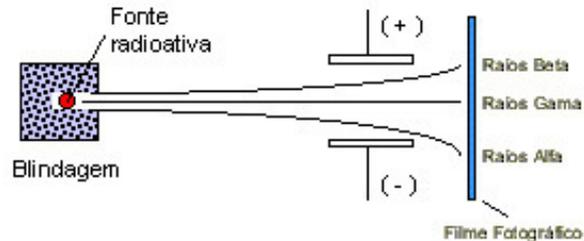
Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

Assim, pode-se definir radiação como uma forma de onda eletromagnética de alta energia e curtíssimo comprimento de onda, e por isto, de grande poder de penetração. A radiação ionizante é assim chamada devido a este átomo ser capaz de ionizar qualquer outro,

arrancando elétrons de sua eletrosfera, onde o íon é todo átomo que, por qualquer motivo, perde seu equilíbrio elétrico e o número de prótons supera o número de elétrons. (SILVA, s.d.)

Define-se “radioatividade” como sendo a emissão espontânea de radiação corpuscular e eletromagnética por um núcleo atômico que se encontra num estado excitado de energia. A radioatividade, na prática, é um fenômeno de desintegração espontânea, também denominada decaimento. Utilizando-se a velocidade de desintegração isto é, o número de desintegrações por período de tempo, pode-se medir a intensidade de uma fonte. Esta característica é causada pela instabilidade da complexa estrutura de um átomo sobre a ação de forças elétricas, magnéticas e gravitacionais. O elemento rádio possui este desbalanceamento natural emitindo energia na forma de raios- γ para alcançar uma condição mais estável. Juntamente com os raios- γ , são emitidos as partículas α (alfa) e β (beta). Estas últimas são facilmente absorvidas, porém, os raios- γ são mais penetrantes, pois sua energia é muito alta. A Figura 16 mostra um desenho esquemático dessas partículas.

Figura 16- Esquema de separação das radiações alfa, beta e gama.



Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

Por causa do perigo de radiação sempre presente, as fontes radioativas devem ser manejadas com muito cuidado e são necessários aparelhos que permitam guardá-las, transportá-las e utilizá-las em condições de segurança total. Estes aparelhos consistem de uma blindagem ou carcaça protetora de chumbo, tungstênio ou Urânio 238. Esta carcaça apresenta um furo axial, no interior do qual existe um estojo metálico, chamado porta-isótopo, fixado a um comando mecânico flexível munido de um pequeno volante ou manivela para manobra a distância.

Os detectores eletrônicos representam um método que permite detectar as radiações e medir sua intensidade e tem como princípio, a contagem das ionizações provocadas pelas

radiações no ar. Os aparelhos mais utilizados na detecção da radiação são *Geiger Müller*, câmara de ionização e contadores proporcionais.

2.4.2 Equipamentos da gamagrafia

São equipamentos portáteis, compostos por um irradiador e acessórios, projetados para permitir a manipulação da fonte radioativa à distância, com segurança, para fins de radiografia industrial. Para condução da fonte, o equipamento é dotado de conduítes metálicos em forma de espiral, flexíveis e resistentes (tubo guia), que são conectados na parte frontal do irradiador. O controle do conjunto fonte e conexão – porta-fonte – é feito através de um cabo de aço reforçado, conectado ao comando.

O nível de radiação na superfície externa dos irradiadores é determinado por normas internacionais, que também estão harmonizadas com as normas da CNEN, e deve ser uma das bases para o projeto do equipamento.

As fontes mais utilizadas para os serviços de gamagrafia industrial são dos seguintes isótopos radioativos ou radioisótopos: Irídio-192, Selênio-75 e Cobalto-60. A foto da Figura 13 mostra um transdutor de Irídio-192.

Figura 17- Irradiador gama específico para fontes radioativas de Irídio-192.



Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

2.4.3 Filmes radiográficos

Segundo a KODAK (1957, apud LOBERTO, 2007, p. 58), os filmes radiográficos são compostos de uma emulsão e uma base. A emulsão consiste em uma camada muito fina,

com espessura aproximada de 0,25 mm de gelatina, que contém dispersos em seu interior um grande número de minúsculos cristais de brometo de prata. Os cristais de brometo de prata presentes na emulsão possuem a propriedade de, quando atingidos pela radiação ou luz, tornarem-se susceptíveis a reagir com um produto químico denominado revelador.

O componente químico denominado revelador é responsável por formar a imagem radiográfica, que é formada por áreas claras e escuras. A este conjunto de áreas claras e escuras é chamado de densidade do filme radiográfico, definida também como grau de enegrecimento do filme radiográfico.

A classificação dos filmes radiográficos é estabelecida em função da velocidade, do contraste e da granulação dos mesmos, conforme apresentado na Tabela 6. Quando a qualidade for o fator preponderante, deve-se optar por filmes mais lentos, com granulação mais finas. Quando a rapidez na execução do teste for mais importante ou quando a peça a ser radiografada exigir tempos proibitivamente longos, deve-se usar filmes mais rápidos, com granulação mais grossa (SILVA,s.d.).

A norma da Petrobrás N-1595 proíbe em suas instalações que sejam utilizados filmes classificados como Classe III e IV, como isto, fica estabelecida a qualidade mínima requerida com a Classe II.

Tabela 6– Classes de filmes industriais.

TIPO	GRANULAÇÃO	VELOCIDADE	CONTRASTE
I	MUITO PEQUENA	LENTA	MUITO ALTO
II	PEQUENA	MÉDIA	ALTO
III	MÉDIA	ALTA	MÉDIO
IV	GROSSEIRA	MUITO ALTA	MUITO BAIXO

Fonte: ASTM. **E-185: Standard practice for design of Surveillance Programs for Light-Water Moderated Nuclear Power Reactor Vessels**. ASTM, 2016.

2.5 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM

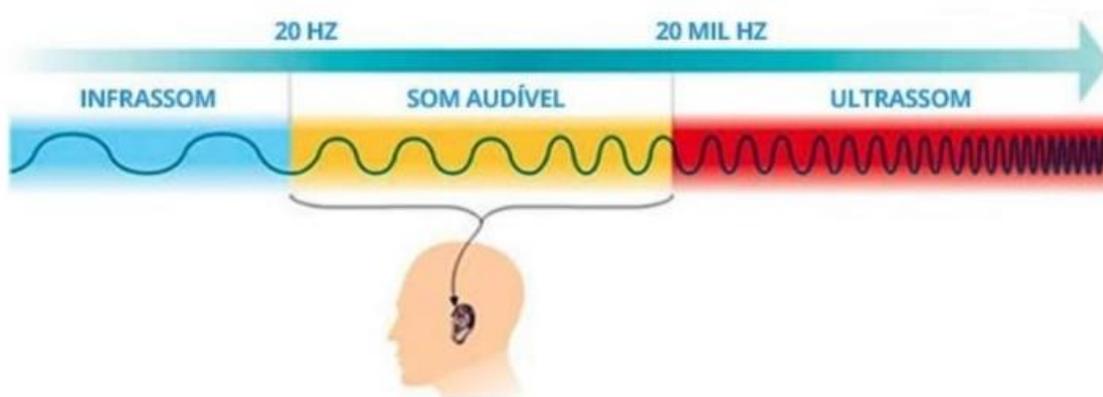
O ultrassom é uma técnica de ensaio de inspeção não destrutiva, referenciada pelos códigos de projeto e de manutenção dos equipamentos e tubulações. Desta forma, o ultrassom é um END muito utilizado nas indústrias para os diversos tipos de materiais, ferrosos e não ferrosos, com a finalidade de garantir a confiabilidade do item avaliado, tanto para fins de

produção, quanto para disponibilidade a curto, médio e longo prazo, com as seguintes aplicações principais:

- Medição de espessuras;
- Aferição da integridade mecânica dos metais de base como chapas laminadas, metais fundidos ou forjados;
- Avaliação da eficiência das juntas soldadas nos exames de detecção de descontinuidades físicas.

Ultrassom é um som não audível para o ouvido humano por serem vibrações com frequências muito altas, acima de 20 kHz, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18- Desenho esquemático das frequências do som em Hz.



Fonte: (Quais..., 2019).

2.5.1 Breve histórico do ensaio por ultrassom

Segundo ANDREUCCI (2014), em 1929 o cientista *Sokolov* fazia as primeiras aplicações da energia sônica para atravessar materiais metálicos. Em 1942, Firestone utilizaria o princípio da ecosonda ou ecobatímetro, para exames de materiais. Somente em 1945 o ensaio por ultrassom iniciou sua caminhada em escala industrial. Foi impulsionado pelas necessidades e responsabilidades cada vez maiores.

Os princípios físicos do som permanecem inalterados, porém, as inovações avançam a cada dia, e hoje existe um vasto número de aparelhos com tecnologias diferentes, mas com o mesmo fundamento técnico para o mesmo tipo de exame.

Nesta linha, o ultrassom é um tipo de ensaio utilizado nas indústrias para geometrias complexas, grandes espessuras, materiais diversos, porém, nos dias atuais, a maioria das suas solicitações ainda é para materiais ferríticos ou martensíticos, ficando os aços inoxidáveis austeníticos com porcentagens mínimas de aplicação. E é justamente esse o ponto de partida dessa pesquisa, pois, diante de tantos avanços, fica a questão central: por que não investir no desenvolvimento de outra técnica de inspeção, diferente da gamagrafia, para avaliação da integridade mecânica de juntas soldadas em aço inoxidável austenítico, que tragam resultados confiáveis? Seria um novo método que não represente riscos à saúde dos trabalhadores e isso representaria uma mudança de cultura que, certamente, traria resistências.

2.5.2 Princípios físicos do ultrassom

O som é um fenômeno da natureza que, ao atuar em um determinado material, mediante vibrações, produz ondas sonoras de determinadas frequências que se propagam em meios sólidos, líquidos ou gasosos, mas nunca no vácuo.

Onda é um movimento causado por uma perturbação, e esta se propaga através de um meio. Um exemplo clássico de onda é quando se joga uma pedra em um lago de águas calmas, onde o impacto causa uma perturbação na água, fazendo com que ondas circulares se propaguem pela superfície da água. Também existem ondas que não podemos observar a olho nu, como, por exemplo, ondas de rádio, ondas de televisão, ondas ultravioletas e microondas (ANDREUCCI, 2014).

As ondas são classificadas em dois tipos principais:

- **Ondas mecânicas:** são ondas que necessitam de um meio material para se propagar, ou seja, sua propagação envolve o transporte de energia cinética e potencial e depende da elasticidade do meio. Por isto não é capaz de propagar-se no vácuo. Alguns exemplos são os que acontecem em molas e cordas, sons e em superfícies de líquidos (ANDREUCCI, 2014);
- **Ondas Eletromagnéticas:** são ondas geradas por cargas elétricas oscilantes e sua propagação não depende do meio em que se encontram, podendo propagar-se no vácuo e em determinados meios materiais. Alguns exemplos são as ondas de rádio, de radar, os raios x e as microondas (ANDREUCCI, 2014).

A técnica da inspeção por ultrassom é realizada através de ondas ultrassônicas, do tipo acústicas, geradas por transdutores construídos a partir de materiais piezoelétricos. Ao penetrar no material inspecionado, a energia acústica causa vibração e, desta forma, faz com que as partículas que o compõem executem um movimento oscilatório de ida e de volta em torno de sua posição de equilíbrio, nos diversos sentidos e, assim, o deslocamento de uma partícula provoca o deslocamento de suas vizinhas de modo a “varrer” toda a espessura que se deseja inspecionar até o final ou até detectar alguma descontinuidade, quando a mesma retorna. Essa repetição periódica das vibrações durante um intervalo de tempo ocorre a uma frequência a partir de 500.000 Hz (ou 0,5 MHz), sendo que a utilização desta tecnologia situa-se entre 1 a 25 MHz, sendo um Hertz (Hz) igual a um ciclo por segundo ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ c/s}$) (GLOBAL END, 2016).

As ondas acústicas podem ser classificadas em quatro tipos: (LOBERTO, 2007)

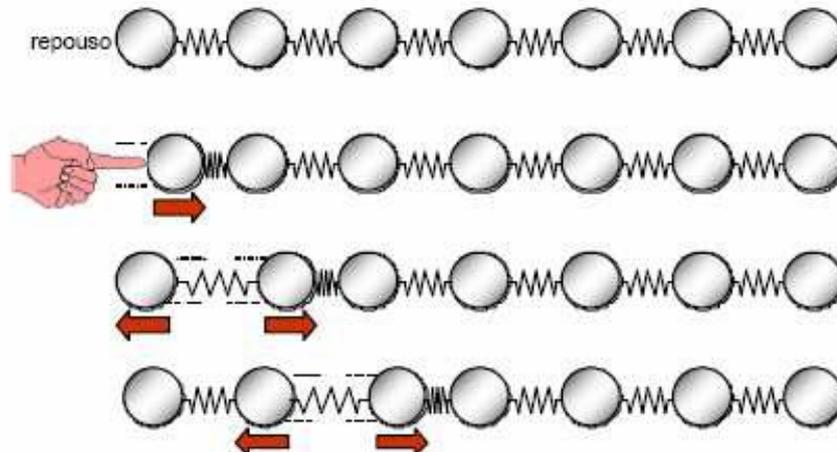
- a) Ondas longitudinais (ondas de compressão);
- b) Ondas transversais (ondas de cisalhamento);
- c) Ondas superficiais (ondas de Rayleigh);
- d) Ondas superficiais (ondas de Lamb).

Obs: as ondas superficiais não estão contempladas neste trabalho.

- a) **Ondas longitudinais** (ondas de compressão): uma onda longitudinal é obtida quando as partículas de massa próximas à superfície são impulsionadas na direção de propagação da onda. A Figura 19 mostra a propagação da onda longitudinal em um corpo de massa.

As zonas de compressão e de diluição movem-se através do corpo de prova com certa velocidade “V”, denominada velocidade da onda longitudinal. Esta velocidade do som é uma constante de cada material, isto é, ela difere de acordo com o material no qual a onda propaga. Assim ela pode ser considerada constante em um material homogêneo (SANTIN, 2003).

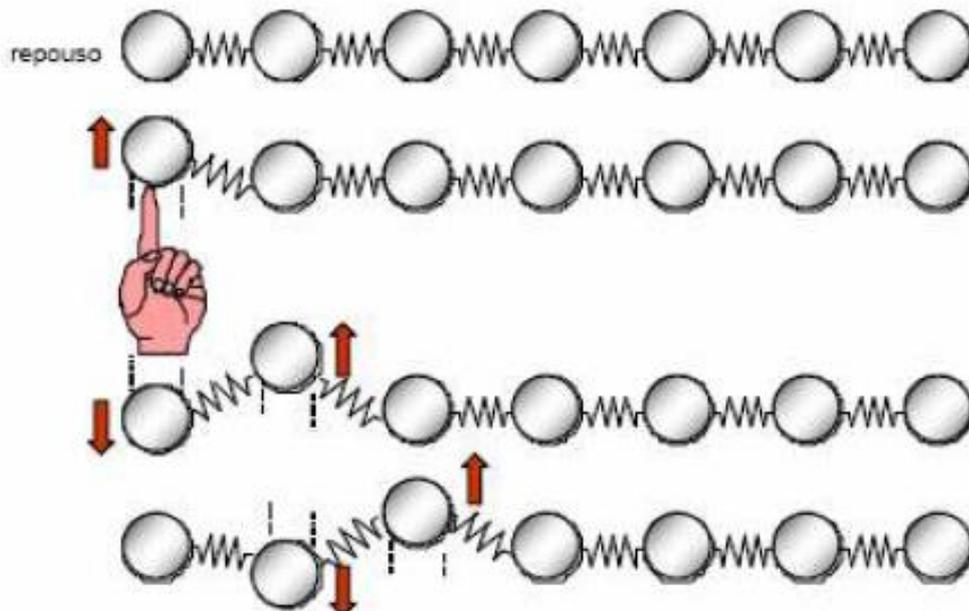
Figura 19- Propagação de uma onda longitudinal em um corpo de massa.



Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

- b) **Ondas transversais** (ondas de cisalhamento): Uma onda transversal é gerada quando as partículas de massa próximas à superfície são impulsionadas em uma direção perpendicular ao da propagação. A Figura 20 mostra a propagação da onda transversal em um corpo de massa.

Figura 20- Propagação de uma onda transversal em um corpo de massa.



Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

Observando-se o movimento dinâmico das ondas transversais, verifica-se que o pico da onda bem como o seu vale permanece a uma distância constante durante o seu movimento através do corpo de ensaio, sendo o comprimento de onda (λ) transversal igual a esta distância. Analogamente, para as condições das ondas longitudinais, a distância entre duas zonas de compressão determina o comprimento de onda (SANTIN, 2003).

Da mesma forma como ocorrem nas ondas longitudinais, a velocidade das ondas transversais é uma constante do material, porém em todos os meios as velocidades das ondas transversais e longitudinais diferem largamente, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7- Velocidades em ondas longitudinais e transversais de alguns materiais.

VELOCIDADES EM ONDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS		
MATERIAL	ONDAS LONGITUDINAIS (m/s)	ONDAS TRANSVERSAIS (m/s)
AR	330	-
ALUMÍNIO	6300	3100
COBRE	4700	2300
OURO	3200	1200
AÇO	5900	3200
AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO	5800	3100
NYLON	2600	1100
ÓLEO (SAE 30)	1700	-
ÁGUA	1480	-
PRATA	3600	1600
TITÂNIO	6100	3100
NÍQUEL	5600	3000
ACRÍLICO	2700	1100
FERRO FUNDIDO	4800	2400

Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

2.5.2.1 Frequência, velocidade de propagação e comprimento de onda

A Equação 1 traz a relação entre os parâmetros frequência (f) e velocidade de propagação (V) para o cálculo do comprimento de onda (λ), uma vez que, tanto a velocidade, quanto a frequência são conhecidas.

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (1)$$

Esse comprimento de onda é importante por ser associado ao tamanho da descontinuidade a ser detectada. Em geral, a menor dimensão de um defeito deve ser da ordem da metade do comprimento de onda calculado ou $\lambda/2$ (ANDREUCCI, 2014).

A velocidade do som é uma constante que independe do comprimento da onda e da frequência, porém varia em função da densidade e da elasticidade do meio onde as ondas se propagam, sendo tanto maior, quanto mais elástico for o material e inversamente proporcional à densidade. Assim, aumentando o módulo de elasticidade (mantida constante a densidade) a rapidez de propagação aumenta; aumentando a densidade (mantido constante o módulo de elasticidade) a rapidez de propagação diminui (ANDREUCCI, 2014).

Um exemplo disso é a velocidade de propagação do som no ar ser menor do que na água, porque a densidade da água é cerca de 1000 vezes maior do que a do ar, enquanto que o módulo de elasticidade da água é mais de 1000 vezes maior do que o do ar. Ou seja, o fato de que a água é menos compressível do que o ar (tem módulo de elasticidade maior do que o do ar) compensa e excede o efeito da densidade.

No caso do aço inoxidável austenítico, teremos os valores mínimos de descontinuidades detectáveis indicados nas Tabelas 8 e 9, para ondas longitudinais e transversais, respectivamente.

Tabela 8– Comprimentos mínimos de detectabilidade das descontinuidades para ondas longitudinais.

VELOCIDADE LONGITUDINAL (m/s)	FREQUÊNCIA (MHz)	COMPRIMENTO DE ONDA (mm)	MENOR DEFEITO (mm)
5800	1	5,80	2,90
5800	2	2,90	1,45
5800	3	1,93	0,97
5800	4	1,45	0,73
5800	5	1,16	0,58

Fonte: (LOBERTO, 2007).

Tabela 9– Comprimentos mínimos de detectabilidade das descontinuidades para ondas transversais.

VELOCIDADE TRANSVERSAL (m/s)	FREQUÊNCIA (MHz)	COMPRIMENTO DE ONDA (mm)	MENOR DEFEITO (mm)
3100	1	3,10	1,55
3100	2	1,55	0,78
3100	3	1,03	0,52
3100	4	0,78	0,39
3100	5	0,62	0,31

Fonte: (LOBERTO, 2007).

2.5.2.2 Atenuação sônica no austenítico

A atenuação é a diminuição da intensidade do feixe sonoro através da perda de energia causada por vários fatores como absorção e dispersão, por exemplo, ao atravessar um determinado material.

A absorção e a dispersão representam perdas na transmissão do feixe sônico e são duas das principais causas da atenuação sônica que, na prática, pode ser visualizada na tela do aparelho do ultrassom, onde as alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda (ANDREUCCI, 2014).

A atenuação é menor, também, quando o tamanho do grão é pequeno, porque um fator predominante na medição da atenuação é a relação entre o comprimento da onda do ultrassom e o tamanho do grão do material (GOPICHAND, 2012 *apud* RAMON, 2013).

A Tabela 10 mostra valores obtidos em pesquisa realizada com o aço inoxidável austenítico 316L-CR, na condição de como recebido, e o 316L-1100, tratado termicamente a 1100 °C durante 15 min, cujo tamanho de grão foi maior que o primeiro. Isto comprova que a atenuação sônica está correlacionada ao tamanho do grão (FARIA et al, 2012).

Tabela 10 - Resultados da atenuação x tamanho de grão:

MATERIAL	TEMPERATURA (°C)	TAMANHO DO GRÃO (μm)	ATENUAÇÃO (dB/mm)
AUSTENÍTICO 316L	COMO RECEBIDO	36,16 ± 6,37	0,076
	1100	73,35 ± 20,22	0,72

Fonte: (FARIAS et al, 2012).

Ruídos excessivos podem ser provenientes de reflexões dos contornos de grãos na zona fundida e na ZTA, que no caso dos aços inoxidáveis austeníticos tendem a ser grandes e anisotrópicos. Quando a quantidade de energia refletida nos contornos de grãos é aproximadamente 10% da quantidade de energia refletida dos furos padrões (Ø 2,4 mm), significa que o tamanho de grão é da ordem de 0,024 mm e, conseqüentemente, uma microtrinca com dimensões da mesma ordem poderia não ser detectada (COSTA, 2011).

A atenuação é um limitante para se examinar uma junta soldada de material austenítico, e pode até inviabilizar essa inspeção, principalmente para peças fundidas, que são exemplos clássicos desta dificuldade. A Tabela 11 apresenta alguns valores de atenuação, de acordo com o processo de fabricação do material a ser examinado (LOBERTO, 2007).

Tabela 11- Valores de atenuação para aços Cr-Ni para três processos de fabricação.

MATERIAL DE AÇO Cr-Ni	ATENUAÇÃO SÔNICA (dB/mm)
FORJADOS	0,009 a 0,010
FUNDIDOS	0,040 a 0,080
LAMINADOS	0,018

Fonte: (RAMON, 2013).

2.5.2.3 Absorção

Absorção é o processo pelo qual a onda sonora perde energia ao atravessar um meio ou ao chocar-se com outra superfície. É a energia cedida pela onda para que cada partícula do meio execute um movimento de oscilação e transmita a vibração às outras partículas vizinhas. A combinação de material e geometria pode possibilitar a criação de meios nos quais a absorção é total (LOBERTO, 2007).

2.5.2.4 Dispersão

Essa perda deve-se, principalmente, à heterogeneidade da matéria, que contém interfaces naturais da sua própria estrutura ou do processo de fabricação a que foi submetida, como presença de grãos de ferrita e de austenita na mesma malha cristalina (ANDREUCCI, 2014).

No caso de sinais ultrassônicos, o pulso é transmitido sem sofrer distorções quando o material não é dispersivo. Um meio é considerado não dispersivo quando a forma da onda e a velocidade não se alteram à medida que a mesma se propaga. Exemplos de ondas que não sofrem dispersão são as ondas sonoras no ar. Em meios densos como a água e os metais, as ondas apresentam sinais de dispersão.

Desta forma, a dispersão só ocorre quando algumas frequências do pulso inicial são atrasadas em relação às outras, devido à variação da velocidade de propagação do espectro das frequências do pulso inicial em meios dispersivos (GLOBAL END, 2016).

2.5.2.5 Divergência

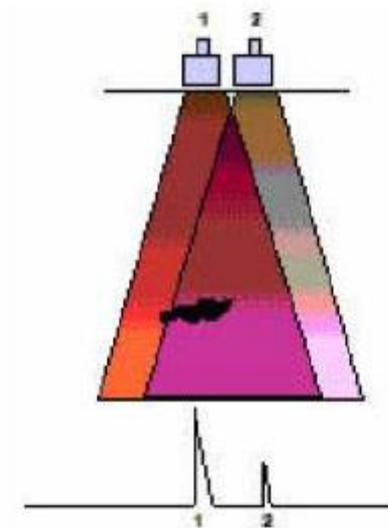
A divergência é outro fenômeno físico responsável pela perda de parte da intensidade ou energia sônica, que ocorre à medida que afastamos a fonte emissora das vibrações acústicas e que pode ser observado quando detectamos um defeito pequeno com feixe ultrassônico central do transdutor, em que, nestas condições, a amplitude do eco na tela do aparelho é máxima. Porém quando afastamos o transdutor lateralmente ao defeito, a amplitude diminui, indicando uma queda da sensibilidade de detecção do mesmo defeito. Este fenômeno é medido pelo fator “k” na fórmula da divergência e assume valores mostrados na Tabela 12 (LOBERTO, 2007).

Tabela 12- Valores de “k” em função da redução da intensidade sônica.

K	%	Db
0,37	71	- 3,0
0,51	50	- 6,0
0,70	25	- 12,0
0,87	10	- 20,0
0,93	6	- 24,0
1,09	1	- 40,0
1,22	0	0,0

Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

A Figura 21 mostra a diferença de sensibilidade (altura do eco de reflexão) quando detectamos o defeito com o feixe ultrassônico central (1) e quando detectamos o mesmo defeito com a borda do feixe ultrassônico (2), onde se pode concluir que a detectabilidade de descontinuidades do primeiro é maior que a do segundo, devido à distância percorrida do (2) ser maior que a do (1).

Figura 21- Variação da sensibilidade de detecção em função da divergência.

Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

2.5.2.6 Impedância acústica ou efeitos da interface entre os materiais

A impedância acústica está relacionada com a resistência ou dificuldade do meio à passagem do som.

Quando introduzimos uma onda ultrassônica em um determinado material e esta onda atinge uma interface com um segundo material, parte da energia acústica é refletida de volta ao primeiro meio (reflexão) e a energia restante é transmitida para o segundo meio (refração). Quando o feixe sonoro atravessa uma interface entre dois meios com a mesma impedância acústica, não há reflexão e a onda é toda transmitida ao segundo meio. O fator determinante para se obter a relação entre a energia refletida e a energia transmitida é a impedância acústica dos materiais que compõem esta interface, ou seja, é a diferença de impedância acústica entre dois meios que define a quantidade de reflexão na interface e a porcentagem da energia acústica incidente que será refletida pela interface depende da razão entre impedâncias acústicas e do ângulo de incidência (ANDREUCCI, 2014).

A impedância acústica de um material é definida como o produto da massa específica pela velocidade sônica do material, conforme fórmula da Equação 2.

$$\mathbf{Z} = \boldsymbol{\rho} \times \mathbf{V} \quad (2)$$

Onde:

- Z = impedância acústica ($\text{kg} / \text{m}^2\text{s}$)
- ρ = massa específica (kg/m^3)
- V = velocidade do som (m/s)

As propriedades acústicas dos metais são influenciadas por variações na estrutura e condições metalúrgicas dos materiais.

Uma camada de ar entre o transdutor e a superfície da peça impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em função da impedância acústica elevada. Por esta razão, deve-se usar um líquido que minimize a impedância, permitindo a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos são denominados líquidos acoplantes.

2.5.2.7 Fatores de reflexão (R) e transmissão (T) em aços inoxidáveis austeníticos

Fator de reflexão é o número que indica, em termos percentuais, qual a quantidade de energia sônica que retorna da interface. Indica, portanto, a energia refletida e é calculado pelas Equações 3 e 4.

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (3)$$

$$T = \frac{4 \times (Z_2 \times Z_1)}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (4)$$

Onde:

- R - Reflexão
- T - Transmissão (ou refração)
- Z1 - Impedância acústica do material 1
- Z2 - Impedância acústica do material 2

Toda energia incidente é transformada em energia refletida e transmitida, o coeficiente pode ser obtido pela relação $R + T = 1$. Os coeficientes são expressos em porcentagens. (SANTIN, 2003)

Os dados necessários para o cálculo são:

Z1 – Meio 1: Aço inoxidável austenítico 44546 x 106 kg/m²s

Z2 – Meio 2: Acrílico (interface) 3221 x 106 kg/m²s

Desta forma, tem-se:

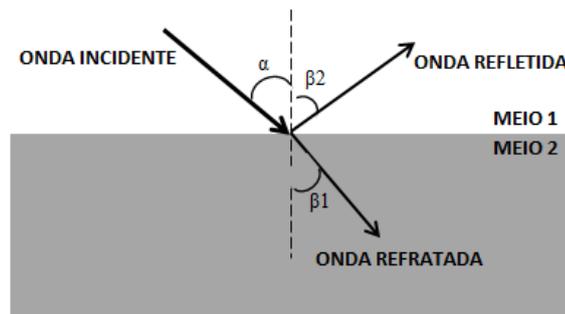
$$R = (44,5 - 3,221)^2 / (44,5 + 3,221)^2 = 1703,95 / 2277,29 = 0,748 = 74,8\%$$

Ou seja, em uma onda ultrassônica incidida com ângulo normal em uma interface acrílico x aço inoxidável austenítico, 74,8% da onda é refletida e o restante de 25,2% é transmitida ao terceiro meio, no caso, o ar.

Desta forma, é possível calcular os coeficientes de reflexão e de transmissão obtidos em um ensaio por ultrassom com incidência normal do feixe sônico em material de aço inoxidável austenítico, em que a segunda interface existente é o próprio acrílico existente no transdutor (SANTIN, 2003).

Os ângulos α e β da Figura 22 são denominados de primeiro e segundo ângulos críticos, respectivamente, e servem de referência para a construção de transdutores angulares, quando se deseja um tipo específico de propagação no interior do material, com o objetivo de facilitar a interpretação dos sinais gerados (FERREIRA, 2013).

Figura 22- Reflexão e transmissão das ondas incidentes.



Fonte: (FERREIRA, 2013).

2.5.2.8 Lei de Snell

A Lei de Snell indica o comportamento das ondas sônicas em interfaces e relaciona os ângulos de incidência e de refração. Seu objetivo é determinar qual o ângulo de um determinado transdutor para o material que se deseja ensaiar. A Lei de Snell é importante porque os transdutores normalmente trazem os ângulos para o aço carbono. Assim, um transdutor de 45° para o aço não terá o mesmo ângulo para o alumínio. A Equação traz a expressão matemática da Lei de Snell (LOBERTO, 2007).

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{V_1}{V_2} \quad (5)$$

Onde:

- V_1 – Velocidade do material 1
- V_2 – Velocidade do material 2

2.5.2.9 Acoplantes

A camada de ar existente entre a superfície de contato (sapata) do cabeçote e a peça a ser ensaiada impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça, em razão da diferença de impedâncias acústicas desses materiais. Os acoplantes utilizados no ensaio de ultrassom objetivam remover a camada de ar (ANDREUCCI, 2014). Por esta razão são utilizados alguns acoplantes especiais que reduzem esta diferença significativamente e permitem a passagem das vibrações para a peça ensaiada. Estes líquidos devem ser escolhidos em função do acabamento superficial da peça e das condições do ensaio (KRAUTKRAMER, 1981 *apud* LOBERTO, 2007).

A Tabela 13 mostra a impedância acústica de alguns materiais e acoplantes.

Tabela 13- Impedância acústica de alguns materiais e acoplantes.

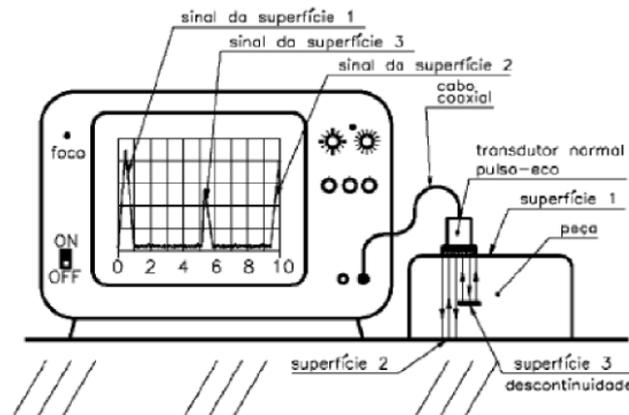
ACOPLANTE	DENSIDADE (g/cm ³)	VELOCIDADE DA ONDA (m/s)	IMPEDÂNCIA ACÚSTICA (g/cm ² .s)
ÓLEO SAE 30	0,90	1700	1,5 x 10 ⁵
ÁGUA	1,00	1480	1,48 x 10 ⁵
GLICERINA	1,26	1920	2,4 x 10 ⁵
CARBOX METIL CELULOSE	1,20	2300	2,76 x 10 ⁵
AÇO	7,70	5900	46 x 10 ⁵
AR OU GÁS	0,0013	330	0,00043 x 10 ⁵
AÇO INOX AUSTENÍTICO	7,80	5800	45,4 x 10 ⁵
ALUMÍNIO	2,70	6300	17,1 x 10 ⁵
ACRÍLICO	1,18	2700	3,1 x 10 ⁵

Fonte: (GLOBAL END, 2016).

2.5.3 Princípio de funcionamento do ensaio por ultrassom

Seguem as principais etapas que fazem parte da realização de um exame por ultrassom. A Figura 23 mostra um exame de inspeção por ultrassom.

Figura 23- Funcionamento do ultrassom.



Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

- a) O equipamento de ultrassom transmite pulsos sonoros acima de 20 Hz para o interior do material a ser inspecionado, através do transdutor, o qual possui cristal(is) piezoelétrico(s);
- b) As ondas sonoras deslocam-se pelo material até atingir uma interface, que pode ser um limite final do próprio material ou uma descontinuidade mecânica ou alguma falha no material inspecionado;
- c) Parte das ondas ultrassônicas é refletida de volta para o transdutor, enquanto outra parte continua se deslocando até atingir outro limite e ser refletida;
- d) As ondas refletidas são captadas pelo transdutor e retransmitidas para o equipamento que as gerou;
- e) O equipamento calcula a distância entre o transdutor e a interface, utilizando-se da velocidade do som no material e o tempo de retorno do eco, que é geralmente da ordem de milionésimos de segundo;
- f) O aparelho exibe em sua tela as distâncias e as intensidades dos ecos;
- g) O Inspetor qualificado em Ultrassom lauda o exame realizado através dos picos e distâncias mostradas na tela.

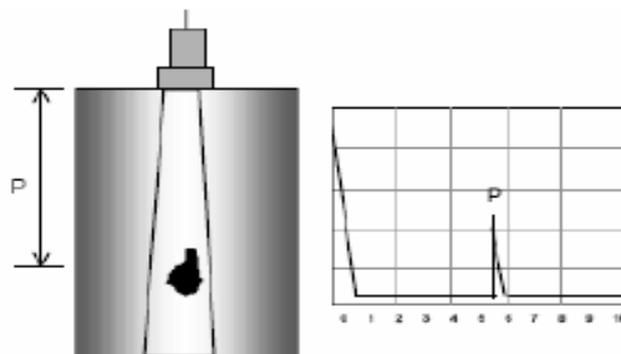
2.5.4 Técnicas da inspeção por ultrassom

A inspeção de materiais ou juntas soldadas por ultrassom pode ser realizada através de dois métodos principais.

2.5.4.1 Técnica de pulso-eco ou de impulso-eco

Nessa técnica, apenas um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material examinado. Dessa forma, o único transdutor é acoplado em somente um lado do material, mas permite que seja detectada descontinuidade, sua profundidade, suas dimensões e sua localização na peça inspecionada. Esta é a técnica mais utilizada nas indústrias de óleo e gás, química e petroquímica. A Figura 24 mostra um desenho esquemático desta técnica.

Figura 24- Técnica do US pelo Impulso-Eco.

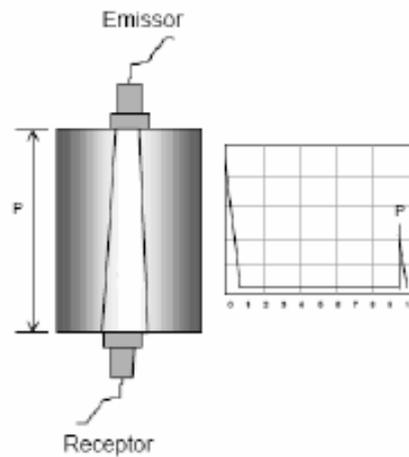


Fonte: (GLOBAL END, 2016).

2.5.4.2 Técnica de transparência

A técnica de transparência utiliza dois transdutores separados, um transmitindo e outro recebendo as ondas ultrassônicas, conforme mostrado na Figura 25. Nesse caso, faz-se necessário acoplar os cabeçotes nos dois lados da peça, de forma perfeitamente alinhados. Ao contrário do método de pulso-eco, neste tipo de inspeção não é possível determinar a posição da descontinuidade, sua extensão ou sua localização na peça examinada. É somente um ensaio do tipo passa-não-passa.

Figura 25- US pela técnica de transparência.



Fonte: (GLOBAL END, 2016).

2.5.5 Equipamento do ultrassom

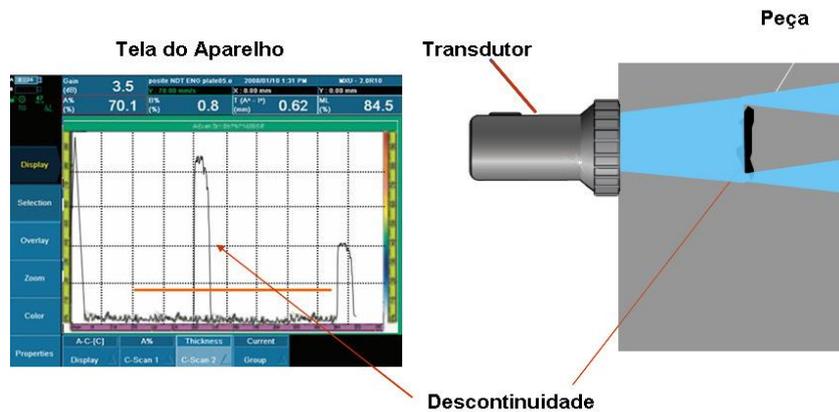
O aparelho utilizado no ensaio por ultrassom é um tipo de osciloscópio e é composto por:

- Temporizador eletrônico: aciona o gerador de pulsos em intervalos regulares de tempo, ao mesmo tempo em que ativa o circuito de varredura;
- Circuito gerador de tempo: emite a sequência básica de sinais eletrônicos que sincronizam as demais funções;
- Gerador de pulsos: recebe os sinais eletrônicos do circuito de geração de tempo e os converte em pulsos com frequência na ordem de microssegundos;
- Circuito de varredura: converte os sinais em ondas de tensão elétrica que alimentam a linha horizontal da tela do aparelho. É conectado ao mostrador de sinais.
- Amplificador: os sinais elétricos recebidos do transdutor são tratados eletronicamente no aparelho, amplificados e mostrados na tela, de onde os resultados são interpretados;
- Tela: onde são indicados os sinais elétricos, sendo na vertical os de saída e de retorno do eco, e na horizontal, o do intervalo entre a emissão e a recepção do pulso;

- Classificação do ensaio pelo tipo de mostrador (tela): A-Scan, B-Scan, C-Scan, P-Scan, S-Scan;

A Figura 26 ilustra o aparelho de ultrassom e seu funcionamento básico.

Figura 26- Avaliação de integridade por ultrassom.



Fonte: (ANDREUCCI, 2018).

2.5.6 Transdutor

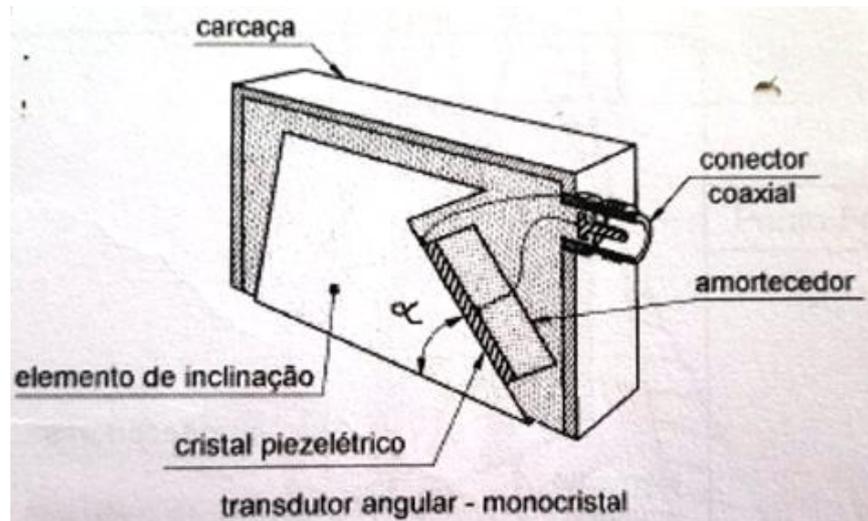
Os transdutores têm grande importância para a obtenção de resultados confiáveis no ensaio por meio de ultrassom. Os requisitos para ser considerado um bom transdutor são: (i) alta sensibilidade ou alta capacidade de detecção de pequenas descontinuidades e (ii) boa resolução, o que significa que ele deve ter capacidade de detectar com precisão descontinuidades vizinhas, próximas umas das outras.

Os cristais são montados sobre uma base de suporte ou bloco amortecedor, que tem a função de reduzir a vibração do cristal, resultando em um pulso mais curto de modo a possibilitar uma melhor resolução do equipamento. Os cristais juntamente com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor, também chamado de cabeçote.

A Figura 27 mostra um transdutor angular monocristal para ultrassom industrial e seus componentes: carcaça, cristal piezelétrico, amortecedor, elemento de inclinação e conector axial.

A Figura 28 ilustra a realização de um ensaio de ultrassom em uma junta soldada de aço inoxidável austenítico.

Figura 27– Transdutor angular e seus componentes.



Fonte: (GLOBAL END, 2016)

Figura 28– Realização de END por US *Phased Array*.



Fonte: (POLIEND, 2017)

A Tabela 14 mostra algumas características dos cristais em função de suas frequências.

Tabela 14- Comparativo dos cristais pela frequência em MHz.

CARACTERÍSTICAS	1 MHz	6 MHz
RESOLUÇÃO	MENOR	MAIOR
PENETRAÇÃO	MAIOR	MENOR
CAMPO PRÓXIMO	MENOR	MAIOR
COMPRIMENTO DE ONDA	MAIOR	MENOR
ATENUAÇÃO	MENOR	MAIOR
VELOCIDADE	IGUAL	IGUAL
DIVERGÊNCIA	MAIOR	MENOR
SENSIBILIDADE	MENOR	MAIOR
ESPESSURA DO CRISTAL	MAIOR	MENOR

Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

A Tabela 15 traz algumas características dos principais cristais utilizados para o ensaio por ultrassom.

Tabela 15- Características dos cristais utilizados como transdutores.

CARACTERÍSTICAS	QUARTZO	TITANATO DE BÁRIO	SULFATO DE LÍTIO	METANIOBATO DE CHUMBO	TITANATO ZIRCONATO DE PB
EMIÇÃO	BAIXA	BOA	MÉDIA	BOA	BOA
RECEPÇÃO	MÉDIA	MÉDIA	BOA	MÉDIA	MÉDIA
SENSIBILIDADE	BAIXA	ALTA	BOA	ALTA	ALTA
SOLUBILIDADE	NÃO	NÃO	SOLÚVEL EM ÁGUA	NÃO	NÃO
TEMPERATURA CRÍTICA	576 °C	120 °C	75 °C	550 °C	350 °C
RESOLUÇÃO	ALTA	MÉDIA	ALTA	ALTA	MÉDIA

Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

Existem quatro tipos principais de cabeçotes: normal, angular, duplo cristal e *Phased Array*. O foco deste trabalho é o *Phased Array*.

2.5.7 Ultrassom por *Phased Array*

2.5.7.1 Breve histórico

A necessidade de melhorar a capacidade de detecção das descontinuidades e a confiabilidade dos resultados, bem como de reduzir o tempo de inspeção, fez com que fossem desenvolvidas novas técnicas de ultrassom. Assim, surgiram tecnologias como o *Phased Array* e o *ToFD (Time of Flight Diffraction)*.

A técnica do ultrassom por “varredura de fases” ou *Phased Array* surgiu com uma patente em 1959 do Tom Brown, para uso na área da medicina laboratorial. No início dos anos 70, foram lançados os primeiros sistemas de *Phased Array* comerciais para diagnósticos médicos. Nos anos 80, com o surgimento dos elementos piezoelétricos compostos, esta técnica foi introduzida nas empresas do setor industrial, porém, somente nos anos 90, a partir do desenvolvimento da capacidade computacional, do aumento da velocidade na excitação dos vários elementos e, também, da capacidade de processamento dos dados obtidos nas varreduras, o ultrassom *Phased Array* foi consolidado como um novo método de ensaio não destrutivo.

Nessa mesma década surgiram os aparelhos de *Phased Array* portáteis e alimentados por baterias. Outro avanço foi a transição da área analógica para digital e o desenvolvimento de microprocessadores embutidos de baixo custo, que permitiram uma nova geração de aparelhos de *Phased Array* portáteis, voltados para a utilização em diversos setores industriais (FERREIRA, 2013).

2.5.7.2 Ultrassom *Phased Array* em soldas austeníticas

O ultrassom é uma técnica de ensaio não destrutivo (END) previsto no código ASME Section V, que consiste na inserção de ondas mecânicas (acústicas) no meio onde se deseja realizar a verificação da integridade mecânica. Em meios ferríticos, é possível a reflexão e diagnóstico preciso das condições físicas da peça examinada, quanto à presença de descontinuidades mecânicas ou mesmo de defeitos (COSTA, 2011).

No exame por US em meio austenítico, ocorrem situações antagônicas entre o metal de base e o metal de solda. No primeiro, ocorre a reflexão normal e uniforme das ondas acústicas, sendo possível realizar a varredura de toda a espessura examinada e, assim, detectar

as descontinuidades, caso existam. Já no metal de solda, ocorre uma atenuação sônica causada por fenômenos de anisotropia, tamanho e heterogeneidade dos grãos, decorrentes dos ciclos térmicos e da própria composição química dos metais de base e de solda, que causam uma impedância acústica e dispersão não uniforme. Estes fenômenos prejudicam a capacidade de detecção de defeitos na solda.

A incidência das ondas transversais sonoras no metal de base (MB) tem reflexão normal, uniforme e é conclusiva quanto à presença de descontinuidades, porém, a incidência dessas ondas no metal de solda (MS) não é uniforme, pois ocorre dispersão das mesmas e atenuação do som, não sendo possível compensar os valores nos resultados porque não possui um comportamento linear. Ocorre também a impedância acústica, diretamente relacionada à energia que será refletida na interface dos meios em questão. Isto ocorre porque há diferenças nos valores de densidade e velocidade do som nos meios de propagação devido às interfaces metálicas.

No caso do ultrassom convencional A-Scan com ondas longitudinais, em tese, apesar de não haver reflexão pelas próprias características da emissão das mesmas, as descontinuidades existentes são detectáveis de forma conclusiva, com uma dificuldade: requer que a cobertura ou o reforço das solda/acabamento seja removido com o uso de esmerilhadeira (“usinado”), o que irá demandar horas trabalhadas (Hh), ainda mais quando se tratar de um volume elevado de juntas soldadas.

2.5.7.3 Funcionamento do ultrassom por *Phased Array*

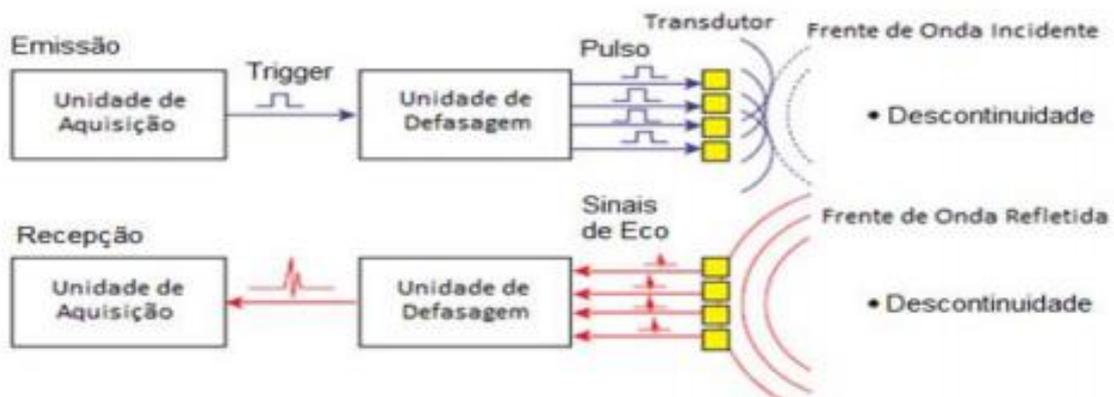
O princípio físico basilar que rege o funcionamento do ensaio de inspeção por ultrassom *Phased Array* é o mesmo do ultrassom convencional, pois ambas as técnicas são realizadas através de ondas ultrassônicas emitidas e recebidas pelos transdutores. A principal diferença no funcionamento destas técnicas é que no *Phased Array*, o transdutor possui de 8 a 256 elementos, que podem ser excitados isoladamente e em tempos defasados (pulsos). Por sua vez, o ultrassom convencional dispõe de apenas um ou dois cristais (ou elementos) (STEIN, 2017).

O transdutor *Array* é aquele que contém uma quantidade de elementos separados em uma única estrutura, conforme mostrado na Figura 29. *Phased* refere-se ao modo como esses elementos são pulsados sequencialmente. Um sistema *Phased Array*, normalmente, toma

como base um transdutor ultrassônico especializado que possui muitos elementos individuais – de 8 a 256 – e que podem ser pulsados separadamente em um padrão programado. Esses transdutores podem ser utilizados com vários tipos de calços, no modo de contato ou em teste por imersão. Seu formato pode ser quadrado, retangular ou redondo, e as frequências de teste estão geralmente entre 1 MHz e 10 MHz.

Assim, o sistema *Phased Array* permite realizar inspeções com um único transdutor ou cabeçote, porém com feixe de pontos em vários ângulos e vários comprimentos focais, onde o controle dos ângulos de cada elemento e o foco do feixe é feito por software através de atrasos precisamente controlados, tanto na emissão quanto na recepção do pulso de cada elemento do feixe. A resposta da imagem em A-Scan é comparável com àquelas obtidas no uso do cabeçote de ângulo fixo e um sistema de pulso-eco convencional. Por sua vez, os dados do A-Scan são processados para mostrar imagens da vista superior, lateral, frontal do volume do material inspecionado. Em adição à imagem padrão, o sistema *Phased Array* produz varreduras setoriais ou S-Scan, uma característica única deste método. O S-Scan é composto de imagens em tempo real da vista lateral, geradas a partir de um único local de inspeção, sem nenhum movimento do transdutor (GLOBAL, 2016).

Figura 29- Princípio de emissão e recepção de pulsos do *Phased Array*.



Fonte: (OLYMPUS, 2010).

Pulso e recepção de um sistema *Phased Array* de elementos múltiplos de um *Array* e esses elementos são pulsados de forma a criar vários componentes de feixe para combiná-los um com o outro e formar um declive de onda único que se desloca da direção desejada. Da mesma forma, a função do receptor combina a entrada dos vários elementos em uma única apresentação.

A tecnologia de *phasing* permite formatar e direcionar o feixe eletrônico, sendo possível gerar uma grande quantidade de perfis de feixes ultrassônicos diferentes em um único conjunto de sonda. A direção deste feixe pode ser programada dinamicamente para criar varreduras eletrônicas e isso permite: (i) controlar o software de feixes angulares, a distância focal e o tamanho do ponto do feixe. Esses parâmetros podem ser rastreados dinamicamente em cada ponto de controle para otimizar o ângulo de incidência e a relação de sinal-ruído da geometria de cada peça; (ii) a inspeção em vários ângulos com uma sonda multielementos e calços pequenos fornece ângulos fixos individuais ou rastreamento em vários ângulos; (iii) maior flexibilidade para a inspeção de geometrias complexas e testes em peças com geometria com acesso limitado; (iv) o rastreamento em alta velocidade sem movimento a partir de uma única posição do transdutor por causa da multiplexação de vários elementos. Mais de um rastreamento pode ser realizado a partir de um único local com vários ângulos de inspeção (GLOBAL, 2016).

2.5.8 Tipos de varredura

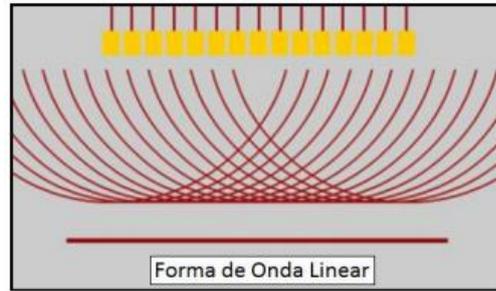
Lei focal é o conjunto de parâmetros necessários para definir os valores de defasagens aplicados tanto na emissão quanto na recepção dos elementos ativos (que geram os pulsos) e, portanto, está associado diretamente ao conjunto de cristais que formam o encapsulamento de um transdutor *Phased Array* (OLYMPUS, 2010).

Alguns fatores influenciam no tipo de varredura como a geometria da peça a ser examinada e a capacidade do aparelho *Phased Array*. Estes dois fatores afetam o ângulo de incidência em relação à descontinuidade, o volume inspecionado e o tempo de inspeção.

As varreduras são estabelecidas eletronicamente através do ajuste dos parâmetros no equipamento para o controle da defasagem eletrônica e podem ser de três tipos principais.

- a) **Varredura Linear:** a varredura linear consiste na movimentação do feixe sônico com um ângulo fixo ao longo do comprimento do transdutor por um grupo de elementos ativos, como mostra a Figura 30. É também chamada de varredura eletrônica linear ou E-Scan.(R/D TECH, 2004).

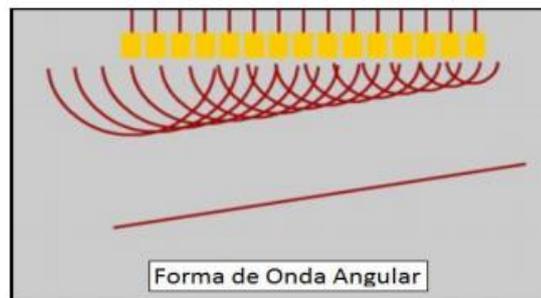
Figura 30- Varredura do tipo linear.



Fonte: (OLYMPUS, 2010).

- b) **Varredura Setorial:** na varredura setorial o feixe é emitido em uma determinada faixa de ângulos para uma profundidade focal específica. A movimentação do feixe é realizada pela aplicação de defasagens entre os elementos a cada nova lei focal, como mostra a Figura 31. É também chamada de varredura azimutal ou S-Scan (R/D TECH, 2004).

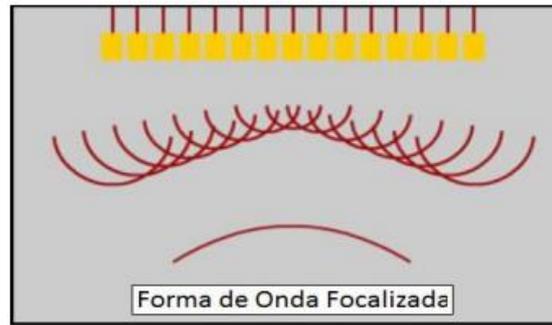
Figura 31- Varredura do tipo setorial com onda angular.



Fonte: (OLYMPUS, 2010).

- c) **Varredura para a focalização dinâmica na profundidade (DDF - *Dynamic Depth Focusing*):** é realizada com diferentes profundidades focais. Um único pulso focalizado é emitido, e a focalização é obtida na recepção para todas as profundidades programadas, como mostra a Figura 32. O foco eletrônico permite otimizar a forma e o tamanho do feixe, bem como otimizar a probabilidade de detecção (GHAEMI, 2014 apud SANTOS, 2017).

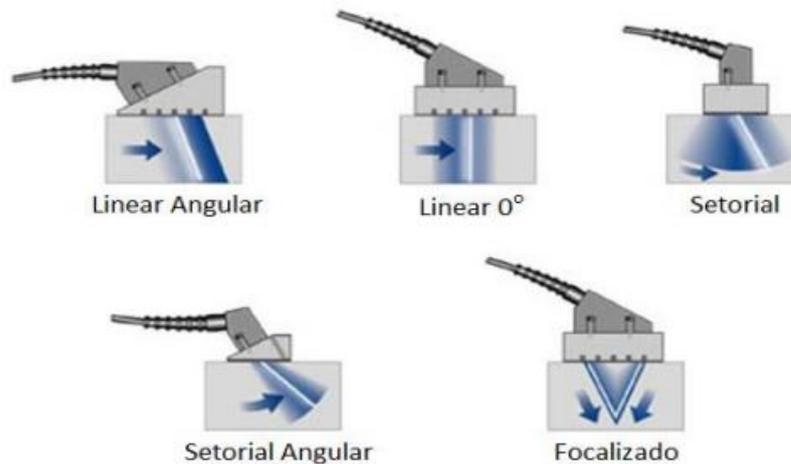
Figura 32- Varredura do tipo DDF com ondas focais.



Fonte: (OLYMPUS, 2010).

A partir da criação das leis focais é possível criar uma variedade de tipos de varredura, como ilustrado na Figura 33.

Figura 33- Configurações de varredura.



Fonte: (OLYMPUS, 2010).

2.5.9 Principais tipos de sapatas para *Phased Array* utilizadas na indústria

Em princípio, os transdutores *Phased Array* podem gerar quaisquer ângulos sem a necessidade do uso de sapatas. Na prática a geração de ângulos extremos é dificultada, sendo aconselhável o uso de sapatas tanto para ondas longitudinais, quanto para ondas transversais. Sapatas *Phased Array* estão disponíveis com ângulos padrões de refração de 0° , 55° e 60° em aço, para inspeção com uma faixa de ângulos variando de 30° a 72° com ondas transversais e longitudinais. Sapatas fora do padrão podem ser personalizadas para criação com diferentes

formas e ângulos refratados (OLYMPUS, 2010). A Figura 34 mostra algumas sapatas padrões utilizadas nas inspeções com transdutores *Phased Array*.

Figura 34- Sapatas utilizadas na inspeção por ultrassom *Phased Array* .



Fonte: (INTERMET, 2019).

2.5.10 Visualização dos sinais ultrassônicos

É possível obter várias formas de visualização dos sinais ultrassônicos recebidos, com o uso do indicador de posição *encoder* e, de acordo com o modelo utilizado, pode apresentar as visualizações tipo A-Scan, B-Scan, C-Scan, D-Scan e S-Scan. As figuras dos relatórios de US por *Phased Array* mostram as visualizações A-Scan, B-Scan, C-Scan e S-Scan, onde:

- (a) **A-Scan:** nessa forma de visualização, o eixo vertical indica a intensidade do sinal ultrassônico recebido, onde a altura dos picos representa a atenuação sônica, e o eixo horizontal, o percurso sônico, medido a partir do ponto onde o transdutor está posicionado.
- (b) **B-Scan:** A visualização B-Scan, representa uma vista em corte transversal da peça, originada de uma série de apresentações A-Scan, obtidas com base no ângulo refratado e tempo de atraso (*delay*). O eixo horizontal indica a largura da peça e o eixo vertical, a profundidade.
- (c) **C-Scan:** a visualização C-Scan apresenta os resultados de uma vista superior da peça com o plano de imagem paralelo a superfície de teste. O eixo vertical indica

a posição na largura do cordão de solda e o eixo horizontal é o de posição longitudinal (ou circunferencial planificado) no cordão de solda.

- (d) **S-Scan**: nessa tela é mostrada a faixa setorial do feixe ultrassônico que está penetrando na peça examinada, onde o eixo vertical corresponde ao percurso sônico enquanto que o horizontal representa a posição do transdutor.

2.5.11 Comparativo entre a técnica convencional e a técnica por *Phased Array*

A Tabela 16 abaixo mostra as principais características das técnicas dos ensaios de inspeção por ultrassom convencional e por *Phased Array*.

Tabela 16- Principais diferenças entre as técnicas de US.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS TÉCNICAS DE ULTRASSOM CONVENCIONAL E POR <i>PHASED ARRAY</i>		
CARACTERÍSTICA	CONVENCIONAL (MANUAL)	<i>PHASED ARRAY</i> (AUTOMATIZADO)
MARCA	GE INSPECTION	OLYMPUS NDT
MODELO	USN 60	QUICK SCAN
QUANTIDADE DE EQUIPAMENTOS	1	6
Nº DE ELEMENTOS TRANSDUTORES	1	128
ÁREA ATIVA DO TRANSDUTOR	24 mm	160 x 18 mm
FORMATO DO CRISTAL TRANSDUTOR	RETO	CÔNCAVO
TÉCNICA DE INSPEÇÃO	PULSO-ECO CONVENCIONAL	PULSO-ECO VIA IMERSÃO PA
VELOCIDADE DE INSPEÇÃO	150 mm/s (MÁX.)	250 mm/s
SOBREPOSIÇÃO	MANUAL	<i>ENCONDER</i>
VARREDURA	MANUAL	AUTOMATIZADA
CONFIABILIDADE	75%	100%

Fonte: (ANDREUCCI, 2014).

A principal vantagem do *Phased Array* em relação ao ultrassom convencional é a capacidade de usar uma variedade de elementos para direcionar, focar, analisar feixes, tudo isso com um único conjunto transdutor.

2.6 PLANO DE INSPEÇÃO

A vida útil estimada para equipamentos estáticos como reatores, torres, permutadores de calor, etc. de empresas de óleo e gás, petroquímica, química, de celulose, entre outras, é de 20 anos, este número tornou-se um axioma. Existem unidades industriais com mais de 50 anos de produção que operam com equipamentos originais e em boas condições de integridade mecânica. Isso ocorre não somente pelas condições de operação, nas quais os mecanismos de danos não sejam críticos, mas, também, por uma sequência de acertos que vai desde o projeto conceitual, passa pelo projeto de detalhamento, de fabricação, pela própria fabricação com seu controle de qualidade, entra pelo plano de inspeção do equipamento e vai até a execução das recomendações de inspeção de acordo com os padrões técnicos aceitáveis.

Em geral, as empresas de fabricação de caldeiraria elaboram um Plano de Inspeção e Testes (PIT) para ser seguido durante a fabricação de um equipamento. Nesse documento, fica estabelecido quais ensaios de inspeção serão realizados durante toda a fabricação do mesmo: da inspeção de recebimento dos materiais de aplicação aos END's aplicáveis; da calibração dos instrumentos a serem utilizados nas inspeções, como higrômetros e termômetros do armazenamento dos consumíveis de solda, até a aferição das máquinas de solda. Essas exigências são ainda mais rigorosas quando o projeto do equipamento pede fabricação com selo ASME de fabricação.

Independente do PIT, para o cálculo das espessuras mínimas, tanto de vasos de pressão, quanto de tubulações, os respectivos códigos de projeto utilizam uma variável *E*, chamada de eficiência de junta soldada, que, por sua vez, é definida de acordo com as características do projeto, sob o aspecto do risco envolvido, quanto:

- ✓ Ao fluido: se é
 - Letal;
 - HHM (high hazard material);
 - Risco médio à saúde das pessoas (enquadrados nos fluidos Classe B ou C da NR-13), com efeitos variáveis em função da quantidade de contato com a pessoa atingida;

- Sem risco à saúde das pessoas.
- ✓ À classe do fluido pela NR-13, se A, B, C ou D, onde os fluidos Classe A são os mais críticos (tóxicos e/ou inflamáveis e/ou combustíveis) e D, os menos críticos (não trazem riscos à saúde das pessoas).
- ✓ Ao projeto de construção mecânica do equipamento, como espessuras maiores;
- ✓ Às condições do projeto como pressão e temperatura de operação;
- ✓ Aos mecanismos de danos decorrentes do meio: hidrogênio, H₂S, soda cáustica, ácidos em geral;
- ✓ Aos materiais de aplicação: martensíticos, alumínio, outros.

Desta forma, em função dos riscos citados acima, a eficiência da junta pode ser total, parcial ou sem gamagrafia e o valor de E utilizado no cálculo da espessura mínima requerida pode ser:

- ✓ $E = 1,00$: gamagrafia total, o que quer dizer que terá gamagrafia em 100% das juntas soldadas de topo;
- ✓ $E = 0,85$: a gamagrafia é parcial. Nesta condição, costuma-se aplicar a gamagrafia nos cruzamentos das soldas e mais 10" para cada lado das mesmas;
- ✓ $E = 0,70$: não há gamagrafia.

A Figura 35 é a cópia de trecho do desenho de um vaso de pressão, regido pelo Código de Projeto *ASME Section VIII Division 1*, com os dados gerais de projeto, inclusive a indicação da eficiência da junta (E), em destaque, cujos cálculos de espessuras mínimas e pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) foram feitos utilizando os valores de 0,85 para o corpo (costado) e 1,0 para os tampos.

Estes dados de projeto, conforme mostrado na Figura 34, valem para toda a vida útil do equipamento, enquanto permanecerem as condições de projeto pelas quais ele foi calculado. Isso quer dizer que esses requisitos técnicos como gamagrafia, alívio de tensões e outros serão aplicados para qualquer serviço de solda de reparo, alteração de projeto, substituição de componentes que ocorra no mesmo, sem tolerâncias de não cumprimento. Em caso de inadimplência do plano de inspeção, terá que ser emitido um relatório de não conformidade, devidamente assinado pelo Inspetor de Equipamentos e, também, pelo Engenheiro PH da Unidade.

Figura 35- Dados gerais de projeto.

DADOS DE PROJETO	
ITEM/QUANTIDADE	D-535/1 / 01 CONJUNTO
CODIGO DE PROJETO E FABRICACAO	ASME VIII DIV. I ED. 2015
DADOS	
PRESSAO DE PROJETO	1,75 Kgf/cm ² M + V.T.
PRESSAO DE OPERACAO	138 mmHg (TOPO) / 164 mmHg (FUNDO)
PMAT (NOVO & FRIO) / LIMITADO POR	3,70 Kgf/cm ² M / CORPO
PRESSÃO DE TH (NOVO & FRIO)	4,81 Kgf/cm ² M MEDIDO NO TOPO
PMTA (COR & QUENTE) LIMITADO POR	3,50 Kgf/cm ² M / CORPO
PRESSÃO DE TH (COR & QUENTE)	4,55 Kgf/cm ² M MEDIDO NO TOPO
TEMPERATURA DE PROJETO	115° C
TEMPERATURA DE OPERACAO	58° C (TOPO) / 85° C (FUNDO)
EFICIENCIA DE JUNTAS	0,85 (CORPO) / 1,0 (TAMPOS)
RADIOGRAFIA	PARCIAL (CORPO) / TOTAL (TAMPOS)
TESTE DE IMPACTO CONF. UCS 66	NÃO
ALIVIO DE TENSOES	NÃO
TOLERANCIA DE CORROSAO	0,0mm
ISOLAMENTO ESP. 4" (LÃ DE ROCHA)	SIM (POR TERCEIROS)
REVESTIMENTO	NÃO
PROTEÇÃO CONTRA FOGO	SIM
PRODUTO	GLICOL
PESO ESPECIFICO DO PRODUTO	983 Kg/m ³
PESO VAZIO	36.304 Kgf ▲
PESO CHEIO DE AGUA	226.941 Kgf
PESO EM OPERAÇÃO	68.950 Kgf
CAPACIDADE TOTAL	191 m ³ ▲
CLASSIFICAÇÃO NR 13	CLASSE: N/A GRUPO: N/A CATEGORIA: I

Fonte: Autor.

Apesar dos desenhos de projeto citarem “Radiografia”, os códigos de projeto, tanto de equipamentos, quanto de tubulações permitem o exame de ultrassom, conforme transcrito abaixo:

Exame por ultrassom pode ser realizado e avaliado de acordo com o Apêndice 12 Obrigatório, mesmo para eficiências de junta que não sejam estabelecidas para este tipo de ensaio. (Exame de Ultrassom de Juntas Soldadas: Ultrasonic Examination of Welded Joints. ASME SEC. VIII Div. 1, 2017, UW-53-a, traduzido).

2.6.1 Caso real dos ativos de uma empresa de grande porte

O quadro da Tabela 1 mostra a quantidade de equipamentos e de tag's de tubulações existentes na Empresa A – petroquímica de grande porte – onde existe uma rotina diária no seu Departamento de Manutenção, de serviços de solda em tubulações e equipamentos. Por consequência, os END's aplicáveis que compõem os PIT's, inclusive gamagrafia, seguem procedimentos ou respectivos projetos (no caso dos equipamentos) ou pipe-specs (no caso, de tubulações).

2.6.2 Pipe-spec e sua importância

Os projetos dos vasos de pressão são individualizados por equipamento, uma vez que, em geral, cada um possui suas peculiaridades. Portanto, cada tag de equipamento possui um prontuário próprio, que contem databook, desenhos e memória de cálculo. No exemplo real do quadro da Tabela 1 existe um total de 1578 equipamentos e, também, 1578 projetos de equipamentos com pasta(s) física(s) e eletrônica(s) para cada um.

Já o projeto das tubulações é definido pelo respectivo pipe-spec, que é um documento da empresa onde ficam estabelecidas todas as especificações dos materiais como tubos, conexões, juntas de vedação, parafusos, porcas, válvulas, etc. Por sua vez, os pipe-specs são criados considerando os seguintes itens, todos determinantes:

- ✓ Fluido
- ✓ Pressão
- ✓ Temperatura
- ✓ Custos

O pipe-spec estabelece o percentual de gamagrafia ou ultrassom das juntas soldadas, tanto para construção e montagem das tubulações novas, quanto para manutenção das que se encontram na ativa (em operação). O plano de inspeção de cada tubulação é definido em função do pipe-spec.

Ainda no exemplo concreto da Tabela 1, referente à Unidade A1 da Empresa A, de 6667 tag's de tubulações em operação, 2502 são linhas construídas em material austenítico, o que representa 37,5% do total ou mais de um terço.

Os dados trazidos aqui reforçam a necessidade de se desenvolver e consolidar na prática, de fato, uma técnica de inspeção para avaliação da eficiência da junta soldada, de

modo que não traga riscos à saúde dos trabalhadores, mas, apenas a segurança da engenharia de processo, a confiabilidade dos resultados dos ensaios realizados e a integridade mecânica dos ativos estáticos das empresas.

2.7 VANTAGENS DO ULTRASSOM SOBRE A GAMAGRAFIA

Apesar de ser considerada uma prática de rotina pela frequência de sua aplicação, são muitas as desvantagens da aplicação da gamagrafia, não apenas quanto à segurança das pessoas, mas, também, sob o aspecto de gestão, tanto pelo lado tangível, quanto pelo intangível.

A realização do exame de gamagrafia exige uma série de requisitos e providências, todos normativos e procedimentais, como:

- Cálculo do raio de isolamento em função da radiação da fonte no dia do ensaio;
- Plano de gamagrafia com planta baixa e indicação do raio de isolamento;
- Exigência da função do Supervisor de Radioproteção certificado pelo CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) para aprovação do referido plano;
- Comunicações para os funcionários da própria empresa onde será realizado o ensaio;
- Comunicação para empresas vizinhas, caso o raio atinja ultrapasse os limites da empresa onde será realizado o ensaio;
- Barricadas de cordas com sinalização específica de radiação;
- Técnicos de segurança para assegurar o cumprimento dos cuidados necessários;
- Proteção de alguns instrumentos de controle e automação;
- Evacuação de área;
- Paralisação de toda e qualquer atividade que esteja dentro do raio de isolamento;
- Transporte e manuseio da fonte de maneira especial;
- Armazenamento com blindagem;
- Coletes com chumbo para blindagem de proteção ao Operador de Radiação;
- Monitoramento periódico dos funcionários que trabalham diretamente com a exposição da radiação e envio em relatório para o CNEN;
- Fontes cadastradas pelo CNEN com suas respectivas atividades;

- Laudo não é on-line e, caso tenha reparo, pode-se perder mais um dia de serviço no cronograma, sendo que o processamento do filme é feito nas instalações da empresa de radiologia;
- O processamento consiste em, nessa ordem: revelação, banho, lavagem intermediária, fixação, lavagem final, banho umectante e secagem final;
- Após a secagem final, verificação de existência de descontinuidades no negatoscópio para o laudo final.

A Tabela 17 mostra o comparativo de quesitos gerais entre os ensaios de inspeção por gamagrafia e por ultrassom, que servem para facilitar o entendimento do motivo deste estudo.

Tabela 17 - Quadro comparativo de quesitos gerais entre gamagrafia e ultrassom:

QUESITO GERAIS	GAMAGRAFIA	ULTRASSOM
Risco à saúde dos trabalhadores.	ALTO	NÃO HÁ
Complexidade do processo de realização do ensaio.	ALTO	PT NORMAL
Improdutividade pela paralização de atividades circunvizinhas.	SIM	NÃO HÁ
Laudo.	ON-LINE	EM APROX. 4 h
As atividades do ensaio impactam no prazo final.	SIM	MÍNIMO
Limitações em soldas austeníticas.	NÃO HÁ	SIM

Fonte: O autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a realização dos ensaios de inspeção através das técnicas de ultrassom pelos métodos convencional e *Phased Array*, e o comparativo dos resultados com a técnica de gamagrafia, nas mesmas juntas soldadas feitas com duas chapas de teste de espessuras distintas, a partir de metal de base e metal de adição austenítico, com a inclusão de defeitos.

O diagrama da Figura 36 ilustra um resumo da metodologia adotada neste processo de trabalho, desde o embasamento literário até a documentação final.

Figura 36- Diagrama da Metodologia da Pesquisa.



Fonte: Autor.

Nesta etapa, foram definidos todos os parâmetros principais como a especificação do inox austenítico, seu dimensional e as espessuras das chapas de teste, o processo de soldagem com suas variáveis essenciais, os ensaios de inspeção necessários e as metodologias de ensaio de ultrassom, de modo a atender aos objetivos estabelecidos para o estudo. A Tabela 18 dá uma visão mais abrangente dos materiais e métodos desta pesquisa com os respectivos critérios adotados para a tomada de decisão.

Tabela 18- Materiais e Métodos.

QUADRO 1: MATERIAIS E MÉTODOS										
ITEM	TIPO DO INOX AUST.	ESPESSURAS	TÉCNICA DE END	DEFEITOS	GESTÃO					
ITENS DA PESQUISA	X	304 / 304L	X	1/4"	X	GAMAGRAFIA	X	FALTA DE FUSÃO	X	COMPLEXIDADE
			X	1/2"	X	US CONVENCIONAL	X	FALTA DE PENETRAÇÃO	X	CUSTO
			X		X	US PHASED ARRAY	X	INCLUSÃO DE ESCÓRIA	X	PRODUÇÃO
					X		X	POROSIDADE	X	SSMA
					X		X	TRINCA		
CRITÉRIO	Dentre os austeníticos, as especificações 304 e 304L são as mais utilizadas em tubulações e equipamentos industriais.	Espessuras próxima da mínima qualificada (5 mm) e mais grossa para verificar a atenuação e a impedância.	Comparativo entre os resultados dos ensaios de gamagrafia x US PA e convencional.	Principais defeitos encontrados nas indústrias relativos às juntas soldadas.	Aspectos de gestão como justificar para uma possível substituição da gamagrafia pela técnica do US.					

Fonte: Autor.

Este estudo, na prática, consistiu nas seguintes etapas:

- 1º) soldagem das chapas de teste com a introdução de defeitos de soldagem pré-definidos, os quais foram determinados pelo critério de maior ocorrência nas indústrias;
- 2º) ensaios de inspeção para controle de qualidade das soldas realizadas;
- 3º) avaliação da junta soldada, através da gamagrafia;
- 4º) avaliação da junta soldada, através do ultrassom convencional *A-Scan*;
- 5º) avaliação da junta soldada, através do ultrassom por *Phased Array*;
- 6º) resultados e conclusão.

De modo a assegurar que as variáveis referentes às certificações das pessoas, dos materiais e que os procedimentos estejam com base nos fundamentados normativos ou nas boas práticas de engenharia, foram atendidos os requisitos conforme segue:

- (i) as chapas e todos os materiais de consumo como metais de adição, discos de corte e de desbaste, gases de proteção e de purga possuam os seus respectivos certificados de qualidade devidamente verificados;
- (ii) os profissionais envolvidos, como Soldador e Inspetor sejam qualificados por órgão competente e reconhecido nacionalmente;
- (iii) as atividades de soldagem realizadas de acordo com os procedimentos técnicos de soldagem aplicados e qualificados por norma.

A ordem dos subitens deste capítulo está de acordo com a sequência natural das atividades realizadas.

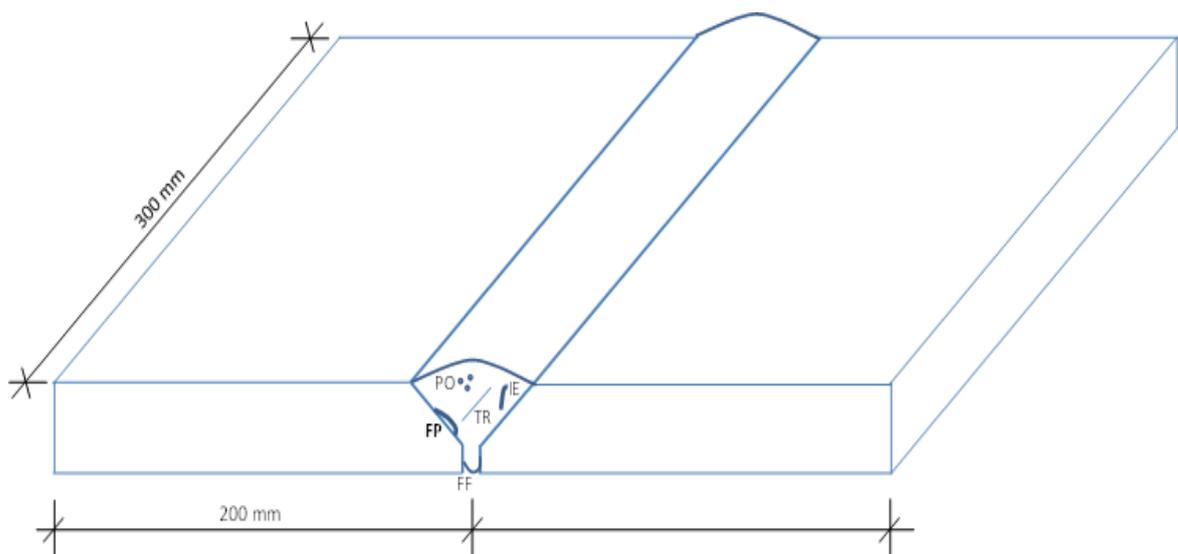
Registre-se que todas as atividades foram realizadas à luz das normas aplicáveis.

3.1 CHAPAS

As duas chapas foram de aço inoxidável austenítico ASTM A-240 Tp-304L, conforme certificados do Anexo I (chapa de 1/2") e do Anexo II (chapa de 1/4"), com os seguintes dimensionais, conforme ilustrado na Figura 37 :

- ✓ Espessuras de 1/4"(6,35 mm) e 1/2" (12,7 mm).
- ✓ Chapas de dimensões de 200mm x 300 mm cada peça, conforme Figura 37.

Figura 37- Dimensões das chapas de teste.



Fonte: Autor.

Vale ressaltar que no certificado consta como A-304, porém, de acordo com a composição química deste documento, o teor de carbono é de 0,038% e 0,044%, portanto, dentro da faixa de 0,03% a 0,04% característica do *low carbon* (L), de acordo com o *ASME Section II Part D – Materials Properties*.

Inicialmente foram soldados quatro corpos de prova, todos em material de aço inoxidável austenítico, mas apenas dois foram selecionados para este trabalho, denominados

de Corpo de Prova 01 (CP-01) e Corpo de Prova 02 (CP-02), cujas características dimensionais estão indicadas na Tabela 19.

Tabela 19- Características dimensionais das chapas utilizadas.

CHAPAS EM AÇO INOX AUSTENÍTICO ASTM A-240 Tp. 304L⁽¹⁾		
CORPOS DE PROVA (CP-01)	ESPESSURA	DIMENSÕES (mm)
CP-01	1/4" (6,35 mm)	200 x 300 / cada ⁽²⁾
CP-02	1/2" (12,7 mm)	200 x 300 / cada ⁽²⁾

NOTAS:

(1) Os Certificados de Qualidade das chapas encontram-se nos Anexo 1 e Anexo 2.

(2) Um corpo de prova é formado por duas chapas.

Fonte: Autor.

Nesta etapa de corte e biselamento das chapas foram verificados os seguintes itens, todos aprovados conforme especificado:

- Certificado de qualidade das chapas. Ver Anexos I e II;
- Medição de espessuras e dimensional de 100% das chapas após corte, com a utilização de paquímetro e trena, respectivamente;
- Dimensional de 100% dos biséis, com a utilização do gabarito específico para este fim;
- Ensaio de LP nos biséis.

As chapas foram biseladas com nariz de 2,0 mm e inclinação de $37,5^\circ \pm 2,5^\circ$, de acordo com o *Welding Handbook* Volume 4, para solda de topo em aço inoxidável austenítico e conforme EPS do Anexo XII e RQPS do Anexo XIII. A abertura entre as chapas para a raiz ficou de 3 a 5 mm.

3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Os processos de soldagem mais utilizados nos departamentos de manutenção das indústrias de petróleo, química e petroquímica para soldagem de tubos e chapas em aço austenítico são TIG (Tungsten Inert Gas), o eletrodo revestido (ER) ou SMAW e o MIG/MAG (Metal Inert Gas e Metal Active Gas), tanto para os serviços de campo (manutenção ou montagem), quanto para os serviços realizados em oficina.

A soldagem TIG é o processo de soldagem mais comum para unir dois metais semelhantes ou diferentes com aquecimento ou aplicação do metal de solda. A técnica de soldagem TIG é usada em diversas indústrias, como automotiva, aeroespacial, marítima, etc. devido ao seu processo rápido e preciso (GARG et al, 2019).

Isso se dá devido à qualidade das soldas, à mobilidade das máquinas e equipamentos e ao grau de facilidade para a execução da atividade nas mais diversas posições.

Considerando essas condições, foram estabelecidos os processos TIG e ER para a soldagem das chapas de teste deste trabalho, com EPS – Especificação de Procedimento de Soldagem – à mão dos Soldadores e respaldada pela RQPS – Registro de Qualificação de Procedimentos de Soldagem de acordo com o Código *ASME Section IX*, Ed. 2019, da seguinte maneira:

- Chapa com espessura de 1/4": toda a solda no processo TIG;
- Chapa com espessura de 1/2": raiz e reforço no processo TIG, enchimento e acabamento no processo ER.

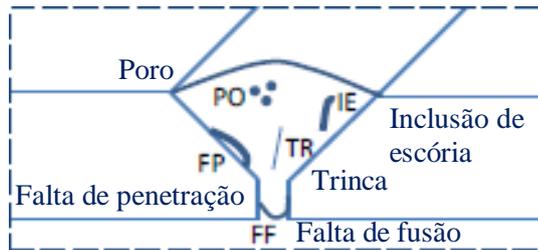
Tanto a EPS, quanto a RQPS encontram-se nos Anexos XII e XIII, respectivamente.

As atividades de soldagem foram realizadas por profissionais qualificados, os Soldadores, conforme o código *ASME Section IX* e os Inspetores de Solda, Líquido Penetrante e Medição de Espessura, de acordo com a FBTS (Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem) e a ABENDI (Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção).

3.3 DEFEITOS DE SOLDA

Os tipos de discontinuidades que seriam introduzidas nas soldas estão ilustrados na Figura 38. Estes são defeitos mais comuns encontrados em soldas realizadas pelos processos TIG e ER (Inspetor de Soldagem Nível 1, 2014), motivo pelo qual foram selecionados.

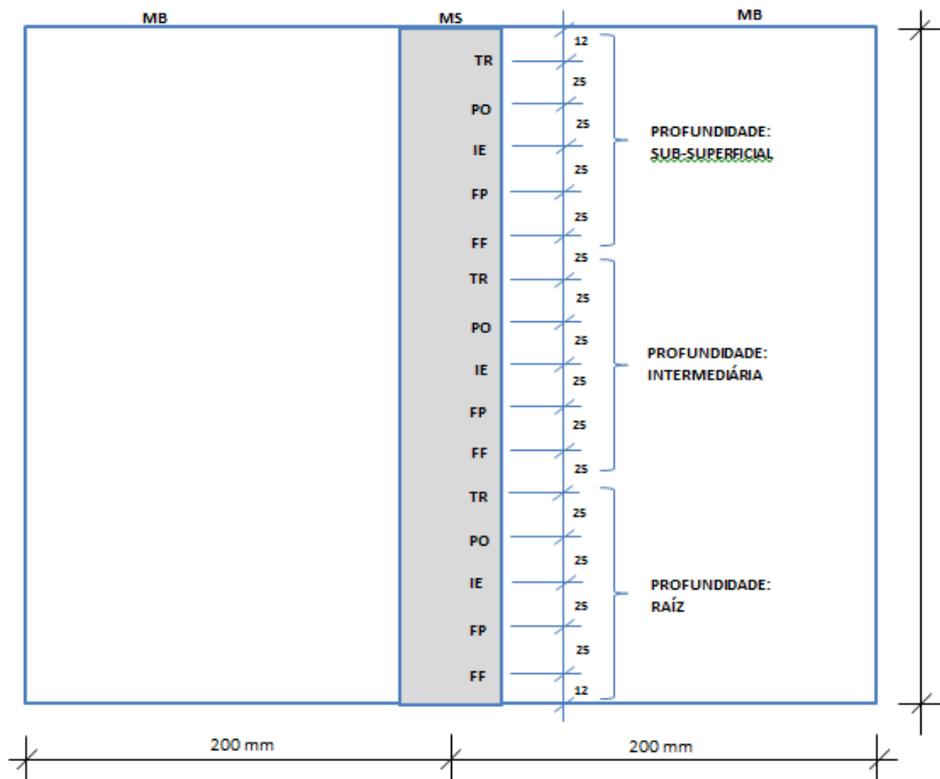
Figura 38- Defeitos de solda a serem introduzidos.



Fonte: Autor.

A Figura 39 mostra o mapeamento das discontinuidades da Figura 38 que seriam introduzidas nas soldas e indica a posição das discontinuidades ao longo do cordão de solda por tipo de defeito, como, também, por faixa de profundidade. Esta escolha foi feita na tentativa de simular uma situação real, das indústrias. Este mesmo mapeamento foi transcrito para o corpo de prova, ainda ponteadado, antes da soldagem, de modo a orientar o Soldador, conforme Figura 42.

Figura 39- Mapa de defeitos marcados nas chapas.



Fonte: Autor.

3.4 SOLDAGEM

A máquina de solda utilizada foi uma multiprocesso Modelo *Miller Pipeworx 400 Welding System 230/460 V*, etiquetada com selo de aferição, conforme Figuras 40 e 41.

Figura 40 - Máquina de solda Muller.



Fonte: Autor.

Figura 41 - Certificado de aferição da máquina de solda.



Fonte: Autor

A Tabela 20 traz alguns dados técnicos dos corpos de prova no que se refere à soldagem.

Tabela 20- Quadro resumo com dados técnicos da soldagem.

CHAPAS EM AÇO INOX AUSTENÍTICO ASTM A-240 Tp. 304L							
CP	ESPES. DAS CHAPAS (mm)	PROCESSO DE SOLDAGEM		METAL DE ADIÇÃO ⁽¹⁾		EPS	RQPS
		RAIZ	ENCHIMENTO/ ACABAMENTO	ESPECIFICAÇÃO	BITOLA		
CP-01	6,35	TIG	TIG	ER-308L	2,4 mm	TE-0005-AI	TE-01-AI
CP-02	12,7	TIG	ER	ER-308L + E-308	2,4 mm / 2,4 mm	TE-0005-AI	TE-01-AI

NOTA:

(1) Os Certificados de Qualidade encontram-se no Anexo XI.

Fonte: Autor.

A soldagem das chapas dos corpos de prova foram todas realizadas dentro dos padrões técnicos exigidos, de acordo com o *ASME Section IX* (onde se aplica), conforme segue.

- a) Os serviços de soldagem foram acompanhados por Inspetor de Solda Nível 1 da *FBTS*;
- b) Soldador qualificado de acordo com o *ASME Sec. IX* em FN° 5 – aplicada à soldagem no processo Eletrodo Revestido de materiais PN° 8, conforme classificação do *ASME II Part C – Materials Specifications for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals*;
- c) O Soldador é qualificado de acordo com o *ASME Sec. IX* em FN° 6 – designada para soldagem no processo TIG de materiais PN° 8, conforme classificação do *ASME II Part C – Materials Specifications for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals*;
- d) Procedimento de solda: utilizada a EPS TE-0005-AI (Anexo XII), específica para o inox austenítico PN° 8 e processos de soldagem TIG e ER;
- e) Qualificação do procedimento de soldagem (RQPS): a EPS utilizada foi emitida com base na RQPS TE-01-AI (Anexo XIII), qualificada dentro dos requisitos do *ASME Sec. IX*;
- f) Os consumíveis de solda – varetas e eletrodos revestidos – utilizados possuem certificados de qualidade e passaram por inspeção de recebimento, conforme procedimento próprio para recebimento, inspeção, secagem e manuseio dos metais de adição utilizados na solda;
- g) Os eletrodos foram ressecados em estufa com controle de temperatura e gráfico tempo x temperatura de acordo com o fabricante dos mesmos;

- h) Os consumíveis de solda utilizados constam da lista das marcas comerciais aprovadas pela FBTS;
- i) O gás de purga utilizado foi o Argônio com 99,9% de pureza;
- j) Os discos de desbaste utilizados foram com alma de nylon para evitar a contaminação no metal de solda e o surgimento de trincas a quente. Esses consumíveis foram utilizados exclusivamente para a soldagem dos corpos de prova, de modo a evitar a contaminação;
- k) A máquina de solda encontrava-se devidamente aferida, com etiqueta de aferição assinada por Inspetor de Solda N1;
- l) As soldagens foram realizadas com controle de temperatura de interpasse, para se evitar que a região soldada permaneça mais tempo na faixa de temperatura entre 490 °C e 920 °C, de modo a evitar o fenômeno de sensitização.

A limpeza da região a ser soldada é de fundamental importância para se evitar contaminações que possam causar trincas a quente, ou mesmo iniciar algum processo corrosivo. Seguem algumas recomendações nessa linha:

- Limpeza do chanfro com escova rotativa, preferencialmente, imediatamente antes da soldagem;
- Utilização de discos de desbaste específico para o aço inox (sem contaminantes), do tipo alma de nylon ou similar;
- Não utilizar os discos em uso para serviços de outras especificações;
- Limpar toda a região a ser soldada e adjacências com acetona para evitar contaminações.

Após a soldagem, foram realizados os ensaios de exame visual e de LP apenas no acabamento, todos com resultado aprovado. Os respectivos relatórios de inspeção encontram-se nos Anexos III (exame visual de solda) e IV (exame de LP), assim como os certificados dos produtos utilizados no ensaio de LP (removedor, penetrante e revelador) encontram-se nos Anexos V, VI e VII.

3.5 DEFEITOS INTRODUZIDOS

Durante a soldagem, foi feita a tentativa de se introduzir os defeitos conforme marcação nas chapas pela habilidade do Soldador, porém os resultados foram adversos do

desejado e o que se detectou foram descontinuidades, alguma aprovadas e outras reprovadas em todos os três ensaios realizados, conforme mostrado nos resultados dos ensaios.

Figura 42- Marcação dos defeitos a serem introduzidos.



Fonte: Autor.

3.6 GAMAGRAFIA

O END de gamagrafia foi realizado em duas etapas, sendo a primeira, com filmes Classe 2 e a segunda, com filmes Classe 1, porém, neste estudo foram utilizados apenas os laudos do último, pelo critério de melhor qualidade da imagem.

Os principais dados técnicos deste ensaio, para ambos os corpos de prova, encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21- Condições radiográficas do END de gamagrafia.

CONDIÇÕES RADIOGRÁFICAS	
ITEM	ESPECIFICAÇÃO
FONTE	IRÍDIO 192
Nº DA FONTE	8777
ATIVIDADE	2,38 Ci
FOCO	3,0 x 2,0 mm
TÉCNICA DE EXPOSIÇÃO	PD - VS
FIO ESSENCIAL	12
FILME	CLASSE I
IQI	10 FE EN 16
ECRANS	Pb 0,005" E 0,010"
IRRADIADOR	S-4331

Fonte: Autor.

3.7 ULTRASSOM CONVENCIONAL E *PHASED ARRAY*

Os ensaios de ultrassom foram realizados em algumas etapas, a saber:

- a) US convencional *A-Scan* nas soldas COM ACABAMENTO para os dois corpos de prova, sendo um com espessura de 1/4" e outro de 1/2". Nesse caso o ensaio foi realizado com ondas transversais.
- b) US *Phased Array* nas soldas COM ACABAMENTO para os dois corpos de prova, sendo um com espessura de 1/4" e outro de 1/2". Nesse caso o ensaio foi realizado com ondas transversais.
- c) US *Phased Array* nas soldas SEM ACABAMENTO para os dois corpos de prova, sendo um com espessura de 1/4" e outro de 1/2". Nesse caso o ensaio foi realizado com ondas longitudinais.

O critério de aceitação das discontinuidades é encontrado no *ASME B31.3*, item 344.6.2, traduzido abaixo.

Descontinuidade do tipo linear é inaceitável se a amplitude da indicação estiver acima da curva de referência e seu comprimento exceder os valores abaixo:

- (1) 6,4 mm (1/4“) para $T_w \leq 19$ mm (3/4“);
- (2) $T_w/3$ para 19 mm $< T_w \leq 57$ mm (2.1/4“);
- (3) 19 mm para $T_w > 57$ mm.

Onde T_w é a menor espessura entre os MB soldados.

(ASME B31.3, 344.6.2, 2016, traduzido).

Os equipamentos e seus acessórios utilizados tanto para o US convencional, quanto para o *Phased Array* estão informados na Tabela 22, com suas respectivas especificações.

Tabela 22- Especificações dos equipamentos de US e seus acessórios.

ITEM	FABRICANTE	MOELO	OUTRAS INFORMAÇÕES
APARELHO DE US CONVENCIONAL	OLYMPUS	EPOCH XT	SÉRIE Nº 091255005
TRANSDUTOR DO CONVENCIONAL	SONATEST	THM4	4 MHz
APARELHO DE US PHASED ARRAY	OLYMPUS	OMNISCAN MX- 100255	128 ELEMENTOS
TRANSDUTOR DO PHASED ARRAY	OLYMPUS	5CCEV35	5 MHz
SAPATA	OLYMPUS	SA 15N60S	-
BLOCO DE CALIBRAÇÃO	GE	V2	a) INOX 304L b) ESPESSURA de 20 mm

Fonte: Autor.

A foto do aparelho de US Convencional *A-Scan* utilizado nesta pesquisa encontra-se na Figura 43 e a foto do US *Phased Array*, na Figura 44.

Figura 43 - Aparelho de ultrassom convencional A-Scan.



Fonte: Autor.

Figura 44- Aparelho de ultrassom *Phased Array* .



Fonte: Autor.

O exame por convencional foi realizado com transdutor de duplo cristal, o que permite uma melhor emissão e recepção da onda ultrassônica.

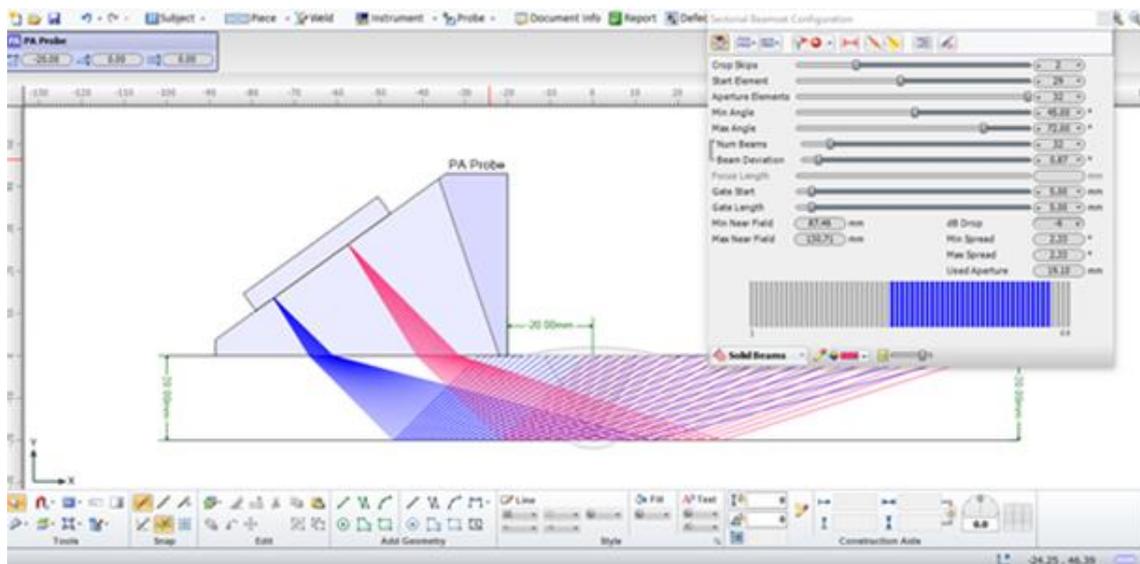
A varredura do US *Phased Array* foi definida através do software *ScanPlan*, ferramenta do *BeamTool*, que permite a montagem do plano de inspeção aplicado à geometria da peça a ser examinada, sendo possível, verificar as leis focais, os ângulos de abertura de cada elemento, individualmente ou em grupo de elementos, e ajuste do percurso sônico. Uma

vez definidos no ScanPlan, estes parâmetros são informados no aparelho do US. A Figura 45 ilustra a programação feita no ScanPlan para a varredura.

A frequência do transdutor utilizado no *Phased Array* foi de 5 MHz, uma vez que o comprimento mínimo detectável das descontinuidades foi calculado em 0,31 mm para ondas transversais e 0,58 mm, para as longitudinais, o que atende perfeitamente ao objetivo dos ensaios de inspeção, considerando-se as espessuras dos corpos de prova de 1/2" (CP-01) e 1/4" (CP-02).

Os valores das impedâncias dos meios físicos, Z_1 e Z_2 , são utilizados para os cálculos dos percentuais de reflexão (R) e de transmissão ou refração (T) pelos fabricantes dos transdutores, para determinação dos ângulos de incidência em função dos materiais a serem inspecionados.

Figura 45- Programação da varredura feita no ScanPlan.



Fonte: Autor.

A varredura foi feita com o *Encoder* alinhado e o vídeo é instalado no *Tomoview* para os laudos dos exames realizados nos corpos de prova CP-01 e CP-02.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo está focado apenas na prática atual da realização dos END's de análise de eficiência das juntas soldadas para os aços inoxidáveis austeníticos em chapas com espessura de 1/4" e 1/2", assim como os seus resultados estão direcionados para o aspecto da gestão, como saúde dos trabalhadores, custos direto e indireto, produtividade e a própria realização dos ensaios.

4.1 RESULTADO DO END DE GAMAGRAFIA

4.1.1 Resultado do END de gamagrafia do CP-01

O resultado do ensaio de gamagrafia do CP-01 está mostrado na Tabela 23, onde foram detectados cinco defeitos reprovados e três descontinuidades aprovadas, de acordo com o ASME B31.3.

O relatório de gamagrafia encontra-se no Anexo VIII. O Anexo IX mostra o filme Classe I da gamagrafia do CP-01, após revelação, onde algumas descontinuidades estão visíveis apenas no negatoscópio. O gabarito da Figura 46 foi traçado no negatoscópio com esse mesmo filme e mostra as descontinuidades e defeitos detectados.

Tabela 23- Resultado do END de gamagrafia do CP-01.

RESULTADOS DO ENSAIO DE GAMAGRAFIA					
CP	ESPESSURA DA CHAPA	DIMENSÕES DA CHAPA	RESULTADOS DAS GAMAGRAFIAS		
			FILME CLASSE 1	DESCONTINUIDADES (POSIÇÃO - EXTENSÃO) (mm)	LAUDO
CP-01	1/4"	200 x 300	FF	0 - 15	R
			MO	35 - 15	A
			FP	70 - 10	R
			PO	90 - 1	A
			PO	155 - 5	R
			TR	250 - 5	R
			FP	255 - 10	R
			PO	297 - 1	A

LEGENDA:

FF	FALTA DE FUSÃO
FP	FALTA DE PENETRAÇÃO
MO	MORDEDURA
PO	POROSIDADE
TR	TRINCA

Fonte: Autor.

Figura 46- Máscara com o resultado do END de gamagrafia do CP-01.

0	.	2	.	4	.	6	.	8	.	10	.
—	—	—	•		•			—			•
FF	MO	FP	PO		PO			TR	FP		PO

Fonte: Autor.

4.1.2 Resultado do END de gamagrafia do CP-02

O resultado do ensaio de gamagrafia do CP-02 está mostrado na Tabela 24 onde foram detectados cinco defeitos reprovados e duas descontinuidades aprovadas, de acordo com o ASME B31.3.

O relatório de gamagrafia encontra-se no Anexo VIII. O Anexo X mostra o filme Classe I da gamagrafia do CP-02 após revelação, onde algumas descontinuidades estão visíveis apenas no negatoscópio. A máscara da Figura 47 foi traçada no negatoscópio com este mesmo filme e mostra as descontinuidades e defeitos detectados.

Tabela 24- Resultado do END de gamagrafia do CP-02.

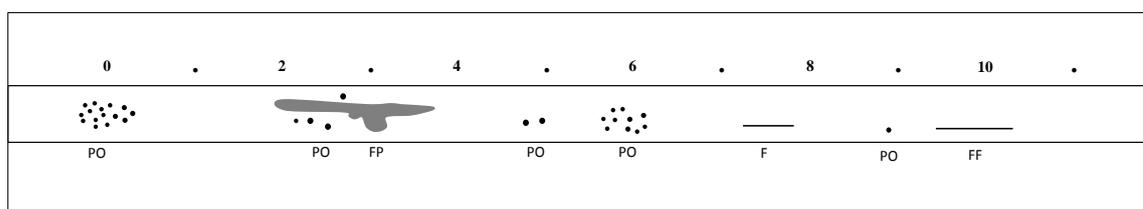
RESULTADOS DO ENSAIO DE GAMAGRAFIA					
CP	ESPESSURA DA CHAPA	DIMENSÕES DA CHAPA	RESULTADOS DAS GAMAGRAFIAS		
			FILME CLASSE 1	DESCONTINUIDADES (POSIÇÃO - EXTENSÃO) (mm)	LAUDO
CP-02	1/2"	200 x 300	PO	13 - 22	R
			FP	70 - 52	R
			PO	141 - 9	R
			PO	168 - 14	A
			FF	215 - 10	R
			PO	250 - 1	A
			FF	260 - 40	R

LEGENDA:

FF	FALTA DE FUSÃO
FP	FALTA DE PENETRAÇÃO
PO	POROSIDADE

Fonte: Autor.

Figura 47- Gabarito com o resultado do END de gamagrafia do CP-02.



Fonte: Autor.

4.2 RESULTADOS DO END DE ULTRASSOM

4.2.1 Resultado do END de ultrassom convencional A-Scan com ondas transversais do CP-01 para chapa de espessura de 1/4" (6,35) com acabamento da solda

O resultado do ensaio de US convencional do CP-01 (chapa de 1/4" ou 6,35 mm) com acabamento da solda está mostrado na Figura 48, onde foram detectadas quatro descontinuidades, sendo dois defeitos (reprovados) e duas descontinuidades, de acordo com o ASME B31.3.

Figura 48 - Resultado do Ultrassom Convencional do CP-01, Relatório APEIRON Nº UT-CP1.18.

		REGISTRO DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM		Nº UT-CP1.18							
				Data 21/01/18	Folha 01/01						
OS / Cliente:	ÊMERSON MOTA		TAG:	CP 01							
Serviço:	INSPEÇÃO DE SOLDA		Desenho:	NA							
Local do Ensaio:	OFICINA - APEIRON		Fabricante:	MKS							
Dados Técnicos											
Metal Base:	ASTM A-240 TP. 304L		Procedimento de Soldagem:	NA							
Metal Adição:	ER-308L (raiz, enchimento e acabamento)		Cond. Superficial:	ESCOVADA							
Diâmetro / Espessura:	CH. 6,35 mm (1/4")		Acoplante:	METIL CELULOSE							
Norma de Referência:	ASME B31.3		Proc. Insp.:	APN UT 001 REV. 02							
Bloco de Ref. / Nº Série:	20mm (INOX)		Aparelho / Nº Série:	EPOCH XT / 091255005							
Transdutores											
Modelo	Ângulo real	Frequência (MHz)	Dimensões (mm)	Ganhos (db)		CABEÇOTE					
				GP	PT	POSIÇÃO	N	S/E	45°	60°	70°
THM4	0º	4 MHz	10	30	0	1	-	X	-	X	X
SMA4-70Z	60º	4 MHz	8X9	42	0	-	-	-	-	-	-
SMA4-60Z	70º	4 MHz	8X9	38	0	-	-	-	-	-	-
SMA4-45Z	45º	4 MHz	8X9	-	-	-	-	-	-	-	-
Croquis / Anotações											
Junta	Descontinuidade								Laudo	Soldador	
	Nº	Cabeç.	Cota	Prof.	Comp.	Amplit.	P. Sônico	Tp. Defeito		Raiz	Ench./Acabam.
J-01	1	45º	0	11	17	+8	27	FF	R	-	-
-	2	45º	38	1	13	-5	36	MO	A	-	-
-	3	70º	64	3	14	-1	30	FP	A	-	-
-	4	60º	250	4,5	9	+2	34	FP	R	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Observações:											

Fonte: Autor.

4.2.2 Resultado do END de ultrassom convencional A-Scan com ondas transversais do CP-02 para chapa de espessura de 1/2" (12,7) com acabamento da solda

O resultado do ensaio de US convencional do CP-02 (chapa de 1/2" ou 12,7 mm) com acabamento da solda está mostrado na Figura 49, onde foram detectadas sete discontinuidades, com cinco aprovadas e apenas dois defeitos (reprovados), de acordo com o ASME B31.3.

Figura 49- Resultado do US Convencional do CP-02, Relatório APEIRON Nº UT-CP2.18.

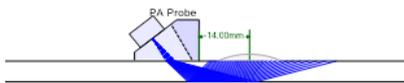
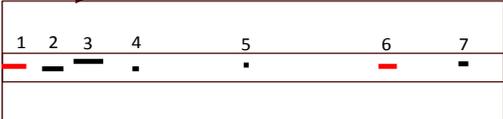
		REGISTRO DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM		Nº UT-CP2.18								
		Data	Folha									
		21/01/18	01/01									
OS / Cliente:	EMERSON MOTA	TAG:	CP 02									
Serviço:	INSPEÇÃO DE SOLDA	Desenho:	NA									
Local do Ensaio:	OFICINA - APEIRON	Fabricante:	MKS									
Dados Técnicos												
Metal Base:	ASTM A-240 TP. 304L	Procedimento de Soldagem:	NA									
Metal Adição:	ER-308L (raiz) + E-308L (enchimento e acabamento)	Cond. Superficial:	ESCOVADA									
Diâmetro / Espessura:	CH. 12,7 mm (1/2")	Acoplante:	METIL CELULOSE									
Norma de Referência:	ASME B31.3	Proc. Insp.:	APN UT 001 REV. 02									
Bloco de Ref. / Nº Série:	20mm (INOX)	Aparelho / Nº Série:	EPOCH XT / 091255005									
Transdutores												
Modelo	Ângulo real	Frequência (MHz)	Dimensões (mm)	Ganhos (db)		CABEÇOTE						
				GP	PT	POSIÇÃO	N	S/E	45°	60°	70°	
THM4	0°	4 MHZ	10	30	0	1	-	X	-	-	X	X
SMA4-70Z	60°	4 MHZ	8X9	42	0	-	-	-	-	-	-	-
SMA4-60Z	70°	4 MHZ	8X9	38	0	-	-	-	-	-	-	-
SMA4-45Z	45°	4 MHZ	8X9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Croquis / Anotações												
Junta	Descontinuidade								Laudo	Soldador		
	Nº	Cabeç.	Cota	Prof.	Comp.	Amplit.	P. Sônico	Tp. Defeito		Raiz	Ench./Acabam.	
J-01	1	70°	8	8	32	+2	30	PO	R	-	-	
-	2	60°	67	6	35	0	40	FP	A	-	-	
-	3	60°	125	7	13	-4	38	PO	A	-	-	
-	4	60°	195	12	28	0	25	FF	A	-	-	
-	5	60°	210	8	6	0	38	FF	A	-	-	
-	6	45°	220	1	12	0	35	FF	A	-	-	
-	7	60°	265	6	40	+7	38	FF	R	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Fonte: Autor.

4.2.3 Resultado do END de ultrassom *Phased Array* com ondas transversais do CP-01 para chapa de espessura de 1/4" (6,35 mm) com acabamento da solda

O resultado do ensaio de US *Phased Array* do CP-01 (chapa de 1/4" ou 6,35 mm) com acabamento da solda está mostrado na Figura 50, onde foram detectadas sete descontinuidades, com apenas dois defeitos (reprovados) e cinco aprovadas, de acordo com o *ASME B31.3*.

Figura 50- Resultado do US *Phased Array* do CP-01 / Relatório APEIRON Nº PA-CP1.18.

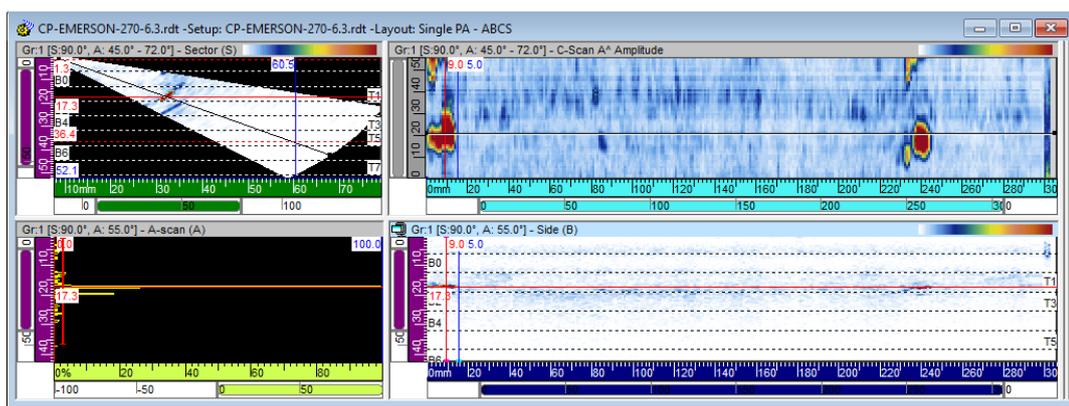
		REGISTRO DE INSPEÇÃO ULTRASSOM PHASED ARRAY - OMNISCAN				Nº PA-CP1.18									
		Data		Folha		01/04									
OS / Cliente:		ÊMERSON MOTA		TAG:		CP1									
Serviço:		INSPEÇÃO DE SOLDA		Desenho:		NA									
Local do Ensaio:		OFICINA - APEIRON		Fabricante:		MKS									
Dados Técnicos															
Metal Base:		ASTMA-240 TP. 304L		Procedimento de Soldagem:		NA									
Metal Adição:		ER-308L (raiz, enchimento e acabamento)		Cond. Superficial:		ESCOVADA									
Diâmetro / Espessura:		CH. 6,35 mm (1/4")		Acoplante:		METIL CELULOSE									
Norma de Referência:		ANSI B31.3		Proc. Insp.:		IT-GT-US-013									
Bloco de Ref. / Nº Série:		20 MM (INOX)		Aparelho / Nº Série:		OLYMPUS OMNISCAN MX- 100255									
Calibração															
Modelo	Nº Serie / Grupo	GP	PT	GV	POSIÇÃO / ÂNGULO										
MSEB4	54067	41	0		1-2 / 0°										
7.5CCEV35-16 – SA ISN60S	H0703	44	0		SK 90/ 45° - 72° EL 1 a EL 16										
5CCEV35-16 – SA ISN60S	HLB 678	44	0		SK 270/ 45° - 72° EL 1 a EL 16										
5CCEV35-16 – SA ISN60L															
POSIÇÃO	CABEÇOTES														
	CONV.	PA	TOFD												
	1	X	X												
	2	X	X												
5	X	X													
Junta	SPOT	LOCAL	SINETE		DES CONTINUIDADES										
			R	EA	Local	Desc.	Grupo	Ganho	Comp.	Prof.	Alt.	Tipo	Laudo		
J-01	-	-	-	-	-	-	0	1	1	>100	15	-	-	FF	R
-	-	-	-	-	-	-	28	2	1	21%	13	-	-	MO	A
-	-	-	-	-	-	-	55	3	1	92%	18	-	-	FF	A
-	-	-	-	-	-	-	80	4	1	38%	4	-	-	PO	A
-	-	-	-	-	-	-	144	5	1	41%	3	-	-	PO	A
-	-	-	-	-	-	-	232	6	1	>100	11	-	-	FF	R
-	-	-	-	-	-	-	282	7	1	28%	6	-	-	PO	A
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Observações															
															

Fonte: Autor.

A Figura 51 e Figura 52 mostram as imagens do *Phased Array* referentes aos defeitos detectados no CP-01, pontos 1 e 6, respectivamente, da Figura 50 .

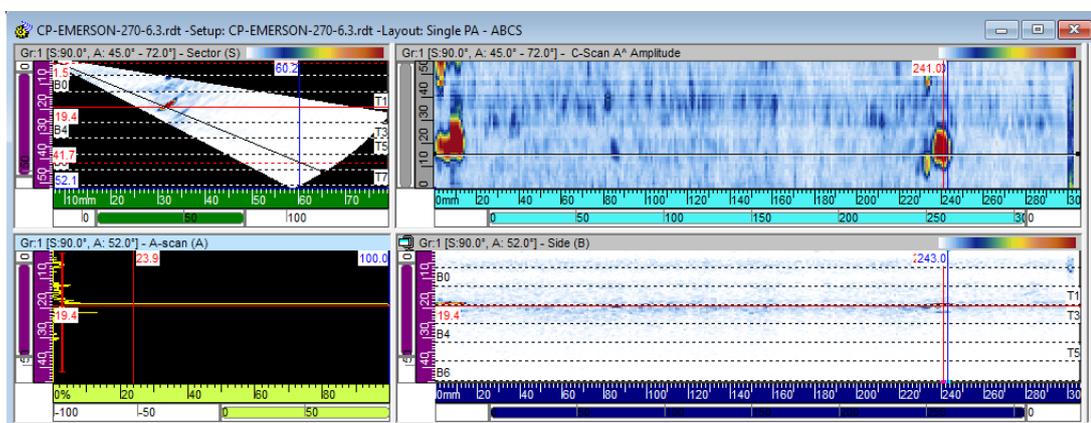
As imagens mostradas na tela das próximas figuras, relativas ao *Phased Array*, fornecem as principais informações sobre as discontinuidades, como a posição, a amplitude do eco e a extensão da mesma da seguinte forma: localiza-se a discontinuidade pelo S-Scan ou pelo C-Scan para que a imagem apareça também no B-Scan. No A-Scan é mostrado a amplitude do eco correspondente ao desvio detectado. Registra-se esta amplitude e procura-se o melhor sinal movendo o cursor no S-Scan, para se obter a melhor imagem da discontinuidade e a maior amplitude no A-Scan. A leitura do A-Scan neste ponto é a profundidade rebatida. A extensão do defeito é a diferença entre a posição inicial e a final que pode ser observada tanto no B-Scan, quanto no A-Scan.

Figura 51- Imagens do defeito do ponto 1 do Relatório APEIRON N° PA-CP1.18 ref. ao CP-01.



Fonte: Autor.

Figura 52- Imagens do defeito do ponto 6 do Relatório APEIRON N° PA-CP1.18 ref. ao CP-01.

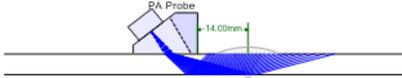


Fonte: Autor.

4.2.4 Resultado do END de ultrassom *Phased Array* com ondas transversais do CP-02 para chapa de espessura de 1/2" (12,7 mm) com acabamento da solda

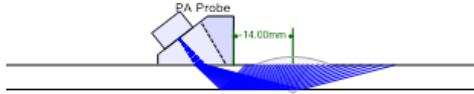
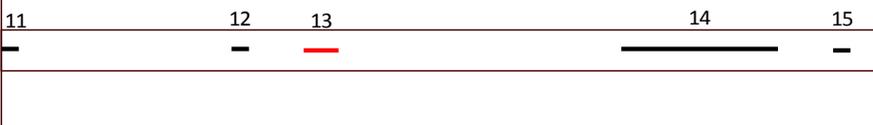
O resultado do ensaio de US *Phased Array* do CP-02 (chapa de 1/2" ou 12,7 mm), com acabamento da solda, está mostrado na Figura 53 e na Figura 54, onde foram detectadas quinze descontinuidades, sendo quatro defeitos (reprovados) e onze aprovadas, de acordo com o ASME B31.3.

Figura 53 - Resultado do US *Phased Array* do CP-02 / Rel. APEIRON N° PA-CP2.18 fl. 1/7.

REGISTRO DE INSPEÇÃO ULTRASSOM PHASED ARRAY - OMNISCAN										N° PA-CP2.18					
OS / Cliente: ÉMERSON MOTA					TAG: CP2					Data: 11/11/19	Folha: 01/07				
Serviço: INSPEÇÃO DE SOLDA					Desenho: NA										
Local do Ensaio: OFICINA - APEIRON					Fabricante: MKS										
Dados Técnicos															
Metal Base: ASTM A-240 TP. 304L					Procedimento de Soldagem: NA										
Metal Adição: ER-308L (raiz) + E-308L (enchimento e acabamento)					Cond. Superficial: ESCOVADA										
Diâmetro / Espessura: CH. 12,7 mm (1/2")					Acoplante: METIL CELULOSE										
Norma de Referência: ANSI B31.3					Proc. Insp.: IT-GT-US-013										
Bloco de Ref. / N° Série: 20 MM (INOX)					Aparelho / N° Série: OLYMPUS OMNISCAN MX- 100255										
Calibração															
Modelo	N° Serie / Grupo	GP	PT	GV	POSIÇÃO / ÂNGULO										
MSEB4	54067	41	0		1-2 / 0°										
SCCEV35-16 - SA15N60S	HLB 678	44	0		SK 90/ 45° - 72° EL 1 a EL 16										
SCCEV35-16 - SA15N60S	HLB 678	44	0		SK 270/ 45° - 72° EL 1 a EL 16										
SCCEV35-16 - SA15N60L	HLB 678														
POSIÇÃO	CABEÇOTES														
	CONV.	PA	TOFD												
	1	X	X												
	2	X	X												
5	X	X													
Junta	SPOT		LOCAL		SINETE		DESCONTINUIDADES								
	R	EA	R	EA	R	EA	Local	Desc.	Grupo	Ganho	Comp.	Prof.	Alt.	Tipo	Laudo
J-01	-	-	-	-	-	-	6	1	1	>100	31	4	-	PO	R
-	-	-	-	-	-	-	30	2	1	71%	7	11	-	FF	A
-	-	-	-	-	-	-	61	3	1	34%	5	8	-	PO	A
-	-	-	-	-	-	-	68	4	1	72%	19	5	-	FP	A
-	-	-	-	-	-	-	79	5	1	>100	11	3	-	PO	R
-	-	-	-	-	-	-	82	6	1	>100	24	10	-	FF	R
-	-	-	-	-	-	-	115	7	1	51%	4	10	-	PO	A
-	-	-	-	-	-	-	133	8	1	50%	4	10	-	FF	A
-	-	-	-	-	-	-	152	9	1	43%	3	10	-	FF	A
-	-	-	-	-	-	-	159	10	1	52%	17	7	-	FF	A
Observações															
															
LEGENDA															

Fonte: Autor.

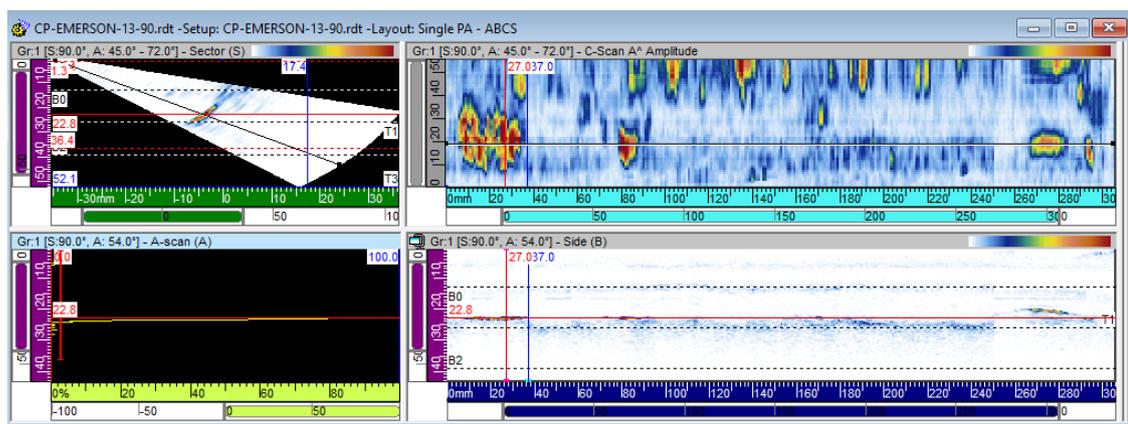
Figura 54 - Resultado do US *Phased Array* do CP-02 / Rel. APEIRON N° PA-CP2.18 P. 2/7.

		REGISTRO DE INSPEÇÃO ULTRASSOM PHASED ARRAY - OMNISCAN				N° PA-CP2.18										
				Data 11/11/19	Folha 02/07											
OS / Cliente:		ÉMERSON MOTA		TAG:		CP2										
Serviço:		INSPEÇÃO DE SOLDA		Desenho:		NA										
Local do Ensaio:		OFICINA - APEIRON		Fabricante:		MKS										
Dados Técnicos																
Metal Base:		A 304		Procedimento de Soldagem:		NA										
Metal Adição:				Cond. Superficial:		ESCOVADA										
Diâmetro / Espessura:		CH/ 13,0mm		Acoplante:		METIL CELULOSE										
Norma de Referência:		ANSI B31.3		Proc. Insp.:		IT-GT-US-013										
Bloco de Ref. / N° Série:		20 MM (INOX)		Aparelho / N° Série:		OLYMPUS OMNISCAN MX- 100255										
Calibração																
Modelo	N° Serie / Grupo	GP	PT	GV	POSIÇÃO / ÂNGULO											
MSEB4	54067	41	0		1-2 / 0°											
5CCEV35-16 – SA15N60S	HLB 678	44	0		SK 90/ 45° - 72° EL 1 a EL 16											
5CCEV35-16 – SA15N60S	HLB 678	44	0		SK 270/ 45° - 72° EL 1 a EL 16											
5CCEV35-16 – SA15N60L	HLB 678															
POSIÇÃO		CABEÇOTES														
		CONV.	PA	TOFD												
		1	X	X												
		2	X	X												
5	X	X														
Junta	SPOT		LOCAL		SINEIE		DES CONTINUIDADES									
					R	EA	Local	Desc.	Grupo	Ganho	Comp.	Prof.	Alt.	Tipo	Laudo	
J-01	-	-	-	-	-	-	160	11	1	34%	3	1	-	FF	A	
-	-	-	-	-	-	-	202	12	1	31%	3	1	-	PO	A	
-	-	-	-	-	-	-	212	13	1	>100	6	12	-	FF	R	
-	-	-	-	-	-	-	263	14	1	50%	27	10	-	FF	A	
-	-	-	-	-	-	-	292	15	1	68%	3	1	-	FF	A	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Observações																

Fonte: Autor.

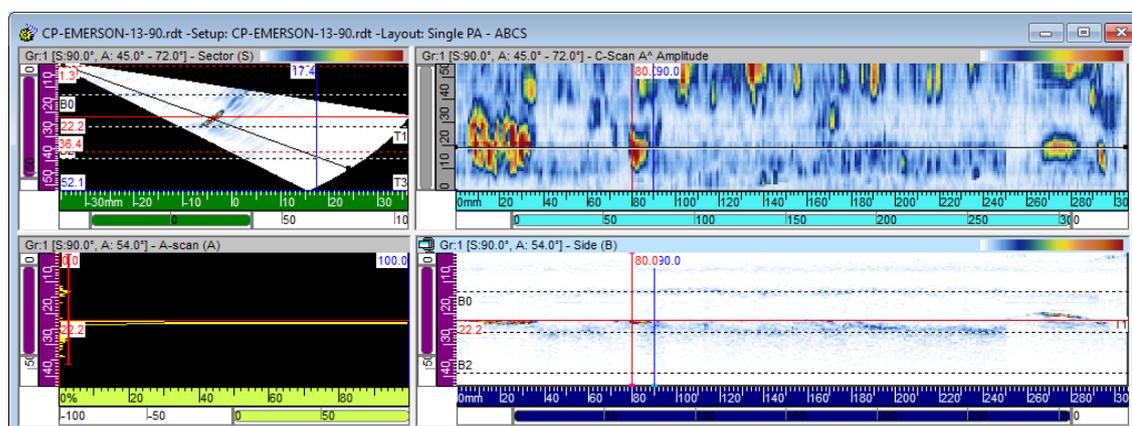
As Figuras 55 a 58 mostram as imagens do *Phased Array* referentes aos defeitos detectados no CP-02, pontos 1, 5, 6 e 13, respectivamente, das Figuras 53 e 54 acima.

Figura 55 - Imagens do defeito do ponto 1 do Rel. APEIRON N° PA-CP2.18 ref. ao CP-02.



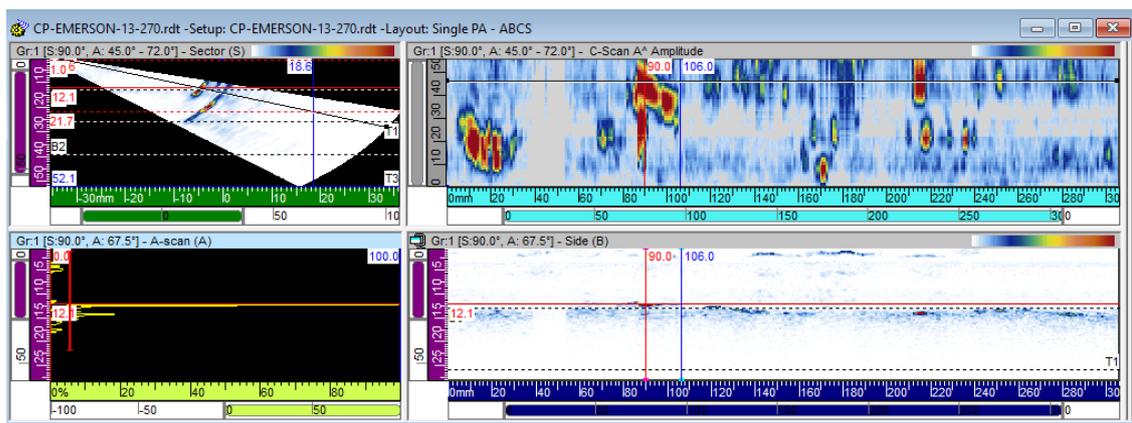
Fonte: Autor.

Figura 56 - Imagens do defeito do ponto 5 do Relatório APEIRON N° PA-CP2.18 ref. ao CP-02.



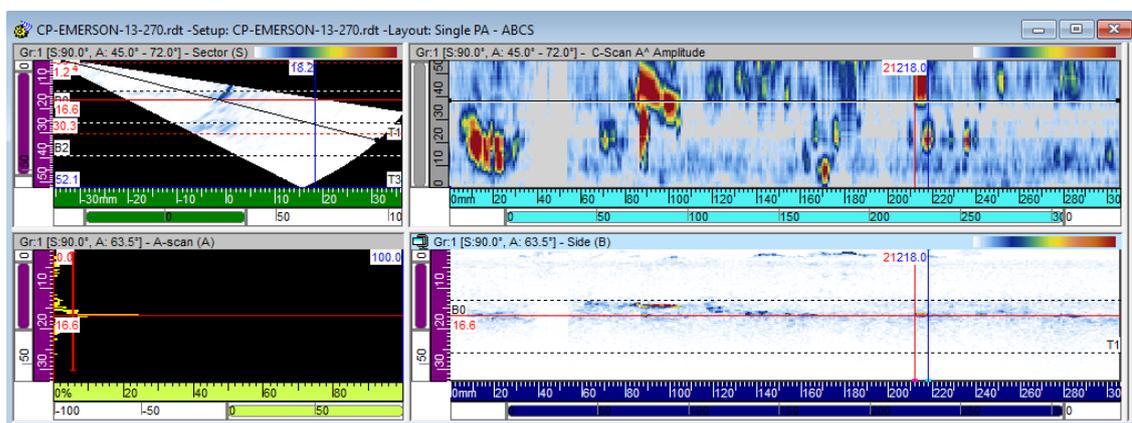
Fonte: Autor.

Figura 57 - Imagens do defeito do ponto 6 do Relatório APEIRON N° PA-CP2.18 ref. ao CP-02.



Fonte: Autor.

Figura 58 - Imagens do defeito do ponto 13 do Relatório APEIRON N° PA-CP2.18 ref. ao CP-02.



Fonte: Autor.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

A Tabela 25 e as Figuras 59 e 60 trazem os resultados dos ensaios realizados de gamagrafia, ultrassom convencional e ultrassom *Phased Array* na solda das chapas de 1/4" (6,35 mm) e de 1/2" (12,7 mm), respectivamente, reunidos em uma só tabela e em apenas um desenho, cada, para permitir uma visualização comparativa das descontinuidades detectadas através destes END's.

O objetivo final de qualquer ensaio não destrutivo em juntas soldadas é o de eliminar as descontinuidades reprovadas, de modo que possam garantir a integridade mecânica dos respectivos equipamentos ou tubulações.

A partir dos resultados obtidos nos três ensaios, seguindo este objetivo, e considerando que, se duas descontinuidades, ainda que aprovadas, estejam separadas por uma

distância menor que a maior descontinuidade, passariam de aprovadas para reprovadas, então, os reparos indicados pelos laudos dariam uma confiabilidade da junta soldada de aproximadamente 90%, conforme citado neste capítulo. Em se tratando de metal de solda austenítico, as diferenças ocorrem devido à atenuação ultrassônica característica da zona fundida da solda austenítica.

É importante registrar que os resultados do US convencional e do *Phased Array* obtiveram boa detectabilidade, com maior sensibilidade para detecção de descontinuidades que a gamagrafia.

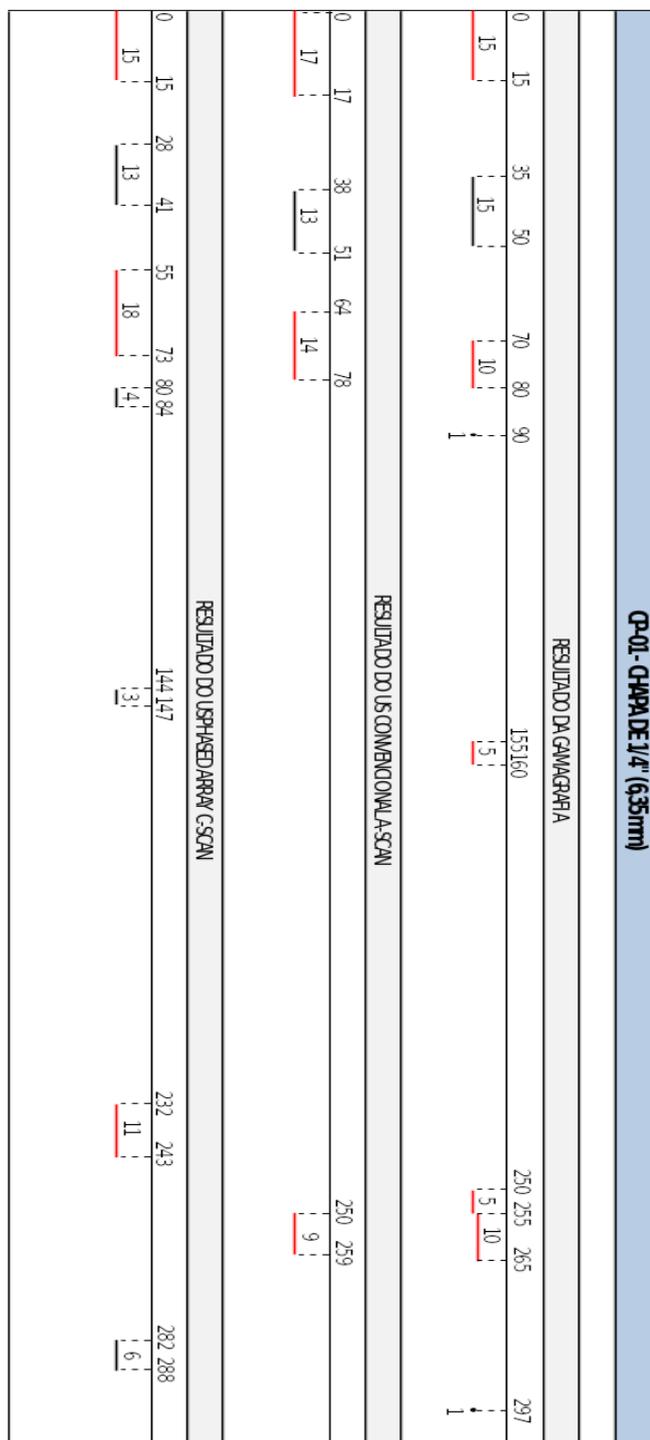
Aparentemente, percebe-se uma defasagem da gamagrafia para os ensaios de ultrassom em duas descontinuidades da solda do CP-01, porém, ocorre apenas nestes pontos, não se repetindo para os demais. Isto afasta a possibilidade desta condição.

Tabela 25- Resultados do ensaio da gamagrafia, do US convencional e do US *Phased Array*

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GAMAGRAFIA E DE ULTRASSOM									
CP	ESPES. DA CHAPA (mm)	DIMENSÕES DA CHAPA (mm)	TIPO DE DEFEITO	GAMAGRAFIA		US CONVENCIONAL		US PHASED ARRAY	
				POSIÇÃO (EXTENSÃO)	LAUDO	POSIÇÃO (EXTENSÃO)	LAUDO	POSIÇÃO (EXTENSÃO)	LAUDO
01	1/4"	250 x 300	FF	0 - 15 (15)	R	0 - 17 (17)	R	0 - 15 (15)	R
			MO	35 - 50 (15)	A	38 - 51 (13)	A	28 - 41 (13)	A
			FP	70 - 80 (10)	R	64 - 78 (14)	R	55 - 73 (18)	R
			PO	90 - 91 (1)	A			80 - 84 (4)	A
			PO	155 - 200 (5)	R			144 - 147 (3)	A
			TR	250 - 255 (5)	R	250 - 259 (9)	R	232 - 243 (11)	R
			FP	255 - 265 (10)	R				
			PO	297 - 298 (1)	A			282 - 288 (6)	A
02	1/2"	250 x 300	PO	13 - 35 (22)	R	8 - 40 (32)	R	6 - 37 (31)	R
			FF					30 - 37 (7)	A
			PO					61 - 66 (5)	A
			FP	70 - 122 (52)	R	67 - 102 (35)	A	68 - 87 (19)	A
			PO					79 - 90 (11)	R
			FF					82 - 106 (24)	R
			PO					115 - 119 (4)	A
			FF			125 - 138 (13)	A	133 - 137 (4)	A
			FF	141 - 150 (9)	R				
			FF					152 - 155 (3)	A
			FF					159 - 176 (17)	A
			FF					160 - 163 (3)	A
			PO	168 - 182 (14)	A				
			FF		R	195 - 223 (28)	A		
			PO					202 - 205 (3)	A
			FF	215 - 225 (10)	R	210 - 216 (6)	A	212 - 218 (6)	R
FF			220 - 232 (12)	A					
PO	250 - 251 (1)								

Fonte: Autor.

Figura 59 - Quadro esquemático com os resultados dos END's realizados no CP-01 (1/4").



Fonte: Autor.

OBS: todas as cotas acima estão em unidade de milímetro (mm).

4.3.1 Análise comparativa dos resultados para a chapa de 1/4" (6,35 mm)

4.3.1.1 US A-Scan x gamagrafia para a chapa de 1/4" (6,35 mm)

O resultado do US *A-Scan* está semelhante ao da gamagrafia, de modo que as respectivas máscaras para os reparos seriam coincidentes, exceto para 3 poros situados entre 155 e 160 mm do ponto zero do filme que, pela gamagrafia está reprovado, e não foi detectado pelo US convencional *A-Scan*. Pegando-se a extensão acumulada das descontinuidades da gamagrafia de 62 mm como referência, o exame *A-Scan* foi de 85,5% deste total, ou 53 mm.

A detectabilidade do US *A-Scan* ficou em 88,9% da gamagrafia, se considerado apenas os defeitos, quando a gamagrafia detectou uma extensão acumulada de 45 mm de defeitos e o *A-Scan*, de 40 mm. Ao passo que os poros não detectados no *A-Scan* possuem uma extensão de 5 mm que, se calculado sobre os 62 mm, daria uma detectabilidade de 92% do *A-Scan*, uma vez que todos os demais foram detectados.

4.3.1.2 US *Phased Array* x gamagrafia para a chapa de 1/4" (6,35 mm)

O resultado do US PA também confere com o da gamagrafia, de modo que as respectivas máscaras para os reparos seriam coincidentes. Em relação aos 3 poros situados entre 155 e 160 mm do ponto zero do filme e reprovados pela gamagrafia, o US PA detectou uma descontinuidade com extensão de 3 mm, entre os pontos 144 a 147, portanto, distinta da porosidade. Pegando-se a extensão acumulada das descontinuidades da gamagrafia de 62 mm como referência, o exame de US por *Phased Array* identificou 70 mm de descontinuidades somadas, o que representa um acréscimo de 12,9% sobre o total detectado pela gamagrafia.

A detectabilidade do US PA ficou em 97,8% da gamagrafia, se considerado apenas os defeitos, quando a gamagrafia detectou uma extensão linear acumulada de 45 mm de defeitos e o PA, de 44 mm.

A Tabela 26 mostra os resultados finais dos ensaios de US tomando-se como base os resultados de gamagrafia do CP-01.

Tabela 26- Quadro resumo dos resultados dos ensaios de US em relação à gamagrafia do CP-01

DETECTABILIDADE DOS ENSAIOS DE US EM RELAÇÃO AO DA GAMAGRAFIA		
ITEM AVALIADO	CP-01	
	DEFEITOS	DESCONTINUIDADES
US CONVENCIONAL	88,9%	92,0%
US PHASED ARRAY	97,8%	112,9%

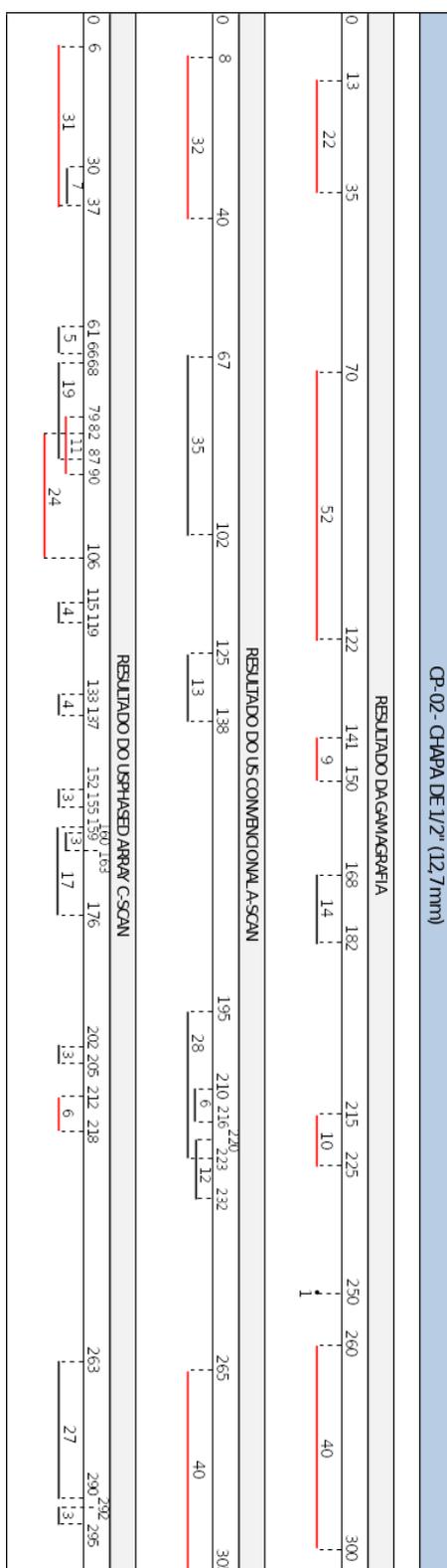
Fonte: Autor.

O comparativo entre as técnicas do US pode ser deduzida dos itens anteriores, onde cada uma foi comparada com a gamagrafia.

4.3.1.3 Análise comparativa dos resultados para a chapa de 1/2" (12,7 mm)

A Figura 60 traz os resultados dos ensaios realizados de gamagrafia, ultrassom convencional e ultrassom *Phased Array* na solda da chapa de 1/2" (12,7 mm), reunidos em um só desenho, para permitir uma visualização comparativa das descontinuidades detectadas através destes END's.

Figura 60 - Quadro esquemático com os resultados dos END's realizados no CP-02 (1/2").



OBS: todas as cotas acima estão em unidade de milímetro (mm).

Fonte: Autor.

4.3.1.4 US A-Scan x gamagrafia para a chapa de 1/2" (12,7 mm)

O resultado do US *A-Scan* diverge do da gamagrafia, sob o aspecto de aprovação/reprovação, uma vez que todas as descontinuidades detectadas pela gamagrafia, também o foram pelo US *A-Scan*, ainda que não coincidentes.

Dessa forma, pelo critério da descontinuidade, as respectivas máscaras para os reparos teriam resultados próximos, diferindo em apenas uma descontinuidade de 14 mm de extensão, situada entre os pontos 168 mm e 182 mm, anotada pela gamagrafia e não identificada no *A-Scan*. Pegando-se o comprimento linear acumulado das descontinuidades da gamagrafia de 148 mm como referência, o exame *A-Scan* foi de 12,1% acima deste total, ou seja, de 166 mm.

A reprovação do US *A-Scan* ficou em 54,1% da gamagrafia, se considerado apenas os defeitos, quando a gamagrafia detectou uma extensão acumulada de 133 mm de defeitos e o *A-Scan*, de 72 mm. Contudo, a solda incompleta na raiz – posição 70 a 152 da máscara – foi laudada no ensaio de gamagrafia como falta de penetração e no relatório do US convencional *A-Scan* – posição 67 a 102 – foi detectada apenas como descontinuidade, já que o critério de aprovação/reprovação tenha sido prejudicado pela curva de referência, na qual não houve a compensação em decibéis (dB) referente à perda de sinal ultrassônico decorrente da atenuação de 6 a 12 dB, detectada no metal de solda. O novo cálculo da detectabilidade com a correção da curva é de 93,2%, com base no resultado da gamagrafia.

4.3.1.5 US *Phased Array* x gamagrafia para a chapa de 1/2" (12,7 mm)

Embora o exame de US PA no CP-02 tenha detectado quinze descontinuidades com extensão linear total de 167 mm e a gamagrafia, apenas 133 mm, os resultados foram similares, de modo que as respectivas máscaras para os reparos seriam convergentes, exceto uma FF (falta de fusão) observada pela gamagrafia de 9 mm de comprimento, localizada entre os pontos 141 e 150 do filme, e não indicada pelo *Phased Array*.

Em relação à quantidade de desvios registrados no fundo de eco do US PA ter sido mais que o dobro da gamagrafia (15 a 7), há uma sobreposição das extensões e localizações, como pode ser visto na Figura 60 acima, o que confere uma confiabilidade de ambos as técnicas de avaliação da eficiência da junta soldada.

Pegando-se a extensão acumulada das discontinuidades da gamagrafia de 148 mm como referência, o exame de US por *Phased Array* anotou 167 mm de discontinuidades somadas, o que representa um acréscimo de 12,8% sobre o total detectado pela gamagrafia. Os números percentuais de detectabilidade em relação à gamagrafia são os mesmos do *A-Scan*, uma vez que o comprimento linear acumulado de ambos é de 72 mm. Assim, se calculado para todos os defeitos laudados pela gamagrafia, têm-se os mesmos 54,1% de detectabilidade (72/133) do *A-Scan*, mas se recalculado considerando a correção da curva, este número sobe para 94,7% de detectabilidade. Isso se deve ao fato da curva de referência do US PA ter sido limitada ao bloco laminado padrão normativo, que não representa uma condição de campo, quando se trata de zona fundida (metal de solda), com picos de variação que chegam até 12 dB. Na verdade, essa mesma perda deveria ser acrescentada ao ganho de varredura para, nesta condição, as discontinuidades serem reprovadas.

A Tabela 27 mostra os resultados finais dos ensaios de US tomando-se como base os resultados de gamagrafia do CP-01.

Tabela 27- Quadro resumo dos resultados dos ensaios de US em relação à gamagrafia do CP-02

DETECTABILIDADE DOS ENSAIOS DE US EM RELAÇÃO AO DE GAMAGRAFIA		
ITEM AVALIADO	CP-02	
	DEFEITOS	DESCONTINUIDADES
US CONVENCIONAL	93,2%	112,1%
US PHASED ARRAY	94,7%	112,8%

Fonte: Autor.

O comparativo entre as técnicas do US de *A-Scan* e *Phased Array* pode ser deduzida dos itens anteriores, quando cada uma foi comparada com a gamagrafia, isoladamente.

4.4 GESTÃO TECNOLÓGICA

As vantagens da prática do ultrassom em relação à gamagrafia – elencadas no item 1.2 *Justificativa* – são motivos suficientes para um estudo aprofundado de cada benefício citado, de modo a justificar uma mudança de prática, alterando-se a rotina da gamagrafia para

o ultrassom, ainda mais quando se trata da saúde das pessoas. Seguem os principais aspectos destes ensaios, que merecem maior dedicação para uma análise posterior.

4.4.1 Saúde do trabalhador

Diferente da gamagrafia, o ultrassom não traz risco à saúde do trabalhador, de modo que o profissional qualificado no ultrassom manuseia o aparelho e acessórios sem a necessidade de EPI's especiais ou EPE's (Equipamento de Proteção Especial), mas apenas os exigidos normalmente pela empresa onde esteja sendo realizado o ensaio. Do mesmo modo, qualquer pessoa pode acompanhar a realização do ensaio sem cuidado especial algum.

4.4.2 Efeitos biológicos da radiação ionizante

- Efeito Não-Estocástico ou Determinístico: este tipo está relacionado à morte de células e fatalmente ocorrerá acima de uma determinada dose de radiação;
- Efeito Estocástico ou Probabilístico: pode-se prever quantas pessoas (não quais pessoas) expostas à radiação com uma determinada dose irão morrer devido a câncer radioinduzido.

A probabilidade de ocorrer o câncer é proporcional à dose de radiação recebida, ao passo que a gravidade do câncer não possui relação com a dose.

No acidente com a fonte radioativa de Césio 137, ocorrido em Goiânia em 1987, mais de seis mil pessoas foram atingidas pela radiação, o CNEN já monitorou 112.800 pessoas e, infelizmente, 60 pessoas morreram em decorrência do mesmo (OKUNO, 2013).

4.4.3 Improdutividade, custos e perdas de produção/faturamento

Na duplicação da capacidade produtiva da planta industrial de uma empresa petroquímica de grande porte, foram pré-fabricadas 2.000 toneladas de spools de tubulações de aço inoxidável austenítico 304L. A parada geral de manutenção da planta existente, para a interligação desta com a nova, contou com a participação de 5.000 homens no total e teve uma duração de 40 dias, entre parada e partida da planta, sendo 20 destes, de gamagrafia no período das 0h às 6h, reduzindo, assim o regime de trabalho de dois turnos 12 h x 12 h (nesta ocasião, era uma prática usual permitida) para dois turnos de 8h x 8h. Em uma conta rápida e direta, foram acrescidos no cronograma 5 (cinco) dias por conta da gamagrafia, o que, se

valorado na realidade de mercado, significaria uma perda de produção na ordem de grandeza de dezena de milhões de reais e um acréscimo da mobilização de toda a mão-de-obra temporária, contratada especificamente para este evento, o que representaria um custo da ordem de milhões de reais.

A gamagrafia é uma prática frequente em turnos da noite durante paradas de manutenção, obras de montagem ou mesmo na rotina diária da manutenção, o que representa perda de produtividade e, por conseguinte, perda de produção de produtos químicos e/ou petroquímicos, onde cada caso é um caso.

Outro exemplo atual é uma parada de manutenção de 30 dias de duração, que ocorreu entre novembro e dezembro/2019, onde os ensaios de gamagrafia foram realizados no horário das 4h às 7h. Considerando apenas 10 diárias de gamagrafia e que esta parada contou com a presença de 6.000 homens, este fato teria causado um impacto de 3 dias no prazo final da parada, com reflexos no custo de mobilização do Hh da parada a maior e o faturamento da empresa petroquímica (contratante dos serviços) a menor. A Tabela 28 exhibe o comparativo entre os ensaios de ultrassom e o de *Phased Array* sob o aspecto de gestão, no que se refere à improdutividade, custos e perda de produção/faturamento.

Tabela 28 - Quadro comparativo de improdutividade, custos e perda de faturamento

COMPARATIVO DE CUSTOS DIRETOS, IMPRODUTIVIDADE E PRODUÇÃO/FATURAMENTO		
ITEM AVALIADO	GAMAGRAFIA	US
PARALIZAÇÃO DE OUTROS SERVIÇOS	TOTAL	NÃO
REDUÇÃO DE JORNADA DE TRABALHO	SIM	NÃO
AUMENTO DE PRAZO TOTAL	SIM (3 DIAS)	NÃO
INCREMENTO DO CUSTO DIRETO DA MOD/MOI	7,65 MR\$	NÃO
PERDA DE PRODUÇÃO (FATURAMENTO)	8,40 MR\$	NÃO

Fonte: Autor.

4.4.4 Complexidade para a realização do ensaio de gamagrafia

Outra desvantagem relevante da prática da gamagrafia reside na sua complexidade. Enquanto para a realização do exame de ultrassom em uma unidade industrial, bastam a PT (Permissão de Trabalho, conforme o procedimento local) e a qualificação do Inspetor, ao passo que, para a primeira, além destas, mais a assinatura de aprovação do Supervisor de Radioproteção, qualificado pelo CNEN, a barricada, o mapa de proteção com o desenho da planta baixa, o raio de isolamento calculado, o informe para os órgãos internos da empresa e externo, caso o raio extrapole as cercas da empresa, enfim, uma série de requisitos normativos e procedimentais que tornam a gamagrafia uma atividade mais complexa em relação ao ultrassom.

Estes itens acima são requisitos diretos para a realização do ensaio, por trás deles existem outros que são o transporte, manuseio e armazenamento das fontes radioativas, o controle da radiação acumulada recebida pelo Operador, o monitoramento das atividades das fontes pelo CNEN.

4.4.5 Liberação da Operação (PT) para a realização do ensaio

Existem situações nas quais não é possível a realização do ensaio de gamagrafia, como instrumentos de controle (automação) que possam tripar a unidade industrial caso sejam expostos à radioatividades, alguma atividade contínua que esteja no raio de isolamento e que não possa ser interrompida, a exemplo da sala de controle de unidade que esteja operando, atingimento da radiação em via pública cuja interdição não seja viável e outras situações de impedimento da gamagrafia.

Este cenário implica em não conformidade de inspeção, cujo relatório terá que ser assinado pelo Profissional Habilitado (PH) da Planta, por ter deixado de cumprir o plano de inspeção do projeto, se for relativo a equipamentos ou do pipe-spec, para tubulações. Qualquer não conformidade pode comprometer a empresa quanto a certificações, como as de gestão integrada (ISO 9000, ISSO 14000) e a própria apólice de seguro, o que, certamente a torna indesejável.

4.4.6 Laudos

A agilidade no laudo é outro fator importante. O do US *Phased Array* é on-line com imagens digitais e registro definitivo para arquivamento, ao passo que os resultados do ensaio de gamagrafia ainda são do tipo revelação em água, em local próprio da empresa executante, o que demora de 3 a 4 horas.

Outro aspecto relevante é o registro do laudo que, em gamagrafia convencional é em filme físico, o que não torna prático o seu arquivamento. Um exemplo prático ocorreu em 2019, quando uma empresa multinacional de grande porte precisou dos laudos das gamagrafias realizadas em 1999 de uma dutovia para um novo contrato de fornecimento do fluido em questão, porém não logrou êxito pleno, por extravio ou perda de parte dos filmes físicos (nome e detalhes da Empresa mantidos sob confidencialidade), o que causou a perda das condições iniciais da integridade mecânica das juntas soldadas.

O fato de não dispor do histórico do controle de qualidade das juntas soldadas pode representar um problema a mais em caso de sinistros, uma vez que existem comunidades que habitam sobre esta dutovia *underground*. Perde-se a rastreabilidade para qualquer necessidade investigativa.

5 CONCLUSÃO

É fato que o metal de solda em aço inoxidável austenítico possui características físicas e metalúrgicas peculiares que não favorecem o exame através da técnica de ultrassom, como a anisotropia, o tamanho do grão pela presença de ferrita e a formação de carbonetos de cromo pelo fenômeno da sensitização, principalmente. Estudos realizados comprovam esta condição desfavorável ao US em soldas austeníticas e pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de aprimorar a detectabilidade, considerando-se este contexto.

As soldas foram executadas à luz das normas e práticas recomendadas de soldagem, no que se refere ao (i) plano de inspeção praticado, com exame visual e LP; (ii) qualificações dos profissionais (Soldador e Inspetores); (iii) qualificação do procedimento de solda e (iv) certificados dos materiais de aplicação (chapas) e consumíveis de solda.

A gamagrafia foi realizada em duas etapas para os dois corpos de prova, a primeira com filmes Classe II e a última com Classe I, cuja granulação é mais fina, o tempo de exposição é maior, a qualidade da imagem e a detectabilidade são melhores.

O ultrassom, por sua vez, foi realizado em chapas com espessuras de 6,35 mm (1/4") e 12,7 mm (1/2"), considerando que as espessuras tanto dos equipamentos estáticos, quanto das tubulações de condução utilizados nas indústrias de óleo e gás, petroquímica e química estão, em geral, abaixo de 12,7 mm, o que daria uma boa base para a qualificação do procedimento com larga abrangência de aplicação prática. Independente, fica a observação importante que todos os resultados e conclusões deste trabalho são válidas apenas para espessura de até 1/2" (12,7 mm).

Foram observadas algumas divergências quanto ao critério de aprovação ou reprovação das descontinuidades e uma causa relevante disto é atribuído ao bloco padrão normativo utilizado para traçagem das curvas de referência, no qual os três furos encontram-se todos no metal de base. Nesta condição, não há perdas de atenuação sônica, exceto pela distância percorrida. Ao contrário dos ensaios realizados no campo, onde o que se deseja examinar é justamente a eficiência das juntas soldadas.

De forma experimental, posicionando-se os cabeçotes de maneira que o feixe sônico varresse a zona fundida da solda, o resultado foi uma variação da perda entre 6 dB a 12 dB ao longo da extensão da solda. Dessa forma, na realização das inspeções de campo, a curva de referência, que representa o primeiro critério de reprovação das descontinuidades, não é

compensada como deveria e, nesta condição, a perda não excede o 100% da curva, o que faz com que defeitos sejam aprovados.

Ainda sobre a curva de referência, por outro lado, em se tratando de metal de solda de material austenítico, as perdas podem variar em função da microestrutura da mesma, e, neste caso, fica a questão do quanto compensar de perda para ajuste desta curva.

Quanto aos ensaios de *Phased Array* com ondas longitudinais, os resultados obtidos foram consistentes com os realizados com ondas transversais, tanto para o corpo de prova de 1/4" quanto para o de 1/2". Diante deste fato, para chapas com espessuras de até 1/2" torna-se desnecessário o Hh para a remoção da solda do reforço, também conhecida por cobertura da solda.

Um ponto positivo deste trabalho foi a boa detectabilidade das descontinuidades superficiais e subsuperficiais com o US por *Phased Array* e ondas transversais, através da reflexão das mesmas.

Ao final, pode-se correlacionar os resultados obtidos do ultrassom pela técnica do *Phased Array* com as peculiaridades do austenítico referentes à atenuação, quando a curva de referência do bloco padrão contempla apenas o metal de base laminado, o que denota uma inconsistência com a prática de campo ou de oficina, porque o objetivo deste tipo de ensaio de inspeção, neste contexto, é justamente avaliar a eficiência das juntas soldadas.

Aqui não se buscou trabalhar com variáveis de solda para melhores microestruturas e menores números de ferrita ou minimizar os efeitos da sensitização, nem mesmo analisar os efeitos da velocidade sônica ou as atenuações encontradas, mas, a partir deste trabalho, restrito a apenas dois corpos de prova, onde foram comparadas as técnicas de gamagrafia com as de ultrassom, de maneira similar ao que é praticada na indústria, pode-se afirmar que os resultados excederam as previsões, com resultados satisfatórios e até superiores, quando o ensaio com o *Phased Array* obteve 97,8% e 88,9%, para as chapas com espessura de 1/4" e de 1/2", respectivamente, se considerado apenas os defeitos e de 12,9% e 12,8% a maior, se consideradas todas as descontinuidades detectadas.

6 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho de pesquisa foi conclusivo para o que foi proposto, mas, para uma mudança de cultura que envolva diretamente a integridade mecânica dos equipamentos e, também, a saúde das pessoas, são necessárias novas atividades para que a questão focal seja plenamente respondida. Ficam elencadas algumas sugestões para os trabalhos futuros:

- Estudo comparativo detalhado entre a gamagrafia e o US *Phased Array* quanto aos riscos à saúde das pessoas;
- Determinação do POD do US *Phased Array* para juntas soldadas em aços inoxidáveis austeníticos;
- Estudo para determinação da compensação da perda por atenuação sônica considerando a zona fundida (metal de solda), com a utilização de bloco padrão customizado e permitido por norma;
- Aferir as descontinuidades detectadas nos laudos do ultrassom e da gamagrafia sobre os mesmos corpos de prova, através de ensaios destrutivos;
- Ampliar a faixa da espessura dos corpos de prova, tanto para menor que 1/4" (6,35 mm), quanto para maior que 1/2" (12,7 mm);
- Análise comparativa dos custos diretos e indiretos da gamagrafia com o ultrassom *Phased Array*;
- Explorar comparativamente os demais aspectos de gestão citados neste trabalho, como prazos de execução e lucros cessantes, complexidade da execução das atividades em si, improdutividade pelo isolamento da área e liberação para a realização dos ensaios de inspeção.

REFERÊNCIAS

ASME. **ASME Section II, part C - specifications for welding rods electrodes and filler metals**. New York: ASME, 2019.

ASME. **ASME B31.3 - code for process piping**–New York: ASME, 2016.

ASME. **ASME Section V - nondestructive examination**. New York: ASME, 2013.

ASME. **ASME Section II, part D - properties of materials**:. New York: ASME, 2017.

ASME. **ASME Section VIII division 1 - rules for construction of pressure vessels**. New York: ASME, 2015.

ASME. **ASME Section IX - welding and brazing qualification**: New York: ASME, 2019.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom, Aplicação Industrial**. São Paulo: ABENDI, 2014.

ANDREUCCI, R. **Radiologia Industrial, guia prático**. São Paulo: ABENDI, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO (ABENDI). A evolução da radiografia, **Revista ABENDI**, v. 84, Ano IX, Abr.2018.

CHASSIGNOLE, B.; EGUERJOURA, R.; PLOIX, M. –A.; FOUQUET, T. Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing. **NDT & International**. v.43, n. 4, p. 273-282, jun./2010.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7.ed.[S.l.]: ABM, 1996.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Disponível em: <http://www.cnen.gov.br>. Acessado em: out./2019.

COSTA, A.C. **Ensaio por ultrassom com as técnicas convencionais A-Scan e Phased-Array em juntas soldadas dissimilares de aços carbono e aço inoxidável austenítico**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

DRURY, J. C.. **Ultrasonic Flaw Detection for Technicians**, 3.ed. UK: Silvering Ltda.

FARIAS, C.T.T.; OLIVEIRA, T.A.S.; SOBRAL, M.D.C.; OLIVEIRA, M.A.; SANTOS, Y.T.S. **Avaliação de parâmetros ultrassônicos em aços inoxidáveis expostos a ciclos térmicos**. UEPG, 2012.

FERRARESI, V. **Soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos**. [S.l: s.n.], 2013.

FERREIRA,R.F. **Avaliação da técnica de inspeção por ultrassom Phased-Array em juntas soldadas de aço Inoxidável AISI 304L**. 2013. Dissertação (Mestrado) – CEFET. Rio de Janeiro, 2013.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA E SOLDAGEM (FBTS). **Inspetor de soldagem nível 1**. 2014. Disponível em: <http://www.fbts.org.br/>. Acessado em: out./2019.

GARG, H.; SEHGAL, K.; LAMBA, R; KAJA, G. **Advances in industrial and production engineering**. [S.l: s.n], 2019. p. 375-385.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GLOBAL END. **Ultrassom**. 2016.

GUO, Z-C; YAN, S-G; ZHANG, B-X. **Simulation of acoustic fields emitted by ultrasonic Phased Array in austenitic weld**. Chinese Physics B, 2019.

HARRY, B.; HONEYCOMB, R. **Steels: microstructure and properties**, 4.ed. USA, 2017.

INTERMET. <http://intermetro.com.br/produtos/transdutores-e-sapatas-cunhas-para-ultrassom/>. Acessado em: dez./2019.

ISSF: **International Stainless Steel Fórum**. Disponível em: <http://www.worldstainless.org/>. WEB. Acessado em: set./2019.

KADO, K.; UEDA, S.; TOKITA S.; INOUEA H. Effect of mc carbide formation on weld solidification cracking susceptibility of austenitic stainless steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 828, 2020.

KESSAL, B. A.; MELIANI, M. H.; ALHUSSEIN, A.; BOULEDROA, O.; FRANÇOIS, M. **Effect of gas tungsten arc welding parameters on the corrosion resistance and the residual stress of heat affected zone**. Engineering Failure Analysis, 2020. V.107.

KUMAR, S.; MENAKA, M.; VENKATRAMAN, B. Simulation and experimental analysis of austenitic stainless steel weld joints using ultrasonic *Phased Array*. **Measurement Science and Technology**, v.31, n.2, 2019.

LOBERTO, T. **Estudo da viabilidade do ensaio de ultrassom na inspeção de juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos AISI 316**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica.) - PUC-PR, Curitiba, 2007.

LUO, C; ZHANG, Y. Effect of printing orientation on anisotropic properties in resistance spot welded 316L stainless steels via selective laser melting. **Material Letters**, v. 254, 2019.

LUZ, T. S. **Influência das variáveis e do processo de soldagem na sensitização dos aços inoxidáveis austeníticos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

METALS HANDBOOK; **Properties and selection. Irons, steels and high performance alloys**, 10.ed. USA: Materials Park, OH, 1990. V1.

MIRANDA, J, **Conceitos básicos do ensaio por ultrassom**. [S.l.: s.n], 2010.

MODENESI, P. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. São Paulo: SENAI, 2014.

- MORESCO, M.. **Dimensionamento e monitoramento de defeitos em tubo soldado de aço inoxidável superduplex pela técnica de ultrassom *Phased Array***. 2017. Dissertação (Mestrado) - UFRGS, Rio Grande do Sul, 2017.
- NONDESTRUCTIVE testing handbook. **Ultrasonic testing.**, 3.ed. [S.l.]: Columbus, 2007. V.7
- OKUNO, E. **Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia: estudos avançados**. [S.l: s.n.], 2013. p. 185-199.
- OLYMPUS. <https://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/phased-array/>. Acessado em: dez./2019.
- OSHIMA, T.; NAGAI, Y.; HATANAKA, H.; YOKOYAMA, M.; ASANO, T.; FUKUSHIMA, N. et al **Application of Ultrasonic Testing for Weld Joints in Stainless Water Gates**. European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT). 12.ed. Sweden: Gothenburg, 2018
- PADILHA, A. F.; GUEDES L. **Aços inoxidáveis austeníticos**, São Paulo: Hemus, 2011.
- PETROBRÁS. N-1594: **ensaio não destrutivo – ultrassom em solda**. 2013.
- PETROBRÁS. N-2315: **execução de ensaio não destrutivo – ultrassom em forjado**, 2016.
- PETROBRÁS. N-2315:**execução de ensaio não destrutivo – ultrassom em fundido**, 2016.
- PETROBRÁS. N-2803: **ensaio não destrutivo – ultrassom computadorizado e mecanizado para inspeção em solda**, 2015.
- POLIEND ensaios não destrutivos. Disponível em: <http://www.poliend.com.br/servicos/ultrassom/>. Acessado em 09/12/2019.
- QUAIS são os limites da audição humana? BIOSOM. Disponível em: <https://biosom.com.br/blog/curiosidades/limites-da-audicao-humana/>. Acessado em set./2019.
- RAHIMI, S.; MARROW, T. J. A new method for predicting susceptibility of austenitic stainless steels to intergranular stress corrosion cracking. **Materials & Design**, v. 187, 2020.
- ROBERTS-AUSTEN, W. C. **An Introduction to the Study of Metallurgy**. Norderstedt (AI): Book on Demand Ltda, 2013.
- SANTIN, J. L. **Ultrassom: técnica e aplicação**. 2. ed. São Cristóvão: Erechim, 2003.
- SANTOS, D.D. **Avaliação da técnica de ultrassom *Phased Array* na inspeção de soldas circunferenciais de inonel® 625 em tubulações de aço API 5L X70 revestidas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) - CEFET, Rio de Janeiro, 2017.
- SCIENCEDIRECT. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acessado em dez./2019.
- SILVA, R. **Radiação**. Rio de Janeiro: CNEN, [s.d.].

SILVA, R. **Radiografia industrial: princípios fundamentais**. Rio de Janeiro: CNEN, [s.d.]

SOMANI, C.A.; LALWANI, D. I. **Experimental study of some mechanical and metallurgical properties of TIG-MIG hybrid welded austenitic stainless steel plates. Materialstoday: Procedure**. [S.l: s.n], 2019.

STEIN, R.M. **Análise e avaliação da técnica de ensaio não-destrutivo ultrassom *Phased Array***. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

TELLES, P. S. **Materiais para equipamentos de processo**. 6.ed. [S.l.]: **Interciência**. 2003.

WELDING HANDBOOK. **Materials and their weldability**, AWS. 6.ed. 1984. V.4.

ANEXOS

ANEXO I – CERTIFICADO CHAPA 0316-2017 (6,3 MM)

Fig. 1/1

Aperam Inox América do Sul S.A.

Sede: Av. Carondelet, nº 1116, 22ª Andar - Centro - Belo Horizonte - MG - 30130-010 - Brasil
 Usina Proza 1ª de Maio, nº 9 - Centro - Três Lagoas - MS - 35600-010 - Brasil
 Filial: Av. Marechal Buarque, nº 1.438 - Distrito Industrial - Curitiba - SP - 13059-750 - Brasil
 Rodovia RSC 454, Km 2,2 - 192 - Distrito Industrial - Caxias do Sul - RS - 96110-000 - Brasil

CERTIFICADO DE QUALIDADE

Número:
Pedido APERAM:
Data:
Nota Fiscal:

1988204
00019801
14/09/2017
683463 ✓

Cliente:
INOXPLASMA COMERCIO DE METAIS LTDA
AV HENRY FORD 50
03109000 - SAO PAULO - SP
BRASIL
Ordem: PC02211/17

Aço: AISI 304 ✓ Acabamento: NRI Produto: CHAPA
 Dimensões: 6,35 mm x 1520 mm x 8000 mm ✓
 Marcação:

Composição Química

Número Corrida	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	N PPM	TI %	Cu %	Co %				
761572G	0,038	1,13✓	0,450✓	0,0330	0,0011✓	17,82✓	8,03✓	0,095	434	0,0022	0,1373	0,181				

Resultados

Ensaio/Variável	Unid. Med	761572G2202C		761572G2201C									
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Lim Resistência	MPa		670,00 ✓		670,00 ✓								
Lim. Escoamento 0,2%	MPa		334,00 ✓		334,00 ✓								
Alongamento	%		52,00		52,00								
Tamanho de Grão			08/08		08/08								
Dureza RB	HRB	85,50 ✓	85,50 ✓	85,50 ✓	85,50 ✓								
Oxalico			APROV		APROV								
Peso Líquido	Kg		4.630		4.630								
Peso Bruto	Kg		4.740		4.740								

Identificação de unidade metálica (U.M.):

Ok

Qualidade superficial / dimensional:

Ok

Tratamento Térmico: Temp.mínima de solubilização 1040 C

Normas:

ASTM A240/A240M 16A

ASTM A480/A480M 16B

Observações:

- Material sem contaminação por Mercúrio.
- Material sem contaminação por radioatividade. (Garantia enquanto estocado sob responsabilidade da Aperam Inox América do Sul S.A.).
- Certificamos que os resultados descritos acima estão corretos e de acordo com a especificação ou concessão autorizada.
- Sistema de Gestão da Qualidade certificado conforme norma ISO 9001 - Certificado ABS QE Nº 30071.
- Sistema de Gestão da Qualidade certificado conforme norma ISO/TS 16949 - Certificado ABS QE Nº 38324.
- Sistema de Gestão Ambiental certificado conforme norma ISO 14001 - Certificado ABS QE Nº 66989.
- Corrida(s) produzida(s) no Brasil.

Paulo Sérgio Ribeiro
 Inspetor Qualificação
 Aperam Inox América do Sul S.A

CONFORME ASME SECCÃO II PARTE A
 EDIÇÃO 2013 PELO INSPECTOR DE
 SOLGAGEM J. Bispo FBTS 150262

DATA: 09/10/17 Ass:
 Antônio Carlos de Jesus
 IS.MI (EQ/NE/UP/BS)
 FBTS 15.0262 5NQC - 5345

ANEXO II – CERTIFICADO CHAPA RIR-0364-2017 (12,7 MM)

ITEM		MATERIAL	NORMA	CORRIDA
1		CHAPA AÇO INOX 304 4,76 X 2000 X 1200MM	ASTM A240	4608081
2		CHAPA AÇO INOX 304 12,70 X 2000 X 1500MM	ASTM A240	3416791
3				
4				
5				
6				
7				
8				

COMPOSIÇÃO QUÍMICA													
ITEM	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Ti	Al	Co	Cu
1	0,044	1,160	0,430	0,029	0,001	18,200	8,000	0,038	455,000	0,035	0,000	0,192	0,069
2	0,045	1,140	0,420	0,034	0,001	18,380	8,000	0,117	631,000	0,000	0,045	0,000	0,145
3													
4													
5													
6													
7													
8													

ENSAIOS							
ITEM	Lim. Resistência	Lim. escoamento	Alongamento %	Estricção %	Hidrostático	Achatamento	Dureza
1	703MPA	390MPA	52,00				90HRB
2	630MPA	317MPA	58,00				83HRB
3							
4							
5							
6							
7							
8							

ITEM		OBSERVAÇÕES
1		VISUAL E DIMENSIONAL OK
2		VISUAL E DIMENSIONAL OK
3		
4		
5		
6		
7		
8		

RIR-0364/2017

CONFORME ASME SECÇÃO II PARTE A
 EDIÇÃO 2017 PELO INSPECTOR DE
 SOLGAGEM _____ FBTS IS. _____

DATA: 09/10/17 Ass.: _____

Luiz Eduardo Cardoso Oliveira
 Engenheiro Mecânico
 CREA/BA 79404

echins

 CONTROLE DE QUALIDADE

ANEXO III – RELATÓRIO EVS 001-2019

		RELATÓRIO DE ENSAIO VISUAL			Nº: 0001/2019				
					OP: -	DATA	PÁGINA		
		19/09/2018		1/1					
OS/Cliente: 999.01.20 / EMERSON MOTA				Contrato: -					
Serviço: Projeto de US p/ Solda em Inox Austenítico - PUSSIA									
Identificação da Peça Examinada: CP-01 (300 X 400 mm) / CP-02 (300 X 400 mm) / CP-03 (730 X 400 mm)									
DADOS DO ENSAIO									
Norma/Critério de Aceitação: ASME VIII Div.1 Ed.2017				Procedimento/Rev.: PR-08-0014 / REV.00					
Metal de Base: ASTM A 240 TP 304		EPS/IEIS: TG-0012-AI		Metal de Adição: ER-308L					
Estado da Superfície: ESCOVAADA			Iluminação: NATURAL		Método: DIRETO				
CROQUIS									
									
RESULTADOS DO ENSAIO									
Item	Identificação da Solda	Junta Nº	Descontinuidade			Metal de Base B1 - B2	Sinete Soldador	Laudo	Observação
			Tipo	Posição	Tamanho				
01	CP-01 (300 X 400 mm)	1	-	-	-	ASTM A 240 TP 304	01	A	-
02	CP-02 (300 X 400 mm)	1	-	-	-	ASTM A 240 TP 304	01	A	-
03	CP-03 (730 X 400 mm)	1	-	-	-	ASTM A 240 TP 304	01	A	-
04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
06	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07	-	-	-	-	-	-	-	-	-
08	-	-	-	-	-	-	-	-	-
09	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
INSTRUMENTOS UTILIZADOS				OBSERVAÇÕES					
Instrumento	TAG	Nº Certificado	Validade						
Hilo:	HILO-001-0089	71886/19	26/04/2020						
Calibre de Solda:	0001-0097	43167/19	11/03/2020						
Luxímetro:	LUXI-002-0001	806H	05/01/2020						
Paquímetro:	-	-	-						
Trena:	TR-179	57101/19	03/04/2020						
A - Aprovado		IT - Inclusão de Tungstênio		MO - Mordedura		FF - Falta de Fusão			
R - Reprovado		FP - Falta de Penetração		TT - Trinca Transversal		REC - Recomendação Exame Complementar			
PO - Porosidade		CO - Concavidade		TL - Trinca Longitudinal					
CONTROLE DA QUALIDADE			LIDERANÇA			CLIENTE			
 Jan Paulo de Jesus Sousa Inspetor de Soldagem FBTS IS-6366 N1			 Venício da Silva Acherman Inspetor de Equipamentos - CREA-BA 90005						
DATA: 19 / 09 / 2018			DATA: 19 / 09 / 2018			DATA:			

ANEXO IV – RELATÓRIO LP 001-2019

		RELATÓRIO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO LÍQUIDO PENETRANTE			Nº: 0001/2019					
					OP: -					
		DATA	PÁGINA							
		19/09/2018	1/1							
OS/Ciente: 999.01.20 / EMERSON MOTA				Contrato: -						
Serviço: Projeto de US p/ Solda em Inox Austenítico - PUSSIA				Equipamento: CORPOS DE PROVA						
Local do Ensaio: CP-01 (300 X 400 mm) / CP-02 (300 X 400 mm) / CP-03 (730 X 400 mm)				Desenho: -						
Norma de Referência/Rev.: ASME V Ed.2017				Procedimento/Rev.: PR-08-015 REV. 00						
Critério de Avaliação: ASME VIII Div.1 Ed.2017				Material/Espessura: ASTM A 240 TP 304 / 6,3 mm e 12,7 mm						
Condição Superficial: ESCOVADAS				Equipamento de Iluminação: NATURAL						
Produto:	SOLVENTE	PENETRANTE	REMOVEDOR	REVELADOR						
Fabricante:	METAL-CHEK	METAL-CHEK	AGUA	METAL-CHEK						
Referência Comercial:	E 59	VP 30	-	D 70						
Lote:	26112	20108	-	LT-180064						
Data Fabricação:	20/12/2017	19/12/2017	-	25/01/2018						
CROQUIS / ANOTAÇÕES										
										
RESULTADOS DO EXAME										
Item	Identificação da Solda	Junta Nº	Descontinuidade			Metal de Base B1 - B2	Sinete Soldador	Laudos	Observação	
			Tipo	Posição	Tamanho					
01	CP-01 (300 X 400 mm)	1	-	-	-	ASTM A 240 TP 304	S-01	A	-	
02	CP-02 (300 X 400 mm)	1	-	-	-	ASTM A 240 TP 304	S-01	A	-	
03	CP-03 (730 X 400 mm)	1	-	-	-	ASTM A 240 TP 304	S-01	A	-	
04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ensaio Executado: <input checked="" type="checkbox"/> Após fabricação <input type="checkbox"/> Antes do tratamento térmico <input type="checkbox"/> Após tratamento térmico										
Laudos Final: <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO <input type="checkbox"/> REPROVADO <input type="checkbox"/> EXAME COMPLEMENTAR							INSTRUMENTO	TAG	VALIDADE	
LEGENDA							Luxímetro:	LUXI-002-0001	05/01/2020	
A - Aprovado	MO - Mordedura	TR - Trinca Ramificada					Trena:	TR-179	03/04/2020	
R - Reprovado	TT - Trinca Transversal	SP - Sobreposição					Med. Temperatura	550-0004	03/03/2020	
FP - Falta de Penetração	TL - Trinca Longitudinal	REC - Recomendação Exame								
CONTROLE DA QUALIDADE			LIDERANÇA			CLIENTE				
 Sílvia B. Batista Inspetor de LP N2 G.5NQC-5362			 Carlos Alberto Santana Ventura Supervisor de CQ - CFT-0506509370							
DATA: 19 / 09 / 2018			DATA: 19 / 09 / 2018			DATA: / /				

ANEXO V – CERTIFICADO REMOVEDOR LP METALCHECK 0002- 2018

METAL-CHEK															
CERTIFICADO DE CONFORMIDADE Nº 201702511															
PRODUTO: METAL-CHEK E 59 PROPELENTE HIDROCARBONETO (HI) REMOVEDOR															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">TIPO / FORMA</td> <td style="width: 20%;">2</td> </tr> <tr> <td>MÉTODO</td> <td>N.A</td> </tr> <tr> <td>NÍVEL DE SENSIBILIDADE</td> <td>N.A</td> </tr> </table>	TIPO / FORMA	2	MÉTODO	N.A	NÍVEL DE SENSIBILIDADE	N.A	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Nº LOTE / STATUS</td> <td style="width: 20%;">26112 / Aprovado</td> </tr> <tr> <td>DATA DE FABRICAÇÃO</td> <td>20/12/2017</td> </tr> <tr> <td>DATA DE VALIDADE</td> <td>31/12/2020</td> </tr> </table>	Nº LOTE / STATUS	26112 / Aprovado	DATA DE FABRICAÇÃO	20/12/2017	DATA DE VALIDADE	31/12/2020		
TIPO / FORMA	2														
MÉTODO	N.A														
NÍVEL DE SENSIBILIDADE	N.A														
Nº LOTE / STATUS	26112 / Aprovado														
DATA DE FABRICAÇÃO	20/12/2017														
DATA DE VALIDADE	31/12/2020														
NORMAS DE REFERÊNCIA															
PETROBRAS N 2370; PETROBRAS N 1595; AMS 2644; ASME Seção V - Art. 6; JIS Z 2343; ASTM E 1417; ISO 3452-2															
O produto está de acordo com as normas referenciadas acima indicadas. As referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes dos referidos documentos (incluindo emendas).															
TESTE	REQUERIMENTO	RESULTADO	STATUS												
Aparência	Líquido incolor	Aprovado	Aprovado												
Conjunta de contaminantes (Cl + F)	Cloreto + Fluoreto < 0,1% do resíduo	0 %	Aprovado												
Conjunta de contaminantes (Cl + F)	Cloreto + Fluoreto < 200 ppm	0 ppm	Aprovado												
Conjunta de contaminantes (S)	Enxofre < 0,1% do resíduo	0,0026 %	Aprovado												
Conjunta de contaminantes (S)	Enxofre < 200 ppm	26 ppm	Aprovado												
Estabilidade da estocagem	Dois anos, temperatura de 5 a 40°C	Aprovado	Aprovado												
Integridade da embalagem	Não deve apresentar amassamento / vazamento	Aprovado	Aprovado												
Odor	Característico	Aprovado	Aprovado												
Pressão interna	3,0 ± 1,0 kgf/cm ²	3,5 kgf/cm ²	Aprovado												
Toxicoz	Vide rótulo / dados de segurança	Aprovado	Aprovado												
Unidade de compra	Aerossol + ficha de emergência	Aprovado	Aprovado												
<p>Bragança Paulista, 20 de dezembro de 2017 METALCHECK</p> <p>Fernando Dias Laboratório/Controle da Qualidade CRO IV 04155443</p> <p style="text-align: right;">Este documento é gerado eletronicamente, não necessitando ser assinado.</p>															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">MKS</th> </tr> <tr> <td style="width: 50%;">RIR Nº: 0002/2018</td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">CONFORME ASME</td> </tr> <tr> <td>SEÇÃO: V</td> <td>PARTE: A ED. 2017</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">  ASSINATURA </td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"> MKS SOLUÇÕES INTEGRADAS Luiz Carlos Ferreira Teixeira Líder CQ / IEQ / CD-CL CREA-PE 059026 - SNOQ 5585 </td> </tr> </table>				MKS		RIR Nº: 0002/2018		CONFORME ASME		SEÇÃO: V	PARTE: A ED. 2017	 ASSINATURA		MKS SOLUÇÕES INTEGRADAS Luiz Carlos Ferreira Teixeira Líder CQ / IEQ / CD-CL CREA-PE 059026 - SNOQ 5585	
MKS															
RIR Nº: 0002/2018															
CONFORME ASME															
SEÇÃO: V	PARTE: A ED. 2017														
 ASSINATURA															
MKS SOLUÇÕES INTEGRADAS Luiz Carlos Ferreira Teixeira Líder CQ / IEQ / CD-CL CREA-PE 059026 - SNOQ 5585															
METAL-CHEK DO BRASIL IND E COM LTDA. CNPJ 00.092.934/0001-53 atendimento@metalcheck.com.br															

ANEXO VI – CERTIFICADO PENETRANTE LP METALCHECK 0003- 2018



CERTIFICADO DE CONFORMIDADE Nº 201702502

PRODUTO: METAL-CHEK VP 30 PROPELENTE HIDROCARBONETO (HI) LP VISIVEL LAVAVEL A AGUA

TIPO / FORMA	II	Nº LOTE / STATUS	26108 / Aprovado
MÉTODO	A	DATA DE FABRICAÇÃO	19/12/2017
NÍVEL DE SENSIBILIDADE	2	DATA DE VALIDADE	31/12/2019

NORMAS DE REFERÊNCIA

PETROBRAS N 2370; PETROBRAS N 1596; AMS 2644; ASME Seção V - Art. 6; ASTM E 1417; ISO 3452-2.

O produto está de acordo com as normas referenciadas acima indicadas. As referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes dos referidos documentos (incluindo emendas).

TESTE	REQUERIMENTO	RESULTADO	STATUS
Aparência	Líquido vermelho	Aprovado	Aprovado
Aspersão e recobrimento	Deve apresentar uma camada fina e homogênea	Aprovado	Aprovado
Conjunto de contaminantes (Cl + F)	Cloreto + Fluoreto < 0,1% do resíduo	0,0002 %	Aprovado
Conjunto de contaminantes (Cl + F)	Cloreto + Fluoreto < 200 ppm	2 ppm	Aprovado
Conjunto de contaminantes (S)	Enxofre < 0,1% do resíduo	0,0010 %	Aprovado
Conjunto de contaminantes (S)	Enxofre < 200 ppm	18 ppm	Aprovado
Cor do penetrante	Vermelho / violeta	Aprovado	Aprovado
Corrosividade	Não deve apresentar sinais de deterioração	Aprovado	Aprovado
Estabilidade de estocagem	Dois anos, temperatura de 5 a 40°C	Aprovado	Aprovado
Integridade da embalagem	Não deve apresentar amassamento / vazamento	Aprovado	Aprovado
Molhabilidade	Homogêneo, sem retrações ou formação de gotas descobrindo a área aplicada	Aprovado	Aprovado
Odor	Glicólico	Aprovado	Aprovado
Pressão interna	5,0 ± 1,0 kgf/cm ²	4,7 kgf/cm ²	Aprovado
Removibilidade	Não deve haver resíduo	Aprovado	Aprovado
Sensibilidade LP	Padrão 30µm (método ISO 3452-3)	Aprovado	Aprovado
Tolerância à água	> 5%	11,8 %	Aprovado
Toxidez	Vide rótulo / dados de segurança	Aprovado	Aprovado
Unidade de compra	Aerossol + ficha de emergência	Aprovado	Aprovado
Viscosidade	7,40 ± 0,74 cSt a 38 ± 3 °C (método ASTM D 445)	7,30 cSt	Aprovado

Bragança Paulista, 19 de dezembro de 2017
METALCHECK

Fernando Dias
Laboratório/Controle da Qualidade
CRQ IV 04155443

MKS

RIR Nº: 0003/2018

CONFORME ASME

SEÇÃO: PARTE: 1 ED.: 2017

[Assinatura]
SIGNATURA
20/12/18

MKS SOLUÇÕES INTEGRADAS
Luiz Carlos Ferreira Teixeira
Lider CQ / IEQ / CD-CL
CREA-PE 059026 - SNGC 5585

Este documento é gerado eletronicamente,
não necessitando ser assinado.

METAL-CHEK DO BRASIL IND E COM LTDA.
CNPJ 50.892.944/0001-63
www.metalcheck.com.br

ANEXO VII – CERTIFICADO REVELADOR LP METALCHEK 0001- 2018



CERTIFICADO DE CONFORMIDADE Nº 201800079

PRODUTO: METAL-CHEK D 70 PROPELENTE HIDROCARBONETO (HI) REVELADOR NAO AQUOSO

TIPO / FORMA	d, e	Nº LOTE / STATUS	LT-18-0064 / Aprovado
MÉTODÓ	N.A	DATA DE FABRICAÇÃO	25/01/2018
NÍVEL DE SENSIBILIDADE	N.A	DATA DE VALIDADE	31/01/2020

NORMAS DE REFERÊNCIA

PETROBRAS N 2370; PETROBRAS N 1596; AMS 2644; ASME Seção V - Art. 6; JIS Z 2343; ASTM E 1417; ISO 3452-2.

O produto está de acordo com as normas referenciadas acima indicadas. As referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes dos referidos documentos (incluindo emendas).

TESTE	REQUERIMENTO	RESULTADO	STATUS
Aparência	Líquido branco, homogêneo quando disperso	Aprovado	Aprovado
Aspersão e recobrimento	Deve apresentar cobertura uniforme, sem grumos ou respingos	Aprovado	Aprovado
Conjunto de contaminantes (Cl + F)	Cloreto + Fluoreto < 0,1% do residuo	0,0024 %	Aprovado
Conjunto de contaminantes (Cl- + F-)	Cloreto + Fluoreto < 200 ppm	24 ppm	Aprovado
Conjunto de contaminantes (S)	Enxofre < 0,1% do residuo	0,0017 %	Aprovado
Conjunto de contaminantes (S)	Enxofre < 200 ppm	17 ppm	Aprovado
Contraste do revelador	Contraste de fundo igual ou superior ao revelador de referência	Aprovado	Aprovado
Cor do revelador	Branco, quando agitado	Aprovado	Aprovado
Corrosividade	Não deve apresentar sinais de deterioração	Aprovado	Aprovado
Estabilidade de estocagem	Dois anos, temperatura de 5 a 40°C	Aprovado	Aprovado
Integridade da embalagem	Não deve apresentar amassamento / vazamento	Aprovado	Aprovado
Odor	Alcoólico	Aprovado	Aprovado
Pressão interna	5,0 ± 0,5 kgf/cm ²	4,8 kgf/cm ²	Aprovado
Redispersabilidade	Deve suspender prontamente quando agitado	Aprovado	Aprovado
Removibilidade	Não deve haver residuo	Aprovado	Aprovado
Toxicidez	Vide rótulo / dados de segurança	Aprovado	Aprovado
Unidade de compra	Aerosol + ficha de emergência	Aprovado	Aprovado

Bragança Paulista, 25 de janeiro de 2018
METALCHEK

Fernando Dias
Laboratório/Controle da Qualidade
CRQ IV 04155443

MKS

RIR Nº: 0003 / 2018

CONFORME ASME

SEÇÃO: V PARTE: 12 ED.: 2012

[Assinatura]

ASSINATURA
27/10/2018

MKS SOLUÇÕES INTEGRADAS
Luiz Carlos Ferreira Teixeira
Lider CQ / IEQ / CD-CL
CREA-PE 059026 - SNQC 5585

Este documento é gerado eletronicamente, não necessitando ser assinado.

METAL-CHEK DO BRASIL IND E COM LTDA.
CNPJ 00.882.834/0001-53
atendimento@metalcheck.com.br

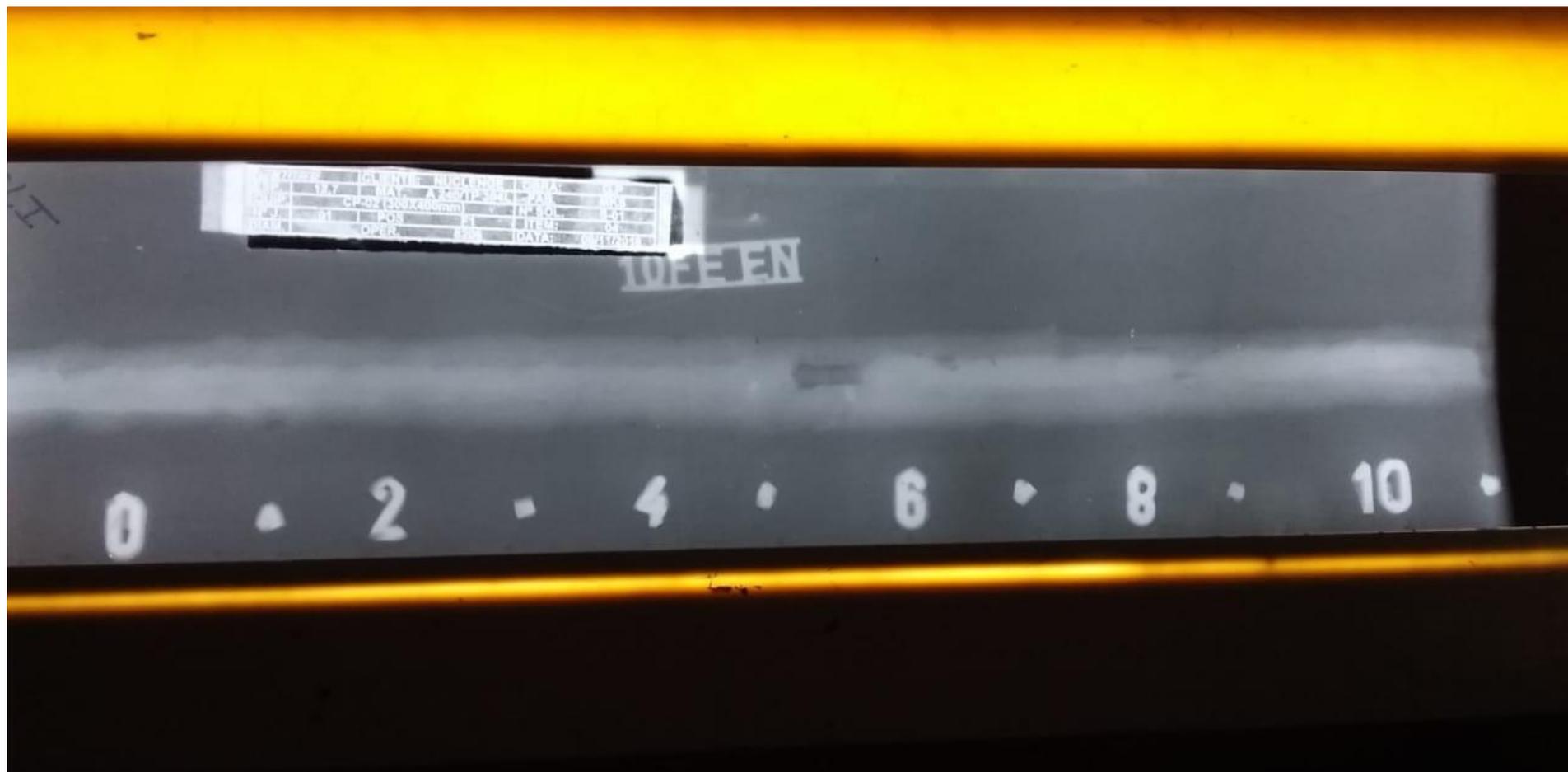
ANEXO VIII – RELATÓRIOS DE GAMAGRAFIA 1/2

Applus [®] Duamtec		RELATÓRIO DE ENSAIO RADIOGRÁFICO				No. -				
		FOLHA 1/1		N° QT 030/18		DATA EMISSÃO 20/09/2018				
IDENTIFICAÇÃO										
CLIENTE: MKS		OS: -		DATA TESTE 20/09/2018						
OBRA CONTRATO: QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE ULTRASSOM		LOCAL DE SERVIÇO: QUALITEC								
FABRICANTE / MONTADORA: MKS		CONDIÇÕES SUPERFICIAIS: ESCOVADO								
CONDIÇÕES RADIOGRÁFICAS				OPERADOR N°: 8206						
PROC. DE ENSAIO: N° / REVISÃO PT-RG-02 REV.03		METAL BASE: ASTM A 240 - TP 304L		METAL DE ADIÇ. ER 308L						
NORMA DE REF.: ASME XI		PROC. DE SOLDA: TIG		TÉCNICA DE EXPOSIÇÃO: PD - VS						
PARÂMETROS		N° FONTE	CORRENTE	FOCO	APARELHO	IQI	FIO ESSENCIAL			
GAMAGRAFIA		-	-	-	-	10 FE EN 16	12			
TIPO DE FONTE		N° FONTE	ATIVIDADE	FOCO	IRRADIADOR	ECRANS	FILME			
IRIDIO 192		8777	2,38 CI	3,0x2,0mm	S-4331	Pb 0.005" E 0.010"	CLASSE I			
N°.: ITEM	IDENTIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO	MATERIAL	JUNTA	POSICAO	DIÂMETRO	ESP. (MM)	DEFEITOS	RESULT		SOLDADOR
								A	R	
01	CP-01 (300X400mm)	A 240 - TP 304L	01	F1	-	6,3	FF/PO		X	S-01
02	CP-03 (730X400mm)	A 240 - TP 304L	01	F1	-	12,7	PO	X		S-01
03	CP-03 (730X400mm)	A 240 - TP 304L	01	F2	-	12,7	PO	X		S-01
SIMBOLOGIA										
N - SEM DESCONTINUIDADE		PD - POROSIDADE		DEC - EX. COMPLEMENTAR		RC - RECHUPE DE CRATERA		CO - CONCAVIDADE		
E - INCLUSÃO DE ESCORIA		FF - FALTA DE FUSÃO		FP - FALTA DE PENETRAÇÃO		MO - MORDEDURA		T - TRINCA		
C - PERF. / CRATERA		H - PASSO C/O		EP - EXC. DE PENETRAÇÃO		IF - INCLUSÃO DE FUNDIMENTO		IA - INDICAÇÃO ALCONGADA		
OBS:										
DATA 20/09/2018		DATA				DATA				
DENILSON DA SILVEIRA ALMEIDA ER-N2-S-RG-SMQC / END 10962						CLIENTE / FISCALIZAÇÃO				

ANEXO IX – FILME GAMAGRAFIA CP-01



ANEXO X – FILME GAMAGRAFIA CP-02



ANEXO XI – CERTIFICADO VARETA ER 308L RIR-0023-2018

voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

Rua Arnaldo Magalhães nº 371
04691-060 - São Paulo - SP
Tel: (11) 5694-8377 - Fax: (11) 5631-4662E-mail: info.welding@voestalpine.com
Site: www.voestalpine.com/weldingJN SOLDAS COMERCIO E
REPRESENTACOES LTDA
R BELO HORIZONTE, LOJA 04 90
42700-000 LAURO DE FREITAS
BrasilCERTIFICADO DA QUALIDADE
Certificate Schedule Fconforme / as per : ASME/AWS A5.01
No. : No. : 2018-000178011-1-200-102574-004
Rev. 0 Pagina / Page : 1 / 1

Pedido No	PO no.	JOSE NEREU/EMAIL	de / of	12.06.2018
Ordem de Produção	Order no.	1005340230		
Fatura	Delivery note/pos./splitt	2005392747/000000/000200	de / of	12.06.2018
Produto	Product	Vareta (TIG) / GTAW rod/wire		25000-1
Designação da Marca	Trade name	THERMANIT JE-308L		81633
Classificação	Standard designation	EN ISO 14343-A: W 109 L AWS A5.9: ER308L		1587A000 0004
Dimensão	Dimension	2,4 x 1000 mm		
Corrida	Heat no.	102574		
Quantidade	Quantity	20,0 KG		

Análise Química % do produto

Chemical composition in % of the product

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu									
0,02	0,50	1,6	0,022	0,016	20,1	0,10	10,3	0,11									

propriedades mecânicas

Mechanical properties

Ensaio de Tração		Tensile test						
T	ReL / Rp 0,2 MPa	Rp 1,0 MPa	Rm MPa	A (Lo = 4d) %	Z %	WBH PWHT	Observações Remarks	
20°C			≥ 520	≥ 35				

O total de outros elementos não excede 0,50%, validade 2 anos após a entrega.

RIR-0023/2018
CONFORME ASME SECÇÃO II PARTE C
EDIÇÃO 2017 PELO INSPECTOR DE
SOLGAGEM _____ FBTS IS _____

DATA: 05/11/18 Ass.: _____

Jaquaraci de Souza
Tecnólogo em Gestão da Qualidade
Especialização em Soldagem
INSPECTOR DE SMDA: 1510871

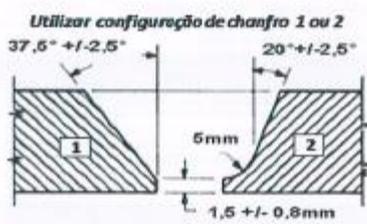
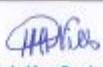
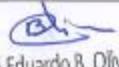
Lugar / Town
Sao PauloData / Date
14.06.2018

Representante da Qualidade Autorizado / Authorized representative

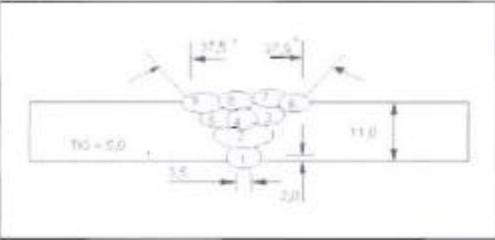
Impresso por computador, válido sem assinatura
This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

voestalpine

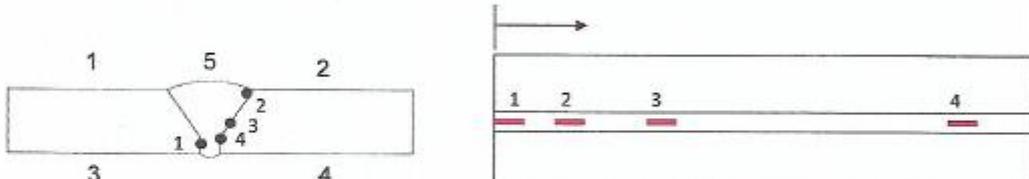
ANEXO XII – EPS TE-0005-AI

		ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM		EPS Nº: TE-0005-AI Revisão: 00 Data: 30/11/2017 Página: 1/2	
DADOS DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM					
Processo de Soldagem: GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e SMAW (Shielded Metal Arc Welding)					
Tipo: Manual		Código de Referência: ASME IX Ed. 2017; ASME VIII Div.1 Ed. 2017			
Nº RQPS de Cobertura: TE-01-AI (Este documento não atende requisitos especiais das "I-ET da Petrobras")					
Outros: Não aplicável para serviços com requisito de impacto e nem tratamento térmico					
DETALHES DA JUNTA		METAIS DE BASE			
		Especificação: ASTM A 240 TP304/304L; ASTM A 312 Gr. TP304/304L; ASTM A 358 Gr. 304/304L; ASTM A 182 Gr. F304/304L; ASTM A 403 Gr. WP304/304L			
		P Nº: 8 X 8		G Nº: 1 ou 2	
		Faixa de Espessura do Metal de Base: Todas as espessuras para solda em ângulo			Faixa de Espessura do Metal de Solda: Até 10,0 mm (GTAW) Até 12,0 mm (SMAW)
		Faixa de Diâmetros: Todos			
PREPARAÇÃO DA JUNTA					
O chanfro e superfícies próximas a solda, numa faixa mínima de 50 mm de cada margem, pelos lados internos e externos, devem estar isentos de tinta, óleo, oxidações, graxa ou quaisquer outras substâncias prejudiciais à qualidade da solda.					
METAIS DE ADIÇÃO					
Especificação: AWS A 5.9 (GTAW) / AWS A 5.4(SMAW)		Classificação: ER 308 / 308L (GTAW) + E 308/308L-15/16/17 (Obs 1)			
F Nº: 6 (GTAW) / 5 (SMAW)		A Nº: 8			
Tipo de Revestimento: Rútílico (SMAW)					
Tipo de Fluxo: Não se Aplica					
Marca Comercial: Conforme lista de consumíveis da FBTS e com mesma classificação AWS.					
ARMAZENAMENTO E SECAGEM: Conforme recomendação do fabricante ou procedimento específico					
Posição de Soldagem		Progressão de Soldagem			
Posição: Todos		Progressão: Ascendente			
Preparação da Junta		Acoplamento			
Corte: Serra e/ou disco abrasivo para aço inox. [Obs. 2]		Acoplamento: Ponteamento direto no chanfro, dispositivo dispositivo auxiliar de montagem em contato ou soldado (Obs. 3, 4 e 5)			
OBSERVAÇÕES					
Obs.1: Somente utilizar metal de adição ER 308L com metal de base TP ou Gr. 304, se o limite de resistência do metal de adição for > 75 ksi (520 Mpa).					
Obs.2: Efetuar limpeza com esmerilhamento ou escovamento para obter o metal brilhante na região a ser soldada e adjacente.					
Obs.3: Os dispositivos soldados não devem ser removidos por impacto e após remoção, realizar ensaio visual e LP.					
Obs.4: A soldagem dos dispositivos auxiliares de montagem deve ser depositada, no mínimo, distante 25 mm da margem do chanfro.					
Obs.5: Cachorro ou batoque de mesmo PNF do material de base ou revestido com solda de inox austenítico					
INSPEÇÃO DE SOLDAGEM N2		APROVAÇÃO		CLIENTE	
 Hylynthon Luis Alves Pereira Filho Certificação FBTS IS 6049 N2		 Paulino Eduardo B. Oliveira Coordenador MKS Bahia			

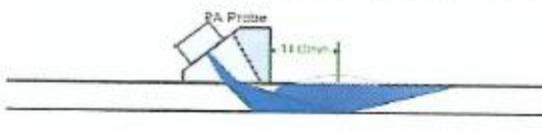
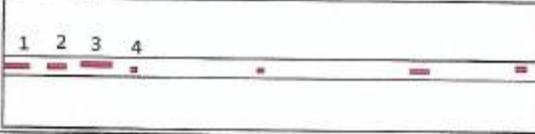
ANEXO XIII – RQPS TE-01-AI

	REGISTRO DA QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM		R.Q.P.S.: TE - 01- AI Folha: 01 / 02 Data: 01 / 04 / 2011 Revisão: 01									
	PROCESSO DE SOLDAGEM: TIG / ELET. REVESTIDO		TIPO: Manual		EPS nº: ---							
NORMA DE QUALIFICAÇÃO: ASME IX (2010)												
DETALHES DA JUNTA			TEMPERATURAS									
			Pré Aquecimento: Não se Aplica Temperatura Interpasse: $\geq 150^{\circ}\text{C}$ (Máximo) Pós Aquecimento: Não se Aplica Tempo: Não se Aplica Método de Pré e Pós Aquecimento: Não se Aplica Controle de temperatura: Pirômetro de Contato.									
			TRATAMENTO TÉRMICO									
METAL DE BASE			Taxa de Aquecimento: Não se Aplica Temperatura Patamar: Não se Aplica Tempo Patamar: Não se Aplica Taxa Resfriamento: Não se Aplica Temperatura de Controle: Não se Aplica Obs.:									
Especificação: ASTM A312 TP 316L P N°: 8 GN°: 1 ESPES.: 11.0 mm SCH: 80 Ø Nominal: 6" Obs.: ---			GÁS DE PROTEÇÃO									
METAL DE ADIÇÃO			<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <th style="width: 50%;">Face (Arco de Soldagem)</th> <th style="width: 50%;">Raiz (Purga)</th> </tr> <tr> <td>Tipo de Gás: Argônio</td> <td>Tipo de Gás: Argônio</td> </tr> <tr> <td>Composição: 99,99%</td> <td>Composição: 99,99%</td> </tr> <tr> <td>Vazão: 8 à 12 l/min</td> <td>Vazão: 18 à 20 l/min</td> </tr> </table>		Face (Arco de Soldagem)	Raiz (Purga)	Tipo de Gás: Argônio	Tipo de Gás: Argônio	Composição: 99,99%	Composição: 99,99%	Vazão: 8 à 12 l/min	Vazão: 18 à 20 l/min
Face (Arco de Soldagem)	Raiz (Purga)											
Tipo de Gás: Argônio	Tipo de Gás: Argônio											
Composição: 99,99%	Composição: 99,99%											
Vazão: 8 à 12 l/min	Vazão: 18 à 20 l/min											
Marca Comercial: TIG: KTS G 4430 / ER: OK 63.30 Especificação: TIG: SFA 5.9 / ER: SFA 5.4 Classificação: TIG: ER 316L / ER: E 316L-17 F N°: TIG: 8 / ER: 5 (OBS.1) A N°: 8 Tipo de Fluxo: Não se Aplica Tipo de Revestimento: Rutilico (Eletrodo Revestido) Diâmetro: Ø 3,25 mm (ambos processos) Obs.: ---			Obs.: Utilizou-se gás de purga até a 02 camada de solda.									
POSIÇÃO			TÉCNICAS DE SOLDAGEM									
Posição de Soldagem: 5G Progressão: Ascendente Obs.: ---			Deposição: Retilíneo Oscilação Máxima: 3 vezes diâmetro do consumível Passes: <input type="checkbox"/> Simples <input checked="" type="checkbox"/> Múltiplos Eletrodos: <input checked="" type="checkbox"/> Simples <input type="checkbox"/> Múltiplos Goivagem na Raiz: Não se Aplica Eletrodo Tungstênio (TIG): AWS EWTh-2 Ø Tungstênio (TIG): Ø 3,2 mm Diâmetro do Bocal (TIG): 1/2" Modo de Transferência: Não se Aplica Obs.: ---									
PARAMETROS DE SOLDAGEM												
Passes	Processo	Metal Adição		Corrente		Tensão (volts)	Vel. Avanço (cm/min)	Heat Input				
		Classificação	Ø	Tipo/Pol.	(amperes)							
1	TIG	ER 316L	3,2	C.C. (-)	97 A	10 V	-	-				
2	TIG	ER 316L	3,2	C.C. (-)	120 A	10 V	-	-				
3	ER	E 316L-17	3,2	C.C. (+)	100 A	28 V	-	-				
4	ER	E 316L-17	3,2	C.C. (+)	100 A	28 V	-	-				
5	ER	E 316L-17	3,2	C.C. (+)	105 A	28 V	-	-				
6	ER	E 316L-17	2,5	C.C. (+)	82 A	25 V	-	-				
7	ER	E 316L-17	2,5	C.C. (+)	82 A	25 V	-	-				
8	ER	E 316L-17	2,5	C.C. (+)	82 A	25 V	-	-				
9	ER	E 316L-17	2,5	C.C. (+)	82 A	25 V	-	-				
EMIÇÃO Ronaldo da Rocha e Silva Certificação FBTS-45-0608 N2  DATA: 01/04/2011		APROVAÇÃO Ronaldo da Rocha e Silva Certificação FBTS-45-0608 N2  DATA: 01/04/2011		CLIENTE DATA: ___/___/___								

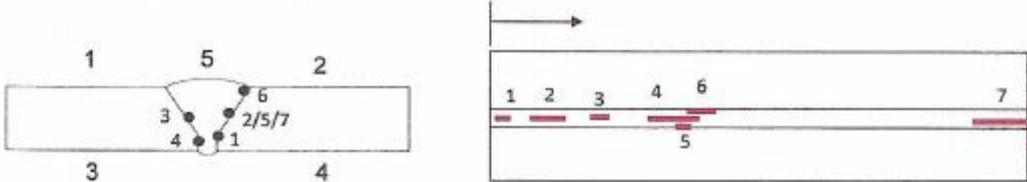
ANEXO XIV – US A-SCAN CP 01

		REGISTRO DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM		Nº UT-CP1.18							
				Data 21/01/18	Folha 01/01						
OS / Cliente:	ÊMERSON MOTA	TAG:	CP 01								
Serviço:	INSPEÇÃO DE SOLDA	Desenho:	NA								
Local do Ensaio:	OFICINA - APEIRON	Fabricante:	MKS								
Dados Técnicos											
Metal Base:	ASTM A-240 TP-304L	Procedimento de Soldagem:	NA								
Metal Adição:	ER-308L (raiz, enchimento e acabamento)	Cond. Superficial:	ESCOVADA								
Diâmetro / Espessura:	CH, 6,35 mm (1/4")	Acoplante:	METIL CELULOSE								
Norma de Referência:	ASME SEC. VIII DIV. 1 & ASME B31.3	Proc. Insp.:	APN UT 001 REV. 02								
Bloco de Ref. / Nº Série:	20mm (INOX)	Aparelho / Nº Série:	EPOCH XT / 091255005								
Transdutores											
Modelo	Ângulo real	Frequência (MHz)	Dimensões (mm)	Ganhos (db)		CABEÇOTE					
				GP	PT	POSIÇÃO	N	S/E	45°	60°	70°
THM4	0°	4 MHZ	10	30	0	1	-	X	-	X	X
SMA4-70Z	60°	4 MHZ	8X9	42	0	-	-	-	-	-	-
SMA4-60Z	70°	4 MHZ	8X9	38	0	-	-	-	-	-	-
SMA4-45Z	45°	4 MHZ	8X9	-	-	-	-	-	-	-	-
Croquis / Anotações											
											
Junta	Descontinuidade								Laudo	Soldador	
	Nº	Cabeç.	Cota	Prof.	Comp.	Amplit.	P. Sônico	Tp. Defeito		Raiz	Ench./Acabam.
J-01	1	45°	0	11	17	+8	27	-	R	-	-
-	2	45°	38	1	13	-5	36	-	A	-	-
-	3	70°	64	3	14	-1	30	-	A	-	-
-	4	60°	250	4,5	9	+2	34	-	A	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Observações:											
LEGENDA											
A = Aprovado				TR = Trinca				IE = Inclusão de Escória			
R = Reprovado				FF = Falta de Fusão				PO = Poros			
REC = Recomendação de Exame Complementar				FP = Falta de Penetração				CO = Concavidade			
GP = Ganho Primário				PT = Perda por Transparência							
Inspeção				Cliente				Fiscalização			
Data:				Data:				Data:			
 US-N2-AE1/S2.1 SNQC/END- N° 02057								FM-TEC-AP-000.00-001 Rev.4			

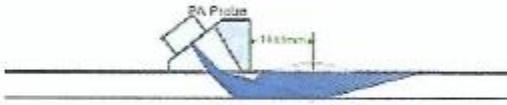
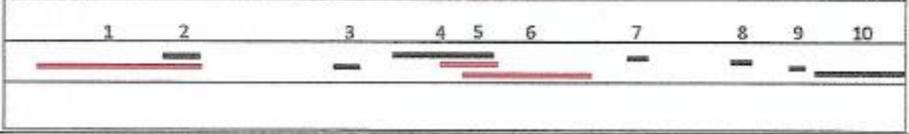
ANEXO XV – US PA CP 01

		REGISTRO DE INSPEÇÃO ULTRASSOM PHASED ARRAY - OMNISCAN				N° PA-CP1.18										
						Data	Folha									
OS / Cliente:	ÉMERSON MOTA			TAG:	CP1											
Serviço:	INSPEÇÃO DE SOLDA			Desenho:	NA											
Local do Ensaio:	OFICINA - APEIRON			Fabricante:	MKS											
Dados Técnicos																
Metal Base:	ASTM A-240 TP-304L			Procedimento de Soldagem:	NA											
Metal Adição:	ER-308L (raiz, enchimento e acabamento)			Cond. Superficial:	ESCOVADA											
Diâmetro / Espessura:	CH/ 6,35mm			Acoplante:	METIL CELULOSE											
Norma de Referência:	ASME SEC. VIII DIV. 1 & ASME B31.3			Proc. Insp.:	IT-GT-US-013											
Bloco de Ref. / N° Série:	20 MM (INOX)			Aparelho / N° Série:	OLYMPUS OMNISCAN MX- 100255											
Calibração																
Modelo	N° Serie / Grupo	GP	PT	GV	POSIÇÃO / ÂNGULO											
MSEB4	54067	41	0		1-2 / 0°											
7.5CCEV35-16 - SA15N608	H0703	44	0		SK 90/ 45° - 72° EL 1 a EL 16											
5CCEV35-16 - SA15N608	HLB 678	44	0		SK 270/ 45° - 72° EL 1 a EL 16											
3CCEV35-16 - SA15N608																
POSIÇÃO	CABEÇOTES															
	CONV.	PA	TOFD													
	1	X	X													
	2	X	X													
5	X	X														
Junta	SPOT	LOCAL	SINETE		DESCONTINUIDADES											
			R	EA	Local	Desc.	Grupo	Ganho	Comp.	Prof.	Alt.	Tipo	Laudo			
J-01	-	-	-	-	-	-	0	1	1	>100	15	-	-	-	-	R
-	-	-	-	-	-	-	28	2	1	21%	13	-	-	-	-	A
-	-	-	-	-	-	-	55	3	1	>100	18	-	-	-	-	R
-	-	-	-	-	-	-	80	4	1	38%	4	-	-	-	-	A
-	-	-	-	-	-	-	144	5	1	41%	3	-	-	-	-	A
-	-	-	-	-	-	-	232	6	1	>100	11	-	-	-	-	R
-	-	-	-	-	-	-	282	7	1	28%	6	-	-	-	-	A
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Observações																
LEGENDA																
A = Aprovado				TR = Trínca				IE = Inclusão de Escória								
R = Reprovado				FF = Falta de Fuso				PO = Poro								
REC = Recomendação de Exame Complementar				FP = Falta de Penetração				CO = Concavidade								
GP = Ganho Primário				FT = Perda por Transparência												
Inspetor				Cliente				Fiscalização								
Data:				Data:				Data:								
 US-N2-AE1/S2.1 SNQC/END- N° 02057												EM-TEC-AP-000.00-001 Rev.0				

ANEXO XVI – US A-SCAN CP 02

		REGISTRO DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM		Nº UT-CP2.18							
				Data 21/01/18	Folha 01/01						
OS / Cliente:	EMERSON MOTA	TAG:	CP 02								
Serviço:	INSPEÇÃO DE SOLDA	Desenho:	NA								
Local do Ensaio:	OFICINA - APEIRON	Fabricante:	MKS								
Dados Técnicos											
Metal Base:	ASTM A-240 TP-304L	Procedimento de Soldagem:	NA								
Metal Adição:	ER-308L (raiz) + E-308L (enchimento e acabam.)	Cond. Superficial:	ESCOVADA								
Diâmetro / Espessura:	CH. 13,0 mm (1/2")	Acoplante:	METIL CELULOSE								
Norma de Referência:	ASME SEC. VIII DIV. 1 & ASME B31.3	Proc. Insp.:	APN UT 001 REV. 02								
Bloco de Ref. / N° Série:	20mm (INOX)	Aparelho / N° Série:	EPOCH XT / 091255005								
Transdutores											
Modelo	Ângulo real	Frequência (MHz)	Dimensões (mm)	Ganhos (db)		CABEÇOTE					
				GP	PT	POSIÇÃO	N	S/E	45°	60°	70°
THM4	0°	4 MHz	10	30	0	1	-	X	-	X	X
SMA4-70Z	60°	4 MHz	8X9	42	0	-	-	-	-	-	-
SMA4-60Z	70°	4 MHz	8X9	38	0	-	-	-	-	-	-
SMA4-45Z	45°	4 MHz	8X9	-	-	-	-	-	-	-	-
Croquis / Anotações											
											
Junta	Descontinuidade								Laudo	Soldador	
	Nº	Cabeç.	Cota	Prof.	Comp.	Amplit.	P. Sínico	Tp. Defeito		Raiz	Ench./Acabam.
I-01	1	70°	8	8	32	+2	30	-	R	-	-
-	2	60°	67	6	35	0	40	-	A	-	-
-	3	60°	125	7	13	-4	38	-	A	-	-
-	4	60°	195	12	28	0	25	-	A	-	-
-	5	60°	210	8	6	0	38	-	A	-	-
-	6	45°	220	1	12	0	35	-	A	-	-
-	7	60°	265	6	40	+7	38	-	R	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Observações:											
LEGENDA											
A = Aprovado				TR = Trínca				IE = Inclusão de Escória			
R = Reprovado				FF = Falta de Fusão				PO = Poro			
REC = Recomendação de Exame Complementar				FP = Falta de Penetração				CO = Concavidade			
GP = Ganho Primário				PT = Perda por Transparência							
Inspetor				Cliente				Fiscalização			
Data:				Data:				Data:			
 Amsturi da Silva Amorim US-N2-AE1/S2.1 SNQC/END- N° 02057								FM-TEC-AP-000.00-001 Rev.1			

ANEXO XVII – US PA CP 02

		REGISTRO DE INSPEÇÃO ULTRASSOM PHASED ARRAY - OMNISCAN				Nº PA-CP2.18								
						Data	Folha							
OS / Cliente:	EMERSON MOTA	TAG:	CP2											
Serviço:	INSPEÇÃO DE SOLDA	Desenho:	NA											
Local do Ensaio:	OFICINA - APEIRON	Fabricante:	MKS											
Dados Técnicos														
Metal Base:	ASTM A-240 TP-304L	Procedimento de Soldagem:	NA											
Metal Adição:	ER-308L (raiz) + E-308L (enchimento e acabam.)	Cond. Superficial:	ESCOVADA											
Diâmetro / Espessura:	CH. 13,0 mm (1/2")	Acoplante:	METIL CELULOSE											
Norma de Referência:	ASME SEC. VIII DIV. 1 & ASME B31.3	Proc. Insp.:	IT-GT-US-013											
Bloco de Ref. / Nº Série:	20 MM (INOX)	Aparelho / Nº Série:	OLYMPUS OMNISCAN MX- 100255											
Calibração														
Modelo	Nº Serie / Grupo	GP	PT	GV	POSIÇÃO / ÂNGULO									
MSEB4	54667	41	0		1-2 / 0°									
SCEV35-16 - SA15N60S	HLB 678	44	0		SK 90° 45° - 72° EL. 1 a EL. 16									
SCEV35-16 - SA15N60S	HLB 678	44	0		SK 270° 45° - 72° EL. 1 a EL. 16									
SCEV35-16 - SA15N60L	HLB 678													
POSIÇÃO	CABEÇOTES													
	CONV.	PA	TOFD											
	1	X	X											
	2	X	X											
5	X	X												
Junta	SPOT	LOCAL	SINETE		DESCONTINUIDADES									
			R	EA	Local	Desc.	Grupo	Ganho	Comp.	Prof.	Alt.	Tipo	Lauda	
J-01	-	-	-	-	5	1	1	>100	31	4	-	-	R	
-	-	-	-	-	30	2	1	71%	7	11	-	-	A	
-	-	-	-	-	61	3	1	34%	5	8	-	-	A	
-	-	-	-	-	68	4	1	72%	19	5	-	-	A	
-	-	-	-	-	79	5	1	>100	11	3	-	-	R	
-	-	-	-	-	82	6	1	>100	24	10	-	-	R	
-	-	-	-	-	115	7	1	51%	4	10	-	-	A	
-	-	-	-	-	133	8	1	50%	4	10	-	-	A	
-	-	-	-	-	152	9	1	43%	3	10	-	-	A	
-	-	-	-	-	159	10	1	52%	17	7	-	-	A	
Observações														
														
LEGENDA														
A = Aprovado				TR = Trinca				IE = Inclusão de Escória						
R = Reprovado				FF = Falta de Fusão				PO = Poros						
REC = Recomendação de Exame Complementar				FP = Falta de Penetração				CO = Concridade						
GP = Ganho Primário				PT = Perda por Transparência										
Inspetor				Cliente				Fiscalização						
Data:				Data:				Data:						
 Amador da Silva Amorim US-N2-AE1/S2.1 SNQC/END- Nº 02057														
FM-TEC-AP-000.00-001 Rev.0														

ANEXO XVIII – EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

ELEMENTO	TIPO DE AÇO AUSTENÍTICO	EFEITOS
C	Todos	Promove fortemente a formação da austenita. Pode formar carboneto com o cromo e resultar em corrosão intergranular.
Cr	Todos	Promove a formação de ferrita. Aumenta a resistência à corrosão.
Ni	Todos	Promove a formação de austenita. Aumenta a ductilidade. Aumenta a resistência a alta temperatura e à corrosão.
N	xxxN	Promove fortemente a formação da austenita. Aumenta a resistência mecânica.
Nb	347	Reduz a sensibilidade à corrosão intergranular combinando com o C. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita. Aumenta a resistência à fluência.
Mn	2xx	Estabiliza a austenita à temperatura ambiente, mas forma ferrita a altas temperaturas. Inibe a fragilidade a quente pela formação de MnS.
Mo	316 / 317	Aumenta a resistência a alta temperatura. Aumenta a resistência à corrosão em meios redutores. Promove a formação de ferrita.
P, Se, S	303 / 303Se	Melhoram a usinabilidade, mas promovem fissuração na solidificação. Diminuem ligeiramente a resistência à corrosão.
Si	302B	Aumenta a resistência à formação de carepa. Promove a formação de ferrita. Adicionado em pequenas quantidades para desoxidação.
Ti	321	Reduz a sensibilidade à corrosão intergranular combinando com o C. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita.
Cu	–	Aumenta a resistência à corrosão em certos meios. Diminui a sensibilidade à corrosão sob tensão. Causa efeitos endurecedores por envelhecimento.

Fonte: (MODENESI, 2014).