

Cristiano Pupo Barreto

**INSPEÇÃO POR ULTRASSOM EM JUNTAS
SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
UTILIZANDO TRANSDUTORES PHASED ARRAY**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

São Paulo
Outubro/2012

Cristiano Pupo Barreto

(Engenheiro Mecânico, USF – Universidade São Francisco, 2001)

**INSPEÇÃO POR ULTRASSOM EM JUNTAS
SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
UTILIZANDO TRANSDUTORES PHASED ARRAY**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração: Engenharia da Soldagem

Orientador: **Eng. Vinicius Machado Mansur**

São Paulo
Outubro/2012

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha amada esposa Silvana, aos nossos maravilhosos filhos Christian e Nicolas e aos meus queridos Pais José Manuel e Elisabete.

AGRADECIMENTOS

Uma monografia é um trabalho que requer muita dedicação e leva tempo. Ao longo do curso e também da elaboração da monografia, diversas pessoas participaram, de forma direta ou indireta. Por isso, quero expressar os meus sinceros agradecimentos a cada uma delas:

- Ao professor Vinicius Machado Mansur pela orientação, compreensão e colaboração.
- Ao professor Dr. Sergio Duarte Brandi pela sua compreensão durante todo o curso e na colaboração durante a execução da monografia.
- Aos inspetores qualificados em ensaio não destrutivo por ultrassom Guilherme, Leonardo e Romulo, pelo apoio dado na execução e ajuda no ensaio prático de aplicação dos ensaios por ultrassom com transdutores '*phased array*'.
- A ASVOTEC Termoindustrial Ltda, seus diretores Christian Mader e Elmar Weitmann e ao Gerente de engenharia João Carlos Garcia, que tornaram possível o desenvolvimento e aprendizado adquirido.
- Ao Rui Prado que me incentivou e contribuiu para a conclusão do curso.
- A minha querida esposa Silvana que sempre esteve ao meu lado, apoiando e ajudando na revisão textual do trabalho.
- Aos meus queridos filhos Christian e Nicolas, que são meu incentivo e pela compreensão nos momentos de ausência.
- Aos meus pais José Manuel e Elisabete, pelo amor, suporte, incentivo e também pela ajuda financeira na conclusão do curso.
- Aos meus colegas de especialização que tornaram agradável minha participação no curso.
- A todos os professores do curso de especialização que contribuíram e muito para aprimorar meus conhecimentos.
- A todos aqueles que estiveram do meu lado, me incentivaram, e me ajudaram na boa execução desta monografia.

"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo,
qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim."

Chico Xavier

CURRICULUM VITAE

CRISTIANO PUPO BARRETO

Formação Acadêmica: **Especialização em Engenharia de Soldagem**
– Poli-USP / Ago10-Ago12
Engenharia Mecânica – Automação e Sistemas – USF / Universidade São Francisco – Itatiba/SP - 1996-2001
Técnico Mecânico – FIEC - Fundação Indaiatubana de Educação e Cultura - 1993-1995

Atividades

Profissionais:

- **ASVOTEC Termoindustrial Ltda.** Desde agosto 2002 – Atualmente como supervisor de engenharia de projetos, com as seguintes responsabilidades principais:
 - Coordenação da equipe de projetos de equipamentos petroquímicos.
 - Com pleno conhecimento das normas ASME Seção VIII Divisão 1, Divisão 2, ASME Seção I , TEMA, ISO 9000, Petrobras, ANSI e outras.
 - Acompanhamento e controle de empresas terceirizadas de projetos e cálculos de equipamentos.
 - Suporte direto aos departamentos de vendas, orçamentos, compras, produção e qualidade.
 - Participação como facilitador no processo de adaptação da ISO 9000:94 para certificação da ISO 9000:2000.
 - Participação direta na auditoria da Petrobrás para os equipamentos de vaso de pressão, torre de processo e trocador de calor.

- Participação na auditoria do ASME para certificação do Selo ASME seção VIII divisão 1 e divisão 2.
- Atuando na execução e verificação de projetos térmicos de trocadores de calor através do software HTRI e cálculos mecânicos através do software PVElite.

Idioma: Inglês intermediário.

Perfil Pessoal: Brasileiro, casado, 02 filhos, nascido em 03/08/1978 em Indaiatuba, SP.

RESUMO

Uma das novas e principais exigências na inspeção de equipamentos da Petrobras sujeitos a serviços especiais e como opção na norma ASME foi à inclusão do ensaio por ultrassom computadorizado com registro em substituição ao ensaio por ultrassom convencional em juntas soldadas que a geometria não permite a realização de exame radiográfico total. Um dos métodos que atendem a essa exigência da Petrobras e ASME é o ensaio por ultrassom com transdutores tipo '*phased array*', porém essa tecnologia na inspeção de equipamentos ainda não está totalmente difundida entre os fornecedores, tanto em materiais de aço carbono, mas principalmente nos equipamento de aço inoxidável austenítico. Com isso se fez necessário a validação do ensaio por ultrassom utilizando transdutores '*phased array*' nas juntas soldadas de aço inoxidável austenítico. O procedimento de ensaio por ultrassom foi preparado de forma a obter as condições mínimas das normas Petrobras e ASME, além de boas práticas na execução do ensaio não destrutivo por ultrassom utilizando transdutores '*phased array*'. O procedimento foi qualificado através da utilização de um bloco de validação, da simulação do ensaio através de *software* específico e o ensaio propriamente dito na junta soldada do equipamento, se mostrando adequado para a aplicação dentro dos tipos de configurações de juntas estudadas. Neste contexto, a simulação do ensaio foi de suma importância na otimização de tempo e na qualidade final do ensaio, principalmente devido a aplicação do ensaio por ultrassom com transdutores '*phased array*' em juntas complexas, onde a configuração das defasagens necessárias para formação das frentes de onda e outros parâmetros são relativamente complexos se comparado ao ultrassom convencional. Mesmo com as dificuldades do ensaio, devido às propriedades anisotrópicas do material, tanto no bloco de validação como na junta soldada do equipamento, foi possível obter imagens nítidas e com resolução adequada para visualização, análise das descontinuidades e classificação das descontinuidades encontradas em relação aos critérios de aceitação do ASME considerados.

ABSTRACT

One of the new and main requirements, applicable in the inspection of Petrobras's equipment to special services and as an option in ASME was the inclusion of ultrasonic test with computerized registry to replace the ultrasonic conventional test of welds that geometry does not allow the realization of total radiographic examination. One of the methods that meet this requirement of Petrobras and ASME is the ultrasonic test with 'phased array' transducers; however this technology in inspection of equipment is not yet fully diffused among suppliers, both in carbon steel materials, but mainly in the austenitic stainless steel equipment. Thus it was necessary to validate the test using ultrasonic with 'phased array' transducers in the welded joints of austenitic stainless steel. The ultrasonic test procedure was prepared in order to obtain the minimum of Petrobras standards and ASME, and best practices in the implementation of non-destructive testing using ultrasonic test with 'phased array' transducers. The procedure was described using a validation block, a simulation of the test using specific software and the testing the welded joint itself in the equipment. The test showed was suitable for application, within the types of welded joint configurations studied. In this context, the simulation test was of paramount importance in optimization time and quality of the final test, mainly due to the application of the ultrasonic test with 'phased array' transducers in the complex welded joints, where the configuration of lags required for the formation of fronts waveform and other parameters are relatively complex if compared to conventional ultrasonic test. Even with the difficulties of the test, due to the anisotropic properties of the material, both in the validation block as in the welded joint of the equipment, it was possible to obtain images with sharp resolution and suitable for visualization, analysis and classification of discontinuities encountered in relation to criteria acceptance of the ASME considered.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Princípio Básico da Inspeção de Materiais por US [13].	7
Figura 2-2 – Principais descontinuidades detectadas em juntas soldadas [14]. .	9
Figura 2-3 – Faixa de classificação das ondas sonoras [12].	11
Figura 2-4 – Representação esquemática do átomo [16]......	12
Figura 2-5 – Modos típicos de propagação das ondas: (a) Longitudinal, (b) Transversal, (c) Superficial. A dimensão λ representa o comprimento de onda [15].	14
Figura 2-6 – Reflexão e transmissão da onda sônica [12]......	16
Figura 2-7 – Possíveis modos de propagação das ondas [12].	19
Figura 2-8 – Primeiro ângulo crítico [12].	20
Figura 2-9 - Segundo ângulo crítico [12].	21
Figura 2-10 – Cortes cristais piezelétrico [12].	24
Figura 2-11 – Pontos de interferências construtivas e destrutivas na formação do feixe [18].	26
Figura 2-12 – Princípio de superposição de ondas [18].....	26
Figura 2-13 – Campo a frente do elemento ativo [12].	27
Figura 2-14 – Feixe sônico visível real [12].....	28
Figura 2-15 – Campo sônico [12].....	28
Figura 2-16 – Cabeçote de ultrassom e seus principais componentes [16].....	30
Figura 2-17 – Cabeçotes convencionais: (a) normal, (b) angular [12].	31
Figura 2-18 – Método pulso-eco [12].	34
Figura 2-19 – Método Tandem [12].	34
Figura 2-20 – Visualização tipo A-Scan [4].....	36
Figura 2-21 – Visualização tipo B-Scan [4].....	36
Figura 2-22 – Cabeçote e peça simulando descontinuidades (imagem superior). Visualização C-Scan com escala de cores (imagem inferior esquerda) e Visualização A-Scan (imagem inferior direita) [19].	37
Figura 2-23 – Representação esquemática de diferentes tipos de orientação de grãos para diferentes tipos de processos de soldagem [23].....	40

Figura 2-24 – Imagem de ultrassonografia gestacional dos filhos do autor utilizando transdutores ' <i>phased array</i> ' [24].....	42
Figura 2-25 – Principais componentes do sistema ' <i>phased array</i> ' [25].	44
Figura 2-26 – Cabeçote monocristal (esquerda) e Cabeçote ' <i>phased array</i> ' (direita) [25].	45
Figura 2-27 – Processo de emissão e recepção das ondas [25].....	45
Figura 2-28 – Interferência construtiva das de cada elemento sem defasagem [18].	46
Figura 2-29 – Interferência construtiva das de cada elemento com defasagem [18].	46
Figura 2-30 – Cabeçote ' <i>phased array</i> ' [18].	47
Figura 2-31 – Seção transversal do cabeçote ' <i>phased array</i> ' [18].	47
Figura 2-32 – Dimensões e posicionamento dos elementos [18].	48
Figura 2-33 – exemplos de diferentes tipos de cabeçotes ' <i>phased array</i> ' [18].	49
Figura 2-34 – Exemplos de leis focais [18].	50
Figura 2-35 – Resolução lateral de acordo com aumento da abertura [18].	52
Figura 2-36 – Comparação da resolução lateral de acordo com aumento do número de leis focais [18].....	53
Figura 2-37 – Display com múltiplas imagens [18].....	54
Figura 4-1 – Alguns tipos de equipamentos e juntas aplicáveis.	57
Figura 4-2 – Aparelho de ultrassom	59
Figura 4-3 – Scanner HSMT Compact Olympus	59
Figura 4-4 – Tela do software <i>ESBeamtool</i>	61
Figura 4-5 – Tela do software <i>Tomoview</i>	61
Figura 4-6 – Dimensões bloco de referência de ondas longitudinais.	62
Figura 4-7– Dimensões bloco de calibração de ondas transversais.	63
Figura 4-8 – Dimensões bloco de referencia.	63
Figura 4-9 – Tipos de juntas.....	64
Figura 4-10 – Superfícies de ensaio da junta soldada de conexões.....	66
Figura 4-11 – Superfícies de ensaio da junta soldada de anéis forjados.....	67
Figura 4-12 – Mapa de juntas soldadas examinadas por ultrassom do permutador de calor	68

Figura 4-13 – Detalhe da junta soldada WF1.....	69
Figura 5-1 – Geometria incluída no <i>software ESBeamtool</i>	71
Figura 5-2 – Velocidades de propagação no aço inoxidável austenítico.....	72
Figura 5-3 – Dados do transdutor.....	74
Figura 5-4 – Dados da sapata para varredura setorial.....	75
Figura 5-5 – Dados da sapata para varredura linear com ângulo fixo e normal.	
.....	76
Figura 5-6 – Dados do feixe sônico para varredura setorial.....	77
Figura 5-7 – Dados do feixe sônico para varredura linear com ângulo fixo.....	78
Figura 5-8 – Dados do feixe sônico para varredura linear com ângulo normal.	78
Figura 5-9 – Figura padrão para representação da simulação dos feixes sônicos	
.....	80
Figura 5-10 – Trajetória dos feixes sônicos da varredura 1 na superfície 1.	82
Figura 5-11 – Trajetória dos feixes sônicos da varredura 1 na superfície 2.	83
Figura 5-12 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 2 na superfície 2.	85
Figura 5-13 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 3 na superfície 2.	86
Figura 5-14 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 4 na superfície 2.	87
Figura 5-15 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 5 na superfície 2.	87
Figura 5-16 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 6 na superfície 2.	88
Figura 5-17 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 7 na superfície 2.	88
Figura 5-18 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 8 na superfície 2.	89
Figura 5-19 – Bloco de referência	90
Figura 5-20 – Ensaio executado no bloco de referência.....	91
Figura 5-21 – Imagem do ensaio por ultrassom ' <i>phased array</i> ' no bloco de referência.....	91
Figura 5-22 – Juntas a serem inspecionadas por ultrassom no trocador de calor.	
.....	93
Figura 5-23 – Curva DAC aço inoxidável.....	94
Figura 5-24 – Curva TCG aço inoxidável	95
Figura 5-25 – Scanner para posicionamento do cabeçote.	96
Figura 5-26 – Imagem padrão para representação dos resultados com descontinuidades.	97

Figura 5-27 – Imagens aquisitadas da varredura 1 na superfície 1.....	99
Figura 5-28 – Imagens aquisitadas da varredura 1 na superfície 2.....	100
Figura 5-29 – Imagens aquisitadas da varredura 2 na superfície 2.....	101
Figura 5-30 – Imagens aquisitadas da varredura 3 na superfície 2.....	102
Figura 5-31 – Imagens aquisitadas da varredura 4 na superfície 2.....	103
Figura 5-32 – Imagens aquisitadas da varredura 5 na superfície 2.....	104
Figura 5-33 – Imagens aquisitadas da varredura 6 na superfície 2.....	105
Figura 5-34 – Imagens aquisitadas da varredura 7 na superfície 2.....	105
Figura 5-35 – Imagens aquisitadas da varredura 8 na superfície 2.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Tabela modos de propagação [16].....	13
Tabela 2-2 – Impedâncias acústicas de alguns materiais [12].....	17
Tabela 2-3 – Valores de atenuação para materiais de aço Cr-Ni [13].....	42
Tabela 4-1 – Tabela de cabeçotes.....	60
Tabela 4-2 – Tabela de sapatas.....	60
Tabela 5-1 – Tabela de dados principais.....	73
Tabela 5-2 – Tabela padrão com os dados principais utilizados nas simulações.....	80
.....	
Tabela 5-3 – Tabela com os dados principais utilizados na simulação da varredura 1 na superfície 1.....	82
Tabela 5-4 – Tabela com os dados principais utilizados na simulação da varredura 1 na superfície 2.....	84
Tabela 5-5 – Tabela com os dados principais utilizados na simulação das varreduras 7 e 8 na superfície 2.	89
Tabela 5-6 – Exemplo de tabela padrão com a relação das descontinuidades e alguns dados principais.	98
Tabela 5-7 – Relação das descontinuidades detectadas no ensaio da superfície 2 com Varredura 2.....	101
Tabela 5-8 – Relação das descontinuidades detectadas no ensaio da superfície 2 com Varredura 4.....	103
Tabela 5-9 – Relação das descontinuidades detectadas no ensaio da superfície 2 com Varredura 5.....	104

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.

END:	Ensaio Não Destrutivo
RX:	Ensaio Não Destrutivo por Radiografia
US:	Ensaio Não Destrutivo por Ultrassom
ABENDI:	Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção
ASME:	The American Society Of Mechanical Engineers
PETROBRAS:	Petróleo Brasileiro S.A.
RNEST	Refinaria do Nordeste
SNQC	Sistema Nacional de Qualificação e Certificação
ABENDE	Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos
US-N2-S4	Inspetor de Ultrassom Nível 2 e Subnível 4
US-N3	Inspetor de Ultrassom Nível 3
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
TCG	Time-Corrected Gain
DAC	Distance-Amplitude Correction

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
CURRICULUM VITAE	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xiii
SUMÁRIO	xiv
1 – INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	3
2.1.1 – INTRODUÇÃO	3
2.1.2 – ENSAIO VISUAL	4
2.1.3 – ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE	5
2.1.4 – ENSAIO RADIOGRÁFICO	5
2.1.5 – ENSAIO POR ULTRASSOM	6
2.1.6 – DESCONTINUIDADES	8
2.2 – PRINCÍPIOS DO ULTRASSOM NO ENSAIO DE JUNTAS SOLDADAS	10
2.2.1 – INTRODUÇÃO	10
2.2.2 – ONDAS ULTRASSÔNICAS	11
2.2.3 – PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS	12
2.2.4 – COMPORTAMENTO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS	16
2.2.5 – GERAÇÃO E RECEPÇÃO DA ONDA ULTRASSÔNICA	23
2.2.6 – TÉCNICAS DE INSPEÇÃO	33
2.2.7 – TIPOS DE VISUALIZAÇÃO DOS SINAIS	35
2.2.8 – MATERIAL	38
2.3 – ULTRASSOM COM TRANSDUTORES PHASED ARRAY	42
2.3.1 – INTRODUÇÃO	42
2.3.2 – PRINCÍPIOS BÁSICOS DO SISTEMA PHASED ARRAY	44

2.3.3 – CABEÇOTES PHASED ARRAY.....	47
2.3.4 – VARREDURAS NA TECNOLOGIA PHASED ARRAY.....	49
2.3.5 – CARACTERÍSTICAS DO FEIXE NA TECNOLOGIA PHASED ARRAY.	51
2.3.6 – VISUALIZAÇÃO.....	53
3 – OBJETIVOS.	55
4 – MATERIAIS E MÉTODOS.	56
4.1 – INTRODUÇÃO.....	56
4.2 – ESTUDO DE CASO.....	56
4.3 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO POR ULTRASSOM - PHASED ARRAY.....	57
4.3.1 – RESPONSABILIDADE	58
4.3.2 – SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	58
4.3.3 – BLOCOS DE REFERÊNCIA.....	62
4.3.4 – BLOCO PARA DEMONSTRAÇÃO DO PROCEDIMENTO.....	63
4.3.5 – TIPOS DE JUNTAS	64
4.3.6 – TÉCNICA DE INSPEÇÃO	64
4.3.7 – PREPARAÇÃO E CONDIÇÃO SUPERFICIAL.....	65
4.3.8 – TÉCNICAS DE VARREDURA	65
4.3.9 – CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO.....	67
4.4 – ENSAIOS DAS JUNTAS SOLDADAS DO EQUIPAMENTO.....	68
4.4.1 – DIMENSÕES	69
4.4.2 – MATERIAIS UTILIZADOS.....	69
4.4.3 – JUNTA SOLDADA.....	69
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
5.1 – QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO	70
5.1.1 – PLANEJAMENTO DA INSPEÇÃO	70
5.1.2 – VALIDAÇÃO DO PROCEDIMENTO	90
5.2 – INSPEÇÃO DO TROCADOR COM PROCEDIMENTO QUALIFICADO.....	93
5.2.1 – CALIBRAÇÃO.....	93
5.2.2 – ENSAIOS.....	95
6 – CONCLUSÕES.	108
7 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	109
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

9 – ANEXO I – PLANO DE SOLDA	112
10 – ANEXO II – ESPECIFICAÇÃO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.....	118

1 – INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

No contexto atual de crescente otimização nas paradas de manutenção, extensão da vida útil dos equipamentos, e principalmente a preocupação com a segurança dos empregados, da população e do meio ambiente, a indústria petroquímica impõe exigências cada vez mais rígidas a seus fornecedores. No intuito de fazer com que descontinuidades sejam minuciosamente analisadas, propiciando uma melhor avaliação da criticidade dos defeitos, e sua influência sobre a integridade dos equipamentos. O objetivo principal é garantir a segurança operacional dentro de um contexto técnico e economicamente viável, proporcionando ainda mais confiabilidade principalmente em equipamentos que trabalham com fluidos categorizados como perigosos. Dentre esses equipamentos destacam-se, principalmente pela Petrobras, os equipamentos pressurizados que operam com pressões parciais de H₂ (hidrogênio) ou H₂S (sulfeto de hidrogênio) em seu processo de produção. A preocupação nestes casos é com a ocorrência dos fenômenos de corrosão sobtensão e trincamento induzido pelo H₂. Essas exigências se aplicam a todas as etapas do fornecimento, seja aquisição da matéria prima, projeto, fabricação, inspeção ou outras etapas essenciais para o fornecimento dos equipamentos.

Dentre as exigências das Normas Petrobras N-1704 [1] e N-1706 [2], uma das principais imposições das ultimas edições foi à exigência do ensaio por ultrassom computadorizado com registro em substituição ao ensaio por ultrassom convencional nas juntas soldadas, nos casos em que a geometria não permite a realização de exame radiográfico total. No caso de juntas radiografáveis, a substituição do ensaio radiográfico pelo ultrassom computadorizado já é permitida pelo ASME de acordo com o *code case 2235-9* [3] independente da geometria da peça.

A técnica de ultrassom computadorizado com registro tem sido utilizada pela indústria nacional na inspeção de tubulações, sendo considerada relativamente nova para os fornecedores nacionais de equipamentos pressurizados. Desta forma, se faz necessária a avaliação e validação de um

método para atendimento aos novos requisitos. Um dos métodos que atendem a essa exigência da Petrobras é o ensaio por ultrassom com transdutores tipo '*phased array*', porém os principais desenvolvimentos deste método nos ensaios não destrutivos de juntas soldadas no Brasil fazem referência à inspeção automatizada em tubulações, devido à grande produtividade, qualidade e eficiência do processo na detecção de descontinuidades. Por outro lado, na inspeção de equipamentos, este processo ainda não está totalmente difundido entre os fornecedores. Isso ficou claramente evidenciado durante os primeiros fornecimentos de equipamentos com essa nova exigência, onde a complexidade da geometria da junta, material e tempo das inspeções, aliado ao desconhecimento da técnica, entre outros fatores, dificultaram a disseminação e aplicação da mesma. Desta forma, nos primeiros equipamentos com este requisito, foi aprovada pela Petrobras a retirada da necessidade do ensaio por ultrassom computadorizado devido à falta de desenvolvimento e qualificações deste processo no Brasil. Por várias ocasiões, a exclusão deste ensaio do escopo de fornecimento foi aprovada, continuando a utilização nestes casos do ensaio por ultrassom convencional. Porém, com o desenvolvimento do ensaio por ultrassom computadorizado em tubulações e estudos desenvolvidos pela Petrobras, esta concessão deixou de existir, voltando a ser obrigatória a utilização do ultrassom computadorizado, exigindo que seus fornecedores se adaptassem a essa tecnologia, desenvolvendo o procedimento de execução do ensaio por ultrassom computadorizado para as juntas soldadas de seus equipamentos. É neste contexto que este trabalho vem para contribuir no desenvolvimento desta nova tecnologia aplicada a equipamentos.

Os fornecedores que conseguirem desenvolver essa técnica com eficiência terão um diferencial em relação ao mercado podendo, inclusive, trabalhar com o fornecimento de uma gama maior de equipamentos, aliado a um maior valor agregado, obtendo consequentemente um volume de faturamento maior com um menor número de equipamentos, devido à tecnologia envolvida.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 – ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.

2.1.1 – INTRODUÇÃO.

Uma definição simplificada e direta de ensaio não destrutivo (END), pode ser descrita como qualquer método utilizado no teste, exame ou avaliação de qualquer tipo de objeto, sem que este seja danificado ou alterado de qualquer forma. Com o intuito de determinar a ausência ou presença de condições ou descontinuidades que possam comprometer a utilidade ou manutenção desses objetos [4].

Abaixo está listada uma relação dos principais métodos de END utilizados na indústria, conforme publicado no site da associação brasileira de ensaios não destrutivos e inspeções (ABENDI) [5]:

- Correntes parasitas;
- Partículas magnéticas;
- Estanqueidade;
- **Ensaio visual;**
- Emissão acústica;
- **Ultrassom;**
- **Radiografia;**
- **Líquido Penetrante;**
- Termografia;
- Análise de vibrações;

Dentre os ensaios não destrutivos listados acima, estão destacados em negrito os testes requeridos pelas normas da Petrobras N-1704 [1] e N-1706 [2] para a inspeção das juntas soldadas de equipamentos sujeitos a pressão, os quais estão enquadrados e serão abordados neste trabalho. Deve-se ressaltar que o ensaio de partícula magnética também é requerido para este tipo de junta, porém não foi citado, já que o objeto de estudo não é magnético, sendo este ensaio substituído pelo ensaio de líquido penetrante. Dentro dos diversos

tipos de END, os ensaios podem ser utilizados de forma a complementar um ao outro, ou utilizado para a substituição por outro tipo de ensaio de acordo com a aplicação, material, necessidade e outros.

END como uma tecnologia, tem visto um crescimento significativo e inovação única nos últimos anos. É, de fato, considerada hoje uma das mais rápidas tecnologias crescentes do ponto de vista da singularidade e inovação. Melhorias e modificações recentes em equipamentos, bem como uma compreensão mais completa dos materiais e da utilização de diversos produtos e sistemas, além das necessidades de segurança têm contribuído para o desenvolvimento tecnológico dos métodos de ensaios não destrutivos, consequentemente melhorando a confiabilidade e segurança dos objetos inspecionados [4]. É neste contexto de desenvolvimento tecnológico, confiabilidade e segurança, que a Petrobras inovou nas inspeções de equipamentos para serviços críticos.

2.1.2 – ENSAIO VISUAL.

O ensaio visual foi um dos primeiros métodos de END utilizados na indústria, mas foi um dos últimos métodos a ser formalmente reconhecido. O instrumento mais importante, neste ensaio, é o olho humano, com isso algumas restrições a esse método de inspeção são necessárias. Sendo possível executar a inspeção apenas na superfície de um objeto que se tenha acesso direto, caso contrário é necessário à utilização de algum dispositivo que permita a visualização do ponto a ser inspecionado.

É aplicado em diversas etapas de fabricação, porém no caso específico no ensaio de juntas soldadas a técnica de ensaio visual direto é a mais recomendada para a detecção de descontinuidades, porém deve ser observada a limitação da detecção somente de descontinuidades abertas e visíveis na superfície, além da utilização na inspeção de preparação, acabamento, dimensional, entre outros fatores que influenciam na qualidade da região soldada [4].

2.1.3 – ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE.

O Ensaio de Líquido Penetrante é um dos métodos de END mais utilizados para a detecção de descontinuidades superficiais em materiais sólidos não magnéticos, e detecta descontinuidades extremamente finas, na ordem de 0,001mm de abertura, complementando o ensaio visual [6]. Possui uma relativa simplicidade na aplicação e pode ser utilizado em uma ampla variedade de materiais, tamanhos e formas, não sendo recomendado apenas na inspeção de materiais porosos ou com superfícies muito grosseiras [4]. A grande limitação deste ensaio é a possibilidade de detecção apenas de descontinuidades abertas para a superfície, uma vez que o seu princípio fundamental em que se baseia o ensaio de líquido penetrante é a capilaridade ou ação capilar [7]. O ensaio pode ser aplicado em diversos tipos de inspeção, principalmente na detecção de trincas em peças forjadas, materiais conformados, entre outros, mas principalmente na inspeção de juntas soldadas.

2.1.4 – ENSAIO RADIOGRÁFICO.

O ensaio não destrutivo por radiografia (RX) é um dos métodos mais aceitos entre os principais códigos utilizados nos projetos de equipamentos pressurizados, para a validação e detecção de descontinuidades em juntas soldadas. Isto tem se baseado principalmente, a partir de um conhecimento adquirido das vantagens e limitações inerentes ao ensaio não destrutivo de radiografia. Os princípios físicos subjacentes de inspeção radiográfica têm sido conhecidos e desenvolvidos há quase um século e, não surpreendentemente, a radiografia evoluiu durante este tempo em uma tecnologia sólida [8].

Os principais códigos e normas utilizam o ensaio radiográfico como critério para aceitação das juntas soldadas de equipamentos pressurizados. Entre os principais códigos e normas, o código ASME seção VIII Divisão 1 evidencia a importância do RX desde o projeto, onde o cálculo das espessuras requeridas dos equipamentos depende da eficiência da junta soldada, a qual é definida de acordo com a abrangência do RX [9].

A emissão radioativa na peça inspecionada proporciona uma diferença de absorção da radiação devido às diferenças de densidade, variações de espessura e composição química, espaços vazios de descontinuidades. Comparando-se essa diferença de absorção com as regiões vizinhas, possibilita a detecção de descontinuidades volumétricas e internas ao material com uma excelente sensibilidade, no caso dos aços inoxidáveis, complementa o ensaio de líquido penetrante, que avalia apenas descontinuidades superficiais. A interpretação e avaliação são relativamente mais complexas se comparada ao ensaio de líquido penetrante, tornando-se uma das partes mais importante do processo, devendo ser criteriosamente avaliada pelo inspetor qualificado [10].

2.1.5 – ENSAIO POR ULTRASSOM.

O ensaio não destrutivo por ultrassom (US) é largamente utilizado não só na indústria, mas também em exames na área médica. Isto devido à possibilidade de execução do ensaio em analisar com facilidade volumes internos dos objetos tanto em metais ferrosos como não ferrosos, e também em não metais [11]. O método de US consiste basicamente na formação do feixe sônico de alta frequência, através de um transdutor, que é introduzido no material a ser inspecionado, e ao percorrer o material o feixe sônico é refletido ao encontrar uma interface. Essa reflexão depende do estado físico da matéria que está do lado oposto da interface, sendo monitorada e analisada através de um monitor que indica a intensidade da energia refletida. Com isso é possível à obtenção de sinais que avaliados podem indicar descontinuidades, espessura do material ou imagens que permitem uma melhor análise do objeto [12]. Dentro deste contexto, o US pode ser representado de forma simplificada conforme figura 2-1, onde o ensaio por ultrassom é subdividido em algumas partes principais, sendo um transdutor, que faz a função de fonte geradora, o meio de propagação formado pela peça a ser ensaiada, uma unidade receptora, formado pelo próprio transdutor de emissão ou por outro transdutor e por um visor, que permite a interpretação do ensaio [11].

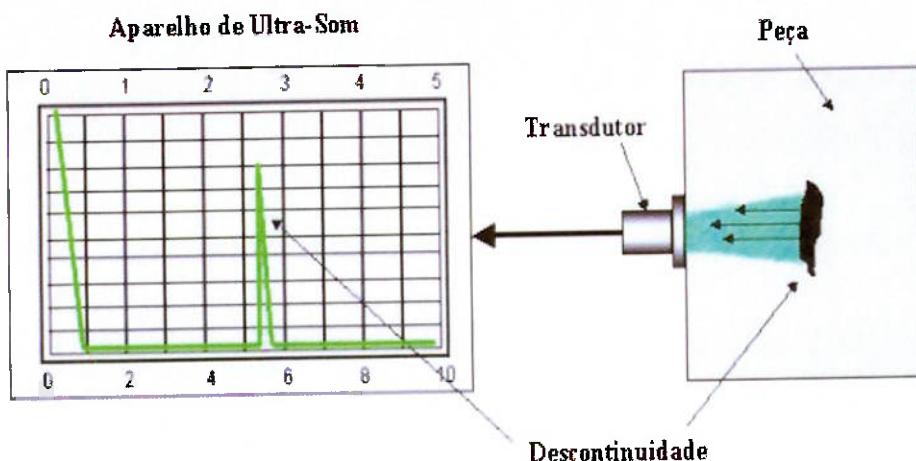


Figura 2-1 - Princípio Básico da Inspeção de Materiais por US [13].

Dentro deste conceito do US e sua aplicação em diversos tipos de materiais, juntamente com a propriedade de reflexão quase total em interface metal-gás, e reflexões parciais nas interfaces metal-liquido e metal-metal, faz com que o ensaio por ultrassom seja utilizado para diversas finalidades. Desde avaliações médicas, análise de integridade de materiais, como chapas, forjados, fundidos, na análise de descontinuidades em juntas soldadas, como trincas, poros, falta de fusão, entre outras. Este método possui diversas vantagens, como por exemplo, grande poder de penetração, alta sensibilidade, maior precisão. É suficiente o acesso somente a uma superfície, indicações instantâneas, varredura volumétrica, não gera efeitos nocivos às pessoas e materiais, possuem boa portabilidade, entre outros. Por outro lado, o método manual requer muita habilidade, atenção e pessoal qualificado na execução e avaliação dos resultados, a inspeção se torna difícil em formatos irregulares, superfícies rugosas, ou sem homogeneidade estão entre algumas das desvantagens do ensaio por ultrassom se comparado a outros métodos [12].

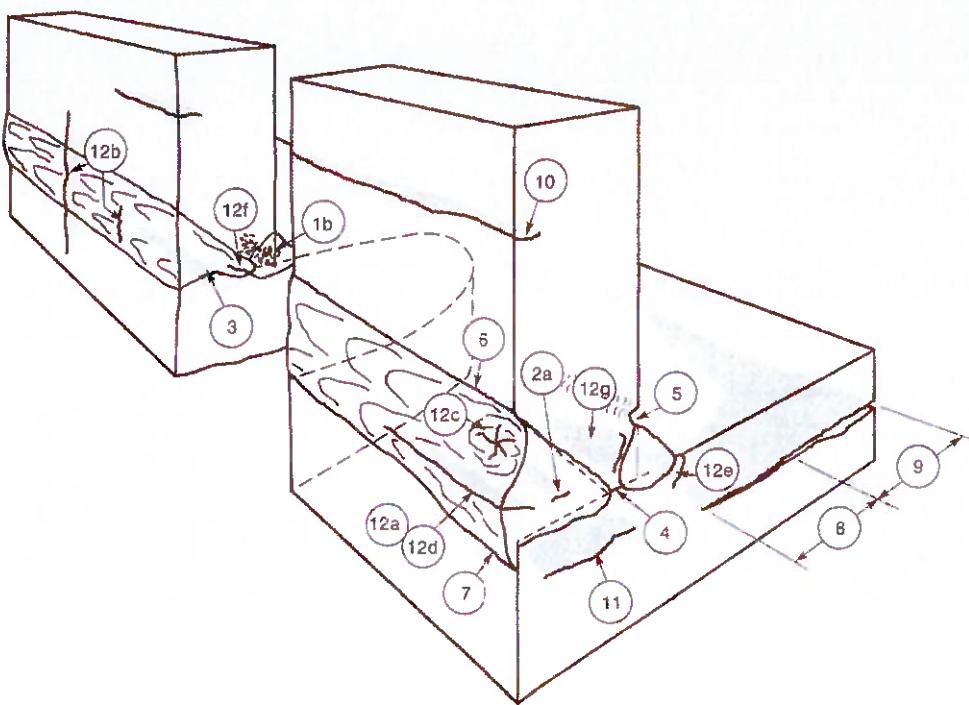
2.1.6 – DESCONTINUIDADES.

Todos os materiais estruturais são compostos de átomos e moléculas e nos projetos de engenharia são considerados como homogêneos, a uniformidade das propriedades e a continuidade dos materiais. No entanto, na realidade nunca será obtido uma homogeneidade, continuidade e propriedades de forma absoluta em qualquer componente. A falta de continuidade e homogeneidade no material é denominada descontinuidade.

As descontinuidades estão presentes em todos os materiais, porém nem todas são prejudiciais ao material e devem ser avaliadas como aceitáveis ou rejeitadas, dentro de um critério de aceitação elaborado de forma a não comprometer o desempenho ou a confiabilidade do material em relação às considerações realizadas no projeto. É neste contexto que os ensaios não destrutíveis se mostram de suma importância na indústria, com objetivo principal de detectar as descontinuidades e tornar possível sua avaliação através da determinação de algumas informações importantes, como sua localização, quantidade, forma, tamanho, orientação e tipo.

As descontinuidades podem ter sua origem em qualquer das etapas de fabricação, desde o processo de fabricação da matéria prima, por exemplo, na laminação, forjamento, fundição, entre outros, como também podem surgir durante a operação, manutenção, e qualquer etapa do processo de fabricação, ou seja, durante a conformação, tratamento térmico e principalmente durante o processo de soldagem [4].

Existem diversos processos de soldagem, e cada um deles possuem características específicas que podem dar origem a diferentes tipos de descontinuidades conforme mostrado na figura 2-2.

**Legenda:**

- | | | |
|----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| (1b) Porosidade Agrupada | (7) Sobreposição | (12b) Trinca Transversal |
| (2a) Inclusão de Escória | (8) Laminação | (12c) Trinca na Cratera |
| (3) Falta de Fusão | (9) Delaminação | (12e) Trinca na Margem |
| (4) Falta de Penetração | (10) Dobra | (12f) Trinca de Raiz |
| (5) Mordedura | (11) Trinca Lamelar | (12g) Trinca na ZAC |
| (6) Deposição Insuficiente | (12a) Trinca Longitudinal | |

Figura 2-2 – Principais descontinuidades detectadas em juntas soldadas [14].

Neste conceito, detectar os defeitos realmente é importante para a garantia da qualidade do produto final. Porém, para uma melhoria continua tanto do processo de fabricação, quanto para a confiabilidade e qualidade do produto, o ideal é que a cada novo defeito seja feito um estudo com as causas, evitando que o mesmo ocorra novamente, isso além de permitir um aprendizado, também proporciona um desenvolvimento nos processos utilizados, sempre tendendo atingir a meta de defeito zero.

2.2 – PRINCÍPIOS DO ULTRASSOM NO ENSAIO DE JUNTAS SOLDADAS.

2.2.1 – INTRODUÇÃO.

O US foi introduzido como técnica de ensaio não destrutivo de juntas soldadas nos anos 60. Desde então, a técnica teve um extenso desenvolvimento, fazendo o ensaio obter uma grande aceitação dentre os principais códigos de projeto, e inspeção aplicáveis. Consequentemente, o US é agora, juntamente com o RX, uma das principais técnicas utilizadas para a validação nas aplicações de inspeção de estruturas e equipamentos soldados [8]. O US convencional está relacionado nas normas Petrobras como ensaio complementar ao RX. É normalmente aplicado às juntas soldadas em que a geometria da junta, acesso à junta não permita a execução do ensaio radiográfico. Porém com o intuito de conseguir um registro permanente dos resultados e uma melhoria e confiabilidade na avaliação do ensaio, foi desenvolvido os métodos de US com registro, o qual foi adotado por diversas normas como método alternativo ou até como método obrigatório. Isso pode ser claramente evidenciado no código ASME seção VIII Divisão 1 [9], sendo incluído em 2005 o *code case 2235-9* [3], onde foi permitida a substituição do RX pelo US, porém desde que esse o US seja computadorizado. Da mesma forma as normas Petrobras N-1704 e N-1706 incluíram como exigência em todas as juntas onde não é possível a execução de RX [1,2].

Como objeto principal deste estudo, os fundamentos do US voltado para o END de juntas soldadas, assim como os fundamentos do US pelo método '*phased array*' serão abordados como complemento ao US nos próximos capítulos de forma restrita aos tópicos necessários para proporcionar um entendimento adequado dos fenômenos envolvidos que serão discutidos nos capítulos posteriores.

2.2.2 – ONDAS ULTRASSÔNICAS.

As ondas ultrassônicas possuem os mesmos princípios que as ondas de sons audíveis. Ambas são ondas mecânicas, obtidas por uma fonte geradora através da vibração repetida de um material durante certo tempo, ou seja, com certa frequência, e necessitam de um meio elástico para se propagarem, podendo ser sólidos, líquidos e gasosos, porém nunca no vácuo. O que principalmente difere as ondas ultrassônicas das ondas de sons audíveis são as frequências das ondas geradas. Essa diferença pode ser observada de forma clara na figura 2-3, onde se tem a divisão das ondas por níveis de frequência de acordo com as frequências audíveis para o ser humano. Nos níveis de frequências geradas abaixo de 20Hz se define o infrassom, na faixa de 20Hz e 20KHz são caracterizados os sons audíveis para o ser humano e no caso de ondas com frequência acima de 20KHz, que excedem ao valor máximo perceptível pelo ouvido humano, define-se o ultrassom [12].

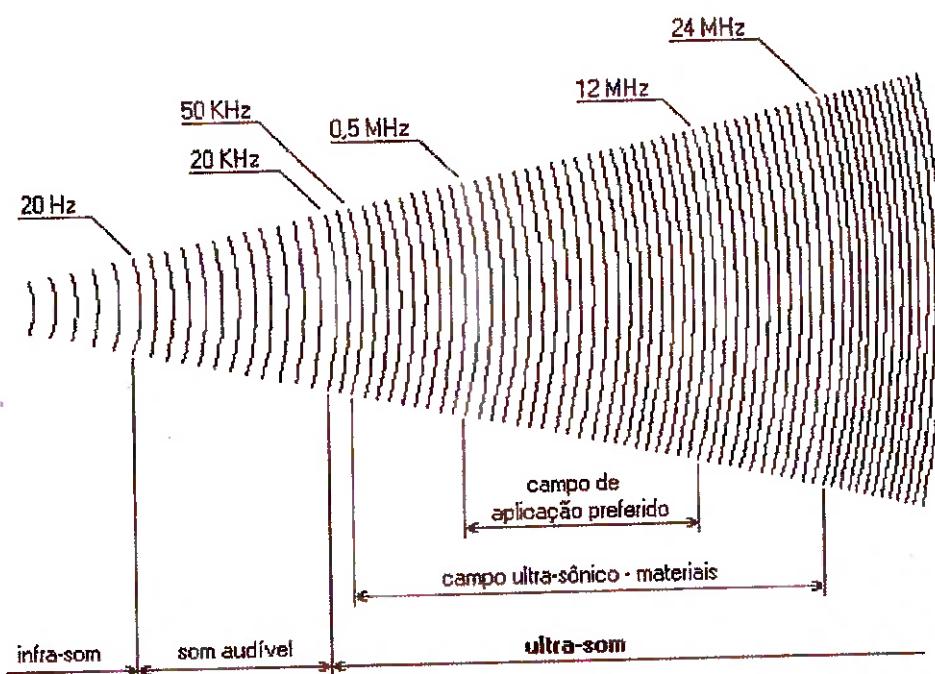


Figura 2-3 – Faixa de classificação das ondas sonoras [12].

Dentre essa faixa do ultrassom, para os fins de ensaios tradicionais por ultrassom na indústria, a região de trabalho se concentra principalmente entre 0,5 a 20 MHz [15]. Dentro deste conceito, pode-se avaliar um fenômeno que presenciamos no cotidiano para melhor entendimento do comportamento das ondas ultrassônicas. Uma porcentagem das ondas sonoras produzidas em um ambiente qualquer se reflete nas paredes, enquanto que a outra parte se propaga a outros ambientes. Esta relação das ondas refletidas e propagadas depende das interfaces que compõem o meio de propagação das ondas. Desta forma, nos ambientes acústicos temos uma proporção muito maior de ondas refletidas, se comparadas às ondas propagadas. As ondas viajam na sua velocidade característica em um meio homogêneo, sendo que esta velocidade depende das propriedades do meio e não das propriedades da onda.

2.2.3 – PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS.

As ondas propagam-se nos meios elásticos. Estes meios elásticos são constituídos de átomos ou moléculas que estão dispostos pelas forças internas de atração e repulsão existentes, essas forças são comparadas a molas e podem ser esquematizadas conforme demonstrado na figura 2-4.

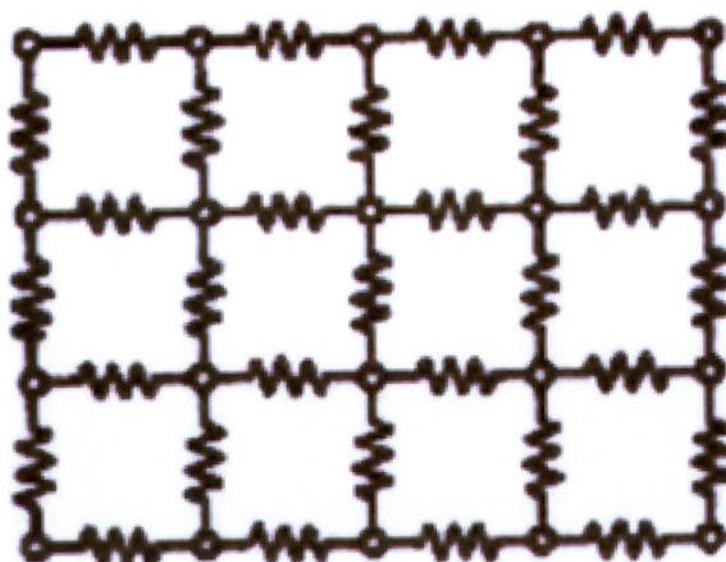


Figura 2-4 – Representação esquemática do átomo [16].

Quando as partículas do meio são deslocadas de suas posições de equilíbrio por qualquer força externa que proporcione tensões abaixo do limite elástico, atuam sobre estas partículas forças internas de atração e repulsão (molas) tentando restaurar suas posições originais, combinadas com a inércia e as forças interatômicas existentes entre partículas vizinhas, conduz aos movimentos oscilatórios do meio [12]. A orientação das forças internas de restauração da posição original define os modos de propagação possíveis no material, tanto no interior de seu volume quanto próximo à sua superfície [15].

A tabela 2-1 abaixo resume os mais importantes modos de propagação das ondas utilizadas no ultrassom.

Tabela 2-1 – Tabela modos de propagação [16].

Tipos de propagação	Vibração das partículas	Inspecção
Longitudinal ou compressiva	Na direção de propagação.	Volumétrica
Transversal ou cisalhante	Perpendicular à direção de propagação.	Volumétrica
Rayleigh	Movimentos elípticos no plano formado entre o eixo da direção de propagação e o eixo perpendicular à superfície.	Superficial
Creeping	Na direção de propagação	Superficial
Love	Movimentos elípticos nos planos paralelos a superfície, sendo a direção perpendicular à propagação predominante.	Superficial
Lamb	Movimentos elípticos no plano formado entre o eixo da direção de propagação e o eixo perpendicular à superfície.	Superficial e volumétrica para espessuras iguais a um comprimento de onda

Entre os modos de propagação de onda listada na tabela 2-1, no método longitudinal ou compressivo, as ondas se propagam nos materiais como uma série alternada de zonas de compressão e rarefação, nas quais as partículas transmitem a vibração, fazendo com que a direção de propagação coincida com a oscilação do meio. Sua utilização é comum, tanto nos sólidos, nos líquidos,

assim como nos gases. No entanto, o modo de propagação transversal ou cisalhante é possível somente nos sólidos, e a alguns fluidos com viscosidade elevada. Esses materiais apresentam tensões cisalhantes, fazendo com que as moléculas possam suportar vibrações em outras direções. Combinações destes dois modos, longitudinal e transversal são também possíveis, especialmente próximos à superfície, gerando um padrão elíptico de oscilação do meio, conforme representado na figura 2-5 [15].

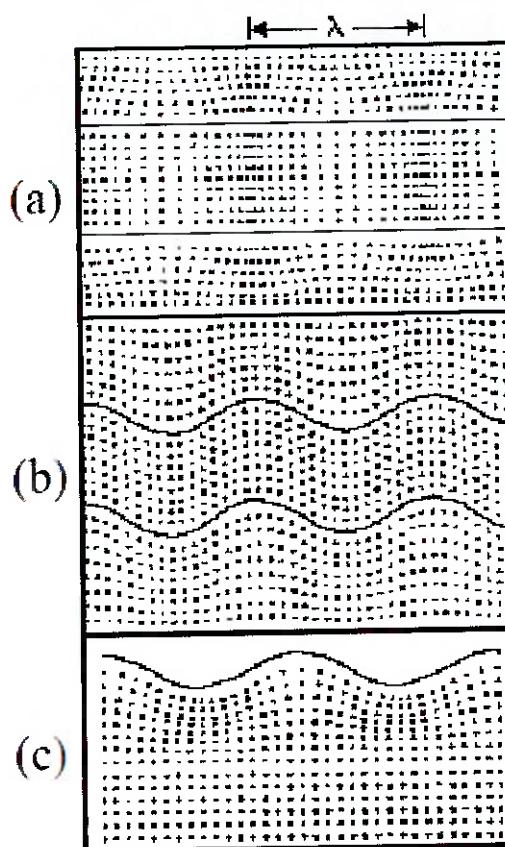


Figura 2-5 – Modos típicos de propagação das ondas: (a) Longitudinal, (b) Transversal, (c) Superficial. A dimensão λ representa o comprimento de onda [15].

A velocidade das ondas ultrassônicas com que a onda se propaga depende das propriedades do meio, sendo diferente para cada modo de propagação, isto pode ser evidenciado nas equações 2-1, 2-2 e 2-3 que expressam respectivamente as velocidades de fase das ondas longitudinais, transversal e superficial [12].

$$\mathbf{v}_L = \sqrt{\frac{E.(1-\mu)}{\rho.(1+\mu).(1-2\mu)}} \quad (2-1)$$

$$\mathbf{v}_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2.\rho.(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2.(1-\mu)}} \cdot \mathbf{v}_L \quad (2-2)$$

$$\mathbf{v}_S = \left(\frac{0,87+1,12\mu}{1+\mu} \right) \cdot \mathbf{v}_T \quad (2-3)$$

Onde:

v_L = Velocidade de fase da onda longitudinal [m/s];

v_T = Velocidade de fase da onda transversal [m/s];

v_S = Velocidade de fase da onda superficial [m/s];

E = Módulo de elasticidade [N/m²];

μ = coeficiente de Poisson, definido pela relação adimensional: $((E - 2G) / 2G)$;

G = módulo de rigidez [N/m²];

ρ = massa específica [kg/m³].

Em cada modo de propagação a velocidade de fase relaciona-se com a frequência e o comprimento de onda pela equação 2-4 [12].

$$v = \lambda \cdot f \quad (2-4)$$

Onde:

v = velocidade de fase da onda [m/s];

λ = comprimento de onda [m];

f = frequência de oscilação da onda [Hz].

2.2.4 – COMPORTAMENTO DAS ONDAS ULTRASSÔNICAS.

2.2.4.1 – CARACTERISTICAS DA INTERFACE

O limite entre um meio e outro meio, é definido como interface. Essa interface é de suma importância no ensaio por ultrassom, sempre que as ondas elásticas percorrem um meio e encontra uma interface, parte da energia acústica incidente é refletida de volta para o primeiro meio e a energia restante é transmitida ao segundo meio [4], conforme demonstrado na figura 2-6.

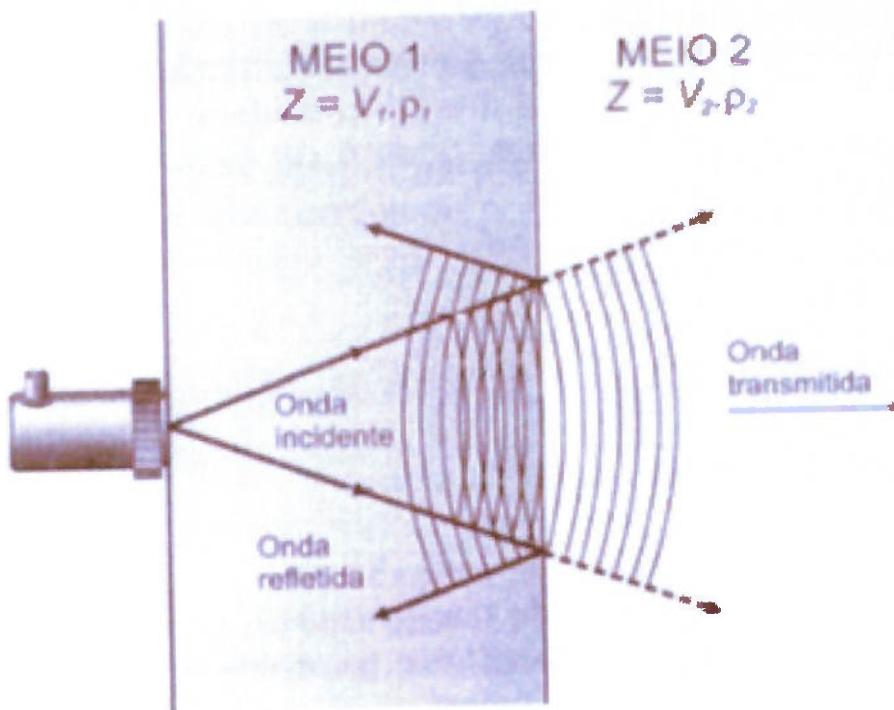


Figura 2-6 – Reflexão e transmissão da onda sônica [12].

As propriedades da densidade e elasticidade são os fatores que define o quanto de energia é refletida e o quanto é transmitida na interface. Cada material possui um fator específico usado para calcular a proporção refletida na interface. Este fator é definido como impedância acústica, é obtida pelo produto da massa específica pela velocidade sonica do material, conforme expresso na equação 2-5 [12].

$$Z = \rho \cdot v \quad (2-5)$$

Onde:

Z = impedância acústica característica do meio [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];

ρ = massa específica [kg/m^3];

v = velocidade de fase da onda [m/s].

Sabendo que quanto maior a impedância acústica, maior é a parcela de energia refletida. É possível determinar, durante o ensaio por ultrassom, a quantidade de energia refletida e transmitida pela descontinuidade. Na tabela 2-2 estão listados alguns valores de referência de alguns dos principais materiais utilizados em equipamentos petroquímicos. Porém, as propriedades acústicas dos metais e ligas são influenciadas por variações na estrutura, e nas condições metalúrgicas, consequentemente algumas impedâncias acústicas podem variar dos valores definidos na tabela 2-2, de acordo com as características metalúrgicas dos materiais [12].

Tabela 2-2 – Impedâncias acústicas de alguns materiais [12].

Material	Massa Específica kg/m^3	Velocidade transversal m/s	Velocidade longitudinal m/s	Impedância acústica $10^6 \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
Aço Carbono	7850	3250	5920	46,472
Aço inoxidável Austenítico	7900	3070	5640	44,556
Acrílico	1180	1430	2730	3,221
Água	1000	-	1480	1,480

A porcentagem de energia acústica refletida pela interface depende da razão entre as impedâncias acústicas e o ângulo de incidência. Quando a onda ultrassônica incide em um ângulo de 0° , ou seja, perpendicularmente em uma interface, ocorre apenas reflexão e transmissão, sem mudança na direção do feixe sônico. Esta incidência é denominada incidência normal, neste caso o coeficiente de reflexão (R) é obtido pela razão entre a intensidade do feixe refletido e a intensidade do feixe incidente e o coeficiente de transmissão (T) é

a razão entre a intensidade do feixe transmitido, e a intensidade do feixe incidente [12], sendo expressos pelas equações 2-6 e 2-7:

$$R = \frac{Ir}{Ii} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2-6)$$

$$T = \frac{It}{Ii} = \frac{4(Z_2 \cdot Z_1)}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2-7)$$

Também pode-se obter, em relação à pressão sônica, o coeficiente de reflexão (R) e o coeficiente de transmissão (T) é a amplitude de pressão exercida no material pela passagem do som [12], sendo expressos pelas equações 2-8 e 2-9:

$$R = \frac{Pr}{Pi} = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (2-8)$$

$$T = \frac{It}{Ii} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2-9)$$

Onde:

R = coeficiente de reflexão para pressão;

T = coeficiente de transmissão para pressão;

Pi = amplitude da onda de pressão do feixe incidente [Pa];

Pr = amplitude da onda de pressão do feixe refletido [Pa];

Pt = amplitude da onda de pressão do feixe transmitido [Pa];

Z1 = impedância acústica característica do meio 1 [kg/(m²·s)];

Z2 = impedância acústica característica do meio 2 [kg/(m²·s)];

Quando o ângulo de incidência for diferente de 0°, denomina-se como incidência oblíqua, e devem ser considerados os fenômenos de conversão de modo (mudança do tipo de oscilação ou tipo de onda) e refração (mudança na direção de propagação da onda transmitida). Todas as ondas ultrassônicas

possíveis de serem geradas na interface a partir de uma onda longitudinal incidente obliquamente podem ser visualizadas na figura 2-7 [12].

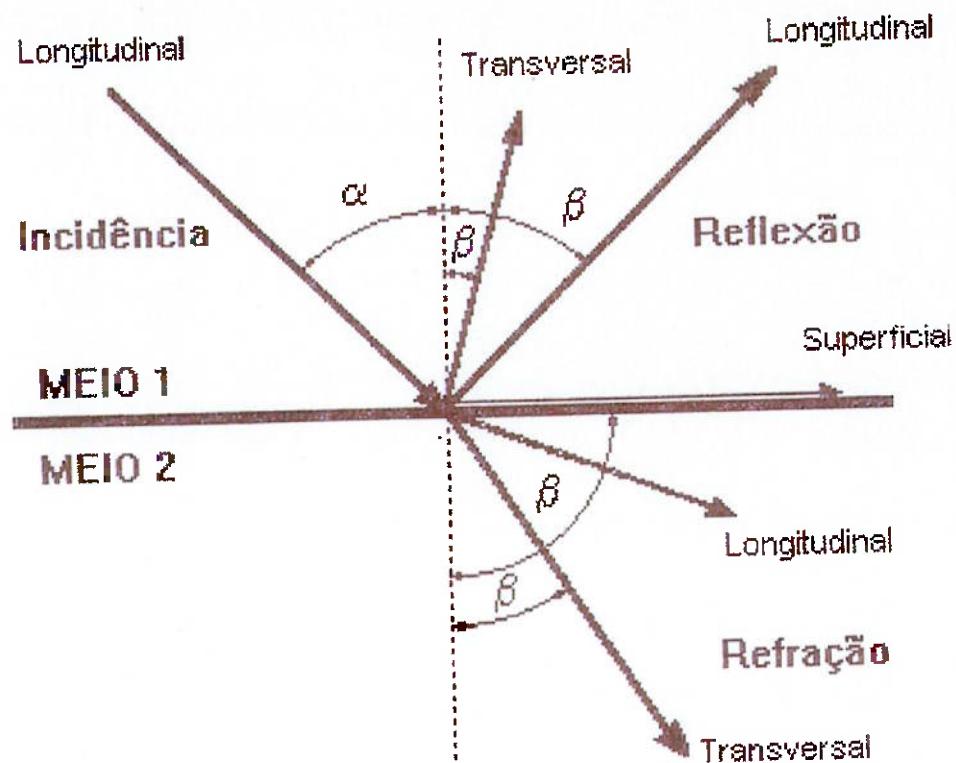


Figura 2-7 – Possíveis modos de propagação das ondas [12].

Porém nem todas as ondas mostradas na figura 2-7 serão produzidas, a propagação das ondas depende do ângulo de incidência e das velocidades sônicas dos meios que compõem a interface. O comportamento das ondas ultrassônicas nas interfaces é conhecido como lei de Snell, e relaciona os ângulos do feixe incidente e do feixe refletido ou refratado com as velocidades sônicas dos meios, conforme expresso na equação 2-10 [12]:

$$\frac{\operatorname{sen}(\alpha)}{vi} = \frac{\operatorname{sen}(\beta)}{vr} \quad (2-10)$$

Onde:

α = ângulo do feixe incidente [radianos];

β = ângulo do feixe refletido ou refratado [radianos];

v_i = velocidade da onda no meio de incidência [m/s];

v_r = velocidade da onda no meio de referência, no qual foi refletida ou refratada [m/s].

A partir da lei de Snell é possível determinar o primeiro e segundo ângulos críticos. O primeiro ângulo crítico é determinado como o maior ângulo incidente onde ocorra a conversão de modo na interface, com a onda longitudinal refratada exatamente a 90° , ficando com apenas a onda transversal refratada no segundo meio. Conforme mostrado na figura 2-8.

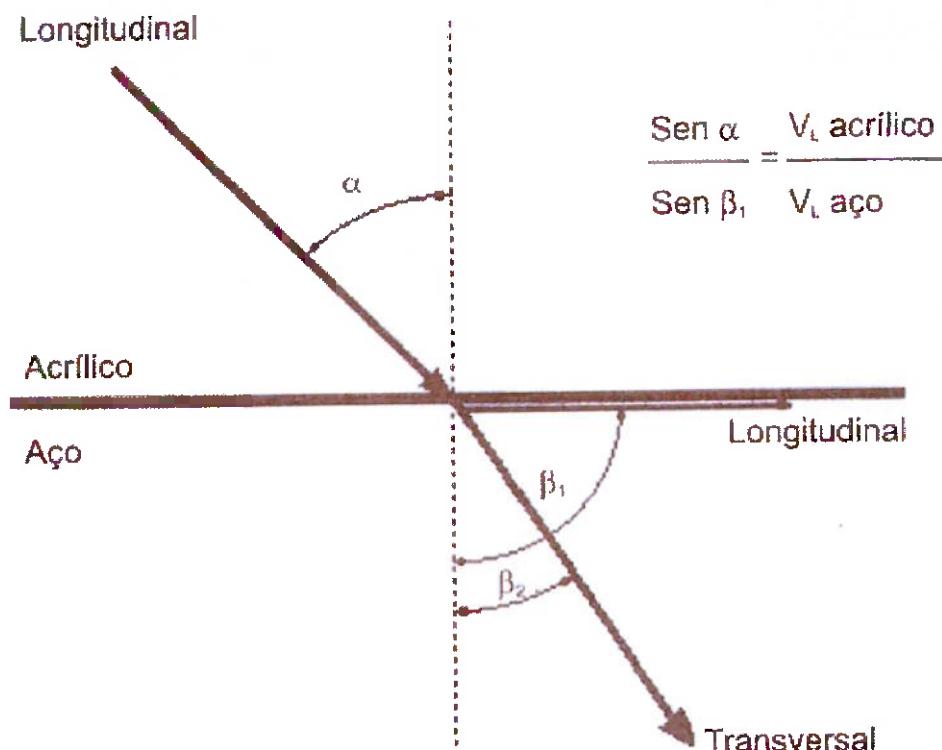


Figura 2-8 – Primeiro ângulo crítico [12].

Se o ângulo de incidência for aumentado gradativamente, a partir do primeiro ângulo critico, será refratada somente a onda transversal, até certo limite onde a onda transversal se aproxima da superfície de interface formando exatamente 90° . Para este ângulo de incidência denomina-se segundo ângulo critico. Conforme mostrado na figura 2-9.

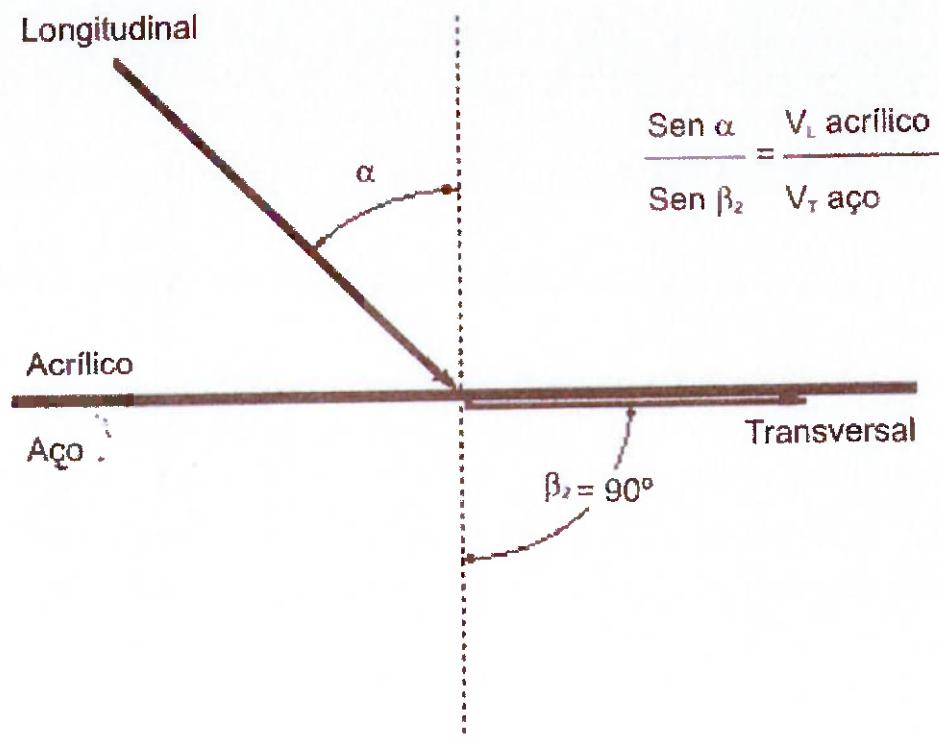


Figura 2-9 - Segundo ângulo crítico [12].

O primeiro e segundo ângulos críticos são de extrema importância tanto na inspeção com feixe angular, como na inspeção superficial. Na inspeção superficial o ângulo de incidência deve ser regulado exatamente no primeiro ou no segundo ângulos críticos, onde são geradas propagações de ondas refratadas superficiais na interface, conforme mostrado nas figuras 2-8 e 2-9. Enquanto que na inspeção com feixe angular, o ângulo incidente deve ser ajustado entre o primeiro e segundo ângulos críticos, de forma que se tenha apenas o modo de onda refratada transversal, facilitando, no caso do ultrassom convencional, a interpretação dos sinais gerados. Os ajustes no ângulo de incidência são possíveis na refração inicial, já nas múltiplas reflexões com incidência obliqua em suas paredes ou descontinuidades podem gerar conversão de modos, dificultando a interpretação do ultrassom.

As descontinuidades que possuem ar em seu interior são mais fáceis de serem detectadas, pois a interface do ar reflete totalmente a energia sônica, isto devido à diferença relativamente grande entre as impedâncias acústicas do ar e do metal. Porém essa propriedade de reflexão se torna um problema no

momento em que um transdutor é simplesmente colocado diretamente sobre a superfície formando um filme de ar muito pequeno, mas suficiente para refletir praticamente toda a energia sonica, sendo pouca energia transmitida à peça ensaiada.

Para eliminar esse problema é necessário eliminar o ar desta interface, para isso é utilizado uma substancia, que coincide com a impedância acústica do transdutor para o metal e permitir que o transdutor deslize sobre a superfície do metal com menor atrito. Tornando-se possível com a utilização de um líquido, gordura, ou em pasta. Essa substância é denominada acoplante.

2.2.4.2 – ATENUAÇÃO

Quando o feixe sônico se propaga através do meio, a intensidade diminui com o aumento da distância. Em um material considerado ideal essa intensidade seria reduzida somente pela dispersão do feixe, no entanto, nos materiais reais os principais fatores responsáveis por esta diminuição de intensidade são as perdas por transmissão, efeitos de interferência e dispersão do feixe, esses fatores combinados são denominados de atenuação. Geralmente essa atenuação corresponde proporcionalmente ao quadrado da frequência das ondas sônicas aplicadas.

As perdas por transmissão incluem absorção, espalhamento e efeito da impedância acústica nas interfaces encontradas. A absorção ocorre devido à transformação de parte da energia mecânica em energia térmica, além das forças contrárias ao movimento oscilatório que tenta equilibrar o sistema. Já no espalhamento a ocorrência deve-se ao material não ser totalmente homogêneo, sendo este fenômeno evidenciado de forma mais nítida em materiais anisotrópicos e materiais com tamanho de grãos maiores que 0,1 vezes o comprimento de onda. O efeito de espalhamento torna-se significante e dificulta a análise dos resultados da inspeção. O efeito da impedância acústica já foi discutido no item 2.2.4.1, sendo mais importante em inspeções aplicadas a materiais que envolvem mais que uma interface, ou seja, em materiais compostos e inspeção por imersão [12].

A difração é intimamente ligada ao fenômeno da interferência, e está relacionada com a interação de uma onda sônica com um obstáculo muito pequeno se comparado ao feixe sônico. Esse efeito pode ser encontrado em descontinuidades tipo poro, inclusão de escória, entre outras. A onda, ao contornar as bordas da descontinuidade, toma diferentes caminhos e produz um padrão vibratório diferente, cujos comprimentos de ondas totais podem variar. As ondas oriundas da original acabam por se recombinar ao passar por um dado ponto do espaço de acordo com o princípio de Huygens definido no item 2.2.5.2 [17].

A dispersão do feixe também responsável pela redução da intensidade do feixe sonico está descrita no item 2.2.4.

2.2.5 – GERAÇÃO E RECEPÇÃO DA ONDA ULTRASSÔNICA.

2.2.5.1 – MÉTODOS DE GERAÇÃO E RECEPÇÃO DA ONDA ULTRASSÔNICA.

Conforme já mencionado anteriormente, as ondas ultrassônicas são ondas mecânicas, que consistem na oscilação das partículas atômicas ou moleculares da peça, repetidas dentro de certa frequência. Desta forma existem diversas modos para a geração e recepção das ondas ultrassônicas, conforme listado abaixo:

- Efeito piezelétrico;
- Choques ou atritos mecânicos;
- Excitação térmica;
- Processos eletrostáticos;
- Processos eletrodinâmicos;
- Processos magnetostriktivos.

Dentre as diferentes maneiras de geração e recepção listadas acima o efeito piezelétrico é o mais utilizado na indústria. Neste método, a base para a geração e recepção das ondas ultrassônicas é a transformação de corrente elétrica em vibrações mecânicas e vice versa. O elemento ativo é o coração do

transdutor e se baseia no conceito de que alguns cristais geram corrente elétrica quando deformados mecanicamente, da mesma forma se aplicado uma diferença de potencial elétrico entre duas faces opostas do cristal ocorre à deformação mecânica do cristal. Portanto uma corrente elétrica alternada gera vibrações mecânicas no cristal de acordo com a frequência elétrica.

O cristal encontrado na natureza mais comum e mais utilizado na geração de ondas ultrassônicas é o cristal de quartzo. Porém com a introdução das cerâmicas piezelétricas, logo se tornou o material dominante na utilização dos transdutores, devido principalmente na facilidade de fabricação nos diversos tipos de formas e tamanhos, o que é de suma importância. Pois de acordo com o corte do cristal pode-se obter diferentes modos de deformação de acordo com a figura 2-10.

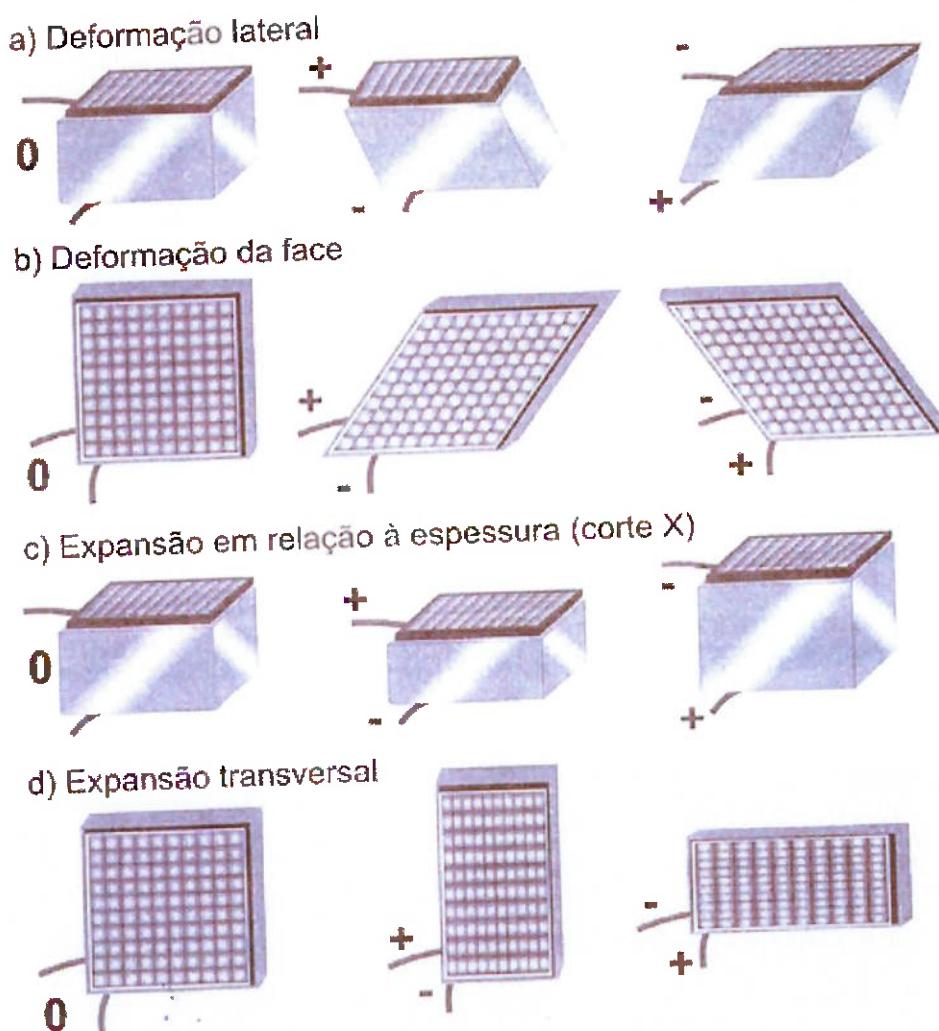


Figura 2-10 – Cortes cristais piezelétrico [12].

A frequência desejada em um transdutor é definida através da espessura do elemento ativo, conforme evidenciado na equação 2-12. Onde o elemento vibra com um comprimento de onda o qual é duas vezes a sua espessura. Portanto quanto maior a frequência do transdutor, mais fino o elemento ativo. A principal dificuldade na produção de transdutores de contato de alta frequência é a necessidade que o elemento tenha uma espessura muito fina, tornando-se muito frágil.

2.2.5.2 – CAMPO SÔNICO.

De acordo com o princípio de Huygens a energia irradiada a partir de um ponto propaga-se em todas as direções, gerando uma frente de onda esférica, a qual tem sua intensidade decrescendo com o quadrado da distância. Quando duas ou mais fontes são colocadas próximas, ocorrerá a combinação das frentes de ondas esféricas e a frente de onda resultante perderá o formato esférico [12].

Essa combinação ocorre devido ao fenômeno de superposição das ondas nos pontos de interferência. Os pontos em azul na figura 2-11 representam os pontos em que as ondas estão em desigualdade de fase, e a resultante se torna nula denominase como interferência destrutiva, representada na figura 2-12. Enquanto que os pontos em vermelho da figura 2-11 representam as ondas em igualdade de fase e que geram a máxima amplitude da onda, podendo ocorrer tanto no sentido negativo como o positivo, sendo estes pontos definidos como interferência construtiva, representada pela figura 2-12.

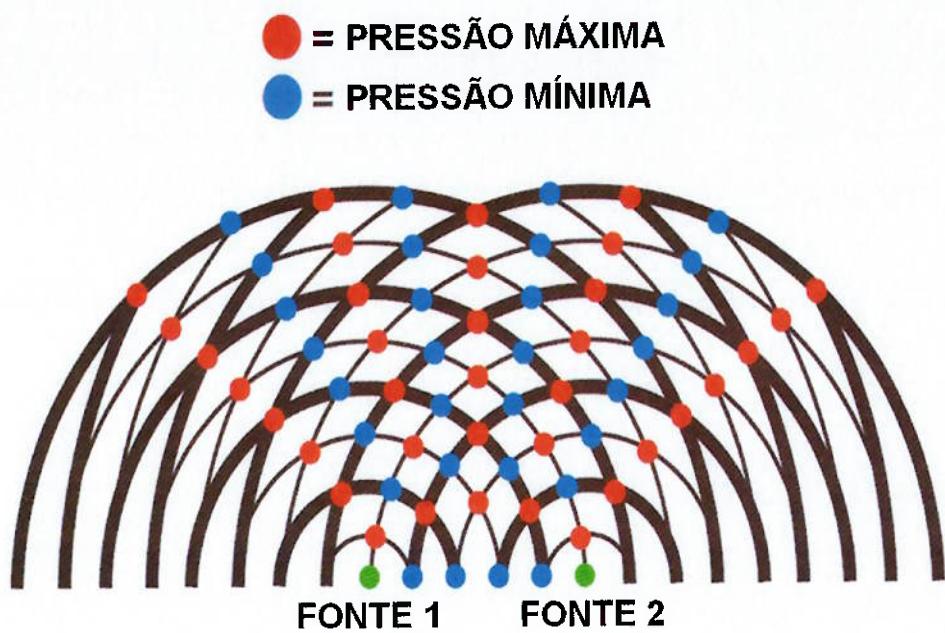


Figura 2-11 – Pontos de interferências construtivas e destrutivas na formação do feixe [18].

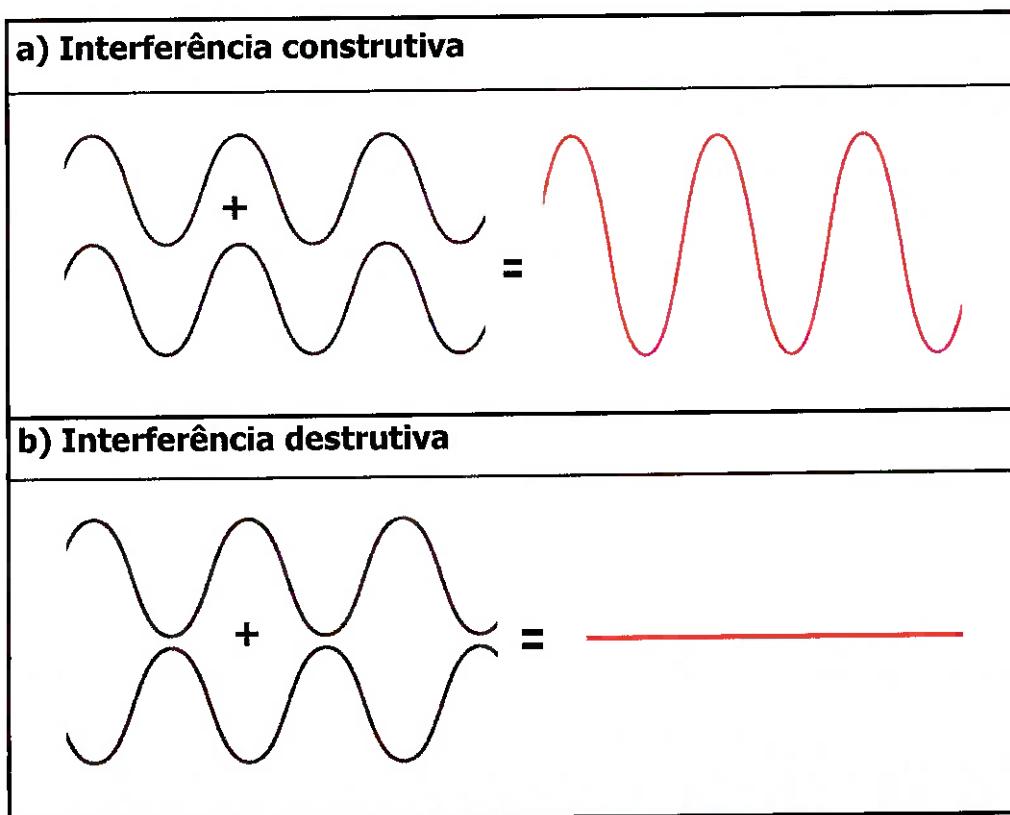


Figura 2-12 – Princípio de superposição de ondas [18].

A fonte de energia que emana de um transdutor piezelétrico não é considerada como proveniente de um ponto único, mas sim, como um grande grupo de fontes pontuais, partindo de toda a área da superfície do elemento piezelétrico. Essas fontes próximas proporcionam uma combinação das frentes de onda esféricas, perdendo o formato esférico. Isso é evidenciado na figura 2-13 que representa graficamente o campo imediatamente a frente do elemento ativo, e as combinações das frentes de onda esférica individuais, formam uma frente de ondas planas representadas pelas linhas paralelas. As linhas cheias circulares representam as ondas esféricas com pressão sônica máxima, enquanto que as linhas circulares tracejadas representam as ondas esféricas com pressão sônica mínima, sendo distanciada a meia onda da pressão máxima.

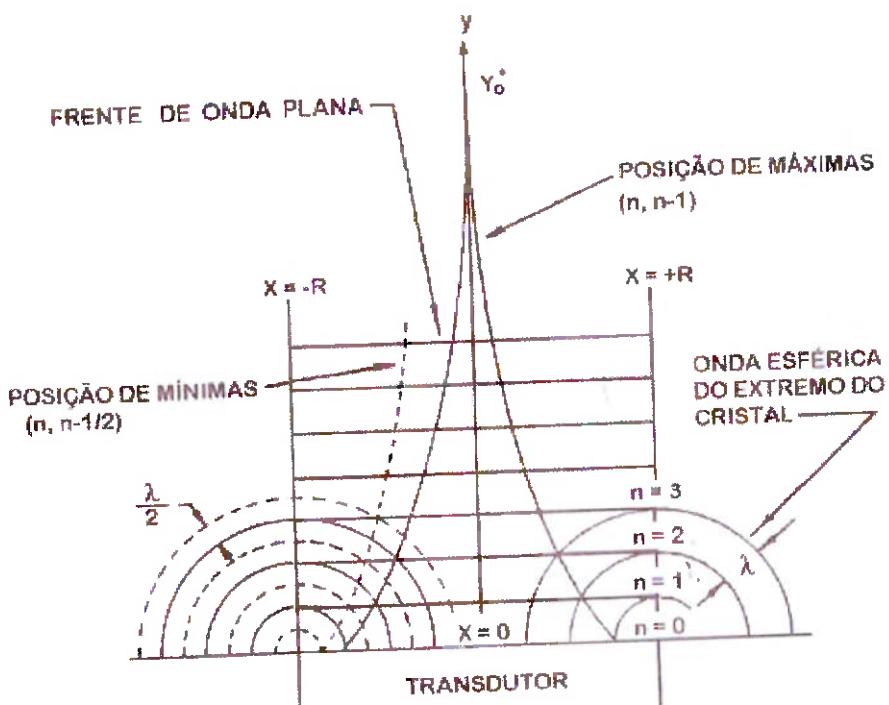


Figura 2-13 – Campo a frente do elemento ativo [12].

O resultado dessas combinações com pontos de pressão máxima e mínima formam o feixe sônico, mostrado na figura 2-14 através de um feixe sônico real tornado visível, sendo que a parte clara representa as regiões de alta pressão sônica e as partes escuras representam as regiões de baixa pressão sônica.

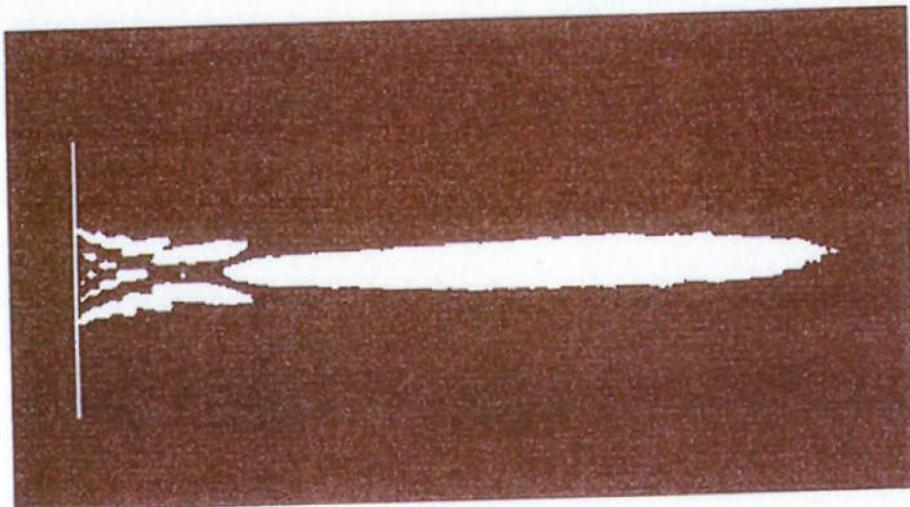


Figura 2-14 – Feixe sônico visível real [12].

O campo sônico é dividido em três regiões distintas, conforme figura 2-15. Partindo do elemento ativo a primeira região é definida como campo próximo, em seguida se encontra a região de transição, e por ultimo a região definida como campo distante.

A região do campo próximo está localizada logo a frente do elemento ativo, e é nesta região que ocorrem os fenômenos de interferências construtivas e destrutivas, conforme já definido anteriormente. Seu formato e dimensões são próximos ao formato do elemento ativo, tendo uma pequena diminuição de dimensão ao fim do campo próximo.

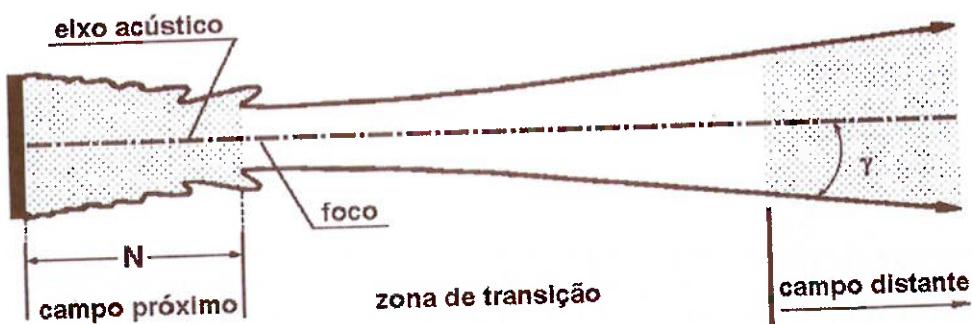


Figura 2-15 – Campo sônico [12].

O fim do campo próximo é determinado pelo ponto de pressão máxima do feixe sônico, e a distância entre este ponto e o elemento ativo é definida

como comprimento do campo próximo(N) e representa o foco natural do transdutor. Portanto essa é a distância mínima possível para foco deste transdutor, isso aliado as grandes variações de intensidade nesta região, aumentando a dificuldade na avaliação com precisão as descontinuidades. O comprimento do campo próximo depende do formato do elemento ativo, das características do meio, onde o som se propaga e da frequência sônica, e é expresso pelas equações 2-11 e 2-12:

Para elementos ativos circulares:

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4 \cdot v} \quad (2-11)$$

Para elementos ativos quadrados e retangulares com diferença de até 12% entre os lados:

$$N = \frac{1,3 \cdot M_{ef}^2 \cdot f}{v} \quad (2-12)$$

Onde:

N = campo próximo [m];

v = velocidade do som [m/s];

f = frequência [Hz];

D_{ef} = diâmetro do elemento ativo [m];

M_{ef} = comprimento do cristal retangular [m];

k = fator de correção que considera a razão q entre largura e comprimento do elemento retangular. Seu valor varia de 0,98 a 1,38, para razões q entre 0,1 e 1, respectivamente.

No fim do campo próximo, tem inicio a região de transição. Essa região tem distância final equivalente a três campos próximos e o feixe sônico passa a divergir e não é observado variação na pressão sônica movido pelas interferências ocorridas no campo próximo. Além disso, nessa região o ângulo de divergência é variável e não existe relação entre o decréscimo de pressão

acústico e a distância. Nesta região, já é possível à detecção de descontinuidades, porém, deve ser analisado com cuidado devido às restrições para detecção de descontinuidades com dimensões próximas a um comprimento de onda.

A terceira parte e última região é denominada campo distante ou zona de Fraunhofer e tem inicio logo após a região de transição. Neste instante o ângulo de divergência torna-se constante e a pressão sônica diminui proporcionalmente com o inverso da distância. Nesta região que a detecção se torna mais confiável para a detecção de descontinuidades com dimensão de um comprimento de onda e maiores.

2.2.5.3 – CABEÇOTE.

O cabeçote é uma das partes principais do ensaio por ultrassom, conforme já mostrado na figura 2-1. Sua estrutura é composta de vários elementos necessários para realizar de forma adequada a transmissão e recepção das ondas sônicas, podendo conter um ou mais transdutores responsáveis em converter energia elétrica em ondas acústicas e vice versa [12]. Os cabeçotes possuem diversas configurações, porém de uma forma geral os cabeçotes podem ser representados conforme mostrado na figura 2-16.

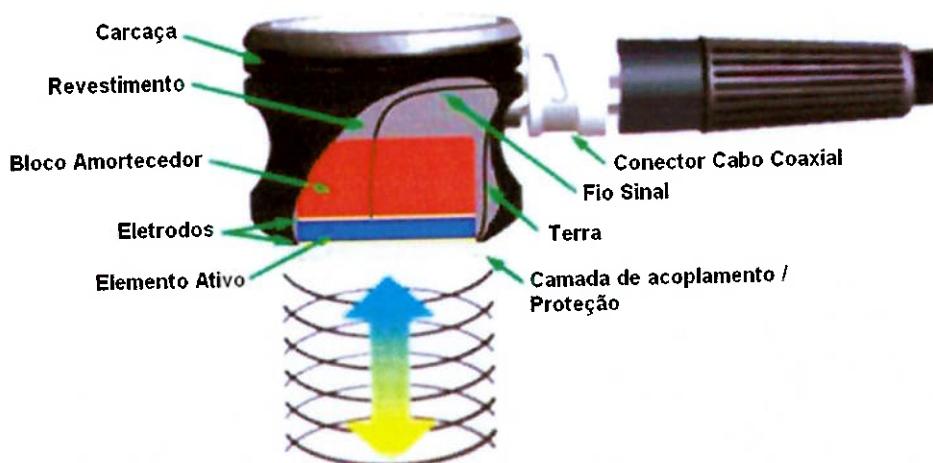


Figura 2-16 – Cabeçote de ultrassom e seus principais componentes [16].

A carcaça do transdutor é responsável pela geometria externa do transdutor e propicia uma adequada resistência mecânica e estanqueidade, pois a parte interna da carcaça abriga componentes sensíveis e primordiais para o funcionamento do cabeçote. Entre os quais estão o elemento ativo responsável em converter deformação em potencial elétrico e vice-versa. Os eletrodos e fios responsáveis pela ligação elétrica com o elemento ativo, além do bloco amortecedor para a atenuação dos ecos indesejáveis. E para complementar a proteção dos componentes a carcaça é preenchida com uma resina interna revestindo os componentes, além de um revestimento na face do elemento ativo que ajuda na transmissão das ondas, encurta a duração do pulso e protege o elemento ativo durante a inspeção.

Na figura 2-17 estão representados alguns dos principais cabeçotes selecionados e utilizados de acordo com a necessidade em cada tipo de inspeção.

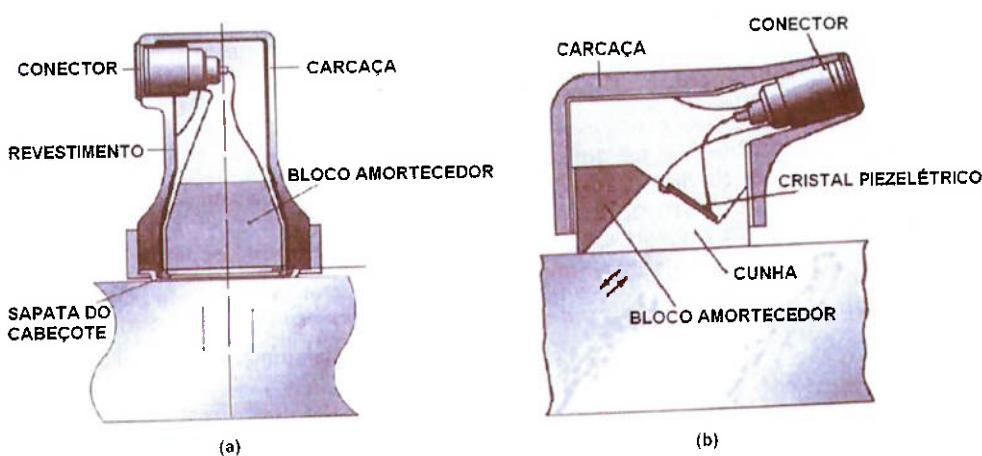


Figura 2-17 – Cabeçotes convencionais: (a) normal, (b) angular [12].

Entre os diversos tipos de cabeçote utilizados no END por ultrassom, os dois mais comuns são o cabeçote normal e o cabeçote angular, mostrados na figura 2-17.

O cabeçote normal mantém tanto a sapata, como o cristal piezelétrico na posição plana, emite ondas de propagação longitudinais que penetram na peça de maneira perpendicular a superfície de inspeção. É utilizada na detecção de

defeitos paralelos a superfície, para medição espessura, medição de perda de espessura por corrosão, entre outros.

O cabeçote angular tem como característica principal o posicionamento dos cristais piezelétricos formando um determinado ângulo com a superfície inspecionada. Essa inclinação é confeccionada de tal forma a converter as ondas longitudinais geradas, de acordo com o tipo de onda desejada para determinado ensaio. Podendo de acordo com o ângulo selecionado e aplicando a lei de Snell, obter a propagação de ondas longitudinais, superficiais ou transversais. Esta característica faz com que este cabeçote seja utilizado comumente na inspeção de descontinuidades em juntas soldadas.

Os cabeçotes monocristal utilizam cristal em formato circular com diâmetro entre 5 e 80mm, sendo os diâmetros mais utilizados entre 5 e 25mm. Enquanto que os cabeçotes angulares possuem cristal com formato quadrado ou retangular, podendo ser utilizado também cristais circulares, porém menos comum.

A frequência de trabalho do cabeçote é uma função entre o material utilizado e a espessura do cristal. Como em um mesmo material a velocidade do som é constante, a variação da frequência é obtida variando a espessura do cristal, sendo que quanto menor a espessura do cristal, maior será a frequência. Isso é evidenciado na equação 2-12:

$$Ff = \frac{V}{2.e} \quad (2-13)$$

Onde

Ff: Frequência

V: Velocidade sônica

e: Espessura do elemento ativo

Essa frequência normalmente varia entre 1 e 6MHz na utilização de ensaios comuns como aços carbono e em outras aplicações especiais pode chegar a 25MHz.

Os cristais são unidos às faces protetoras e blocos de amortecimento, onde a face protetora tem como função principal proteger o cristal e seu material. Além disso, deve ser selecionado de forma que se obtenha o melhor casamento acústico entre o cristal e a peça. Enquanto que o bloco de amortecimento é selecionado um material atenuador, e é instalado na parte posterior do cristal, obtendo uma redução no período de vibração do cristal eliminando vibrações indesejáveis e propiciando um pulso mais curto, consequentemente melhorando a resolução. Por outro lado, este amortecimento diminui a energia sônica transmitida, sendo necessário encontrar um valor de forma a balancear a quantidade de energia suficiente para o ensaio, e uma adequada resolução para análise dos resultados.

2.2.6 – TÉCNICAS DE INSPEÇÃO.

Os métodos e técnicas de inspeção podem ser divididos em três principais métodos e duas técnicas. Essa classificação pode varia de acordo com o tipo, e posicionamento dos transdutores em relação ao feixe emitido e recebido. Outro fator importante é o tipo de inspeção desejado, a sensibilidade e tipo de descontinuidades a serem detectadas, entre outros.

Dentre os métodos de inspeção, pode-se destacar o pulso-eco, por ser um método simples e exigir acesso somente a uma das superfícies de inspeção. Neste método o transdutor emite pulsos de energia sônica no material, durante intervalos regulares de tempo e ao encontrar uma interface, parte ou toda a energia é refletida de volta ao transdutor convertendo as vibrações mecânicas em energia elétrica. Essa conversão é feita levando-se em conta a quantidade e o tempo entre a transmissão e retorno da energia sônica, permitindo a visualização do sinal em um monitor [12]. A figura 2-18 representa de forma simplificada o método de pulso-eco.

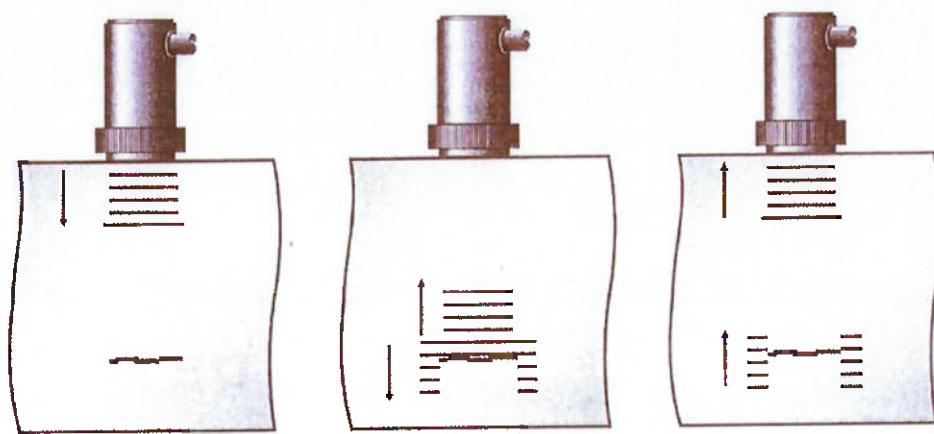


Figura 2-18 – Método pulso-eco [12].

Outro método de inspeção utilizada no END por ultrassom é o método Tandem. Neste caso, dois cabeçotes de feixe angular são posicionados de tal forma, que a energia sônica emitida é captada pelo outro transdutor, o receptor, caso exista alguma descontinuidade no caminho. Esse método é utilizado na inspeção de grandes espessuras, e na detecção de descontinuidades em juntas soldadas, não perpendiculares ao feixe sônico [12]. Esse método esta demonstrado na figura 2-19.

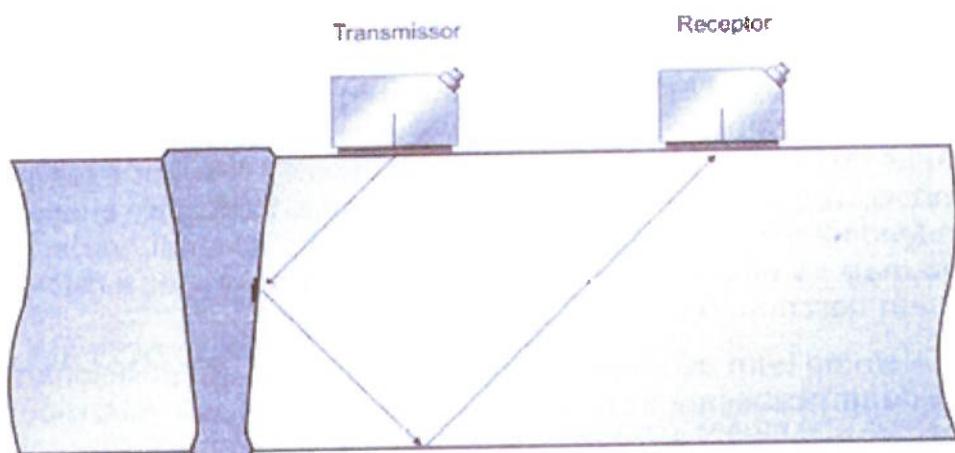


Figura 2-19 – Método Tandem [12].

O terceiro método dentre os principais é o método por transparência. Este outro método também utiliza dois cabeçotes, porém com incidência normal, alinhados e posicionados de forma opostas na superfície da peça

inspecionada. No caso de não haver descontinuidades no material, a energia sônica é emitida pelo transdutor em uma das superfícies, e recebida em sua totalidade pelo receptor na superfície oposta. Já no caso do feixe sônico encontrar uma descontinuidade, parte ou toda a energia sônica é refletida e consequentemente menor ou inexistente será a amplitude do sinal recebido pelo cabeçote receptor. Desta forma o método se restringe apenas na detecção de descontinuidades, não sendo possível a determinação da profundidade da mesma. É geralmente utilizado na inspeção de chapas, com o intuito de detectar dupla-laminação, defeitos planares, entre outros, porém não é comum sua utilização no ensaio de juntas soldadas [12].

Dentre os métodos descritos acima, cada um pode ser executado através de dois tipos de técnicas. A primeira e mais utilizada é a técnica por contato, onde o cabeçote é colocado diretamente sobre a superfície a ser inspecionada. Pode ser utilizado um acoplante entre o cabeçote e a superfície de forma a eliminar o ar, que é um pobre transmissor das ondas, melhorando a transmissão das ondas para o material inspecionado. A segunda é a técnica por imersão. Neste caso, o cabeçote não tem contato direto com a superfície, onde tanto o cabeçote como as peças a serem inspecionadas, ficam imersas e a transmissão é feita através de um líquido. Além disso, as duas técnicas permitem a realização do ensaio de forma manual ou automatizada [12].

2.2.7 – TIPOS DE VISUALIZAÇÃO DOS SINAIS.

Outro ponto importante no ensaio não destrutivo por ultrassom é a visualização dos sinais aquisitados durante a inspeção, para a devida interpretação e laudo dos resultados. Existem diferentes maneiras dos dados serem exibidos de acordo com o propósito do ensaio a ser executado.

A exibição mais simples dos dados obtidos é a apresentação denominada A-Scan, na qual os sinais recebidos são representados em um gráfico, sendo que a ordenada indica a amplitude do eco, e a abscissa indica o tempo de percurso do pulso. Com a correlação entre amplitude e tempo do pulso é

possível determinar a distância ou profundidade. A visualização A-scan pode ser feita de duas formas conforme mostrado na figura 2-20. Com a onda não retificada utilizada usualmente na inspeção de materiais compostos, ou com onda retificada utilizada tanto na detecção de descontinuidades, como na medição de espessura [4].

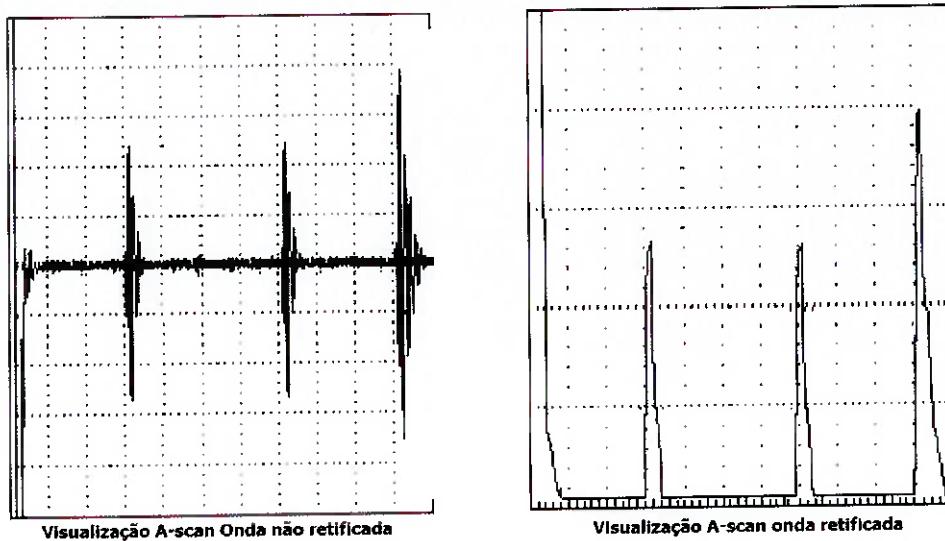


Figura 2-20 – Visualização tipo A-Scan [4].

Outro modo de visualização dos dados é denominado B-Scan, neste modo de visualização o gráfico é representado no eixo vertical pelo tempo percorrido, caracterizando a profundidade e o eixo horizontal, representado pela posição do transdutor ao longo da superfície em relação à posição inicial da inspeção. Consequentemente, o gráfico representa exatamente a seção transversal da peça inspecionada, de acordo com a imagem representada na figura 2-21 [4].

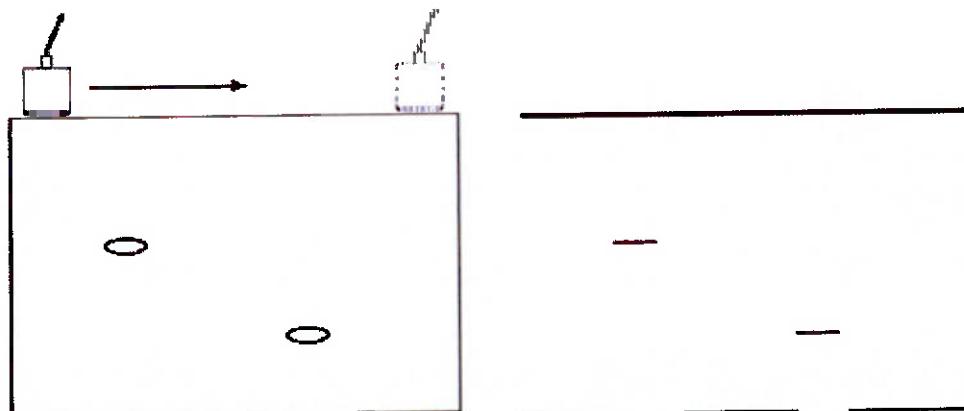


Figura 2-21 – Visualização tipo B-Scan [4].

No modo de visualização C-Scan o grafico representa uma vista em planta da peça inspecionada, indicando o tamanho e a localização das descontinuidades. Sendo similar a uma imagem gerada no ensaio radiográfico. Neste modo normalmente não é indicado à profundidade, porém é possível fazer sua monitoração em um gráfico adicional tipo A-Scan ou ainda sendo permitido, em alguns equipamentos, configurar escalas de cores para indicar a profundidade. Conforme mostrado na figura 2-22.

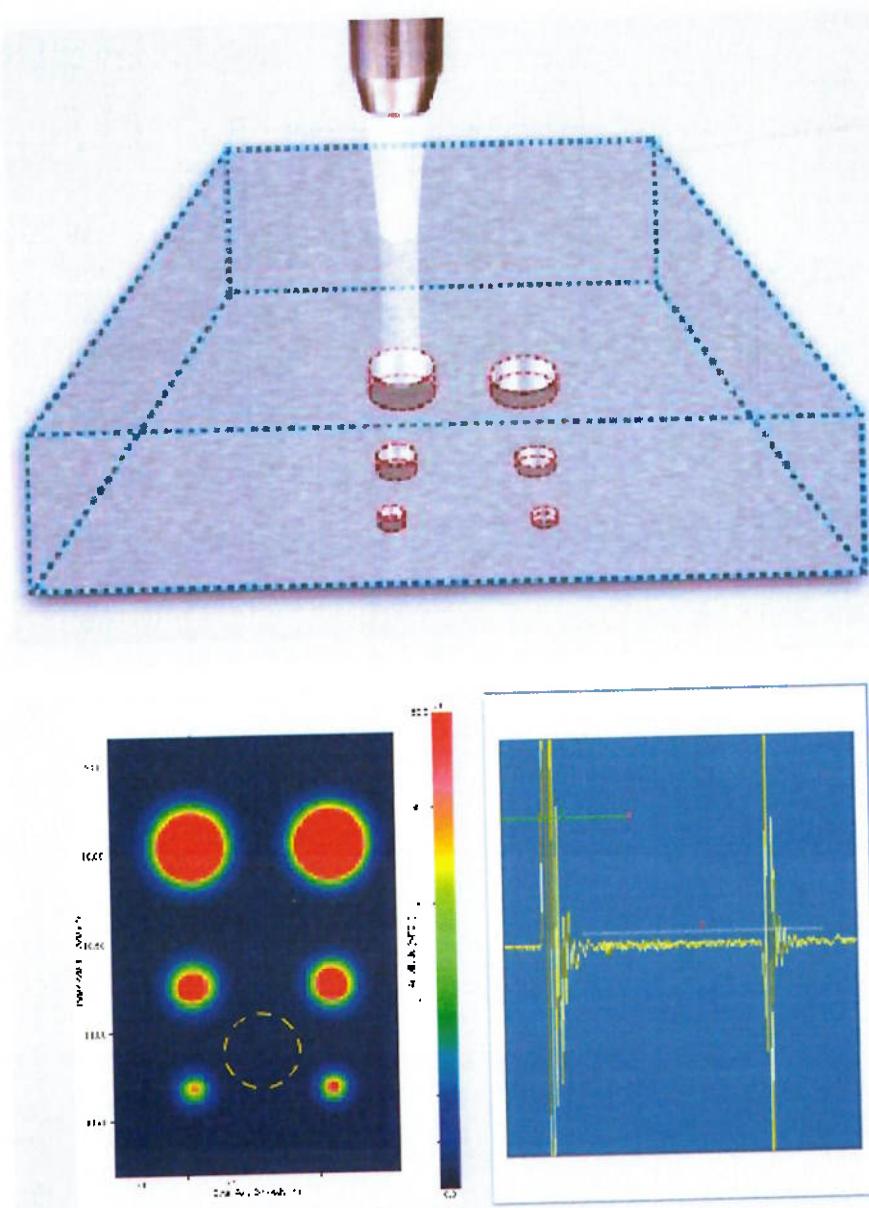


Figura 2-22 – Cabeçote e peça simulando descontinuidades (imagem superior). Visualização C-Scan com escala de cores (imagem inferior esquerda) e Visualização A-Scan (imagem inferior direita) [19].

2.2.8 – MATERIAL.

2.2.8.1 – AÇO INOXIDÁVEL.

Os aços inoxidáveis são ligas que possuem como característica principal a presença de cromo em uma faixa que varia entre 10% a 30% em sua composição química. O cromo é um elemento de liga básico dos aços inoxidáveis, cuja passivação é obtida pela formação de uma película de óxidos e hidróxidos de cromo na superfície metálica. Essa película é resistente e uniforme, além de uma excelente aderência [20].

Além do cromo como elemento principal, outros elementos de liga podem ser adicionados, melhorando as características do aço inoxidável. Entre alguns desses elementos se destacam o molibdênio, cobre, titânio, alumínio, nióbio, nitrogênio, silício, entre outros. Com isso, existe uma gama muito grande de aços inoxidáveis, as principais famílias de aços inoxidáveis, classificados segundo a sua microestrutura, são: ferríticos, austeníticos, martensíticos, Duplex [20].

Nesta gama de aços inoxidáveis se destaca o aço inoxidável austenítico por ser um dos aços inoxidáveis mais utilizados na indústria em geral e principalmente em equipamentos na área petroquímica.

2.2.8.2 – AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO.

Os aços inoxidáveis austeníticos fazem parte de um importante grupo de materiais utilizados em aplicações onde se requer alta resistência a elevadas temperaturas. Também é utilizado quando é essencial ductilidade a baixas temperaturas, como por exemplo, em vasos em serviço criogênico, e principalmente em processos onde se requer resistência a corrosão, como nos caso de processamento de alimentos [21].

Além do cromo na faixa de 16% a 30%, também pode ser destacado o níquel na faixa de 6 a 26%, menos de 0,3% de carbono em sua composição e a possibilidade de inclusão de outros elementos melhorando algumas características a cada elemento, de acordo com a necessidade para cada

aplicação. Isso torna essa classe de material, a classe com maior variedade de materiais entre os aços inoxidáveis, consequentemente a classe de maior utilização.

Tem como característica principal de não serem magnéticos, geralmente são recozidos e trabalhados a frio. Além disso, possui alto limite de resistência, baixo limite de escoamento e elevada ductilidade [22].

2.2.8.3 – SOLDAGEM E INSPEÇÃO POR ULTRASSOM DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.

Outra característica importante nos aços inoxidáveis austeníticos, é a excelente soldabilidade se comparada às outras classes de aços inoxidáveis [22].

Os átomos dos aços inoxidáveis austeníticos possuem estrutura cúbica de face centrada para todas as temperaturas. Entretanto, a estrutura cristalina de uma solda de aço inoxidável austenítico é estabelecida na solidificação e a fase austenítica forma grãos colunares longos que crescem ao longo das direções de máxima perda de calor durante o resfriamento [21]. Além disso, a estrutura do metal de solda austenítico é geralmente um material de grão grosso e com grãos colunares [23].

Metalurgicamente é impossível refinar a estrutura da solda somente pelo tratamento térmico. A estrutura austenítica da solda pode ser refinada pela deformação pesada e recristalização, ou através da aplicação de altas pressões a altas temperaturas, mas nenhum desses processos são usuais na soldagem [21].

A orientação da estrutura de grãos não é obtida ao acaso e diferentes tipos de processos de soldagem produzem características próprias com padrões próximos as orientações de grãos esquemáticos representados na figura 2-23.

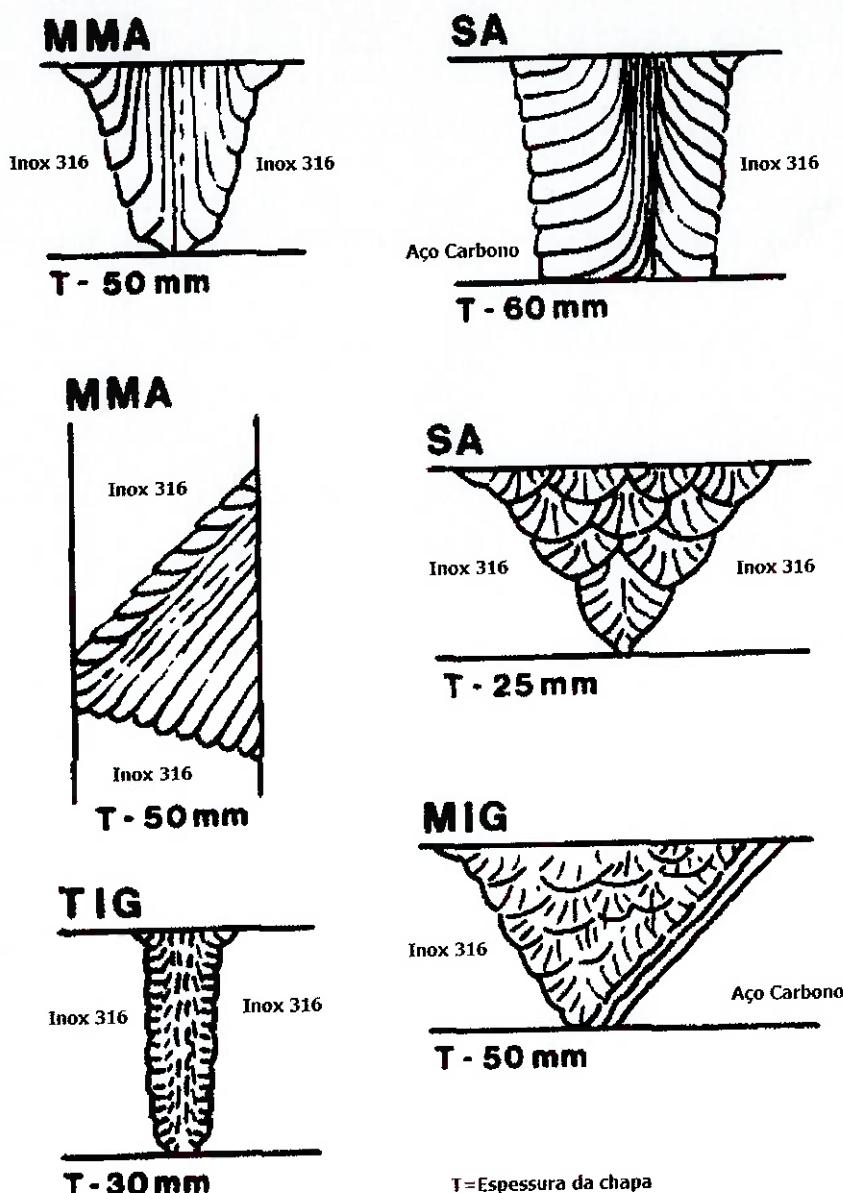


Figura 2-23 – Representação esquemática de diferentes tipos de orientação de grãos para diferentes tipos de processos de soldagem [23].

A partir da formação de grãos alongados, a estrutura é caracterizada como anisotropa. O efeito dessa anisotropia no ensaio por ultrassom depende largamente do alongamento de grão, sendo que grãos pequenos encontrados nas chapas laminadas não tem grande influência na propagação sônica. Por outro lado, os grãos grosseiros encontrados na estrutura das soldas austeníticas têm influencia na propagação sônica, aumentando a atenuação, variando a velocidade sônica, além de causar a distorção do feixe sônico [23].

Devido às dificuldades geradas pela anisotropia do material no ensaio por ultrassom, durante anos esses materiais foram considerados como não inspecionáveis por ultrassom, sendo utilizado nas soldas austeníticas outros tipos de ensaios, como EV, LP e RX.

Porém, com novas pesquisas e desenvolvimento na área, a execução do ensaio nessas estruturas é possível com alguns cuidados, como por exemplo, procedimentos específicos, escolha do processo de soldagem, tipo e dimensões dos defeitos a serem detectados, treinamento especial e qualificação dos inspetores de solda, e sempre que possível complementar a inspeção com outro tipo de ensaio [23].

2.2.8.4 – ATENUAÇÃO.

Como já mencionado no capítulo 2.2.4.2, a atenuação sônica em alguns casos se deve ao fato da matéria não ser totalmente homogênea, onde ocorre a presença de interfaces naturais ou ainda devido ao processo de fabricação. A mudança das características elásticas, no mesmo material, devido à presença de componentes com propriedades elásticas distintas, é denominada anisotropia [13].

O resultado dos efeitos desta dispersão e absorção, mencionados no capítulo 2.2.4.2, quando somados resultam na atenuação sônica. Podendo este fenômeno ser visualizado na imagem A-scan onde ocorrem vários ecos de reflexão de fundo provenientes de uma peça com superfícies paralelas. As alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda.

A atenuação é importante quando inspecionamos peças em que este fator pode dificultar o ensaio. É o caso de juntas soldadas em aços inoxidáveis austeníticos, peças forjadas ou fundidas em aços inoxidáveis, que são exemplos clássicos desta dificuldade. O controle e avaliação da atenuação nestes casos é razão para justificar procedimentos de ensaio especiais [13].

A tabela 2-3 apresenta alguns valores de referência de atenuação para materiais de aço Cr-Ni manufaturados em diferentes processos de fabricação.

Tabela 2-3 – Valores de atenuação para materiais de aço Cr-Ni [13].

Material	Atenuação Sônica (dB/mm)
Forjados	0,009 a 0,010
Laminados	0,018
Fundidos	0,040 a 0,080

2.3 – ULTRASSOM COM TRANSDUTORES PHASED ARRAY.

2.3.1 – INTRODUÇÃO.

Normalmente quando se menciona ensaio por ultrassom, se relaciona sua aplicação na área médica. E realmente foram as necessidades de exames mais precisos e detalhados na área médica que contribuíram no desenvolvimento de transdutores multielementos ou '*phased array*'.

A principal e mais consagrada aplicação do ultrassom com transdutores '*phased array*' na área médica é a ultrassonografia gestacional, conforme mostrado na figura 2-24.



Ultrassom Nicolas



Ultrassom Christian

Figura 2-24 – Imagem de ultrassonografia gestacional dos filhos do autor utilizando transdutores '*phased array*' [24].

O fato de que a composição, as propriedades e a estrutura do corpo humano serem conhecidas, tornaram o ensaio e sua interpretação relativamente simples. Mas a aplicação do ensaio por ultrassom utilizando a tecnologia '*phased array*' não se restringe somente nos diagnósticos médicos, e estão se difundindo na indústria. Mesmo com as dificuldades encontradas no ensaio, devido a grande variedade de propriedades acústicas dos diversos metais, materiais compósitos, cerâmica, plásticos, fibra de vidro entre outros. Além da grande variedade de espessuras e geometrias das peças, gerando um grande desafio no desenvolvimento e na aplicação industrial.

Nos anos 80 foram introduzidos os primeiros sistemas de inspeção por ultrassom com transdutores '*phased array*' na indústria. Os equipamentos eram extremamente grandes, e os dados eram transferidos para um computador para o processamento dos dados e arquivo das imagens. Além disso, o custo era elevado se comparado a outros ensaios não destrutivos. Desta forma, se justificava a utilização desta tecnologia somente em equipamentos de grande responsabilidade e confiabilidade. E foi neste contexto, que a indústria nuclear foi uma das pioneiras na utilização desta tecnologia.

Com o desenvolvimento dos microprocessadores, componentes eletrônicos, alimentação por bateria, entre outros, permitiram a miniaturização do equipamento através da instalação dos componentes eletrônicos, processamento, exibição e análise dos dados em um único dispositivo. Desta forma, surgiram em 2000 os primeiros equipamentos de inspeção portáteis. Isso permitiu difundir a tecnologia dentro do setor industrial. Após esse desenvolvimento, o ensaio por ultrassom com transdutores '*phased array*' foram aceitos ou exigidos por normas e códigos de fabricação de equipamentos petroquímicos.

Conforme mencionado dentre as normas e códigos, foi incluído como opção deste ensaio em substituição ao RX no código ASME através do *code case* 2235-9 de 2005 [3], e foi imposta à realização deste ensaio em juntas soldadas onde não é possível a execução do ensaio radiográfico, nos equipamentos com serviços especiais de H₂ e H₂S conforme normas Petrobras N-1704 [1] e N-1706 [2].

2.3.2 – PRINCÍPIOS BÁSICOS DO SISTEMA PHASED ARRAY.

Os principais componentes requeridos para o ensaio por ultrassom com transdutores '*phased array*' estão demonstrados na figura 2-20.

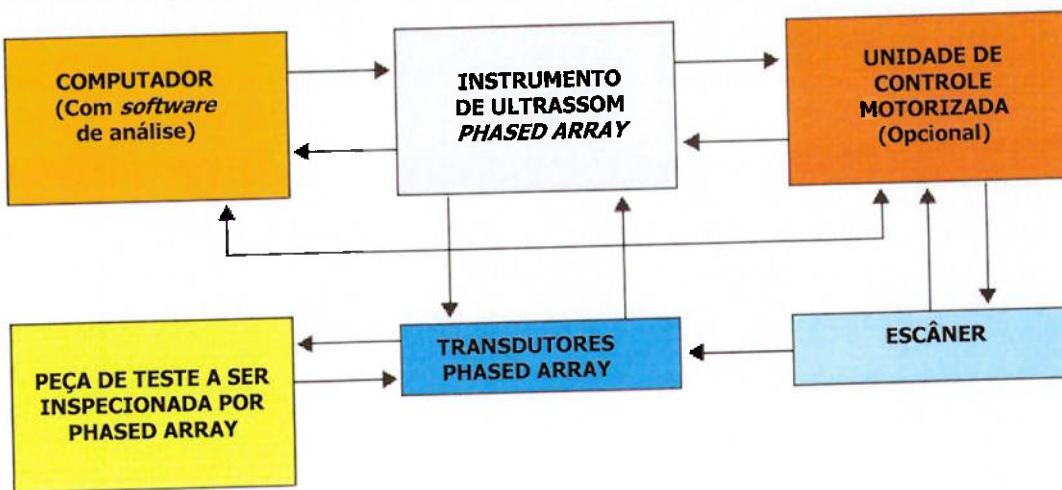


Figura 2-25 – Principais componentes do sistema '*phased array*' [25].

Diferente dos transdutores monocristais que possuem um único elemento ativo que tanto gera e recebe as ondas ultrassonicas, ou ainda dos transdutores duplo cristal com dois elementos emparelhados, sendo um emissor e o outro receptor, os transdutores '*phased array*' são constituídos de um conjunto de 16 a 256 elementos individuais. Essa configuração com vários elementos combinados com um sistema de controle de excitação computadorizado, composto de softwares e componentes eletrônicos permitem controlar a amplitude e a defasagem de excitação dos elementos, de forma que cada elemento seja ativado com certa amplitude de pulso em tempo ligeiramente defasados entre os elementos. Sendo cada onda sônica individual gerada combinada entre si, resultando em uma frente de onda única. Esse sistema permite varreduras em uma série de ângulos, ou ao longo de um caminho linear, diversas profundidades, aumentando assim a flexibilidade e a capacidade de detecção de descontinuidades durante as inspeções. Enquanto que um transdutor com único cristal tem o movimento limitado, aumentando a possibilidade da não detecção de algumas descontinuidades. A figura 2-26 compara os dois tipos de ensaio.

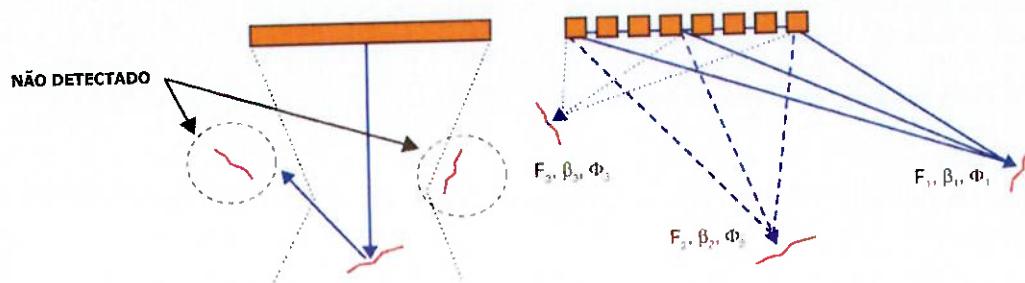


Figura 2-26 – Cabeçote monocristal (esquerda) e Cabeçote '*phased array*'(direita) [25].

Durante o ensaio a unidade de aquisição envia um sinal para o sistema '*phased array*', o qual converte o sinal em um pulso de alta tensão, cada elemento recebe apenas um pulso no tempo desejado, fazendo com que sejam gerados feixes de ondas sônicas com diversos formatos e finalidades. Da mesma forma, os sinais são recebidos de volta, e processados de acordo com o tempo de resposta, sendo transformados todos os sinais recebidos em um único pulso que é enviado para o instrumento de aquisição, conforme representado na figura 2-27.

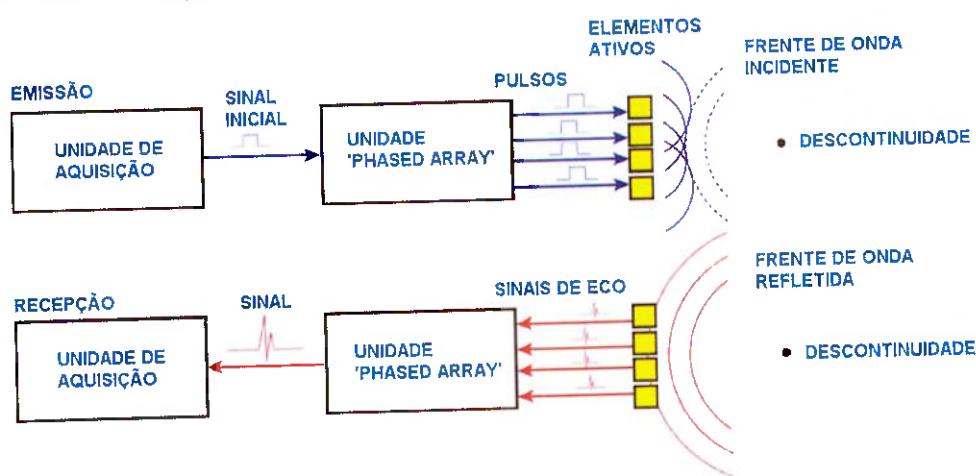


Figura 2-27 – Processo de emissão e recepção das ondas [25].

O valor de atraso do pulso, necessário em cada elemento depende do tipo de onda desejada, o ângulo do feixe, da profundidade focal, entre outros.

De acordo com o princípio de Huygens, quando todos os elementos ativados ao mesmo tempo, sem atraso, a propagação do conjunto de ondas

esféricas se combinam gerando uma frente onda plana. Conforme mostra a figura 2-28.

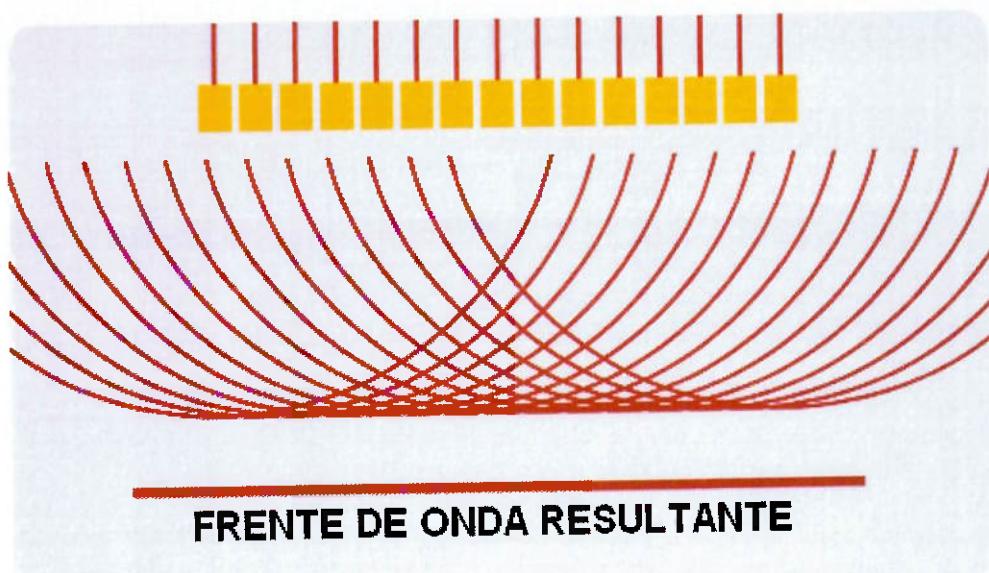


Figura 2-28 – Interferência construtiva das de cada elemento sem defasagem [18].

Considerando o mesmo princípio, é possível formar uma frente de onda única em ângulo, utilizando neste caso uma defasagem no pulso dos elementos de forma a gerar um conjunto de ondas esféricas individuais, as quais combinadas geram a onda única com ângulo desejado, representado pela figura 2-29.

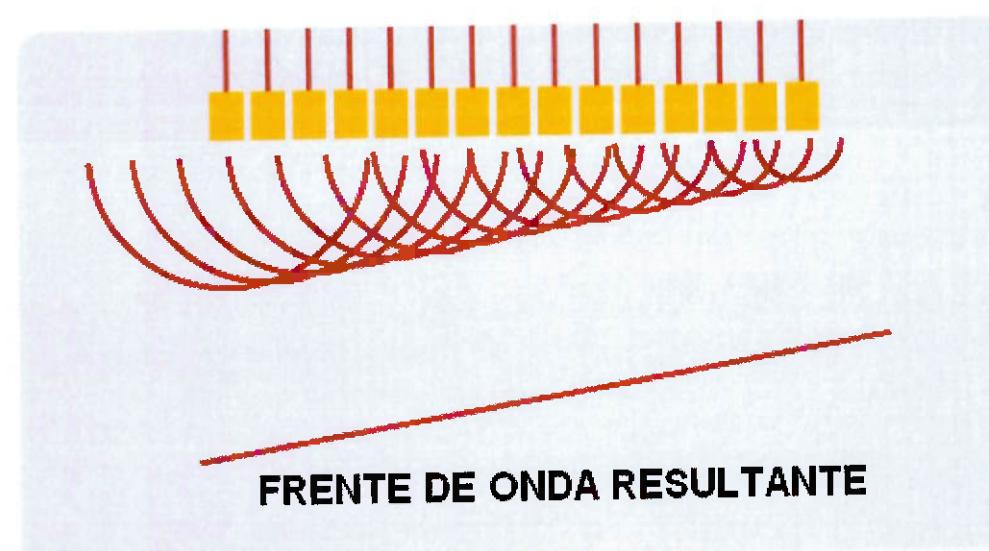


Figura 2-29 – Interferência construtiva das de cada elemento com defasagem [18].

2.3.3 – CABEÇOTES PHASED ARRAY.

A figura 2-30 mostra de forma representativa a definição de um cabeçote '*phased array*' com 128 elementos, ou seja, sendo similar à junção de 128 cabeçotes individuais em um único cabeçote, essa é a ideia principal, porém com uma diferença fundamental, os elementos utilizados nos cabeçotes '*phased array*' são muito menores se comparados aos elementos utilizados em transdutores convencionais.



Figura 2-30 – Cabeçote '*phased array*' [18].

A construção dos cabeçotes '*phased array*' basicamente está baseada em pequenas hastes finas geralmente fabricadas com elementos piezocerâmicos. Porém com o desenvolvimento de novos materiais, utilizam-se também os materiais piezocompósito, onde se utiliza materiais cerâmicos piezelétricos embutidos em uma matriz passiva de polímero, melhorando com isso diversas propriedades e consequentemente obtendo melhores performances. Por outro lado, sua confecção é mais complexa tornando o custo mais elevado e a temperatura de trabalho ser mais baixa se comparado aos elementos piezocerâmicos.

Os elementos segmentados são incorporados ao conjunto do cabeçote, que inclui uma camada de proteção, suporte, ligações de cabos, um invólucro e outros componentes, conforme mostra a figura 2-31.

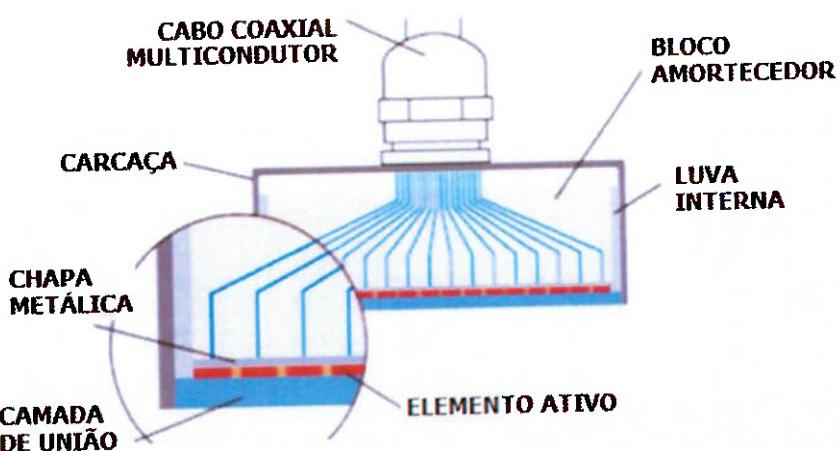


Figura 2-31 – Seção transversal do cabeçote '*phased array*' [18].

Os cabeçotes '*phased array*' são classificados funcionalmente de acordo com suas características. Dentre essas características principais destacam-se o tipo do feixe, a frequência, o número de elementos, a dimensão dos elementos entre outros. A maioria dos cabeçotes '*phased array*' são do tipo feixe angular, projetado para ser utilizado com sapata acrílica em cunha ou reta, ou linha de retardo. Podendo ainda ser utilizado tipo contato direto com aplicação de acoplante ou ainda por imersão. A frequência de trabalho varia normalmente entre 2 e 10 MHz, com uma quantidade de elementos variando entre 16 a 128 elementos, podendo chegar a 256 elementos, aumentando a área de cobertura, porém com um aumento no custo.

A figura 2-32 demonstra os principais parâmetros dimensionais dos elementos de um cabeçote '*phased array*':

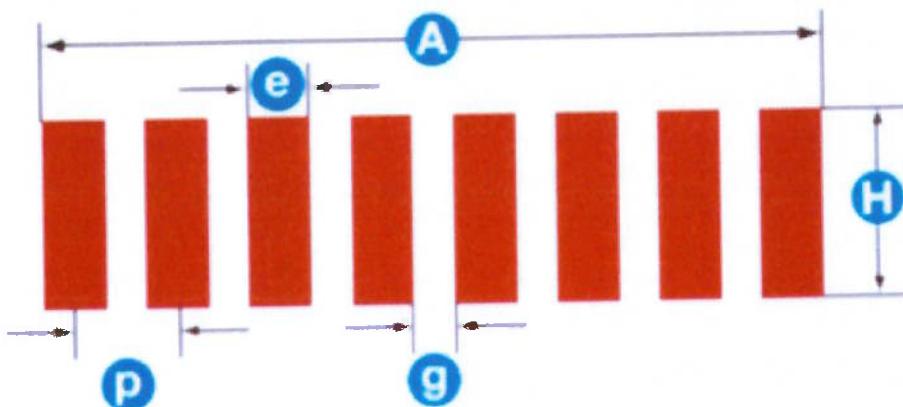


Figura 2-32 – Dimensões e posicionamento dos elementos [18].

Onde:

A= Comprimento total do cabeçote na direção ativa;

H= Altura do elemento ativo;

p= *Pitch* entre dois elementos ativos sucessivos;

e= Largura individual dos elementos ativos;

g= distância entre os elementos ativos;

Estas dimensões são os dados de entrada para o software realizar os cálculos necessários para geração do feixe sônico no formato desejado. Essas informações podem ser alimentadas automaticamente pelo software através de

banco de dados pré-cadastrados dos cabeçotes padrões já existentes, ou ainda, alimentado manualmente pelo usuário.

As características listadas anteriormente definem uma ampla variedade de cabeçotes com diferentes tamanhos, frequências, quantidade de elementos, entre outros. Além disso, os cabeçotes possuem os elementos dispostos em formatos particulares que se adaptam melhores a cada tipo de inspeção, aumentando a cobertura e a velocidade. As principais disposições dos elementos estão representadas na figura 2-33.

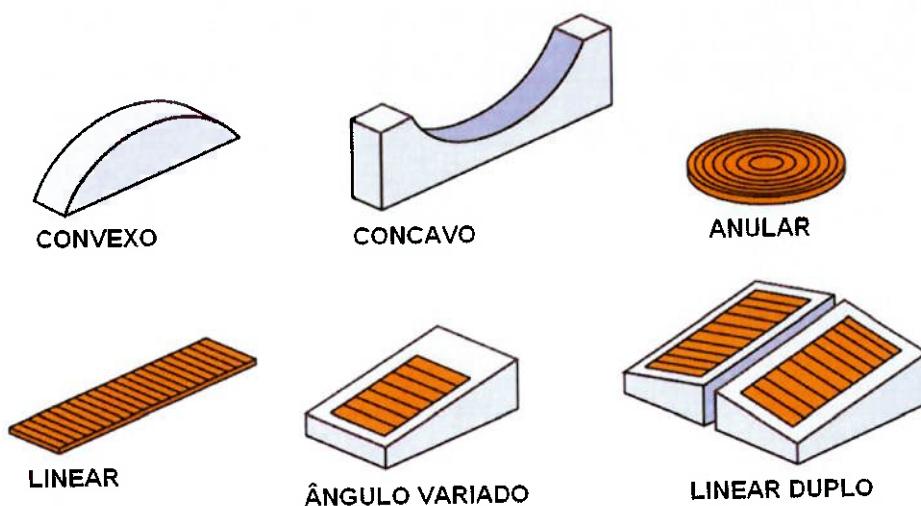


Figura 2-33 – exemplos de diferentes tipos de cabeçotes ‘phased array’ [18].

Cada disposição possui suas vantagens e desvantagens, por um lado algumas configurações permitem velocidade e cobertura maior de inspeção, porém dependendo da configuração, torna-se difícil a sua construção e operação onerando os custos. Portanto devem ser analisados todos os prós e contras antes da escolha do tipo de cabeçote na execução da inspeção.

2.3.4 – VARREDURAS NA TECNOLOGIA PHASED ARRAY.

Cada tipo de varredura é obtido através de uma combinação específica de defasagem, aplicada a cada pulso emitido e recebido pelos elementos ativos do transdutor. Essa combinação de defassagem é denominada pela lei focal ou lei de atraso. O formato da frente de onda é resultado dessa combinação de defasagem entre os elementos ativos do transdutor. Portanto, uma combinação

específica a cada pulso, altera a frente de onda ao longo do tempo, gerando o tipo de varredura desejado. Em todos os casos, o valor de atraso em cada elemento deve ser controlado com precisão.

A varredura linear com feixe normal consiste na translação dos elementos ativos sem que haja alteração no ângulo dos feixes. Da mesma forma, a varredura linear pode ser executada em um ângulo fixo, sendo que em ambos os casos, a varredura de uma determinada seção transversal é executada sem a necessidade de movimentação do cabeçote, o que permite uma maior confiabilidade do ensaio em relação ao ensaio por ultrassom convencional, que depende diretamente da movimentação do inspetor.

Outro tipo de varredura utilizada nos ensaios é a varredura setorial, denominada S-scan, em que a direção de propagação varia dentro de um intervalo de ângulos pré-determinado, de modo a cobrir a região de interesse. Este efeito é conseguido alterando-se as defasagens entre os elementos a cada nova lei focal para aumentar ou diminuir o ângulo.

Outro recurso muito interessante de varredura é conseguido alterando-se dinamicamente a profundidade de foco, com múltiplas profundidades. Durante a construção da lei focal é possível acrescentar este recurso, estabelecendo-se o intervalo de profundidade de interesse e o passo.

Os principais tipos de varreduras utilizadas com transdutores '*phased array*' estão mostrados na figura 2-34.

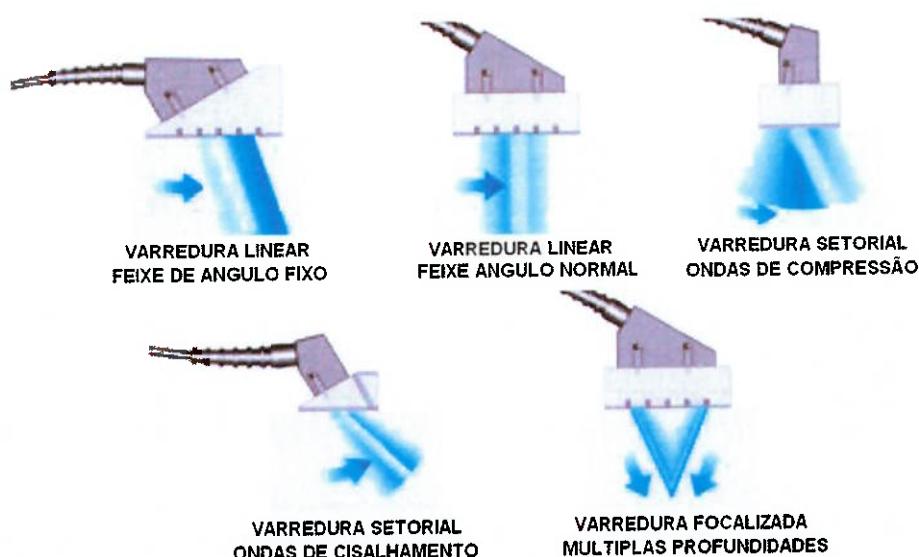


Figura 2-34 – Exemplos de leis focais [18].

2.3.5 – CARACTERISTICAS DO FEIXE NA TECNOLOGIA PHASED ARRAY.

A resposta de qualquer sistema de ensaio por ultrassom depende de uma combinação de fatores, como o transdutor utilizado, o tipo de instrumento utilizado, suas configurações, e as propriedades acústicas do material de teste. Assim como as respostas produzidas pelos transdutores '*phased array*', bem como os transdutores convencionais, estão relacionados ambos com os parâmetros de projeto dos transdutores, como a frequência, tamanho e amortecimento mecânico e dos parâmetros dos pulsos que são utilizados para excitar o transdutor. Sendo que o transdutor '*phased array*' é afetado por outros fatores, dentre os quais além da frequência e do tamanho, tem-se também a quantidade de elementos, passo, abertura e o incremento são parâmetros que merecem destaque e possuem influência no desempenho do transdutor durante o ensaio por ultrassom.

A frequência tem um efeito significativo no comprimento do campo próximo e na propagação do feixe. Na prática, as frequências mais elevadas podem proporcionar uma melhor relação sinal-ruído, se comparado às frequências mais baixas, pois oferecem potencialmente uma focagem mais nítida. Porém ao mesmo tempo, o aumento na frequência diminui-se a penetração em qualquer material, já que ocorre um aumento na atenuação do feixe, principalmente em materiais anisotrópicos.

Com o tamanho individual do elemento diminuindo, aumenta-se a capacidade de direção do feixe sônico, porém para elementos com tamanho menor que um comprimento de onda há a ocorrência de lóbulos laterais indesejados.

Com o aumento no número de elementos ativos há um acréscimo na área de cobertura do transdutor, na sensibilidade, capacidade de focalização e na capacidade de direção do feixe sônico. Porém esse número de elementos deve ser definido levando-se em conta o tamanho do cabeçote, a complexidade de construção e consequentemente o custo do sistema.

O passo entre os elementos individuais, e a abertura, que define o tamanho efetivo de um grupo de elementos individuais que são pulsados

simultaneamente. De forma a otimizar o alcance da direção, o passo deve ser o menor possível. Enquanto que uma abertura maior caracteriza uma melhor sensibilidade do feixe sônico, um espalhamento indesejado menor e uma melhor focalização. A partir do momento em que a energia do feixe é concentrada em um volume menor, melhor a resolução das descontinuidades próximas entre si na direção normal ao eixo do feixe, conforme mostrado na figura 2-35.



Figura 2-35 – Resolução lateral de acordo com aumento da abertura [18].

Outro fator que influencia na resolução lateral é o número de leis focais utilizadas em uma dada varredura, ou em outras palavras, o número de passos para cobrir a região sujeita ao ensaio. Os transdutores '*phased array*' mais comuns suportam leis focais de até 16 elementos, porém sistemas mais avançados permitem até 32 elementos ou ainda 64 elementos. Nas inspeções com varredura setorial, deve-se atentar para que o arco na região de interesse entre uma lei focal e a próxima não ultrapasse um valor de referência (tipicamente 1 mm) baseado na dimensão mínima de descontinuidade que se deseja detectar. A Figura 2-36 demonstra essa situação.

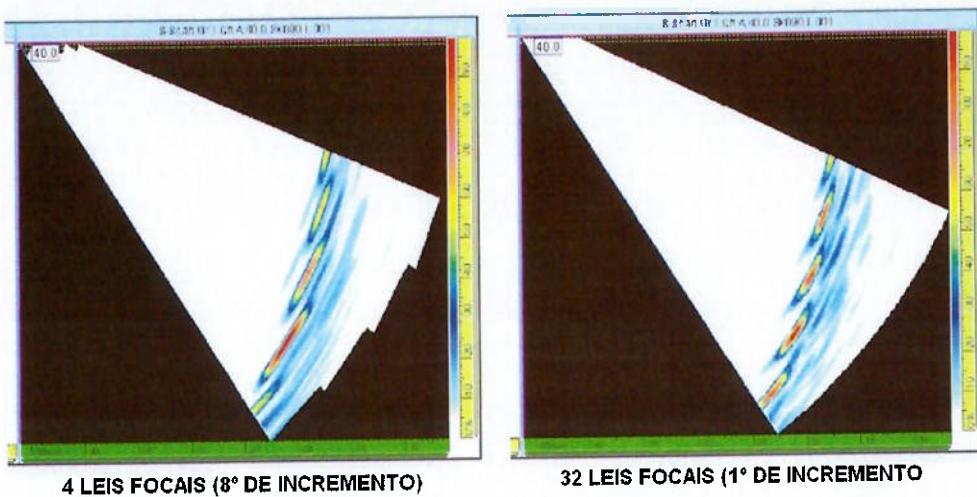


Figura 2-36 – Comparação da resolução lateral de acordo com aumento do número de leis focais [18].

Neste contexto as características do feixe sônico emitido pelos transdutores '*phased array*' podem ser definidas de forma resumida como a excitação de um grupo de elementos através de uma lei focal programada, a qual determina a abertura desejada e as características do feixe sônico [18].

2.3.6 – VISUALIZAÇÃO.

Os tipos de visualização do ensaio por ultrassom com transdutores '*phased array*', são definidas da mesma forma que o ensaio no sistema convencional, conforme definido no capítulo 2.2.7, exceto pela geração da imagem S-scan que se aplica exclusivamente para o sistema '*phased array*', após a definição do ângulo inicial, o ângulo final e o passo. O gráfico associado ao A-scan é digitalizado e plotado à medida que cada lei focal é seqüenciada. A cada ângulo ou lei focal digitalizado, os mesmos são “empilhados” construindo uma imagem de corte transversal em tempo real.

Essa construção real das imagens '*phased array*' permite uma maior capacidade de fornecer em tempo real a visualização dos dados aquisitados de forma volumétrica para todos os tipos de varreduras eletrônicas. Possibilitando a exibição de vários tipos de imagens de forma simultânea. Mas sua principal característica é de armazenar as informações completas dos dados aquisitados,

permitindo posteriormente uma reconstrução das imagens setoriais, C-scans, B-scans com as informações A-scan correspondente em qualquer local da inspeção. A Figura 2-37 mostra uma das possíveis combinações de imagens simultâneas, sendo neste caso exibido o A-scan retificado, o S-scan, e uma imagem C-scan da parte superior da peça. Podendo ainda ser mostrado à imagem C-scan da parte superior da peça em substituição a imagem C-scan B-Scan da seção transversal da peça em substituição a imagem C-scan [18].

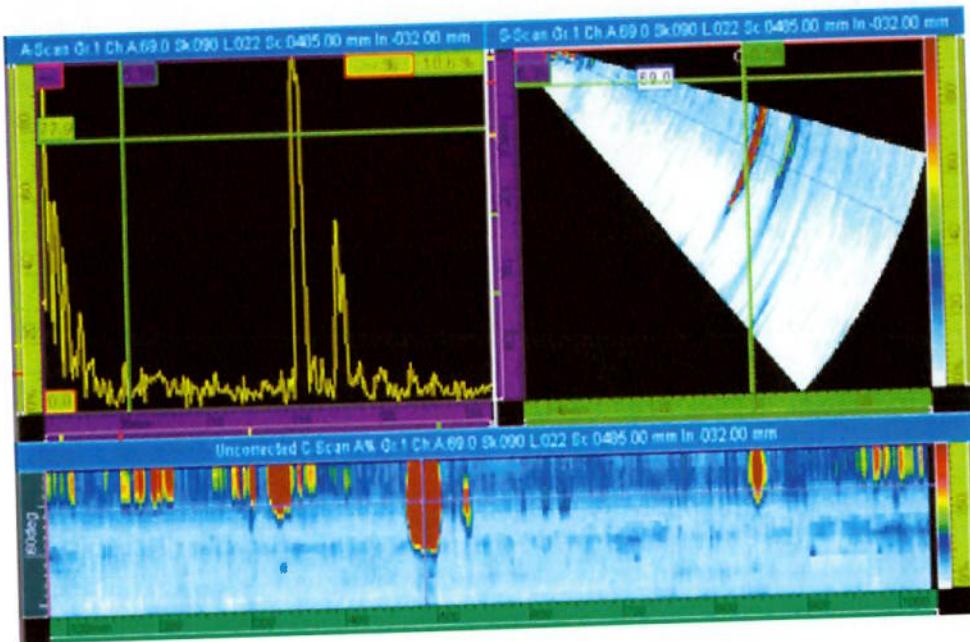


Figura 2-37 – Display com múltiplas imagens [18].

Durante as varreduras os dados são coletados com base na posição do encoder, o qual possibilita identificar posteriormente a localização exata das descontinuidades. A combinação das imagens mostradas simultaneamente apresentadas em diferentes pontos de vista de interpretação facilita e proporciona maior confiabilidade nos resultados finais se comparado a visualização do ensaio por ultrassom convencional mostrado no item 2.2.7.

3 – OBJETIVOS.

Validar e aplicar o ensaio por ultrassom utilizando transdutores '*phased array*' em juntas soldadas de aço inoxidável austenítico.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 – INTRODUÇÃO.

Conforme já mencionado, o objetivo deste trabalho é validar o método de US com transdutores tipo '*phased array*' em juntas soldadas de equipamentos construídos de aço inoxidável austenítico, verificando suas características e confiabilidade, de maneira a se obter o aprimoramento na qualidade das inspeções e maior abrangência atendendo aos requisitos das normas.

O estudo foi desenvolvido explorando-se um equipamento real com juntas soldadas e material considerado relativamente de difícil inspeção, sendo executado através do procedimento qualificado de ensaio não destrutivo por ultrassom com transdutores tipo '*phased array*'.

4.2 – ESTUDO DE CASO.

Algumas juntas soldadas dos equipamentos são constituídas de geometrias complexas tornando inviável o ensaio radiográfico. Nestes casos, para verificar a qualidade das soldas e garantir a confiabilidade do equipamento, ensaios por ultrassom convencional eram executados em substituição à radiografia, porém esse ensaio depende diretamente da sensibilidade, interpretação e experiência do inspetor qualificado, não obtendo registros permanentes dos resultados para futuro acompanhamento das juntas em serviço. Pelos motivos expostos acima, a Petrobras incluiu em suas especificações, para equipamentos que operarão com fluidos contendo hidrogênio e equipamentos fabricados em Cr-Mo e Cr-Mo-V, a exigência do ultrassom computadorizado, já que o mesmo permite obter um registro permanente de todo o volume inspecionado, obtendo assim melhores rastreabilidade e detectabilidade, possibilitando reavaliar as inspeções a qualquer momento e também acompanhar descontinuidades de fabricação

aceitáveis dentro dos critérios estabelecidos e o surgimento de novas descontinuidades.

Vários equipamentos, da indústria nuclear, petroquímica, química, entre outras, possuem juntas onde são aplicáveis as inspeções por ultrassom com transdutores tipo '*phased array*'. Entre os equipamentos aplicáveis, estão em destaque, na figura 4-1, os trocadores de calor e vasos de pressão.

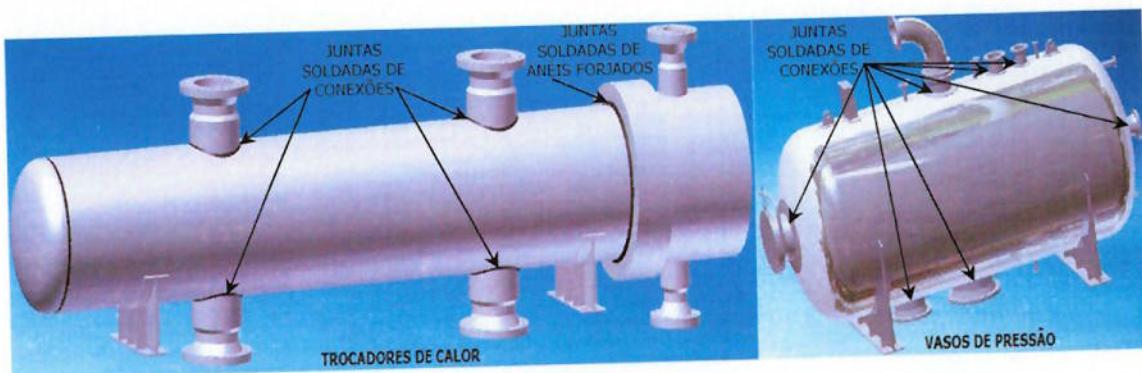


Figura 4-1 – Alguns tipos de equipamentos e juntas aplicáveis.

4.3 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO POR ULTRASSOM – PHASED ARRAY

O procedimento de ensaio por ultrassom foi preparado de forma a obter as condições mínimas e boas práticas na execução do ensaio não destrutivo por ultrassom utilizando transdutores '*phased array*' em juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos.

A totalidade do procedimento foi elaborada com base nos requisitos mínimos definidos pelas normas ASME seção V, ASME seção VIII Divisão 1 e 2 e nas normas Petrobras N-1594, N-1704 e N-1706.

O procedimento deve conter todos os itens de suma importância para a adequada execução do ensaio por ultrassom; dentre esses itens pode se destacar o método de ultrassom que deve ser realizado, definição dos blocos de calibração, a sistemática de traçagem das curvas de referência, critérios de aceitação, técnica de varredura, aparelhos e cabeçotes, acoplante, entre outros itens que serão abordados em seguida.

4.3.1 – RESPONSABILIDADE

A execução do ensaio de ultrassom deve ser realizada por inspetor qualificado pelo Sistema Nacional de Qualificação e Certificação (SNQC) e pela associação brasileira de ensaios não destrutivos (ABENDE), conforme definido pela norma ABENDE NA-01 como inspetor de ultrassom nível 2 e subnível S4 (US-N2-S4). Qualificação que engloba os tipos de juntas definidos no item 4.3.5, além de ser devidamente treinado pelo inspetor de ultrassom nível 3 (US-N3) que elaborou o procedimento para o ensaio de juntas soldadas de aço inoxidável austenítico, utilizando o aparelho Olympus OMNISCAN MX.

4.3.2 – SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Na seleção dos equipamentos utilizados no estudo foram considerados alguns dos principais itens na execução do ensaio por ultrassom. Dentre eles o aparelho de ultrassom, os cabeçotes, softwares, acoplante entre outros acessórios.

4.3.2.1 – APARELHO DE ULTRASSOM

Para execução do ensaio de ultrassom foi utilizado o aparelho modelo OMNISCAN MX com módulo '*phased array*' 32-128, fabricado pela empresa Olympus. A figura 4-2 mostra o aparelho de ultrassom utilizado.



Figura 4-2 – Aparelho de ultrassom

4.3.2.2 – SCANNER

Será utilizado um scanner HSMT Compact da empresa Olympus, conforme figura 4-3, e *encoder* com resolução de 1,0mm montado no *scanner*. Para posicionamento e controle de posição durante o ensaio, possibilitando a correlação entre os sinais registrados e a posição dos mesmos em relação à peça ensaiada.

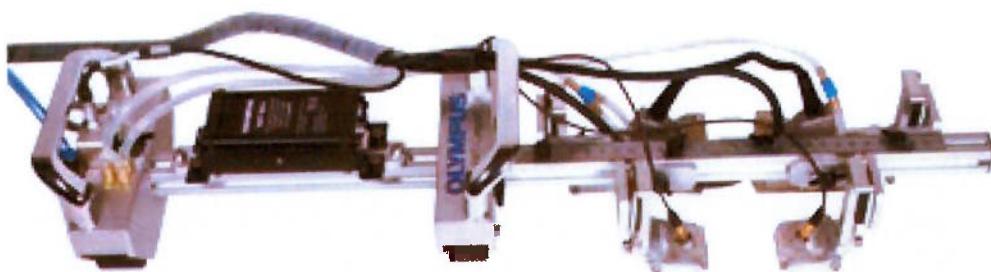


Figura 4-3 – Scanner HSMT Compact Olympus

4.3.2.3 – CABEÇOTES E SAPATAS

Para os ensaios foram definidas a possibilidade de utilização dos cabeçotes listados na tabela 4-1 e as sapatas estão definidas na tabela 4-2, de acordo com as necessidades definidas a cada tipo de varredura.

Tabela 4-1 – Tabela de cabeçotes.

FABRICANTE	MODELO	QUANTIDADE DE ELEMENTOS	FREQUÊNCIA (MHz)	DIMENSÕES DOS ELEMENTOS (mm)
OLYMPUS	SL64-A12	64	5	0,6 x 10
OLYMPUS	SL16-A10	16	5	0,6 x 10

Tabela 4-2 – Tabela de sapatas.

FABRICANTE	MODELO	DIMENSÕES (mm)	ÂNGULO NOMINAL DA ONDA REFRATADA NO AÇO (graus)	VELOCIDADE SÔNICA (m/s)
OLYMPUS	SA12-N55S	58 x 23	55	2330
OLYMPUS	SA12-N60L	26 x 23	60	2330
OLYMPUS	SA12-0L	62 x 23	zero	2330
OLYMPUS	SA10-N55S	23 x 23	55	2330
OLYMPUS	SA10-N60L	26 x 23	60	2330
OLYMPUS	SA10-0L	25 x 23	zero	2330
OLYMPUS	SA5-N45L	57 x 47	55	2330
OLYMPUS	SA5-N60S	46 x 43	60	2330
OLYMPUS	SA5-N60L	39 x 50	60	2330
OLYMPUS	SA5-0L	38 x 45	zero	2330

4.3.2.4 – SOFTWARE

O software *ESBeamTool* será utilizado para definir os principais ajustes do sistema de ultrassom computadorizado que serão posteriormente inseridos no procedimento. Para isso, são inseridos neste software parâmetros de inspeção como tipo de cabeçote e sapata, geometria da solda posicionamento do cabeçote, ângulos e tipo de varredura, para verificar se estes parâmetros proporcionam cobertura de 100% do volume de solda a ser inspecionado ou se há necessidade de ajustes. A figura 4-4 mostra tela do software *ESBeamTool* com a preparação para ensaio de uma junta soldada.

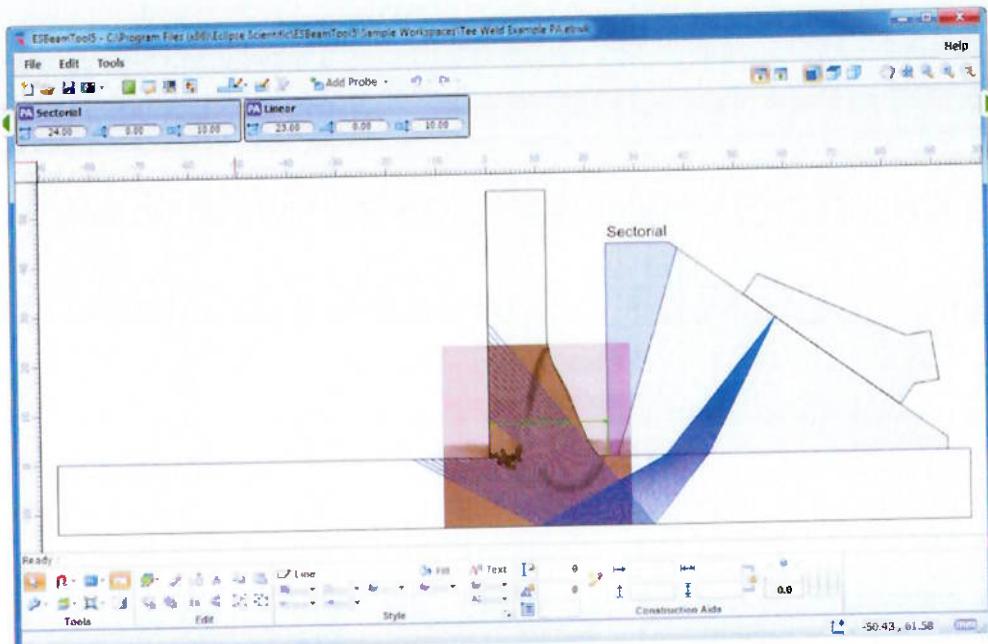


Figura 4-4 – Tela do software *ESBeamtool*.

Para análise das imagens dos dados obtidos, assim como o dimensionamento e localização das descontinuidades será utilizado o software *Tomoview* da fabricante *Olympus*. A figura 4-5 mostra a tela do software *Tomoview* com a visualização de múltiplas imagens do ensaio de ultrassom de uma junta soldada.

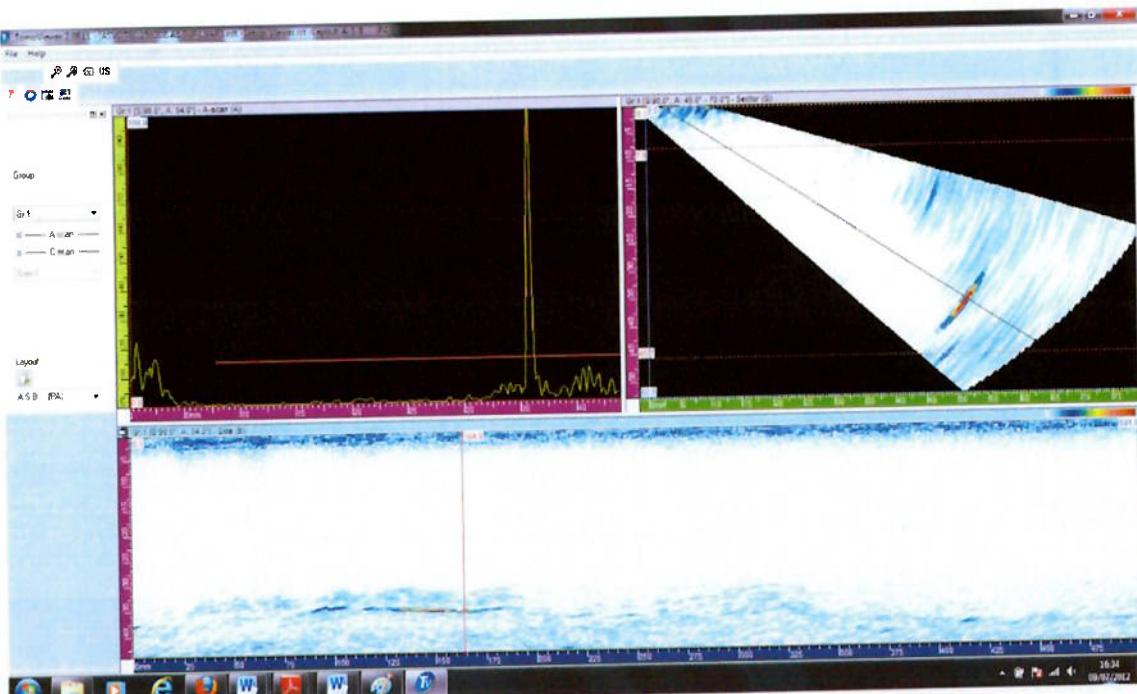


Figura 4-5 – Tela do software *Tomoview*.

4.3.2.1 – ACOPLANTE

Na execução do ensaio de ultrassom deverá ser utilizada água potável como acoplante, podendo ainda ser utilizado o acoplante Magnagel, sendo que o mesmo acoplante especificado para realização do ensaio deve ser utilizado durante a calibração, de forma a manter as mesmas características do ensaio.

Devido à reação do aço inoxidável com alguns contaminantes, antes do ensaio devem ser analisados os teores dos contaminantes, sendo a soma dos teores de cloro e flúor limitados a no máximo 250ppm.

4.3.3 – BLOCOS DE REFERÊNCIA

Os blocos de referencia utilizados foram executados utilizando material aço inoxidável 304L e o mesmo processo de soldagem utilizado nas juntas soldadas do equipamento, de forma a simular a situação próxima da real.

4.3.3.1 – AJUSTE DA SENSIBILIDADE PARA ONDAS LONGITUDINAIS

Para ajuste da sensibilidade das ondas longitudinais será utilizado o bloco de referencia fabricado de acordo com as dimensões definidas na figura 4-6.

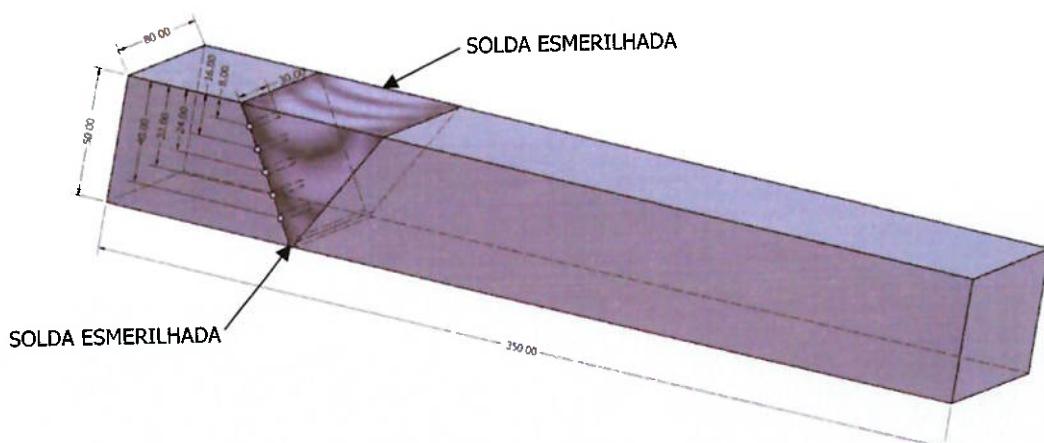


Figura 4-6 – Dimensões bloco de referência de ondas longitudinais.

4.3.3.2 – AJUSTE DA SENSIBILIDADE PARA ONDAS TRANSVERSAIS

Para ajuste da sensibilidade das ondas transversais será utilizado o bloco de referencia fabricado de acordo com as dimensões definidas na figura 4-7.

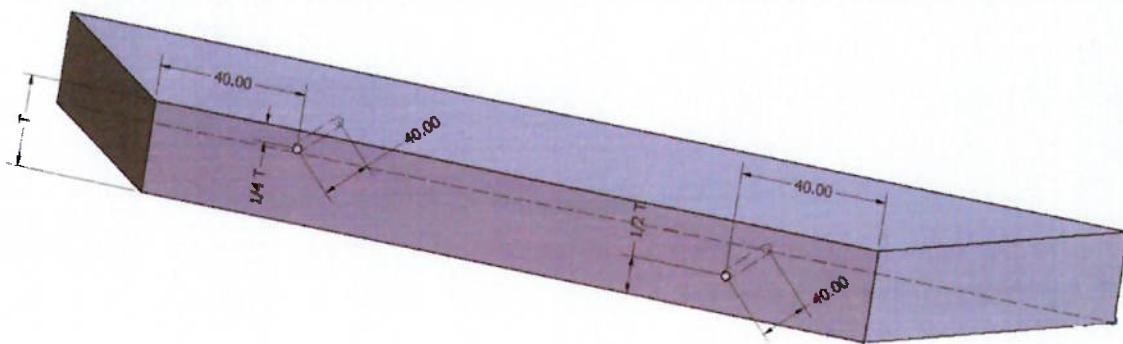


Figura 4-7 – Dimensões bloco de calibração de ondas transversais.

4.3.4 – BLOCO PARA DEMONSTRAÇÃO DO PROCEDIMENTO

Para simulação e validação do ensaio por ultrassom com transdutores 'phased array' nas juntas soldadas de aço inoxidável austenítico, foi preparado um bloco de referencia de acordo com as dimensões definidas na figura 4-8, fabricado de mesmo material e com uma junta soldada de forma a simular a situação mais próxima possível da real.

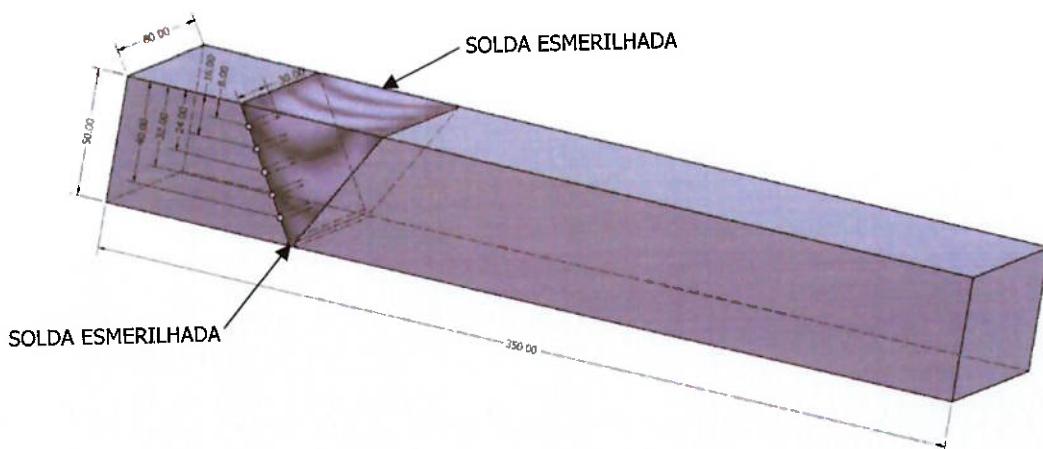
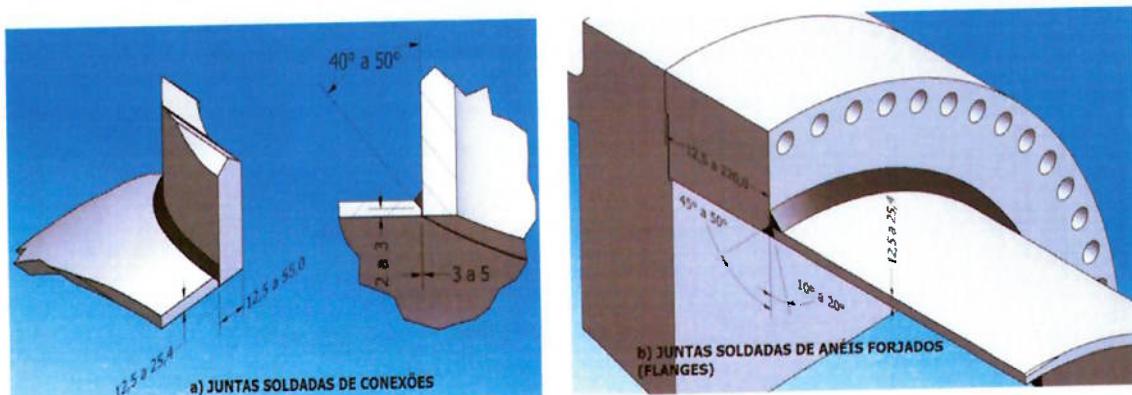


Figura 4-8 – Dimensões bloco de referencia.

4.3.5 – TIPOS DE JUNTAS

O ensaio por ultrassom Phased Array foi aplicado nas juntas soldadas de conexões e flanges onde, em função da geometria da solda, não é possível a execução do ensaio radiográfico total.

Desta forma, foram inspecionados os equipamentos que estarão sujeitos a pressão e serviço considerado como especial pelas normas N-1704 e N-1706, mais especificamente todas as juntas soldadas de conexões com diâmetro nominal superior a $\varnothing 4"$ e as juntas soldadas de flanges, sendo que ambos os tipos de juntas soldadas devem atender uma das configurações e faixa de dimensões definidas na figura 4-9.



- OBS.
- Dimensões em milímetros ou como indicado
 - O diâmetro do equipamento pode variar de 500 a 2000 mm.
 - Conexões com diâmetro maiores que 4".

Figura 4-9 – Tipos de juntas

4.3.6 – TÉCNICA DE INSPEÇÃO

A inspeção será executada por contato direto, com utilização de acoplante, na técnica pulso-eco com transdutores '*phased array*' e utilização de feixe sônico não focalizado. O ensaio deve ser executado com registro total.

O ensaio será composto por um conjunto de feixes sônicos gerados e transmitidos pelo equipamento computadorizado e emitidos por um cabeçote '*phased array*'. A avaliação dos resultados será realizada com o software *Tomoview*.

4.3.7 – PREPARAÇÃO E CONDIÇÃO SUPERFICIAL

As superfícies devem estar limpas e livres de irregularidades que possam interferir no acoplamento e movimentação do cabeçote, tais como rugosidade excessiva, respingos, tintas, entre outros. Para isso as mesmas devem ser preparadas por esmerilhamento, lixamento ou escovamento, de acordo com a necessidade, ressaltando que independente do método de preparação adotado, deve-se tomar os devidos cuidados para evitar a contaminação do aço inoxidável, utilizando ferramentas de mesmo material ou revestido, discos de corte e esmerilhamento devem ter alma de nylon ou similar.

Além disso, as margens da solda devem ter concordância suave entre as superfícies e o reforço interno da solda deve ser removido até rente a superfície do metal de base.

4.3.8 – TÉCNICAS DE VARREDURA

O ensaio das juntas soldadas dos flanges será executado através da movimentação manual do cabeçote '*phased array*' paralelamente à solda e com feixe sônico direcionado transversalmente a solda. Deve ser utilizado *encoder* e dispositivo auxiliar ou guia para manter o posicionamento do cabeçote em relação a uma superfície de referência, sendo este posicionamento determinado pelo software *ESBeamtool* e devendo iniciar a uma distância mínima de 10mm antes da margem da solda.

Será utilizado feixe sônico não focalizado, com isso o aparelho deve ser ajustado para uma distância focal superior a dimensão do campo próximo do feixe sônico formado, determinada através do software *ESBeamtool*.

No ensaio das juntas soldadas das conexões o ensaio será realizado pela superfície 1 com cabeçote angular de onda transversal e pela superfície 2 com cabeçote normal de onda longitudinal, conforme mostrado na figura 4-10.

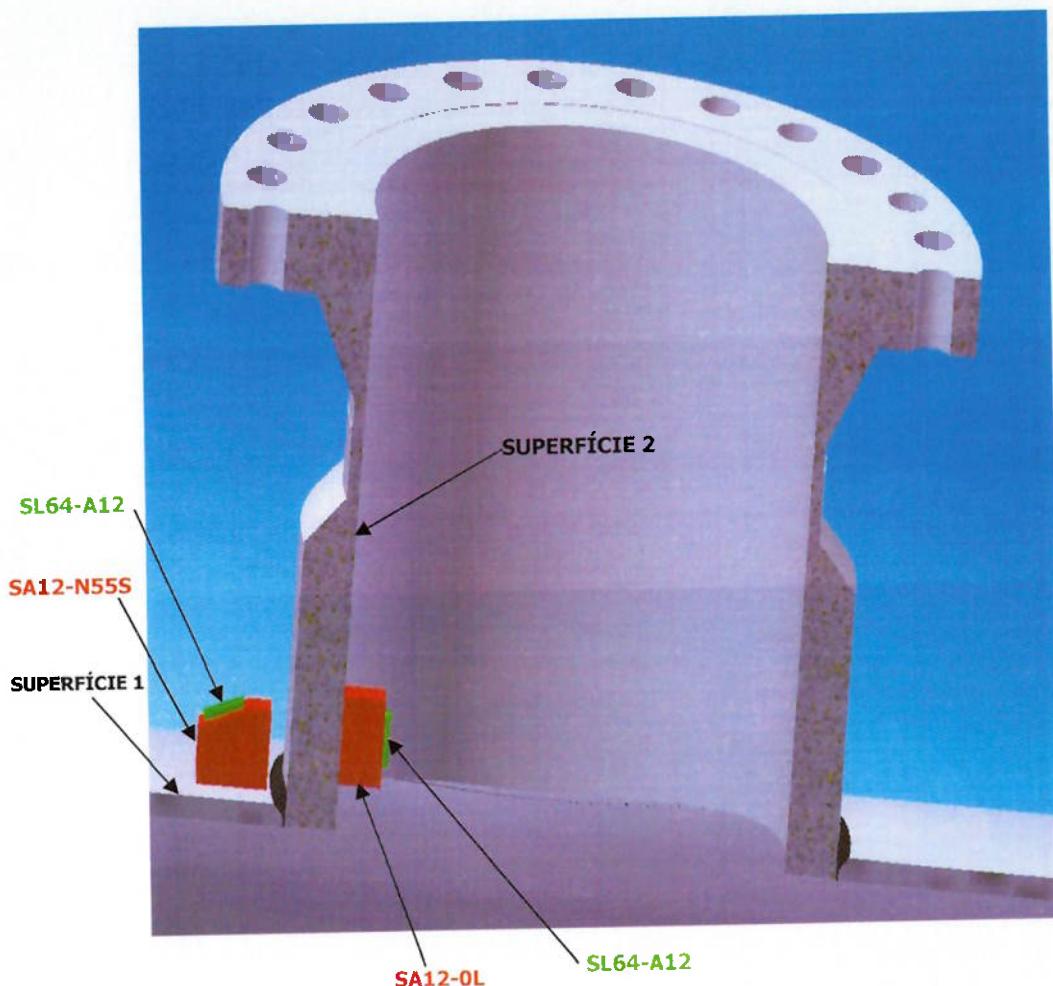


Figura 4-10 – Superfícies de ensaio da junta soldada de conexões.

No ensaio das juntas soldadas de flanges o ensaio será realizado pela superfície 1 com cabeçote angular de onda transversal e pela superfície 2 com cabeçote normal de onda longitudinal, conforme mostrado na figura 4-11.



Figura 4-11 – Superfícies de ensaio da junta soldada de anéis forjados.

Para a realização do ensaio deve ser emitida uma instrução de trabalho específica para cada solda a ser inspecionada, contendo todas as informações necessárias para a execução do ensaio da junta, como detalhe da junta soldada, quantidade de varreduras, posicionamento e modelo do cabeçote a cada varredura, modelo da sapata, e o 'setup' com a técnica de varredura, ângulos de inspeção, numero de elementos, entre outras informações necessárias. Esta instrução deve ser emitida por inspetor de ultrassom nível 2 ou nível 3 e aprovada por inspetor de ultrassom nível 3.

4.3.9 – CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO

Os critérios de aceitação estão baseados no parágrafo 7.5.4.2 do código ASME seção VIII Divisão 2 [26] e na norma N-1704 [1], onde todas as descontinuidades interpretadas como trinca, falta de fusão e falta de penetração são inaceitáveis, independente do comprimento. Para os outros tipos de descontinuidades são inaceitáveis se a reflexão exceder a curva de referência primária e o comprimento excederem a:

- 6 mm para t até 19 mm;
- $1/3$ de t para t acima de 19 mm até 57 mm;

Sendo:

t é a espessura da solda, excluindo qualquer reforço. Para soldas com penetração total que incluem soldas de ângulo, a garganta da solda em ângulo deve ser incluída em t .

O dimensionamento do comprimento e profundidade das descontinuidades será realizado através do software de análise *Tomoview*.

4.4 – ENSAIOS DAS JUNTAS SOLDADAS DO EQUIPAMENTO

O ensaio por ultrassom com transdutores '*phased array*', será aplicado a um permutador de calor fabricado pela ASVOTEC Termoindustrial Ltda que será fornecido para a PETROBRAS RNEST (Refinaria do nordeste). Este equipamento tem como características principais a utilização de aço inoxidável austenítico em sua construção e a aplicação em serviço especial com H_2 que, conforme norma Petrobras N-1704, exige a aplicação do ensaio por ultrassom computadorizado. A figura 4-12 mostra uma vista geral do equipamento destacando as juntas WF1, WA1, WA2, WB1 e WB2 que serão analisadas através do método de ensaio por ultrassom com transdutores '*phased array*'.

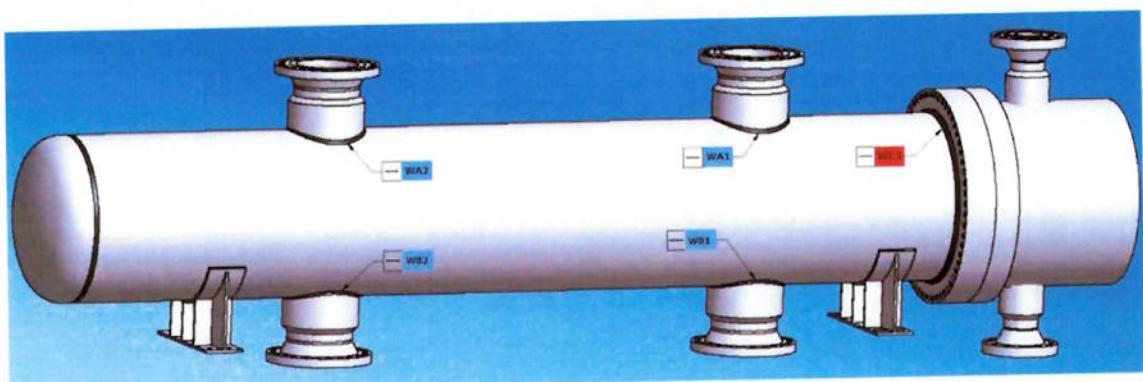


Figura 4-12 – Mapa de juntas soldadas examinadas por ultrassom do permutador de calor

Para a análise dos resultados foi escolhida a junta WF1, definida como a ligação do costado com o flange do corpo de acordo com o destaque em vermelho realizado na figura 4-12.

4.4.1 – DIMENSÕES

A figura 4-13 mostra em detalhes a geometria e as dimensões da junta WF1, cujos resultados da inspeção serão discutidos.

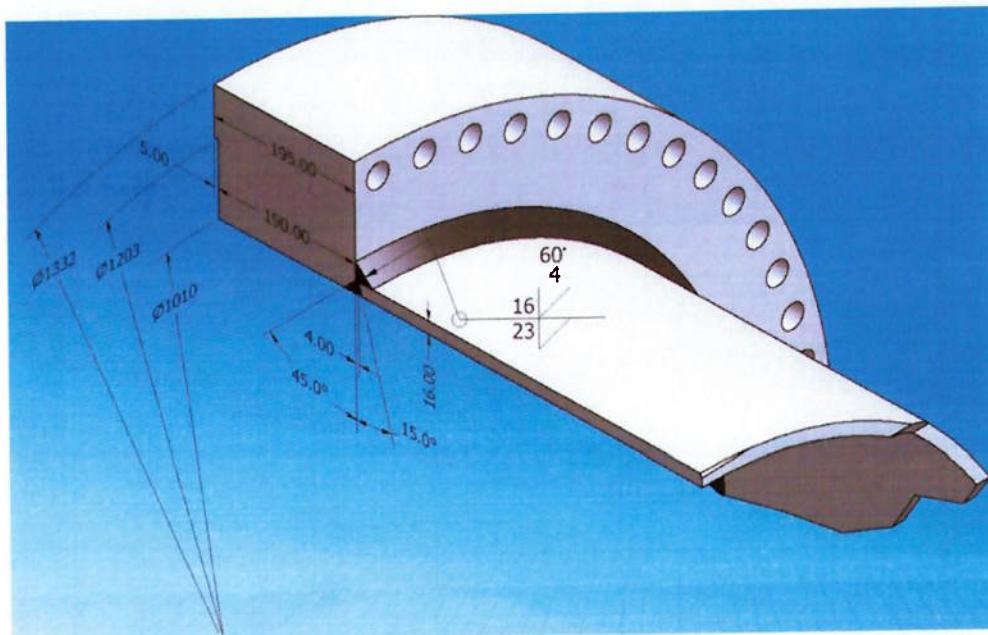


Figura 4-13 – Detalhe da junta soldada WF1.

4.4.2 – MATERIAIS UTILIZADOS

O equipamento foi fabricado em aço inoxidável austenítico, sendo o costado fabricado de chapa especificação SA-240-304L, o flange constituído de anel forjado especificação SA-182 F304L e para a solda foi utilizado consumível de soldagem de inox 308L.

4.4.3 – JUNTA SOLDADA

Para execução da soldagem da junta WF1 de ligação do flange ao costado foi utilizado o plano de soldagem conforme anexo 1 e EPS conforme anexo 2.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento do estudo. Dentre eles podem-se destacar a qualificação do procedimento de ensaio por ultrassom, as curvas de calibração através dos blocos de calibração, as simulações dos feixes sônicos gerados, as imagens dos dados aquisitados a cada varredura necessária para o ensaio por ultrassom na junta soldada do equipamento, detalhar as descontinuidades encontradas, assim como as necessidades de reparo.

De forma a facilitar o entendimento, os resultados serão divididos em duas seções distintas, uma referente ao procedimento de ensaio por ultrassom e outra em relação ao ensaio real de uma das juntas soldadas do equipamento, sendo que as questões pertinentes serão discutidas ao longo do capítulo.

5.1 – QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

O procedimento de ultrassom foi elaborado abrangendo os tópicos necessários para execução do ensaio, atendendo às normas pertinentes ao projeto, porém sua validação está condicionada aos resultados obtidos no ensaio de ultrassom do bloco de referência.

5.1.1 – PLANEJAMENTO DA INSPEÇÃO

Antes da aplicação do ensaio propriamente dito à inspeção do equipamento, é necessário um planejamento das inspeções, onde são definidos, através de simulação com um aplicativo específico, todos os parâmetros necessários para garantir a cobertura de toda a região de interesse.

Nesta parte serão apresentados todos os fatores considerados para a simulação, assim como as definições dos tipos de varredura a serem executadas no ensaio da junta soldada de ligação do flange ao costado do equipamento.

5.1.1.1 – GEOMETRIA

Para iniciar a simulação foi necessário transportar a geometria da junta soldada do equipamento a ser inspecionada do projeto para o *software ESBeamtool* conforme ilustrado na figura 5-1.

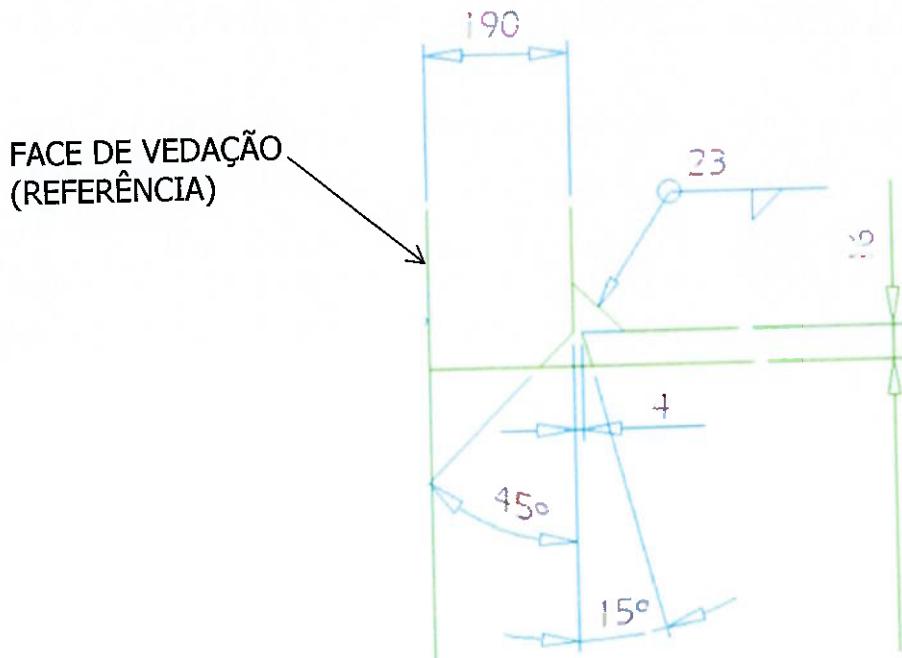


Figura 5-1 – Geometria incluída no software *ESBeamtool*.

A primeira impressão ao iniciar a utilização do *software ESBeamtool* é sua característica de possuir uma interface similar às ferramentas de desenhos auxiliados por computador (CAD) o que proporcionou uma utilização intuitiva e rápida na inclusão desta geometria relativamente complexa como mostrado na figura 5-1.

5.1.1.2 – PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO

5.1.1.2.1 – PARÂMETROS GERAIS

Antes do inicio da simulação das varreduras, é necessário realizar a configuração dos principais parâmetros utilizados na formação do feixe sônico. O próprio *software ESBeamtool* possui um banco de dados com as propriedades

dos principais materiais, sapatas e transdutores, além de executar os cálculos necessários para traçar a trajetória e abrangência do feixe sônico.

Com a geometria definida, conforme figura 5-1, o próximo passo é a definição do material aplicado e consequentemente as definições das velocidades de propagação das ondas longitudinais (compressão) e transversais (ciralhante), pois ambas serão utilizadas durante os ensaios. De acordo com a figura 5-2, o banco de dados do software define os valores considerados nas velocidades de propagação das ondas.

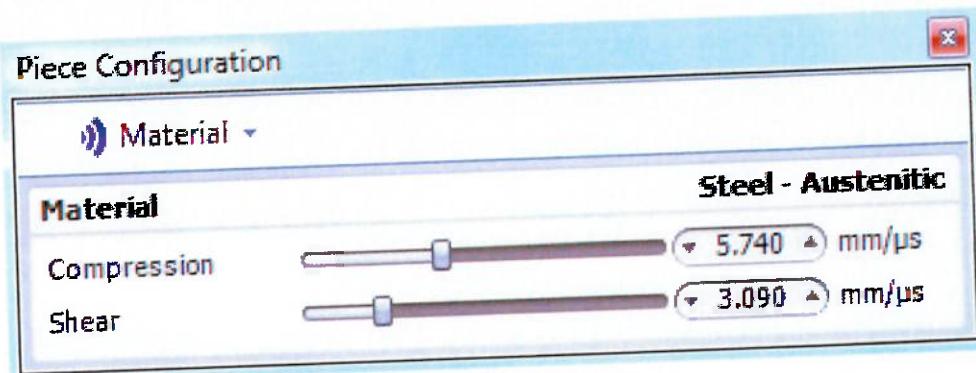


Figura 5-2 – Velocidades de propagação no aço inoxidável austenítico.

Para comparação, foram executados os cálculos das velocidades de propagação das ondas longitudinais e transversais no aço inoxidável austenítico através das equações 2-1 e 2-2 respectivamente, demonstradas abaixo.

Da equação 2-1, velocidade longitudinal:

$$v_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}} = \sqrt{\frac{194,38 \cdot 10^6 \cdot (1 - 0,3)}{7848 \cdot 10^{-9} \cdot (1 + 0,3) \cdot (1 - 2 \cdot 0,3)}}$$

$$v_L = 5774224 \text{mm/s} \rightarrow v_L = 5774 \text{m/s}$$

Da equação 2-2, velocidade transversal:

$$v_T = \sqrt{\frac{(1 - 2 \cdot \mu)}{2 \cdot (1 - \mu)}} \cdot v_L = \sqrt{\frac{(1 - 2 \cdot 0,3)}{2 \cdot (1 - 0,3)}} \cdot 5774 \rightarrow v_T = 3086 \text{m/s}$$

Comparando os valores calculados acima, os valores indicados na tabela 2-2 da literatura e os dados considerados pelo software *ESBeamtool* indicados na figura 5-2, é possível avaliar que os valores são próximos, não interferindo no resultado do ensaio, portanto serão utilizados os valores considerados pelo software.

Dando continuidade na verificação, foi executado o cálculo do comprimento das ondas para determinar a menor descontinuidade que pode ser detectada.

Da equação 2-4, comprimento da onda longitudinal:

$$\nu = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda = \frac{5 \cdot 10^6}{5774} = 0,0015m = 1,5mm$$

Da equação 2-4, comprimento da onda transversal:

$$\nu = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda = \frac{5 \cdot 10^6}{3086} = 0,000618m = 0,62mm$$

Com os comprimentos de ondas calculados é possível determinar a menor dimensão de descontinuidade possível de ser detectada nos parâmetros determinados. Essa dimensão é determinada como a metade de um comprimento de onda e está indicada na tabela 5-1, juntamente com um resumo dos dados calculados anteriormente.

Tabela 5-1 – Tabela de dados principais.

Tipo de Onda	Velocidade da Onda (m/s)	Frequência (MHz)	Comprimento de Onda λ (mm)	Menor Descontinuidade Detectável $\lambda/2$ (mm)
Longitudinal	5774	5	1,5	0,75
Transversal	3086	5	0,62	0,31

5.1.1.2.2 – PARÂMETROS DO TRANSDUTOR

Como o transdutor 5L64-A12 adotado para os ensaios permite a utilização tanto na inspeção com ondas longitudinais como transversais, a configuração do transdutor será realizada uma única vez, sendo a mesma utilizada para todas as varreduras. Os dados configurados estão mostrados na figura 5-3.

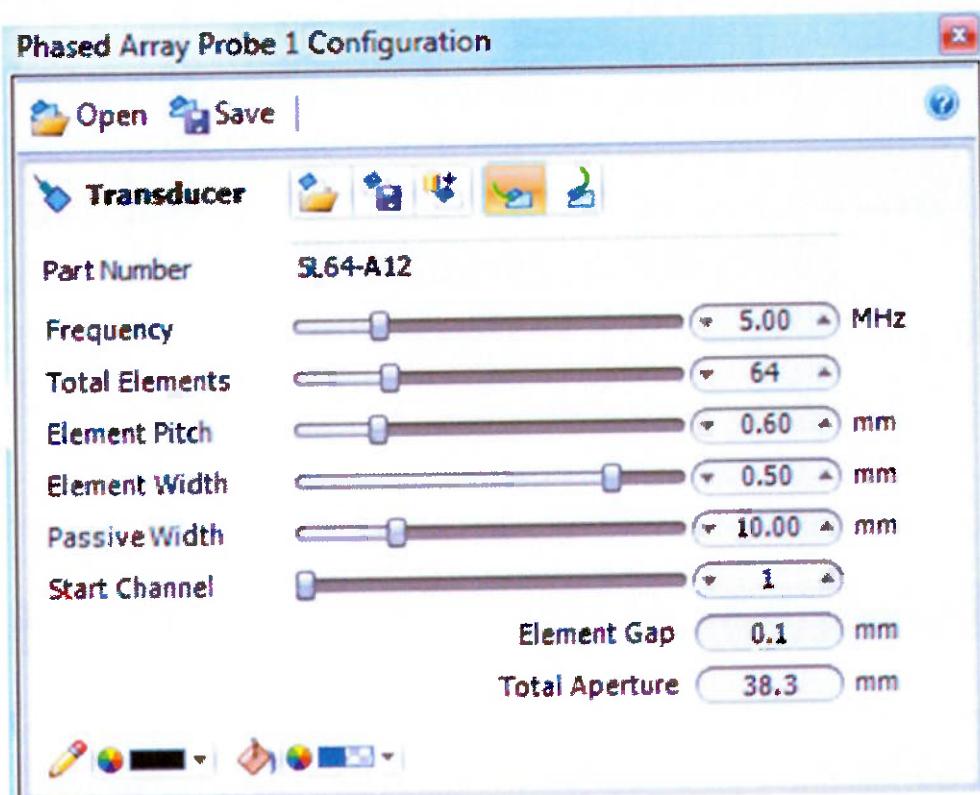


Figura 5-3 – Dados do transdutor.

De acordo com o mostrado na figura 5-3, praticamente todos os dados são imputados de acordo com o modelo de transdutor utilizado, exceto a definição da distância entre elementos (*element gap*) e a abertura total (*total aperture*), as quais foram calculadas pelo software e verificadas de acordo com os cálculos mostrados a seguir.

A distância entre elementos e a abertura total, representadas respectivamente pelas letras *g* e *A* na figura 2-32, são simples de serem calculadas, estando os valores definidos na figura 5-3 validados.

5.1.1.2.3 – PARÂMETROS DAS SAPATAS

Diferentemente do transdutor, as sapatas adotadas não são intercambiáveis para diferentes tipos de ondas. Portanto, de acordo com a figura 5-4 foi executada a configuração de uma sapata para o ensaio com ondas transversais, a ser utilizada na primeira e única varredura da superfície 1.

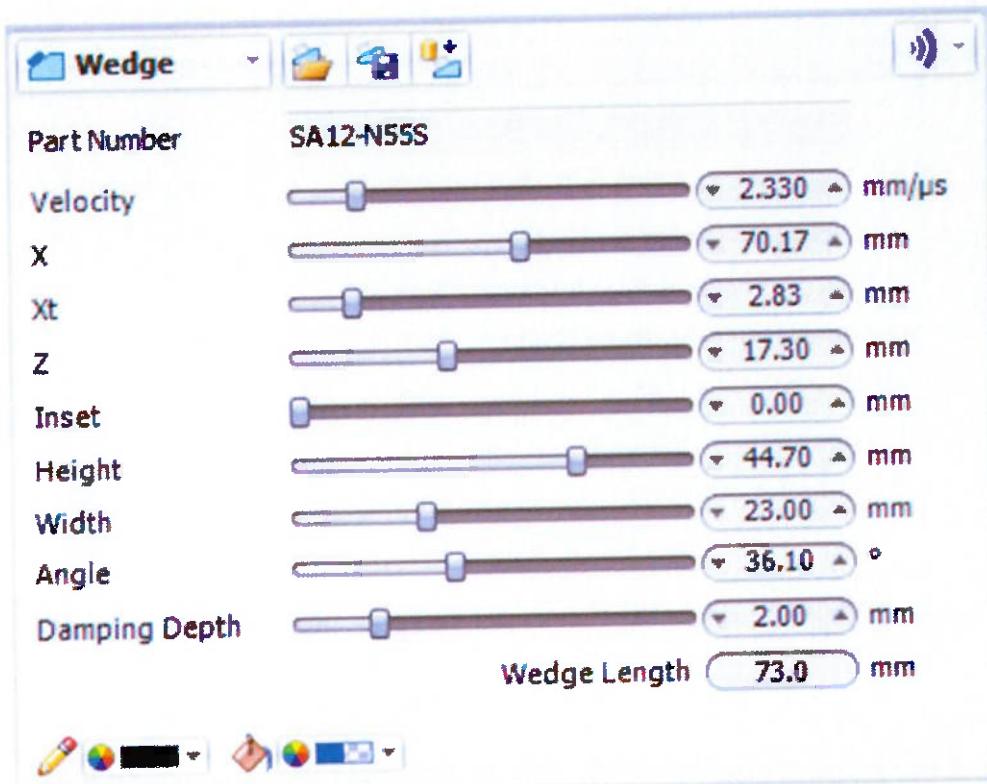


Figura 5-4 – Dados da sapata para varredura setorial.

A configuração executada na figura 5-5 foi elaborada para atendimento ao restante dos ensaios com ondas longitudinais na superfície 2, sendo utilizada na varredura linear tanto no ângulo fixo como no ângulo normal.

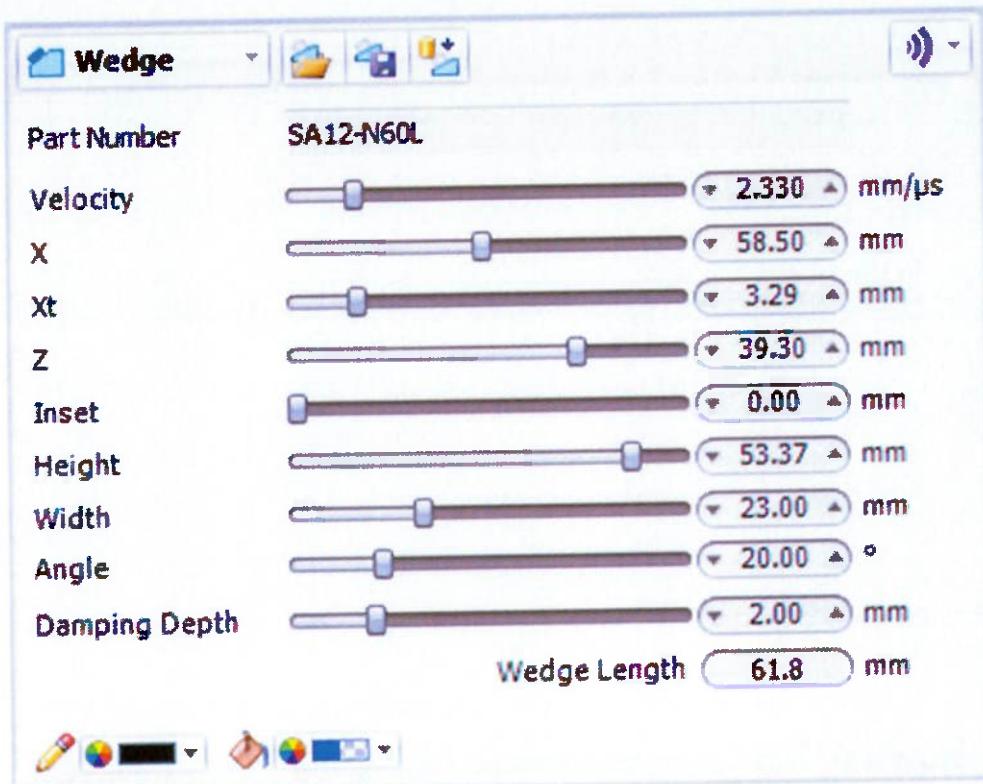


Figura 5-5 – Dados da sapata para varredura linear com ângulo fixo e normal.

Comparando as configurações das sapatas, a principal diferença que deve ser destacada é o ângulo da sapata, local onde é instalado o transdutor. Na sapata para ondas transversais esse ângulo é de 36º, maior que na sapata de ondas longitudinais, o qual é definido com 20º.

5.1.1.2.4 – PARÂMETROS DOS FEIXES SÔNICOS

Na última etapa da configuração dos parâmetros foram abordados os dados referentes aos feixes sônicos.

Na primeira configuração, o feixe sônico da varredura 1 na superfície 1, foi elaborado com varredura setorial e dividido em 2 grupos de ondas. O primeiro grupo inicia no elemento 35, já o grupo 2 inicia-se no elemento 49, sendo que ambos utilizam 16 elementos durante a geração do feixe. Outro fator importante na configuração é a faixa de ângulo utilizada na varredura do material, esse ângulo é a principal diferença entre os dois grupos, fazendo com que um grupo complemente o outro durante o ensaio. Essa configuração é

mostrada na figura 5-6. O ângulo é obtido com a devida defasagem de pulso dos elementos ativos.

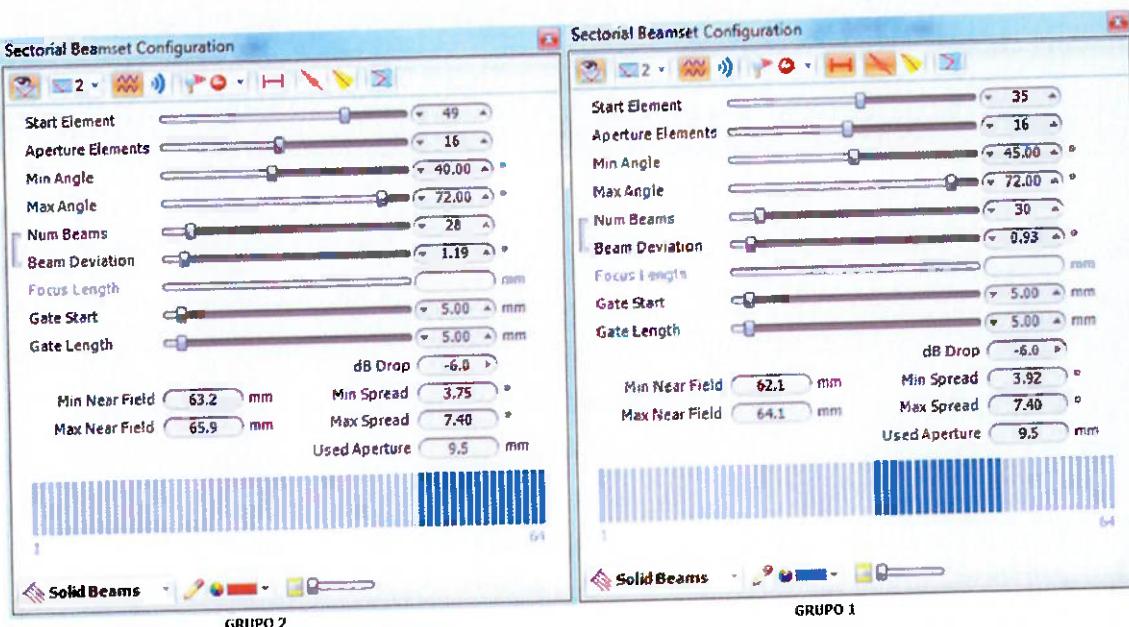


Figura 5-6 – Dados do feixe sônico para varredura setorial.

Enquanto isso a figura 5-7 é mostrado a configuração dos feixes sônicos das varreduras 1 a 6 utilizadas no ensaio da superfície 2. Neste caso a varredura é linear e ao invés de determinar uma faixa de ângulo para o ensaio, conforme feito na varredura setorial, neste caso é determinado um ângulo fixo.

Ao determinar o ângulo refratado que será utilizado no ensaio da peça, o software já determina qual o ângulo de incidência necessário. Esse ângulo depende do comportamento das ondas sônicas na interface entre a sapata e o material, sendo determinado pela lei de Snell através da relação determinada pela equação 2-10 avaliado abaixo.

Da equação 2-10, para ângulo de propagação de 45°:

$$\frac{\sin(\alpha)}{vi} = \frac{\sin(\beta)}{vr} \rightarrow \alpha = \sin^{-1} \left(\frac{vi \cdot \sin(\beta)}{vr} \right) \rightarrow \alpha = \sin^{-1} \left(\frac{2330 \cdot \sin(45^\circ)}{5740} \right)$$

$$\alpha = 16,68^\circ$$

Da equação 2-10, para ângulo de propagação de 60°:

$$\frac{\sin(\alpha)}{vi} = \frac{\sin(\beta)}{vr} \rightarrow \alpha = \sin^{-1} \left(\frac{vi \cdot \sin(\beta)}{vr} \right) \rightarrow \alpha = \sin^{-1} \left(\frac{2330 \cdot \sin(60^\circ)}{5740} \right)$$

$$\alpha = 20,58^\circ$$



Figura 5-7 – Dados do feixe sônico para varredura linear com ângulo fixo.

Finalizando, as configurações das varreduras 7 e 8 da superfície 2 estão na figura 5-8. Foi mantida a configuração das varreduras anteriores com varredura linear, porém neste caso com ângulo normal, ou seja, com ângulo de 0°.

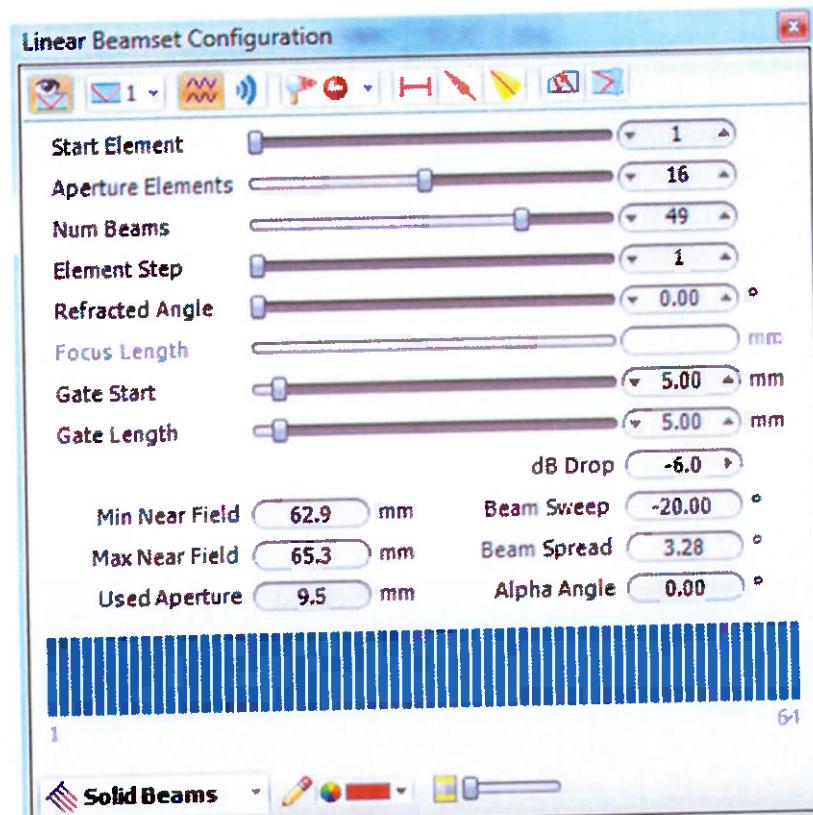


Figura 5-8 – Dados do feixe sônico para varredura linear com ângulo normal.

5.1.1.3 – SIMULAÇÃO

5.1.1.3.1 – INTRODUÇÃO

Uma vez que a geometria da junta soldada, juntamente com todos os parâmetros do ensaio estão incluídas no *software ESBeamtool*, foi possível iniciar a simulação dos feixes sônicos, o posicionamento e quantidade das varreduras necessárias para a inspeção, entre outros parâmetros importantes para o ensaio.

Da mesma forma que a geometria e a inclusão dos principais parâmetros, a definição da melhor trajetória e a visualização do caminho percorrido pelo feixe sônico, também são facilmente realizados no *ESBeamtool*.

Entretanto, mesmo com todas as facilidades do *software*, alguns parâmetros e ajustes de posicionamento e cobertura, entre outros detalhes, dependem diretamente do usuário, portanto foram necessários diversos cuidados e estudos.

Após algumas análises e tentativas, foi definido como melhor opção a utilização de 8 varreduras nas duas superfícies principais do equipamento. Dessas 8 varreduras, 7 foram simuladas pela superfície interna do equipamento, e apenas 1 pela superfície externa, garantindo a cobertura total da junta soldada durante a inspeção.

Para um melhor posicionamento do cabeçote em relação à junta soldada, foi adotada uma superfície com acabamento usinado, sendo a face de vedação do flange utilizada como referência para as varreduras pela superfície interna do costado e a face do flange externa ao costado para referência do ensaio pela superfície externa ao costado, conforme indicado na figura 5-1.

Para facilitar a visualização e interpretação das simulações para o ensaio por ultrassom, cada varredura será mostrada de forma padronizada, contendo uma figura com o posicionamento do cabeçote, a trajetória e a cobertura do feixe sônico na geometria da junta, representadas de acordo com a figura padrão 5-9.

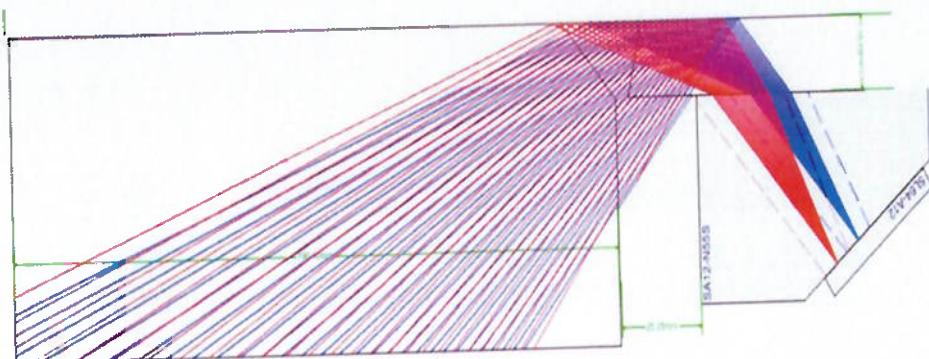


Figura 5-9 – Figura padrão para representação da simulação dos feixes sônicos

Complementando a figura, também será apresentada uma tabela com os dados do cabeçote utilizado, da sapata utilizada e os principais parâmetros utilizados durante as simulações e configurações do feixe sônico empregado em cada varredura, conforme tabela padrão 5-2.

Tabela 5-2 – Tabela padrão com os dados principais utilizados nas simulações.

Dados principais utilizados na simulação da Varredura					
Cabeçote					
Fabricante	Modelo	Quantidade de elementos	Frequência	Dimensões dos elementos	Tipo
Olympus	XXXX-XXX	XX	XXMHz	XX x XX	Phased Array
Sapata					
Fabricante	Modelo	Velocidade Sônica	Ângulo	Dimensões	Tipo
Olympus	XXXX-XXX	XX m/s	XX°	XX x XX	Phased Array
Parâmetros					
TÉCNICA	Dist.	Gr.	Número de elementos	Elemento inicial	Ângulo inicial **
X	XXXmm	X	XX	XX	XX°
					Ângulo Final **
					X°

** Os campos destinados ao ângulo inicial e final são válidos para a varredura setorial, para as varreduras lineares, esses campos serão respectivamente substituídos pelo elemento final e pelo ângulo fixo da varredura linear.

Onde:

Fabricante – Empresa responsável pela confecção do cabeçote e da sapata;

Modelo – Código cadastrado pelo fabricante do cabeçote e da sapata;

Quantidade de elementos – Quantidade total de elementos ativos do cabeçote;

Frequência – número de oscilações por segundo

Dimensões dos elementos – espessura e largura dos elementos ativos;

Tipo – Tipo de transdutor;

Velocidade Sônica – Velocidade do feixe sônico na sapata;

Ângulo – Ângulo de trabalho da sapata, com o cabeçote;

Dimensões – Comprimento x largura da sapata;

Técnica – Métodos de varredura utilizada;

Dist. – Distância do cabeçote até a face de referência;

Gr. – Grupo de elementos para formação do feixe sônico;

Número de elementos – Quantidade de elementos ativos utilizados em cada grupo;

Elemento inicial – Elemento ativo onde se inicia a formação do feixe sônico;

Ângulo inicial – Ângulo inicial de ensaio do feixe sônico na peça (Varredura setorial)

Elemento Final – Último elemento ativo utilizado na formação do feixe sônico (Varredura Linear);

Ângulo final – Ângulo final de ensaio do feixe sônico na peça (Varredura Setorial);

Ângulo – Ângulo fixo utilizado na formação do feixe sônico linear na peça (Varredura Linear);

Incremento – Distância válida de incremento na lei focal, sendo utilizado incremento angular para a varredura setorial, e incremento por elemento no caso de varreduras lineares;

5.1.1.3.2 – VARREDURAS

Inicialmente foi estudada a superfície externa do costado (superfície 1); neste local o espaço para a execução de múltiplas varreduras é limitado devido à extensão do flange e do filete de solda. Portanto, o estudo foi conduzido considerando-se uma única varredura que proporcionou o ensaio total da junta soldada, de acordo com a trajetória dos feixes sônicos na varredura 1 da superfície 1, mostrados figura 5-10.

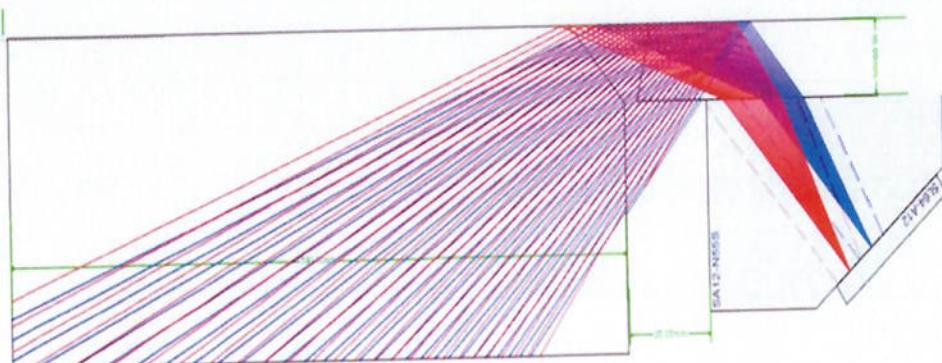


Figura 5-10 – Trajetória dos feixes sônicos da varredura 1 na superfície 1.

Para a varredura da figura 5-10, foram adotados o cabeçote, sapata e os dados definidos na tabela 5-3, destacando-se a utilização da técnica de varredura setorial, com dois grupos de 16 elementos cada, sendo que o grupo 1 é representado pelo feixe sônico na cor azul e o grupo 2 representado pela cor vermelha, de acordo com o mostrado na figura 5-6.

Tabela 5-3 – Tabela com os dados principais utilizados na simulação da varredura 1 na superfície 1.

Dados principais da simulação da varredura 1/superfície 1					
Cabeçote					
Fabricante	Modelo	Quantidade de elementos	Frequência	Dimensões dos elementos	Tipo
Olympus	5L64-A12	64	5 MHz	0,6 x 10	Phased Array
Sapata					
Fabricante	Modelo	Velocidade Sônica	Ângulo	Dimensões	Tipo
Olympus	SA12-N55S-IHC	2330 m/s	36º	68 x 40	Phased Array
Parâmetros					
TÉCNICA	Dist.	Gr.	Número de elementos	Elemento inicial	Ângulo inicial
Setorial	25mm	1	16	35	45º
		2	16	49	40º
				Ângulo Final	Incremento
				72º	1º
				72º	1º

De acordo com a tabela 5-3, nesta varredura foi adotado o cabeçote 5L64-A12 o qual apresenta como principal característica a versatilidade, já que pode ser utilizado tanto na inspeção linear como na inspeção setorial. Sendo neste caso utilizado a varredura setorial, para isso foi utilizada a sapata SA12-N555-IHC específica para este tipo de varredura. Outro dado importante é a quantidade de 64 elementos que compõem este cabeçote, porém nesta primeira varredura devido ao espaço e posicionamento do cabeçote foram utilizados apenas metade dos elementos disponíveis, sendo divididos em dois grupos de 16 elementos cada.

Com a conclusão da simulação do ensaio pela superfície 1, foi dado início a simulação pelo lado interno (Superfície 2).

Diferentemente da superfície 1, a superfície 2 não possui nenhum obstáculo, portanto com a superfície livre foi possível preparar uma simulação com várias varreduras, permitindo que a mesma região da junta soldada seja ensaiada por feixes sônicos com diferentes ângulos e sentidos de incidência.

Desta forma, descontinuidades não detectadas por um determinado feixe sônico podem ser encontradas por um segundo feixe sônico que esteja passando nesta mesma região, porém com um ângulo mais favorável à detecção da mesma, ou seja, aproximadamente perpendicular à descontinuidade.

A primeira varredura considerada pela superfície 2 foi executada a uma distância de 161 mm da face de vedação do flange e considerando as trajetórias dos feixes sônicos de acordo com a figura 5-11.

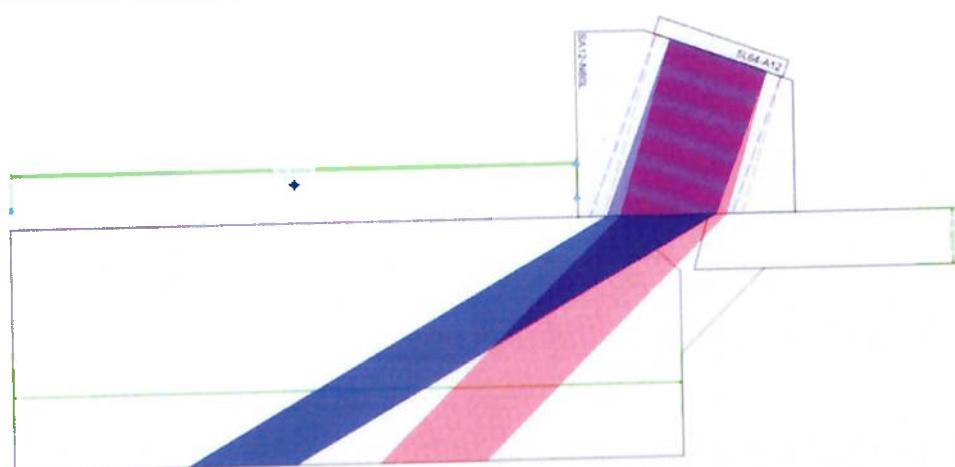


Figura 5-11 – Trajetória dos feixes sônicos da varredura 1 na superfície 2.

Para a varredura mostrada na figura 5-11, foram adotados o cabeçote, sapata e os dados definidos na tabela 5-4, onde pode-se destacar a utilização da técnica de varredura linear com ângulo fixo.

Tabela 5-4 – Tabela com os dados principais utilizados na simulação da varredura 1 na superfície 2.

Dados principais da simulação da varredura 1/superfície 2							
Cabeçote							
Fabricante	Modelo	Quantidade de elementos	Frequência	Dimensões dos elementos	Tipo		
Olympus	5L64-A12	64	5 MHz	0,6 x 10	Phased Array		
Sapata							
Fabricante	Modelo	Velocidade Sônica	Ângulo	Dimensões	Tipo		
Olympus	SA12-N60L	2330 m/s	20º	62 x 53	Phased Array		
Parâmetros							
TÉCNICA	Dist.	Gr.	Número de elementos	Elemento		Ângulo	Incremento
				Inicial	Final		
Linear	*	1	16	1	64	60º	1 (elemento)
		2	16	1	64	45º	1 (elemento)

* Distância variável a cada varredura, ver figura específica da varredura.

Para as próximas varreduras foi alterado o tipo de varredura para linear, com feixe sônico com ângulo fixo e com ângulo normal. Porém como o cabeçote atende ambos os testes, foi mantido o mesmo utilizado na varredura anterior, sendo alterado somente a sapata, adotando-se a sapata SA12-N60L que neste caso é específica para utilização na varredura linear. Além disso, neste momento foi possível à utilização total dos 64 elementos em cada grupo

de feixe sônico, sendo para cada grupo gerado um ângulo específico, conforme mostrado na figura 5-11.

Dando continuidade a simulação, para a segunda varredura o cabeçote foi deslocado 27mm em relação à primeira varredura, ou seja, o cabeçote foi posicionado a 188mm da face de vedação do flange, respeitando uma sobreposição do feixe da segunda varredura sobre a região da junta soldada inspecionada pela primeira varredura.

Na segunda varredura, foram mantidos os mesmos ângulos do feixe sônicos definidos para a primeira varredura, com isso os feixes sônicos foram modelados de acordo com a figura 5-12.

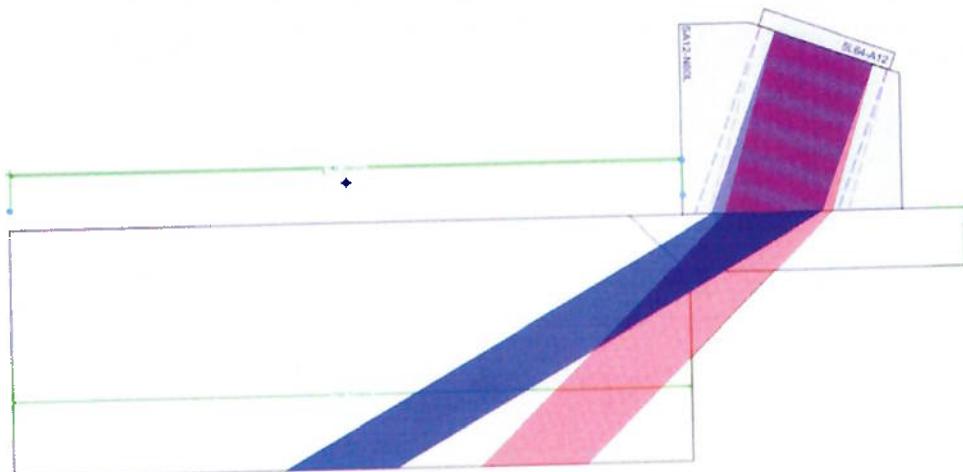


Figura 5-12 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 2 na superfície 2.

De acordo com as trajetórias das varreduras 1 e 2 na superfície 2, mostradas nas figuras 5-11 e 5-12, toda a região soldada foi abordada; porém é necessário que o ensaio se estenda além da junta soldada por no mínimo 10 mm, avaliando possíveis descontinuidades na zona afetada pelo calor (ZAC), ocasionadas pelo processo de soldagem. Na primeira varredura esse critério já foi utilizado, pois de acordo com a figura 5-11, a simulação dos feixes sônicos foi executada tendo seu inicio antes do inicio da solda.

Portanto, uma terceira varredura foi necessária e da mesma forma que na varredura 2, foram mantidos os mesmos parâmetros dos feixes sônicos, sendo apenas deslocado o cabeçote em 15mm, ficando a uma distância de 203mm em relação à face de vedação do flange. As trajetórias dos feixes sônicos e posicionamento do cabeçote estão mostrados na figura 5-13.

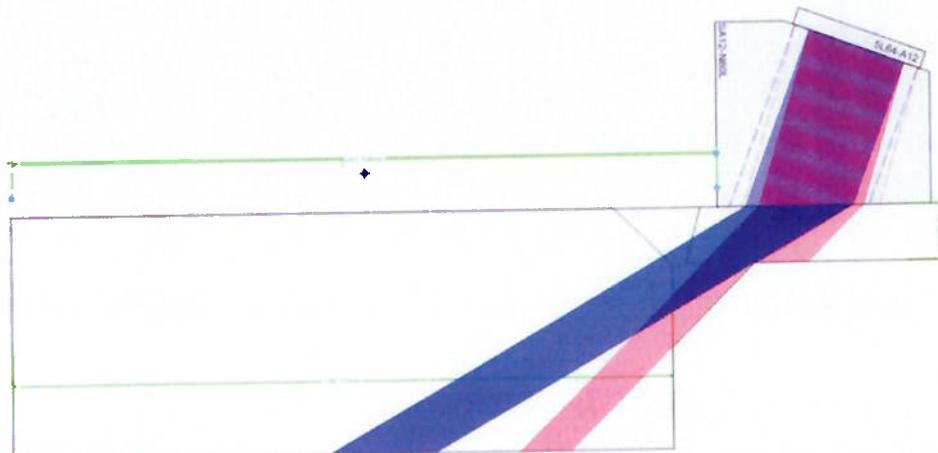


Figura 5-13 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 3 na superfície 2.

Conforme já mencionado, as varreduras 1, 2 e 3 mostradas respectivamente nas figuras 5-11; 5-12 e 5-13 adotaram os mesmos dados principais para a execução da simulação, ou seja, mesmo cabeçote, a mesma sapata, inclusive os mesmos dados descritos na tabela 5-4, sendo alterado somente o posicionamento do cabeçote em relação à face de referência, de acordo com as dimensões mostradas nas figuras específicas de cada varredura.

De acordo com a figura 5-13, além do ensaio se estender além da junta soldada e inspecionar parte do metal de base, a terceira varredura também proporcionou uma maior cobertura de ambos os grupos de elementos devido à sobreposição entre os feixes sônicos das varreduras simuladas, porém o feixe sônico formado pelos elementos ativos do grupo 1, representada pela cor azul, não atinge uma região do filete de solda, isto devido ao ângulo do feixe sônico não convergir com o ângulo do filete de solda.

Mas isso não prejudica o ensaio, pois além do feixe sônico formado pelos elementos ativos do grupo 2 atingir a região do filete, a quarta varredura terá inicio exatamente nessa região, porém o ensaio será executado em outro sentido complementando o ensaio executado anteriormente pelas outras varreduras. Continuando na mesma linha de raciocínio, a simulação teve inicio na região do metal de base antes do inicio da junta soldada.

Na varredura 4 da superfície 2, foram mantidos novamente os parâmetros utilizados nas varreduras 1, 2 e 3 descritos na tabela 5-4, porém com o cabeçote a uma distancia da face de vedação de 97mm e rotacionado

em 180º em relação às outras varreduras, mudando assim o sentido de incidência do feixe sônico na região da junta, de acordo com a figura 5-14.

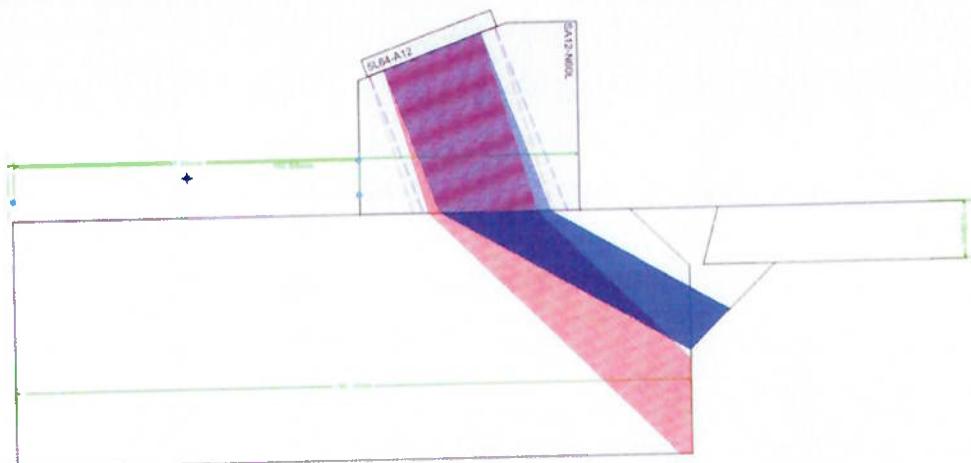


Figura 5-14 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 4 na superfície 2.

Dando continuidade ao ensaio, as mesmas considerações utilizadas anteriormente foram adotadas nas novas varreduras. Inicialmente foram mantidos os dados da varredura 1, redefinindo apenas o deslocamento do cabeçote em relação à face de vedação do flange para as varreduras 2 e 3. Com isso as varreduras 5 e 6 mantiveram os dados da varredura 4, porém com novo posicionamento do cabeçote. A varredura 5 é mostrada na figura 5-15.

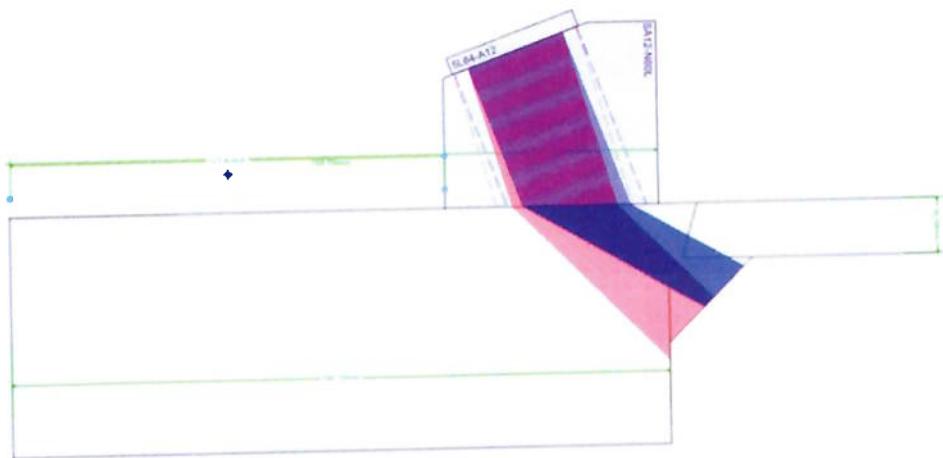


Figura 5-15 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 5 na superfície 2.

Mesmo alterando o sentido de incidência do feixe sônico para ensaio, novamente as varreduras simuladas devem atingir toda região da junta soldada, além de uma área do metal de base. Conforme mostrado na figura 5-16, a varredura 6 atende plenamente o objetivo de complementar as

varreduras 4 e 5 para cobrir toda a região soldada, além de atender uma região do metal de base próximo à junta soldada.

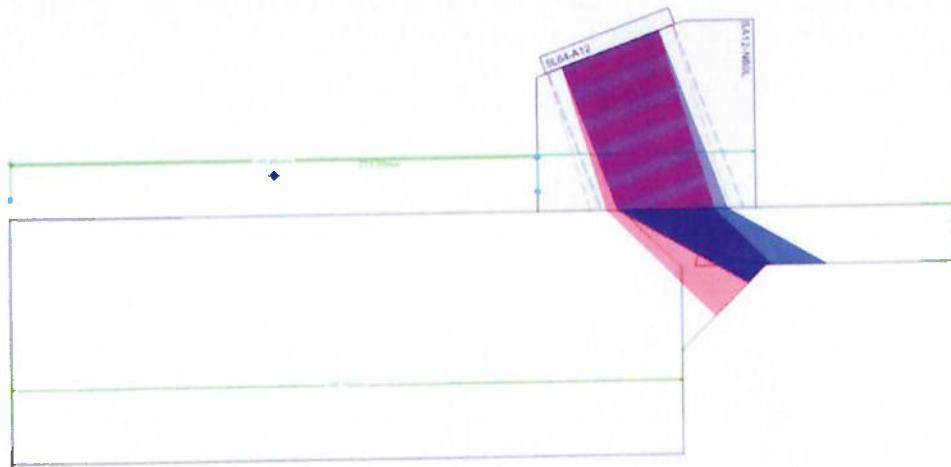


Figura 5-16 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 6 na superfície 2.

Dando continuidade ao ensaio, foi simulado o ensaio em outro sentido, minimizando a possibilidade de alguma descontinuidade não ser detectada, consequentemente melhorando assim a confiabilidade do ensaio.

Na varredura 7 o cabeçote foi posicionado a uma distância de 164 mm, sendo mantida a técnica de varredura linear, porém com uma nova abordagem de ensaio, porém adotando um ângulo de 0° , ou seja, mantendo uma incidência normal do feixe sônico conforme mostrado na figura 5-17.

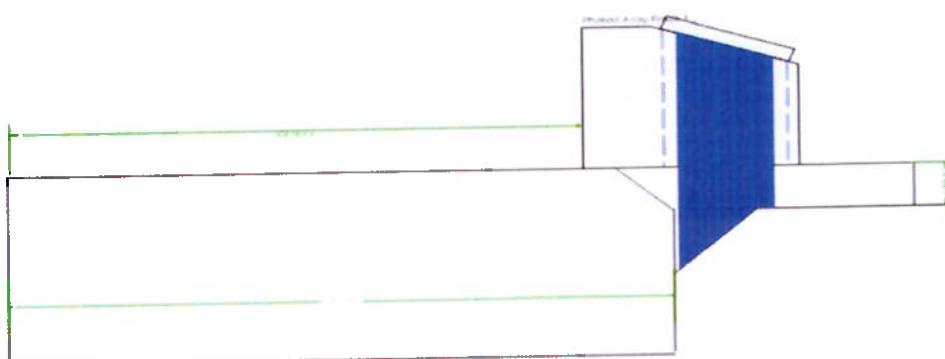


Figura 5-17 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 7 na superfície 2.

Novamente com os objetivos de complementar toda a região soldada, e sobrepor parte do feixe sônico gerado na varredura anterior, além de atender parte da região do metal de base, o cabeçote foi deslocado em relação à varredura 7 em 22 mm, ficando a uma distância de 142 mm em relação à face de vedação do flange, mantendo os mesmos parâmetros da tabela 5-5.

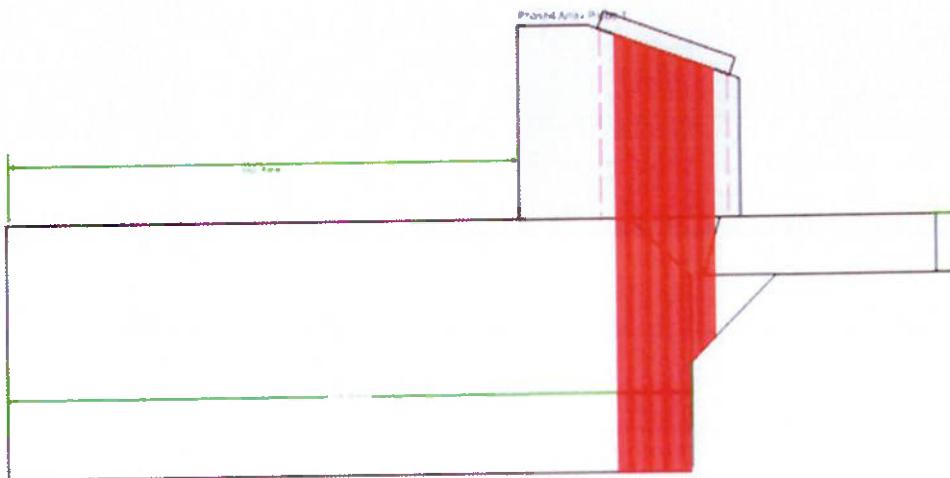


Figura 5-18 - Trajetória dos feixes sônicos da varredura 8 na superfície 2.

Para as varreduras mostradas nas figuras 5-17 e 5-18, foram adotados o cabeçote, sapata e os dados definidos na tabela 5-5, onde pode-se destacar a utilização da técnica de varredura linear com feixe ângulo norma.

Tabela 5-5 – Tabela com os dados principais utilizados na simulação das varreduras 7 e 8 na superfície 2.

Dados principais da simulação das varreduras 7 e 8 /superfície 2					
Cabeçote					
Fabricante	Modelo	Quantidade de elementos	Frequência	Dimensões dos elementos	Tipo
Olympus	5L64-A12	64	5 MHz	0,6 x 10	Phased Array
Sapata					
Fabricante	Modelo	Velocidade Sônica	Ângulo	Dimensões	Tipo
Olympus	SA12-N60L	2330 m/s	20º	62 x 53	Phased Array
Parâmetros					
TÉCNICA	Dist.	Gr.	Número de elementos	Elemento	Ângulo
TÉCNICA	Dist.	Gr.	Número de elementos	Início	Final
				1	64
Linear	*	1	16	1	64
				0º	1 Elemento

* Distância variável a cada varredura, ver figura específica da varredura.

5.1.2 – VALIDAÇÃO DO PROCEDIMENTO

No intuito de validar o procedimento de ensaio por ultrassom utilizando transdutores '*phased array*', foi confeccionado um bloco de referência, conforme mostrado na figura 5-19.

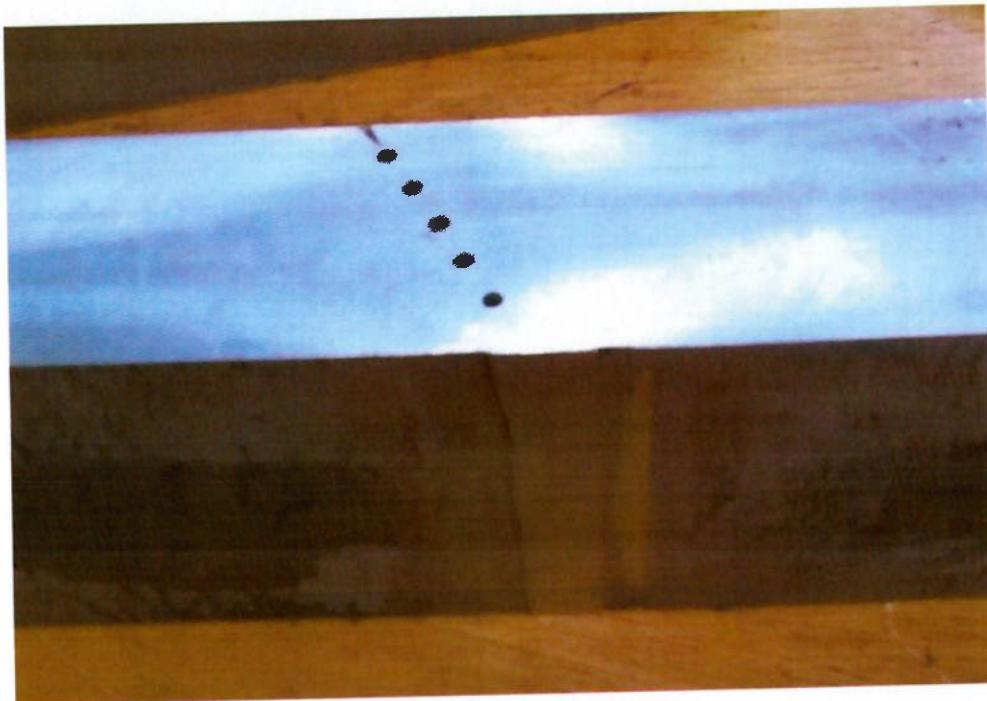


Figura 5-19 – Bloco de referência

A inspeção do bloco de referência serve para verificar se o feixe sônico gerado pelo conjunto aparelho/transdutor é capaz de penetrar na solda para detectar eventuais descontinuidades no interior da mesma. Este bloco foi elaborado de acordo com as dimensões estabelecidas na figura 4-5.

Na confecção do bloco de referência foi utilizada uma chapa de aço inoxidável austenítico 304L e a junta foi soldada respeitando-se os métodos definidos no plano de soldagem e no procedimento de soldagem qualificado para utilização nas juntas soldadas do equipamento, as quais serão posteriormente inspecionadas por ultrassom.

O ensaio foi executado com o cabeçote conduzido manualmente na face superior da junta soldada do bloco com a utilização de acoplante, na direção transversal aos furos do bloco de referência, de acordo com o mostrado na figura 5-20.

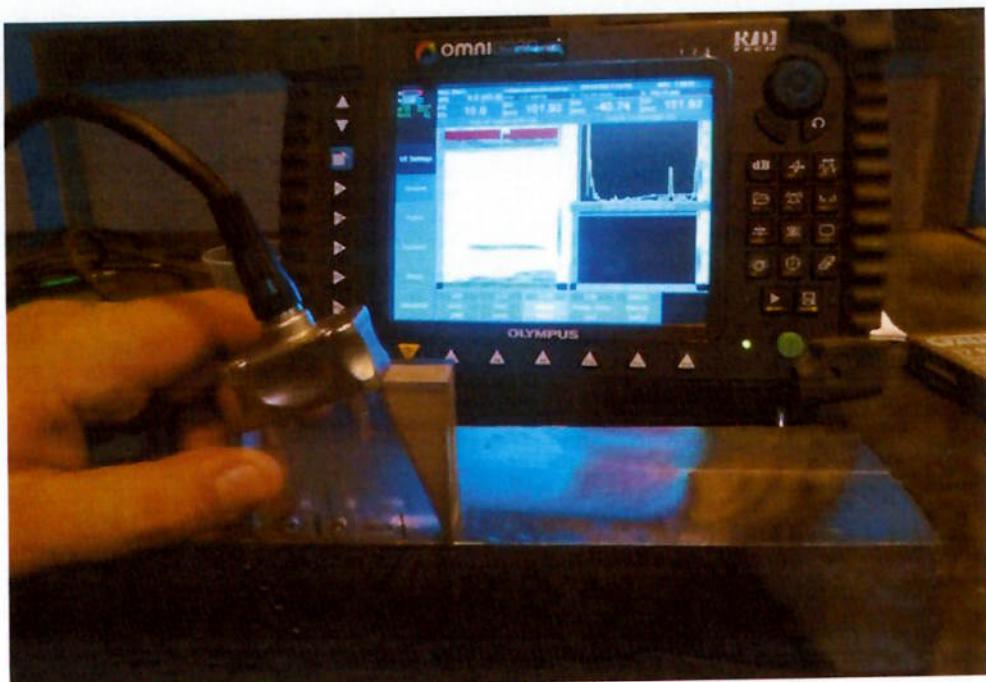


Figura 5-20 – Ensaio executado no bloco de referência

Como as descontinuidades, simuladas pelos furos, possuem as dimensões e posicionamento conhecidos de acordo com a figura 4-5, foi possível realizar uma comparação com as imagens obtidas no ensaio mostrado na imagem da figura 5-21.

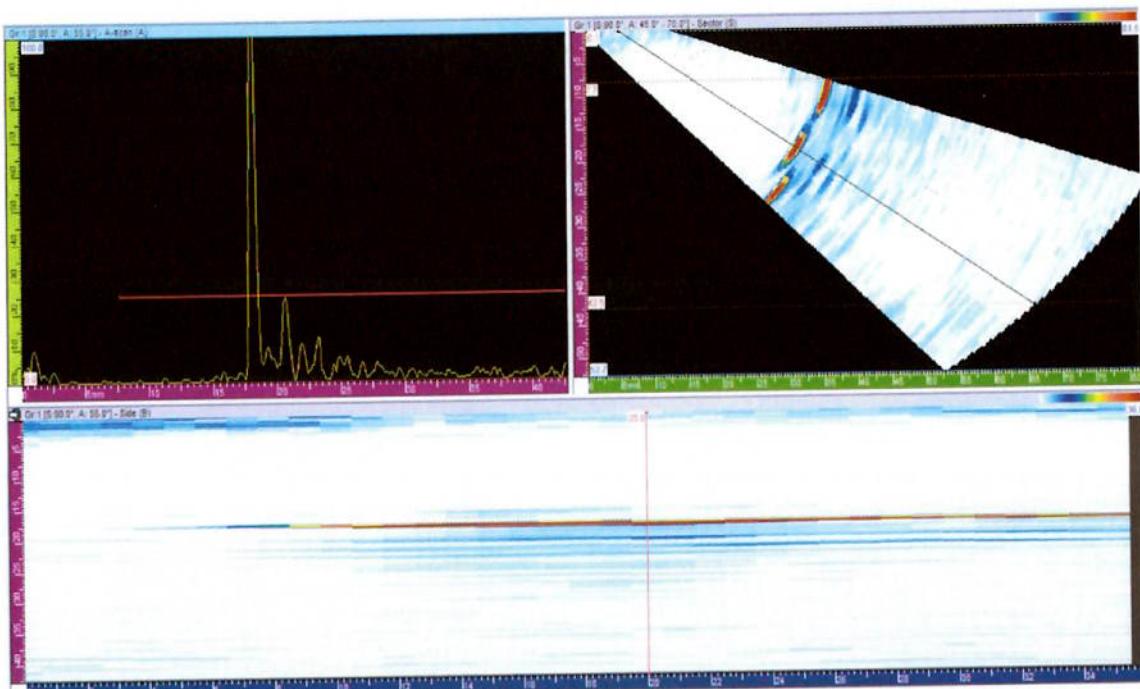


Figura 5-21 – Imagem do ensaio por ultrassom 'phased array' no bloco de referência

De acordo com a imagem 5-21, é possível verificar que os furos estão visíveis e com uma resolução adequada, assim como o dimensionamento e posicionamento se comparado às dimensões de confecção do bloco de referência, indicando que o método de ensaio definido está adequado à execução do ensaio nas juntas soldadas do equipamento.

Apesar de não ter sido escopo deste trabalho a inspeção de juntas soldadas por diferentes processos de soldagem, para possibilitar uma comparação, a literatura diz que o processo de soldagem tem grande influência na atenuação do feixe sônico no caso de materiais inoxidáveis austeníticos, devido às diferenças na solidificação da poça de fusão, fazendo com que este ensaio seja visto com desconfiança. Porém, o avanço da tecnologia aliado às necessidades das empresas fez com que novos desenvolvimentos tornassem o ensaio confiável para a inspeção de materiais austeníticos.

Desta forma, a preocupação em simular a situação mais próxima possível da real se fez necessária para garantir a validação dos métodos de ensaio utilizados e a credibilidade do ensaio para cada situação específica.

5.1.2.1 – CONCLUSÃO

Após todas as análises e simulações, foi definido como melhor opção a utilização das 8 varreduras descritas no item 5.1.1.3.2 aplicadas às duas superfícies principais do equipamento sendo que, das 8 varreduras necessárias, 7 delas foram simuladas pela superfície interna do equipamento (superfície 2), e apenas 1 pela superfície externa do equipamento (superfície 1), garantindo a cobertura total da junta soldada durante a inspeção.

A simulação do ensaio foi de suma importância na otimização de tempo e na qualidade final do ensaio, principalmente neste caso em que foi utilizado o ensaio por ultrassom com transdutores '*phased array*', onde a configuração das defasagens necessárias para formação das frentes de onda e outros parâmetros.

Além disso, as imagens obtidas do ensaio por ultrassom do bloco de referência se mostraram de forma nítida e com resolução adequada para análise e classificação das descontinuidades encontradas em relação aos

critérios de aceitação considerados, validando o procedimento de ensaio por ultrassom utilizando transdutores 'phased array' em juntas soldadas de aço inoxidável austenítico.

5.2 – INSPEÇÃO DO TROCADOR COM PROCEDIMENTO QUALIFICADO

A figura 5-22 mostra o costado do trocador de calor e indica a junta do Flange WF1 e as juntas dos bocais WA1, WA2, WB1 e WB2 que serão inspecionadas por ultrassom, sendo que a junta do flange WF1 é a junta analisada nesse estudo.

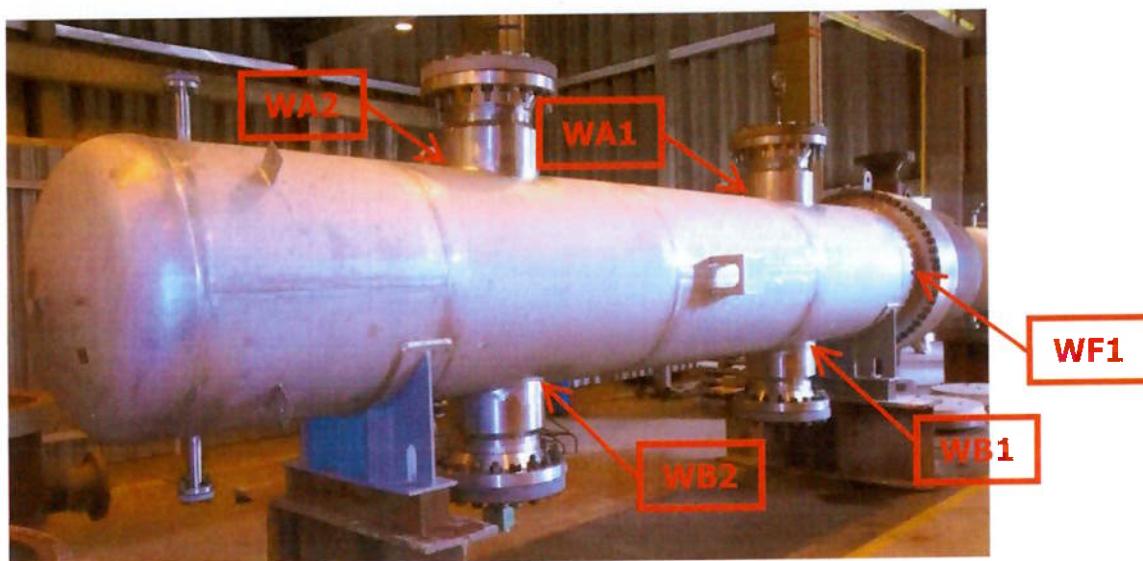


Figura 5-22 – Juntas a serem inspecionadas por ultrassom no trocador de calor.

Para descrever melhor as etapas do ensaio, melhorar o entendimento e facilitar a análise dos resultados obtidos no ensaio por ultrassom da junta soldada do equipamento, o mesmo foi subdividido em duas etapas principais, iniciando com a simulação do ensaio e dando sequencia com o ensaio propriamente dito, os quais serão abordados nos capítulos seguintes.

5.2.1 – CALIBRAÇÃO

Antes de iniciar o ensaio, foram executadas todas as calibrações dos equipamentos, normalizando a resposta de cada lei focal, compensando a sensibilidade de elemento para elemento, além de compensar as variações de atenuação, e quantidade de energia transmitida nos diferentes ângulos

refratados, de acordo com os requisitos definidos no procedimento de ensaio por ultrassom.

As curvas *time-corrected gain* (TCG) e *distance-amplitude correction* (DAC) foram utilizadas, pois levam em consideração os efeitos de atenuação do material e divergência do feixe, corrigindo a sensibilidade em função da variação do percurso sônico. Para isso, são traçadas curvas de referência baseada na resposta de refletores em blocos de referência, de mesma dimensão e diferentes distâncias em relação ao transdutor (diferentes percursos sônicos).

O aparelho OMNSCAN gera e ao mesmo tempo permite a visualização alternada entre as curvas DAC e TCG a qualquer momento, respectivamente mostradas pelas figuras 5-23 e 5-24.

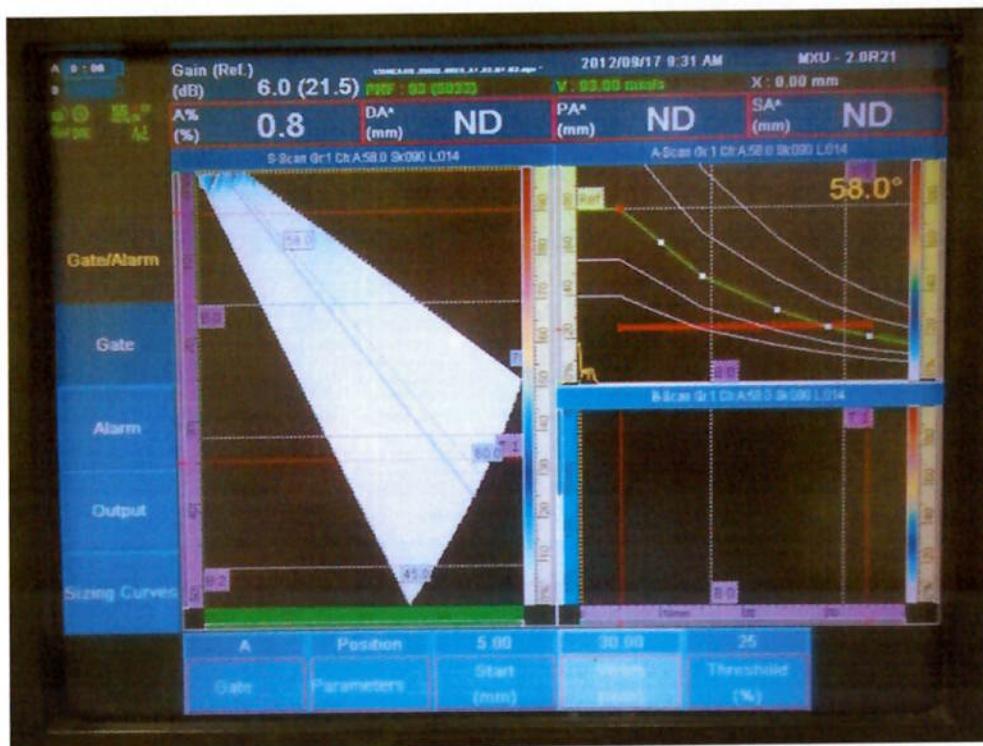


Figura 5-23 – Curva DAC aço inoxidável

Durante a calibração, é realizada uma varredura em um refletor em diferentes ângulos de feixe e os pontos da TCG são salvos a cada posição deste refletor. Esses pontos são configurados para a mesma profundidade para cada feixe.



Figura 5-24 – Curva TCG aço inoxidável

Na curva TCG, figura 5-24, todos os ecos são igualados em amplitude, na DAC, figura 5-23, cada eco é apresentado conforme o ganho obtido.

Com isso foi possível garantir uma imagem mais definida, e principalmente permitir a medição e dimensionamento a partir de qualquer lei focal, assim como a qualidade e confiabilidade do ensaio.

5.2.2 – ENSAIOS

5.2.2.1 – INTRODUÇÃO

Na execução do ensaio um dos pontos importantes é o posicionamento do cabeçote durante o ensaio, já que este posicionamento definirá posteriormente as posições das possíveis descontinuidades encontradas, possibilitando a execução do reparo no local exato. Durante as simulações das varreduras foram definidas no *software ESBeamtool* a face de vedação do flange como referência para posicionamento do cabeçote na peça, com isso foi necessária a utilização do *scanner HSMT Compact* da empresa *Olympus*, sendo

o mesmo posicionado faceando a face do flange, e o cabeçote ajustado de acordo com a distância definida para cada varredura.

Assim foi possível manter uma distância constante em toda a extensão da junta soldada. Esta disposição está mostrada na foto da figura 5-25. Exceto na superfície 1 onde, devido à restrição de espaço, não foi possível a utilização do dispositivo, foi utilizado apenas um anel para guiar o cabeçote durante o ensaio.

Em compensação, em todos os casos foram utilizados encoder para relacionar a posição do cabeçote, a geometria do cabeçote e a sequência de leis focais programadas permitindo as vistas de topo, lateral e frontal da peça ensaiada. Permitindo dimensionamento planar dos defeitos.



Figura 5-25 – Scanner para posicionamento do cabeçote.

Depois de montado o cabeçote com o auxilio do *scanner*, o equipamento foi posicionado sobre roletes e foi rotacionado lentamente com a ajuda da ponte rolante, ao mesmo tempo em que o inspetor foi movimentando manualmente o *scanner*, garantindo o ensaio em toda a circunferência da junta soldada e uma velocidade de ensaio sem prejuízos na resolução dos dados aquisitados.

Todos os ensaios por ultrassom na junta WF1 serão executados utilizando os arquivos de configuração gerados pelo *software ESBeamtool* após as simulações dos feixes sônicos, de acordo com cada varredura mostrada no capítulo 5.1.1.3.

Para facilitar a visualização e interpretação dos resultados dos ensaios obtidos em cada varredura, será mantida a mesma linha de raciocínio considerado na apresentação dos resultados das simulações, ou seja, todos os resultados dos ensaios também serão apresentados de forma padronizada, através de imagens resultantes do *software Tomoview*, onde sua utilização para a visualização dos dados permitiu uma análise combinada das imagens aquisitadas com as visualizações A-Scan, S-scan e B-scan. Sendo as visualizações interativas entre si, foi possível analisar todos os pontos de forma rápida e dimensionar as descontinuidades de forma precisa. Essas imagens serão representadas com as indicações das descontinuidades de acordo com a figura padrão 5-26, as varreduras que não houve a detecção de nenhuma descontinuidade será representada pela imagem aquisitada de um ponto qualquer.

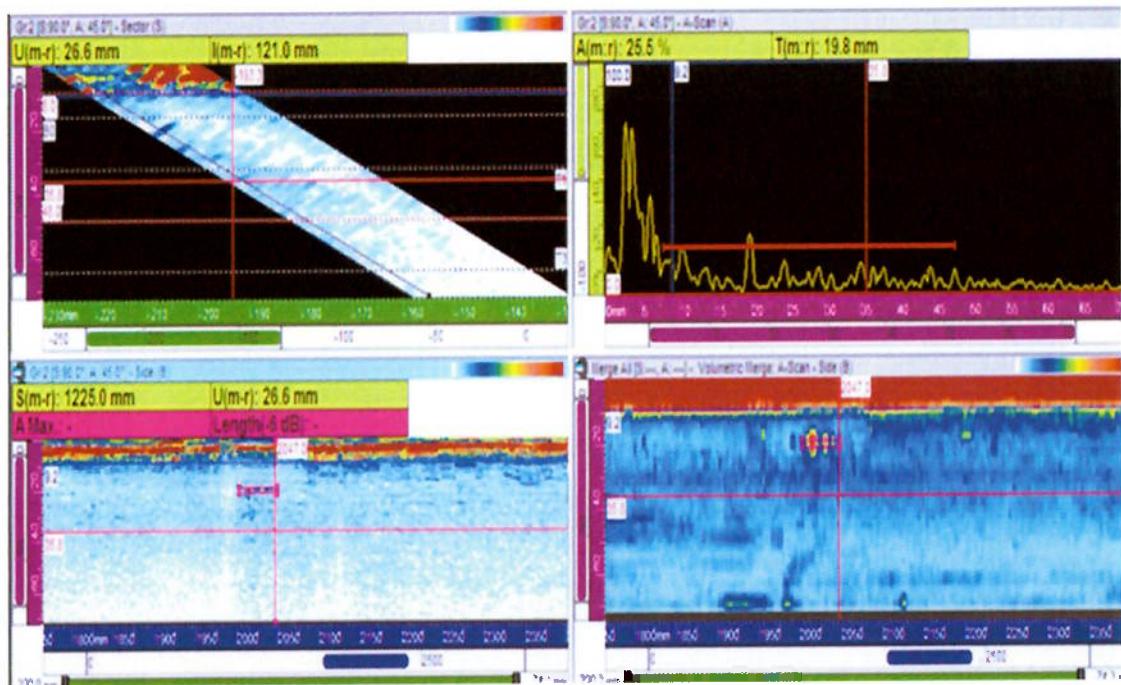


Figura 5-26 – Imagem padrão para representação dos resultados com descontinuidades.

Além da imagem também será apresentada uma tabela com a relação das descontinuidades encontradas a cada varredura, assim como os dados principais, conforme representado na tabela padrão 5-6.

Tabela 5-6 – Exemplo de tabela padrão com a relação das descontinuidades e alguns dados principais.

Dados principais e relação das descontinuidades							
Nº	Grupo PA	Ganho	Local	L	P	Tipo	Laudo
XX	XX	XXdb	XXmm	XXmm	XXmm	XXX	XXX

Onde:

Grupo PA –

Ganho –

Local – Localização da descontinuidade a partir do ponto de início do ensaio na circunferência do diâmetro;

L – Comprimento da descontinuidade;

P – Profundidade da descontinuidade;

Tipo – Classificação do tipo da descontinuidade;

Laudo – Consideração dentro do critério de aceitação;

5.2.2.2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os ensaios seguiram as mesmas sequencias definidas nas simulações, onde o primeiro ensaio foi executado com a varredura 1 na superfície 1 posicionada a uma distancia de 25mm da face oposta a face de vedação do flange, conforme mostrado na simulação da figura 5-10.

Após a aquisição dos dados do ensaio em todo o perímetro externo do equipamento, foram geradas as visualizações através do *software Tomoview*, sendo obtidas diversas combinações de imagens a cada incremento (lei focal) utilizado durante o ensaio. Uma dessas combinações de imagens foi mostrada na figura 5-27.

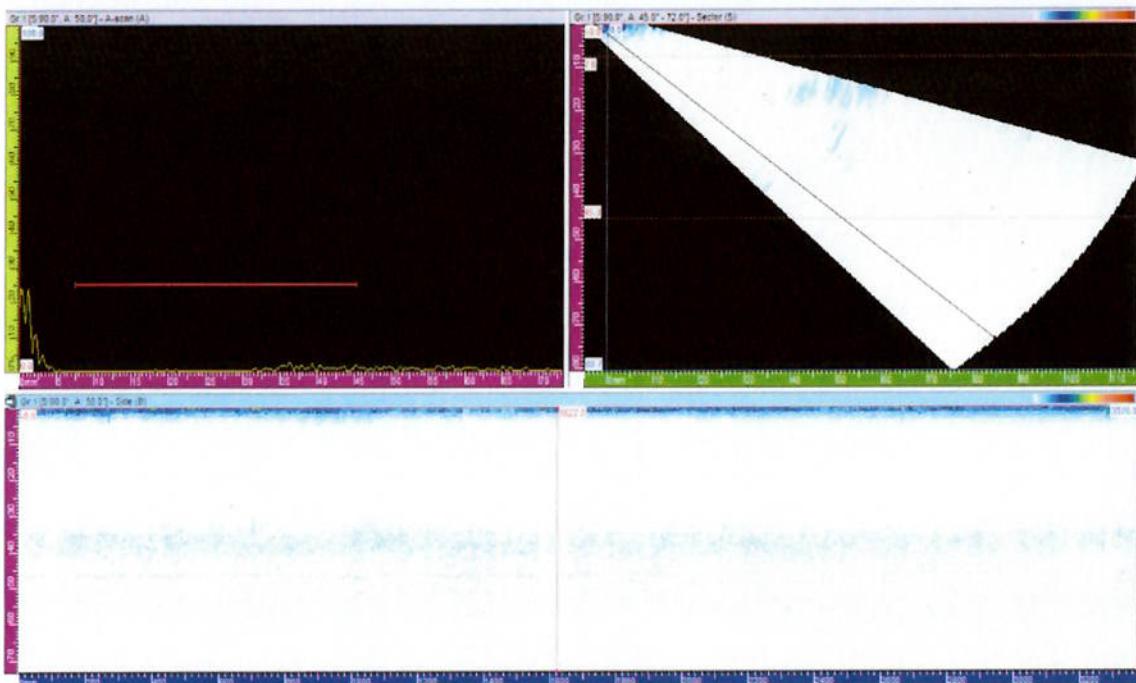


Figura 5-27 – Imagens aquisitadas da varredura 1 na superfície 1.

A imagem mostrada na figura 5-27 representa que nenhuma descontinuidade foi detectada pela inspeção realizada, sendo considerada aprovada, portanto não sendo necessária a execução de nenhum tipo de reparo.

Dando continuidade ao ensaio, foi iniciada a sequência de varreduras pelo lado interno com a ajuda do *scanner* para posicionamento do cabeçote, de acordo com a figura 5-25. A primeira varredura interna foi executada na superfície 2 através da varredura 1, posicionando o cabeçote uma distância de 161 mm da face de vedação do flange, conforme mostrado na simulação da figura 5-11.

Após a aquisição dos dados do ensaio, neste momento em todo o perímetro interno do equipamento, foram geradas as visualizações através do *software Tomoview*, sendo obtidas diversas combinações de imagens a cada incremento (lei focal) utilizado durante o ensaio. Uma dessas combinações com as visualizações A-scan, S-scan e B-scan foi mostrada na figura 5-28.

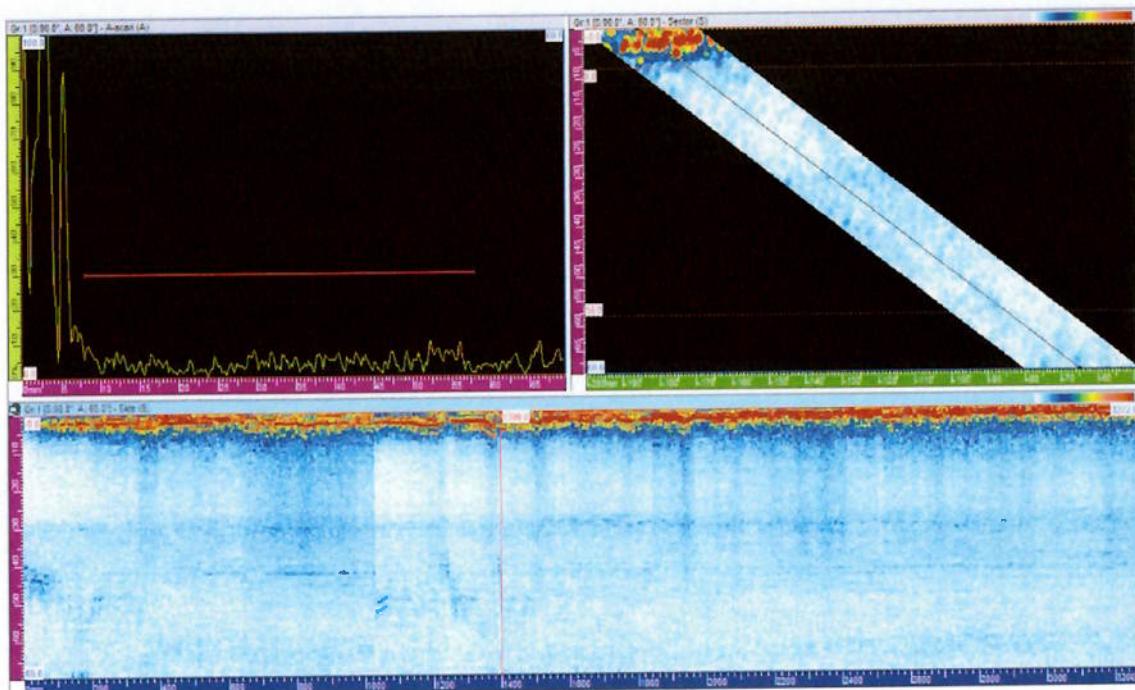


Figura 5-28 – Imagens aquisitadas da varredura 1 na superfície 2.

De acordo com as imagens analisadas, não foi detectado nenhum tipo de descontinuidade nesta varredura, fazendo com que esta varredura valide esta região da junta soldada. Porém, esta região ainda será ensaiada por feixes sônicos com outros ângulos de incidência, podendo ainda ser detectadas descontinuidades passíveis de reparos.

Em seguida o cabeçote foi deslocado e o ensaio da varredura 2 foi executado.

Como resultados deste ensaio, foram obtidas novas imagens, entre as mesmas foi destacada a imagem da descontinuidade nº 01 conforme mostrado na figura 5-29.

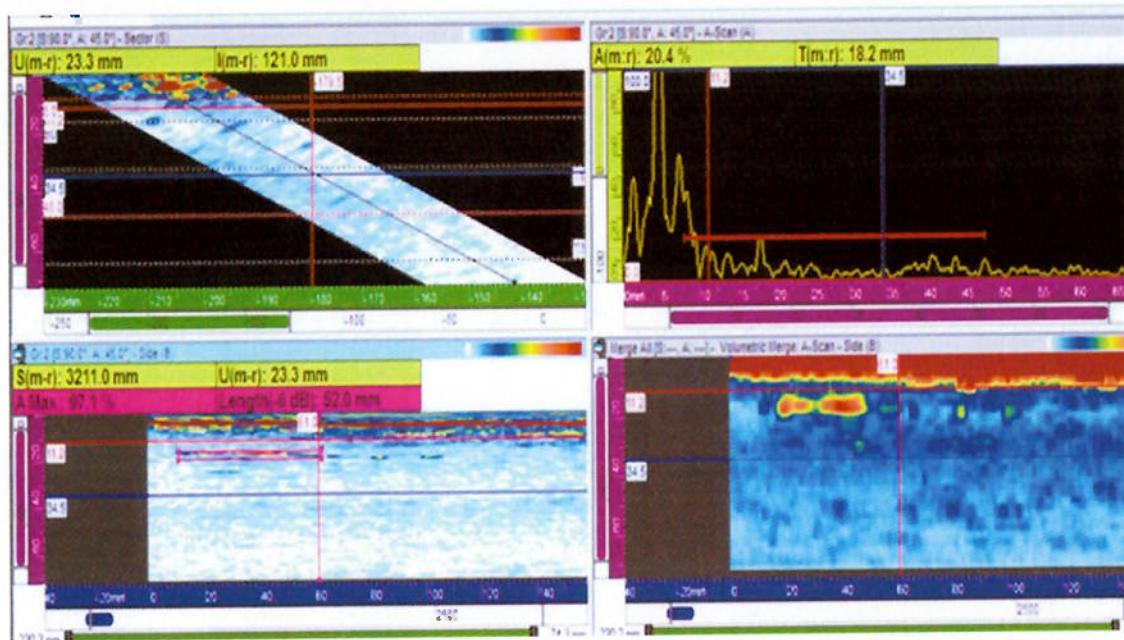


Figura 5-29 – Imagens aquisitadas da varredura 2 na superfície 2.

Nesta aquisição foram detectadas várias descontinuidades, sendo estas relacionadas na tabela 5-7.

Tabela 5-7 – Relação das descontinuidades detectadas no ensaio da superfície 2 com Varredura 2.

Dados principais e relação das descontinuidades							
Nº	Grupo PA	Ganho	Local	L	P	Tipo	Laudo
01	28	97 db	11mm	50mm	17mm	Inclusão de Escória	Aprovado
02	06	100 db	2007mm	40mm	19mm	Falta de fusão	Reprovado
03	30	100 db	3221mm	40mm	16mm	Falta de fusão	Reprovado
04	30	50 db	261mm	10mm	26mm	Inclusão de Escória	Aprovado
05	28	78 db	561mm	5mm	19mm	Inclusão de Escória	Aprovado

De acordo com o exposto na tabela 5-7, as descontinuidades 02 e 03 estão reprovadas e devem ser reparadas, enquanto que todas as outras são aceitáveis. As descontinuidades 02 e 03 estando em desacordo com o valor máximo definido nos critérios de aceitação definidos no capítulo 4.3.9.

Para finalizar o ensaio de toda região soldada, com o feixe sônico no mesmo sentido de abordagem das varreduras anteriores, foi executado o

ensaio da varredura 3. Deste ensaio novas imagens foram obtidas e sendo uma dessas imagens destacada na figura 5-30.

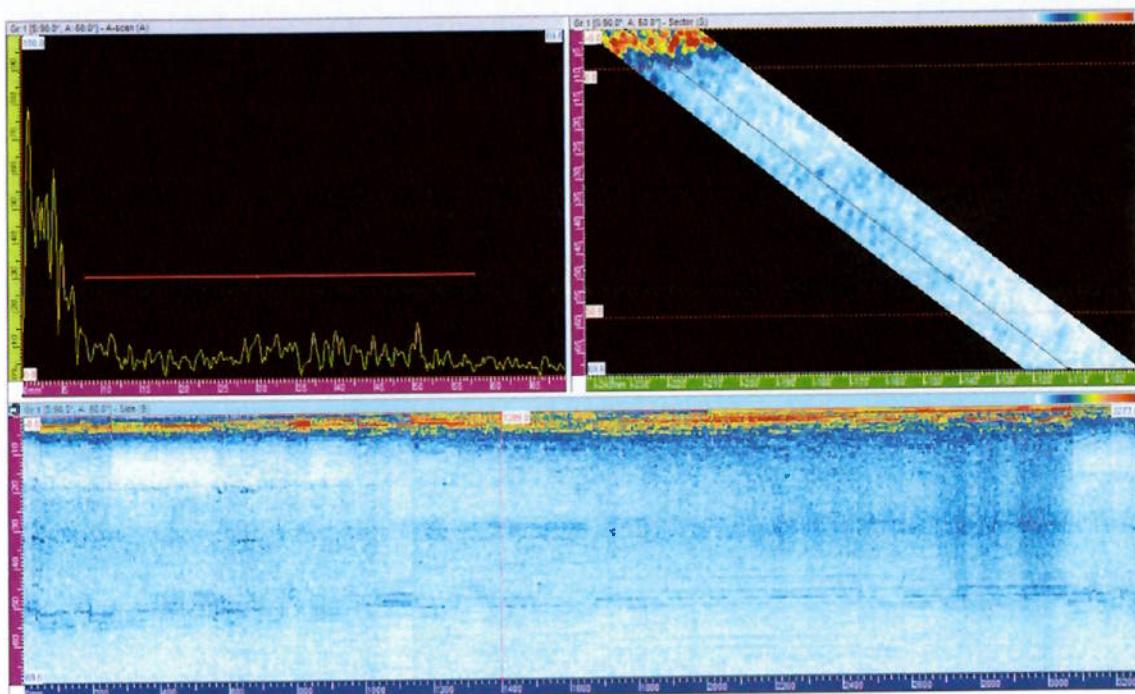


Figura 5-30 – Imagens aquisitadas da varredura 3 na superfície 2.

De acordo com as imagens analisadas e a figura 5-30, não foi detectado nenhum tipo de descontinuidade, portanto o ensaio da varredura 3 da superfície 2 está aprovado.

Após encerrar o primeiro sentido de abordagem em toda a região soldada, foi dado inicio ao ensaio no sentido de abordagem oposto. A varredura 4 foi utilizada, gerando a detecção de uma nova descontinuidade conforme mostrado na figura 5-31.

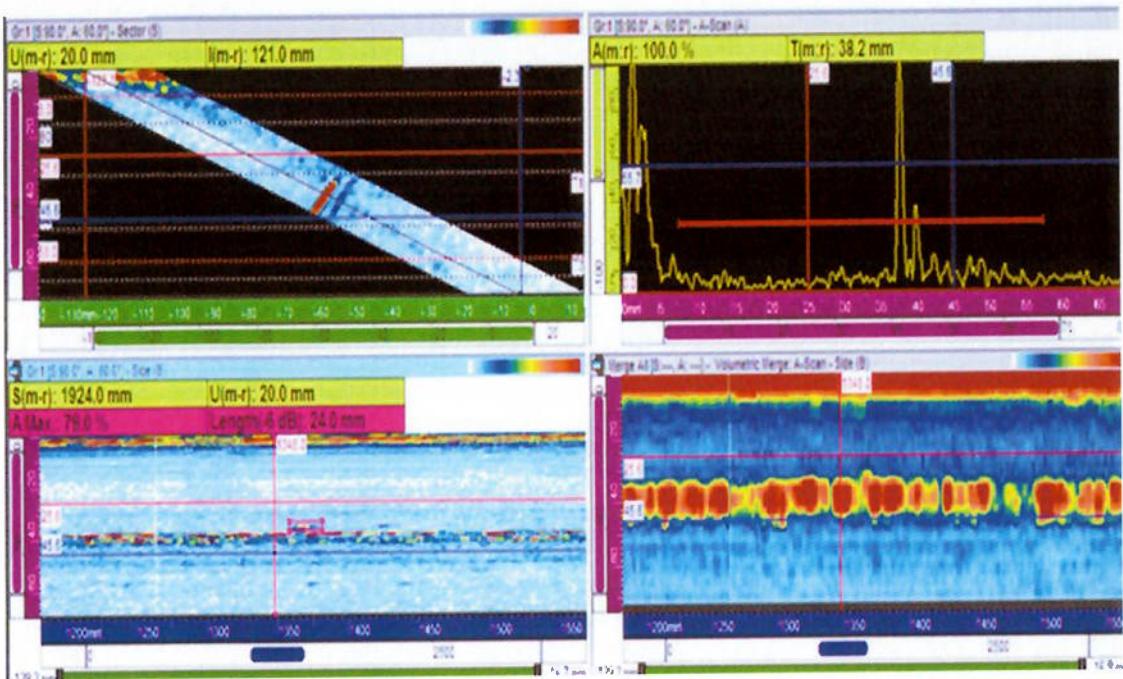


Figura 5-31 – Imagens aquisitadas da varredura 4 na superfície 2.

A única descontinuidade detectada foi relacionada na tabela 5-8, juntamente com seus dados, sendo na análise final aprovada dentro dos critérios de aceitação definidos no capítulo 4.3.9, portanto o ensaio da varredura 4 está aprovado.

Tabela 5-8 – Relação das descontinuidades detectadas no ensaio da superfície 2 com Varredura 4.

Dados principais e relação das descontinuidades							
Nº	Grupo PA	Ganho	Local	L	P	Tipo	Laudo
01	22	78db	1362mm	13mm	35mm	Inclusão de escória	Aprovado

Os ensaios das varreduras 5 e 6, representadas respectivamente pelas figuras 5-32 e 5-33, garantem a cobertura completa do ensaio na região soldada nesta nova abordagem iniciada pela varredura 4, complementando assim o ensaio.

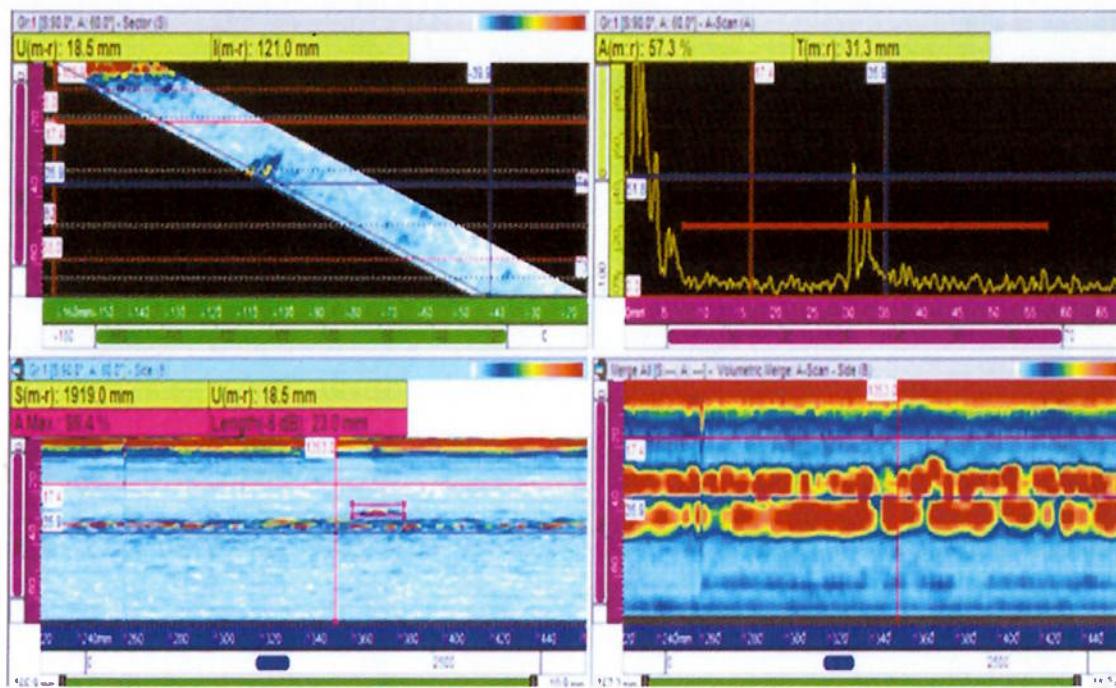


Figura 5-32 – Imagens aquisitadas da varredura 5 na superfície 2.

As descontinuidades detectadas na analise das imagens da varredura 5 e indicadas na figura 5-32, foram listadas na tabela 5-9.

Tabela 5-9 – Relação das descontinuidades detectadas no ensaio da superfície 2 com Varredura 5.

Dados principais e relação das descontinuidades							
Nº	Grupo PA	Ganho	Local	L	P	Tipo	Laudo
01	06	100 db	1364mm	15mm	28mm	Falta de fusão	Reprovado
02	08	43 db	570mm	9mm	25mm	Inclusão de Escória	Aprovado
03	08	65 db	1045mm	17mm	27mm	Inclusão de Escória	Aprovado

Conforme descrito na tabela, uma das descontinuidades se configurou como defeito, sendo necessária a execução do reparo de acordo com os procedimentos de soldagem qualificados para o equipamento.

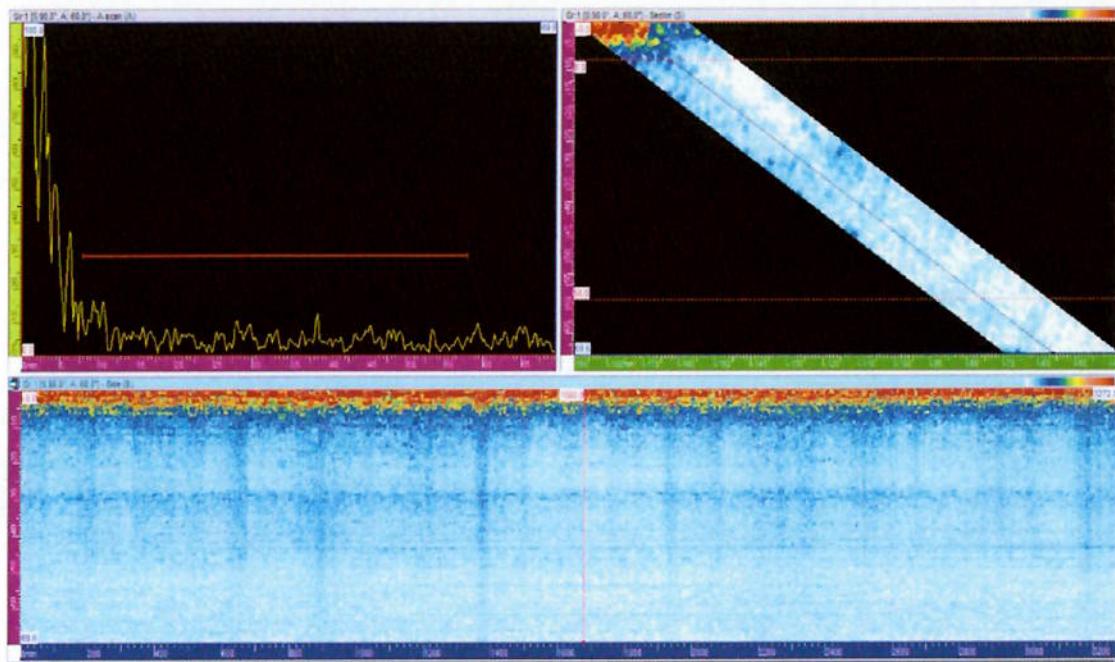


Figura 5-33 – Imagens aquisitadas da varredura 6 na superfície 2.

Ao contrário da varredura anterior, a varredura 6 não detectou nenhuma descontinuidade, de acordo com a imagem mostrada na figura 5-33, estando a mesma aprovada.

Para encerrar o ensaio, uma ultima abordagem do ensaio foi executada, obedecendo aos critérios definidos nas simulações das varreduras 7 e 8.

Uma das imagens resultantes do ensaio referente a varredura 7, foi destacada na figura 5-34.

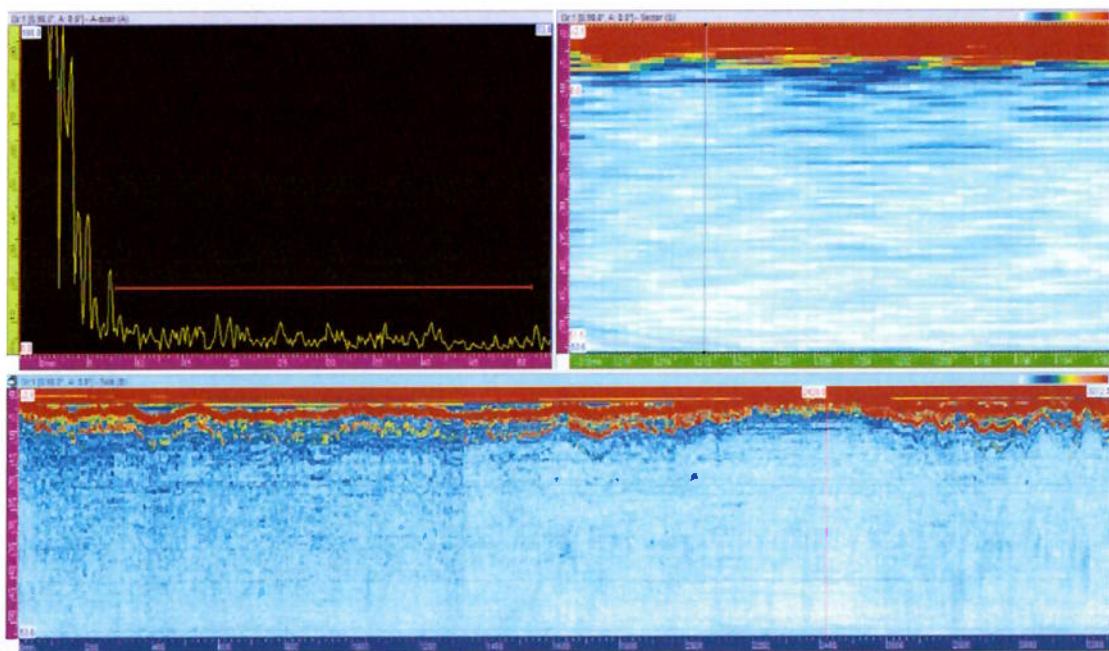


Figura 5-34 – Imagens aquisitadas da varredura 7 na superfície 2.

Assim como executado na varredura 7, na varredura 8 foram mantidos os mesmos parâmetros de ensaio, porém com o cabeçote deslocado para atingir toda a região da junta soldada. A figura 5-35 mostra uma das imagens obtidas no ensaio.

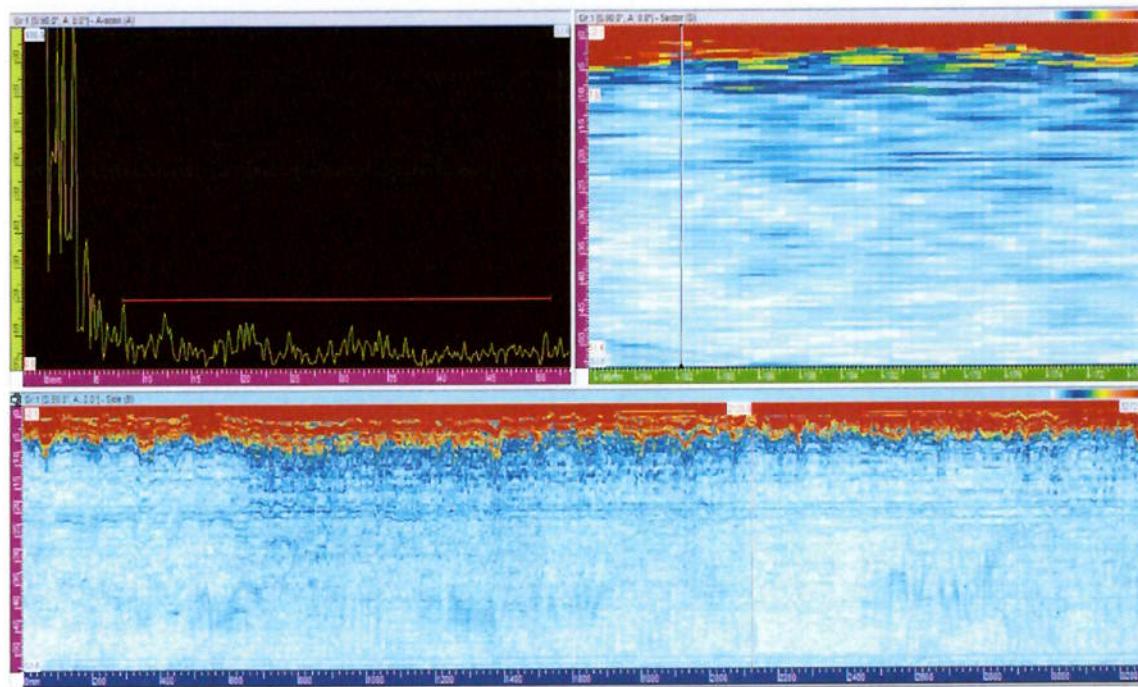


Figura 5-35 – Imagens aquisitadas da varredura 8 na superfície 2.

De acordo com as imagens 5-34 e 5-35, assim como a análise da imagem completa no *software Tomoview*, nas duas varreduras não houve indicações de descontinuidades, portanto os ensaios referentes às varreduras 7 e 8 da superfície 2 também estão aprovados.

Após a execução de todas as varreduras e com o devido registro de todas as coordenadas das descontinuidades reprovadas, foi executada a marcação na junta soldada. Todas as descontinuidades reprovadas foram abertas e identificadas com o acompanhamento do nível 1 de solda, ressaltando que todas as descontinuidades relatadas pelo ensaio foram encontradas e reparadas de acordo com procedimento de soldagem qualificado.

5.2.2.3 – CONCLUSÃO

Como era esperado após as simulações, a validação do bloco de referência e consequentemente a qualificação do procedimento de ultrassom, as imagens obtidas do ensaio por ultrassom da junta do equipamento também se mostraram nítidas e com resolução adequada para análise e classificação das descontinuidades encontradas em relação aos critérios de aceitação considerados;

Com todos os ensaios realizados e os respectivos resultados foi possível realizar uma avaliação da importância da execução do ensaio com sentidos de incidência do feixe sônico em diferentes direções, pois através da comparação dos resultados obtidos, percebe-se que algumas descontinuidades foram detectadas em uma varredura, porém não foram detectadas em outras varreduras executadas na mesma região.

O acompanhamento do inspetor de solda nível 1 na abertura e identificação das descontinuidades de acordo com os registros executados durante o ensaio, evidenciou que o ensaio foi realmente efetivo.

Após todas as etapas, é possível avaliar que para a qualidade e execução do ensaio, a simulação é de suma importância, já que define praticamente todos os parâmetros a serem utilizados, otimiza tempo devido a complexidade da junta e da utilização de transdutores 'phased array'. E após toda a aquisição outra etapa importante é na análise das imagens para laudar, a qual deve ser cuidadosamente analisada.

6 – CONCLUSÕES.

Com base nos métodos considerados, ensaios realizados e resultados obtidos, pode-se concluir que:

- 1- Mesmo com as dificuldades de atenuação no ensaio, devido às propriedades anisotrópicas do material, o procedimento foi validado para o ensaio por ultrassom com transdutores *phased array*, atendendo aos requisitos mínimos estabelecidos nas normas consideradas;
- 2- A combinação das imagens obtidas do ensaio por ultrassom com transdutores *phased array* da junta soldada do equipamento propiciou uma avaliação mais precisa no dimensionamento e classificação das descontinuidades encontradas em relação aos critérios de aceitação, se comparado ao ensaio por ultrassom convencional. Porém, o ensaio ainda depende diretamente da interpretação do inspetor;
- 3- A simulação do ensaio é imprescindível na otimização de tempo e na qualidade final da inspeção por ultrassom com transdutores *phased array*, principalmente em juntas soldadas de geometria complexa, onde a correta configuração dos parâmetros de inspeção é essencial para garantir a cobertura total da solda;

7 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

- Executar o mesmo desenvolvimento na validação de juntas soldadas de equipamentos cladeados com aço carbono de metal de base e revestimento em inox austenítico através do ensaio não destrutivo por ultrassom com transdutores '*phased array*';
- Avaliação do aumento dos custos no valor final do equipamento;
- Avaliar a influencia das alterações nos processos de soldagem nos resultados do ensaio não destrutivo por ultrassom com transdutores '*phased array*';

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

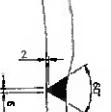
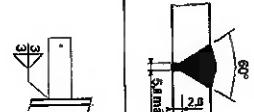
1. PETROBRAS. **N-1704 - Requisitos Adicionais Para Vasos de Pressão em Serviço com Hidrogênio.** Revisão C. ed. Petróleo Brasileiro S.A.: CONTEC, Setembro/2007.
2. PETROBRAS. **N-1706 - Projeto de Vaso de Pressão para Serviço com H₂S Úmido em Unidades de Refino de Petróleo.** REVISÃO D. ed. Petróleo Brasileiro S.A.: CONTEC, JUNHO/2011.
3. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **CASE 2235-09. Use of Ultrasonic Examination in Lieu of Radiography Section I, Section VIII, divisions 1 and 2; and Section XII.** 2005. ed. Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel code: ASME.
4. HELLIER, C. J. **Handbook of Nondestructive Evaluation.** 2003. ed. USA: McGraw Hill Companies.
5. ABENDI. Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. **ABENDI.** Disponível em: <<http://www.abendi.org.br>>. Acesso em: 24 Janeiro 2012.
6. ANDREUSSI, R. **Líquidos Penetrantes.** Abril/2011. ed. São Paulo: Andreussi Assessoria e Serviços Técnicos Ltda/Abendi.
7. SILVA, L. E. **Líquido Penetrante.** 4^a. ed. São Paulo: ABENDI, 2009.
8. BURKE, S. K.; DITCHBURN, R. J.; SCALA, C. M. NDT&E International. **NDT of Welds - State of the Art**, Australia, 1996. 111 - 117.
9. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Boiler & Pressure Vessel Code - Section VIII Division 1.** 2010. ed. New York/USA: ASME.
10. ANDREUSSI, R. **Radiologia Industrial.** Mar/2010. ed. São Paulo: Andreussi Assessoria e Serviços Técnicos Ltda/Abendi.
11. TELECURSO 2000. **Ensaios de Materiais - Aula 21 e 22 - Ultra-som.** [S.I.]: Globo.
12. SANTIN, J. L. **Ultra-som Técnica e Aplicação.** 2^a. ed. Curitiba-PR: Optagraf Gráfica e Editora, 2003.
13. ANDREUSSI, R. **Ensaio Por Ultrassom.** Julho/2011. ed. São Paulo: Andreussi Assessoria e Serviços Técnicos Ltda/Abendi.
14. AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.5M Bridge Welding Code.** 6th. ed. Miami: AWS, 2010.
15. PIRES, G. P. **Inspeção Ultra-Sônica Utilizando Transdutores Phased Array:** Simulação Computacional Para Detecção De Trincas. Rio de Janeiro: Dissertação Mestrado. COPPE/UFRJ, 2009.
16. NDT. **Site NDT Resource Center.** Disponível em: <<http://www.ndt-ed.org>>. Acesso em: 10 Janeiro 2012.
17. WIKIPÉDIA - A Encyclopédia Livre. **Wikipédia.** Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Difração>>. Acesso em: 13 Março 2012.
18. OLYMPUS NDT. **Phased Array Testing:** Basic Theory for Industrial

- Applications. 1^a. ed. Waltham-USA: Olympus NDT, 2010.
19. OLYMPUS. Olympus Corporation. **Olympus NDT**. Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/pt/ndt-tutorials/>>. Acesso em: 05 Fevereiro 2012.
20. TELLES, S. P. **Vasos de Pressão**. 1991. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda..
21. HUGGELL, R. J.; GRAY, B. S. The ultrasonic inspection of austenitic materials - State of the art report. **United Kingdom Atomic Energy Authority Northern Division Report**, May 1985. 1-29.
22. ASM INTERNATIONAL. **ASM Speciality Handbook "Stainless Steel"**. First. ed. [S.I.]: Materials Park, 1994.
23. EDELMANN, X. Ultrasonic examination of austenitic welds at reactor pressure vessels. **Nuclear Engineering and Design**, North-holland, 1991. 341-355.
24. ALBERTO, D. **Ultrassonografia Nicolas - Filho do Autor**. Indaiatuba: [s.n.], 2012.
25. OLYMPUS NDT. **Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications**. 2007. ed. Waltham-USA: Olympus NDT.
26. THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Boiler & Pressure Vessel Code - Section VIII Division 2**. 2010. ed. New York/USA: ASME.
27. OLYMPUS NDT. **Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications**. 2007. ed. Waltham-USA: Olympus NDT.

9 – ANEXO I – PLANO DE SOLDA

(A) Rad total (B) Rad Parc (C) TH (D) US após Sold (E) US após TT (F) LP no chanfro (G) LP na raiz (H) LP após Golv.
 (I) LP após Sold. (J) LP após TT (K) PM no chanfro (L) PM na raiz (M) PM após Golv. (N) PM após Sold. (O) PM Fluor apés TT
 (P) Visual no chanfro (Q) Visual apés Sold (R) Medição de Dureza (S) US apés TH (T) PM apés TH (U) Teste de Estanqueidade

WSP1 SUPORTES	WSP3 SUPORTES	WCA CLIP DE ATERIAZAMENTO	C2-C3-C4-C5	C1	T1-T2-E3-E4-E5	Nº DA JUNTA	
08-09-10-11-12	01-12-02-12	13	14-1-2-1-26	14	1-1-2-2-2626	POSIÇÃO DESENHO	
SA-516 GR 60 SA-240-304L	SA-240-304L SA-240-304L	SA-240-304L SA-240-304L	SA-240-304L SA-240-304L	SA-240-304L SA-240-304L	SA-240-304L SA-240-304L	MATERIAL ESPECIFICAÇÃO	MATERIAL BASE
11-8-1	8-1	11-8-1	8-1	8-1	8-1	Nº P. N° S	PERCENTUAL DE SULAMPA
237.03 238.03 396.01	236.03 236.03 195.01	237.03 236.03 195.01	198.10 195.01	198.10 195.01	198.10 195.01	IPS Nº	
TIG (≤ 25.4 mm) TR (4.8 a 50.8 mm) AT spray (≤ 50.8 mm)	TIG (≤ 25.4 mm) TR (≤ 50.8 mm) AT spray (≤ 203 mm)	TIG (≤ 25.4 mm) TR (4.8 a 50.8 mm) AT spray (≤ 203 mm)	TIG (≤ 12 mm) TR (≤ 64 mm) AT spray (≤ 203 mm)	TIG (≤ 12 mm) TR (≤ 64 mm) AT spray (≤ 203 mm)	TIG (≤ 32 mm) TR (≤ 64 mm) AT spray (≤ 203 mm)	PROC T FAIXA ESP. DEPOS.	MATERIAL PERCENTUAL DE SULAMPA
FR309L E309L E309LT-1	FR308L-17 E308L-17 E308 LT-1	FR309L E309L-17 E309LT-1	FR308L-17 E308L-17 E308 LT-1	FR308L-17 E308L-17 E308 LT-1	FR308L-17 E308L-17 E308 LT-1	CLASSE AWS	MATERIAL BASE
6-5	6-5	6-5	6-5	6-5	6-5	Nº E	PERCENTUAL DE SULAMPA
8	8	8	8	8	8	Nº A	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	FLUXO - MARCA COMERCIAL	
CONFORME LISTA DE CONS. MIVIS DI SODAGEM DA FIBS BOEHLER EAS 2 PW-FD KST TUB. 4829 GFP	CONFORME LISTA DE CONS. MIVIS DI SODAGEM DA FIBS BOEHLER EAS 2 PW-FD	CONFORME LISTA DE CONS. MIVIS DI SODAGEM DA FIBS BOEHLER EAS 2 PW-FD	UTP A68 LC UTP 68-LC BOEHLER EAS 2 PW-FD	UTP A68 LC UTP 68-LC BOEHLER EAS 2 PW-FD	UTP A68 LC UTP 68-LC BOEHLER EAS 2 PW-FD	MARCA COMERCIAL	PERCENTUAL DE SULAMPA
TIG-02.4 = 50.170 TIG-01.2 = 70.200 LR-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 60.100 ER-03.2 = 80.140 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 160.280	TIG-02.4 = 50.170 TIG-01.2 = 70.200 LR-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 60.100 ER-03.2 = 80.140 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 160.280	TIG-02.4 = 50.170 TIG-01.2 = 70.200 LR-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 60.100 ER-03.2 = 80.140 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 160.280	TIG-02.4 = 50.170 TIG-01.2 = 70.200 LR-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 60.100 ER-03.2 = 80.140 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 160.280	TIG-02.4 = 50.170 TIG-01.2 = 70.200 LR-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 60.100 ER-03.2 = 80.140 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 160.280	TIG-02.4 = 50.170 TIG-01.2 = 70.200 LR-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 60.100 ER-03.2 = 80.140 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 160.280	AMPERAGEM (A)	CHARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS
TIG-02.4 = 8-14 TIG-01.2 = 8-14 FR-02.5 = 20-27 FR-03.2 = 20-30 AT-01.2 = 25-30 AT-01.6 = 25-32	TIG-02.4 = 8-12 TIG-01.2 = 8-12 FR-02.5 = 20-27 FR-03.2 = 20-30 AT-01.2 = 25-30 AT-01.6 = 25-32	TIG-02.4 = 8-14 TIG-01.2 = 8-14 FR-02.5 = 20-27 FR-03.2 = 20-30 AT-01.2 = 25-30 AT-01.6 = 25-32	TIG-02.4 = 8-14 TIG-01.2 = 8-14 FR-02.5 = 20-27 FR-03.2 = 20-30 AT-01.2 = 25-30 AT-01.6 = 25-32	TIG-02.4 = 8-14 TIG-01.2 = 8-14 FR-02.5 = 20-27 FR-03.2 = 20-30 AT-01.2 = 25-30 AT-01.6 = 25-32	TIG-02.4 = 8-14 TIG-01.2 = 8-14 FR-02.5 = 20-27 FR-03.2 = 20-30 AT-01.2 = 25-30 AT-01.6 = 25-32	VOLTAGEM (V)	CHARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	VELOC. DE AVANÇO (mm/min)	
2.4-3.2	2.4-3.2	2.4-3.2	2.4-3.2	2.4-3.2	2.4-3.2	ELABORADO TENSÃO (V/mm)	GAS
TIG = ARGONIO 10/20 AT = C02 15/25	TIG = ARGONIO 10/20 AT = C02 15/25	TIG = ARGONIO 10/20 AT = C02 15/25	TIG = ARGONIO 10/25 AT = C02 15/25	TIG = ARGONIO 10/25 AT = C02 15/25	TIG = ARGONIO 10/25 AT = C02 15/25	PROT VAZÃO 1 min	
N/A	N/A	N/A	TIG = AR 5/20	TIG = AR 5/20	TIG = AR 5/20	APOIO Lumin	
DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	LIMPDA INICIAL	
OSCIL MAX X DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	OSCIL MAX X DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	OSCIL MAX X DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	OSCIL MAX X DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	OSCIL MAX X DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	OSCIL MAX X DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	DEPOS RELO OU OSCIL	
DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	TIMEPEZA ENTRE PASSES	
N/A	N/A	N/A	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	MÍTODO DE GOIVA/GFM	
1F-PLANA 2F-HORIZONTAL	1F-PLANA 2F-HORIZONTAL	1F-PLANA 2F-HORIZONTAL	1G-PLANA 2G-HORIZONTAL	1G-PLANA 2G-HORIZONTAL	1G-PLANA 2G-HORIZONTAL	POSIÇÃO DE SOLDAGEM	POSIÇÃO
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	PROGRESSAO DE SOLDAGEM	
TIG = 25°C ER = 25°C AT = 25°C	PRI-AQUI CIMA NTO MÍNIMO	TEMPERATURA DE SOLDAGEM					
150°C	150°C	150°C	150°C	150°C	150°C	INTERPASSE MÁXIMO	TEMPERATURA DE SOLDAGEM
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	POS AQUECIMENTO	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	TEMPERATURA	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	TEMPO	
100% -1Q	100% -1Q	100% Q	100% I-P-Q-F-C A. RAD TOTAL * II- Qdo Aplicável	100% I-P-Q-F-C A. RAD TOTAL * II- Qdo Aplicável	100% I-P-Q-F-C A. RAD TOTAL * II- Qdo Aplicável	INSPIÇÃO	
						ESCOLHA DA JUNTA	
14412 10 02 14412 11 02	DESLINHJO						



(A) Rad total (B) Rad Parc (C) TH (D) US aps Sold (E) US aps TT (F) LP no chanfro (G) LP na raiz (H) LP aps Goiv.
 (I) LP aps Sold. (J) LP aps TT (K) PM no chanfro (L) PM na raiz (M) PM aps Goiv. (N) PM aps Sold. (O) PM Fluor aps TT
 (P) Visual no chanfro (Q) Visual aps Sold (R) Medição de Dureza (S) US aps TH (T) PM aps TH (U) Teste de Estanqueidade

1 CD	WF USPUBIO	WBD1	WBD MARRA DESLIZAMENTO	WFI	WSP2 SUPORTES	N° DA JUNTA	
07.07	I A 16	T-1-6-7-12-13-14	03 - 04/05	02 03	10 12 - 11 12	POSIÇÃO DESENHO	
SA-516 GR 70 SA-516 GR 70	SA-213 - 304L SA-182 - 304L	SA-249 - 304L SA-182 - 304L	SA-249 - 304L SA-182 - 304L	SA-249 - 304L SA-182 - 304L	SA-516 GR 60 SA-516 GR 60	MATERIAL ESPECIFICAÇÃO	MATERIAL BASE
12	B 1	B 1	8.1	8.1	1.1	Nº P / N° S	
234/03 231/03 209/01	420-11	708/10 193/01	398/10 195/01	398/10 193/01	234/03 233/03 209/01	FPS Nº	PROBLEMA DE SOLDAGEM
TIG (≤ 25 mm) LR (48 a 203 mm) AT 99.9% (≤ 25.4 mm)	DIAMETRO TUBO ≥ 17.1 mm	TIG (≤ 12 mm) LR (≤ 64 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	TIG (≤ 12 mm) LR (≤ 64 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	TIG (≤ 12 mm) LR (≤ 64 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	TIG (≤ 25.4 mm) LR (48 a 203 mm) AT SPRAY (≤ 25.4 mm)	PROJ. DE SOLD. TAIXA ESP. DE POS.	
LR708-3 17018-1 3711-1	FR308L	LR308-4, 1708-1-17 E308-L11-4	LR308-L L308-4-17 E308-L11-4	LR308-4, 1708-1-17 E308-L11-4	LR708-3 17018-1-1 E711-1	CLASFI AWS	MATERIAL ADEQUADO
6-4	6	6-5	6-5	6-5	6-4	Nº F	
1	8	8	8	8	1	Nº A	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	FLUXO + MARCA COMERCIAL	
CONFORME LISTA DE CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM DA EWS	WELD-INOX	UTP A69 LC UTP 68 LC BOFHIER FAS 2 PW-FD	UTP A68 LC UTP 68 LC BOFHIER FAS 2 PW-FD	UTP A68 LC UTP 68 LC BOFHIER FAS 2 PW-FD	CONFORME LISTA DE CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM DA EWS	MARCA COMERCIAL	
TIG-02-4*50/180 TIG-03,2*70/220 ER-03,2*80/120 LR-03,2*100/160 LR-03,2*120/220 AT-03,2*150/330	RIZZ SEM METAL DE ADIÇÃO 90/99	TIG-02,4 = 50/170 TIG-03,2 = 70/200 ER-03,2 = 60/100 FR-03,2 = 80/140 AT-03,2 = 100/200 AT-03,2 = 120/250 AT-03,2 = 150/330	TIG-02,4 = 50/170 TIG-03,2 = 70/200 ER-03,2 = 60/100 FR-03,2 = 80/140 AT-03,2 = 100/200 AT-03,2 = 120/250	TIG-02,4 = 50/170 TIG-03,2 = 70/200 FR-03,2 = 60/100 FR-03,2 = 80/140 AT-03,2 = 100/200 AT-03,2 = 120/250	TIG-02,4 = 50/190 TIG-03,2 = 50/220 ER-03,2 = 60/80 FR-03,2 = 80/140 AT-03,2 = 100/200 AT-03,2 = 120/250	AMPERAGEM (A)	
TIG-02-4*8-14 TIG-03,2*8-14 LR-03,2*8-14 FR-03,2*24-30 FR-03,2*26-32 AT-03,2*26-34	RIZZ SEM METAL DE ADIÇÃO 12	TIG-02,4 = 8-14 TIG-03,2 = 8-14 FR-02,5 = 20-27 FR-03,2 = 20-30 AT-03,2 = 25-30 AT-03,2 = 25-32	TIG-02,4 = 8-14 TIG-03,2 = 8-14 FR-02,5 = 20-27 FR-03,2 = 20-30 AT-03,2 = 25-30 AT-03,2 = 25-32	TIG-02,4 = 8-14 TIG-03,2 = 8-14 FR-02,5 = 20-27 FR-03,2 = 20-30 AT-03,2 = 25-30 AT-03,2 = 25-32	TIG-02,4 = 8-14 TIG-03,2 = 8-14 FR-02,5 = 20-27 FR-03,2 = 20-30 AT-03,2 = 25-30 AT-03,2 = 25-32	VOLTAGEM (V)	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	VELOC. DE AVANÇO (mm/min)	
2.4.1.2	1,6	2.4 - 3,2	2.4 - 3,2	2.4 - 3,2	2.4 - 3,2	INTENSIDADE DE CORRENTE (A/mm²)	
TIG-ARGÔNIO 10.20 AT-C02 15/25	AR 10.20 = 70/30 = 11 AR = 99.9% = 12	TIG = ARGÔNIO 10/25 AT = C02 15/25	TIG = ARGÔNIO 10/25 AT = C02 15/25	TIG = ARGÔNIO 10/25 AT = C02 15/25	TIG = ARGÔNIO 10/20 AT = C02 15/25	PROJ. VAZÃO L/min	
N/A	N/A	N/A	N/A	TIG = AR 5/20	N/A	APOIO L/min	
DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	LIMPEZA A INICIAL	
RETO	RETO	OSCIL. MAX X Q.D. ALMA DO ELETRODOS RE TO	OSCIL. MAX X Q.D. ALMA DO ELETRODOS RE TO	OSCIL. MAX X Q.D. ALMA DO ELETRODOS RE TO	RETO	DEPOS RETO OU OSCIL.	
DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	LIMPEZA ENTRE PASSES	
N/A	N/A	N/A	N/A	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	N/A	MÉTODO DE GOIVAGEM	
IG-PLANA 2G-HORIZONTAL	SG-5F	IG-IG-PLANA 2F-2G-HORIZONTAL	IG-PLANA 2F-HORIZONTAL	IG-IG-PLANA 2F-2G-HORIZONTAL	IG-PLANA 2F-HORIZONTAL	POSIÇÃO DE SOLDAGEM	
N/A	ASCENDENTE	N/A	N/A	N/A	N/A	PROGRESSÃO DE SOLDAGEM	
TIG=50°C ER=60°C AT=50°C	TIG=20°C	TIG=25°C ER=25°C AT=25°C	TIG=25°C ER=25°C AT=25°C	TIG=25°C ER=25°C AT=25°C	ER=100°C ER=100°C AT=100°C	PRÉ-AQUECIMENTO MÍNIMO	CONTROLE DE TEMPERATURA
250°C	150°C	150°C	150°C	150°C	240°C	INTERPASS MÁXIMO	TEMPERATURA DE PINTURA
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	PONTA AQUECIMENTO	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	TEMPERATURA	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	TEMPO	
100% I-P-Q-C	100% I-P-Q TESTE ÓPTICO VAZAMENTO C/GAS INSERT	100% Q + I-Q-DÓSIS APLICÁVEL	100% I-Q	100% I-P-Q-F-C-S + H-Q-DÓSIS APLICÁVEL	100% Q	INSPEÇÃO	
						CROSS-SECTION	
14412 10 05	14412 10 03 14412 11 03	14412 10 03 14412 11 03	14412 10 02 14412 11 02	14412 10 02 14412 11 02	14412 10 02 14412 11 02	DISSENTO	

(A) Rad total (B) Rad Parc (C) TH (D) US após Sold (E) US após TT (F) LP no chanfro (G) LP na raiz (H) LP após Goiv. (I) LP após Sold. (J) LP após TT (K) PM no chanfro (L) PM na raiz (M) PM após Goiv. (N) PM após Sold. (O) PM Fluor apôs TT (P) Visual no chanfro (Q) Visual apôs Sold (R) Medição de Dureza (S) US apôs TH (T) PM apôs TH (U) Teste de Estanquedade

CA3 - CD3	WA1 - WA2 WB1 - WB2	CA1 - CA2 CB1 - CB2	WA1	WCD CHAPA DIVISORA	WCD CHAPA DIVISORA	Nº DA JUNTA	
1.14	02	01.02	22	0709	0707	POSIÇÃO DESENHO	
SA-105 SA-105	SA-240-304L SA-182-304L	SA-182-304L SA-182-304L	SA-516 GR 70 AISI 304 / SA-182 - 304L	SA-516 GR 70 SA-516 GR 70	MATERIAL ESPECIFICAÇÃO		MATERIAL BASE
1.2	8.1	8.1	1.1 - 8.1	1.2 - 8.1	1.2	Nº P. N. S	
156.09 198.09 208.09	398.10 195.01	398.10 195.01	233.03 238.03 196.01	217.01 228.03 196.01	234.03 233.03 209.01	LPS N°	PROJETO DE SOLUÇÃO
TIG (≤ 28 mm) FR (≤ 201 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	TIG (≤ 12 mm) FR (≤ 64 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	TIG (≤ 12 mm) FR (≤ 64 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	TIG (≤ 25,4 mm) FR (4,8 a 50,8 mm) AT SPRAY (≤ 50,8 mm)	TIG (≤ 25,4 mm) FR (4,8 a 50,8 mm) AT SPRAY (≤ 50,8 mm)	TIG (≤ 25,4 mm) FR (4,8 a 204 mm) AT SPRAY (≤ 25,4 mm)	PROC. DI. SOLD. FADXA TSP. DEPOS.	
ER70S-3 E7018-1 E71T-1	ER308-L E308-L-17 E308 LT1-4	ER308-L E308-L-17 E308 LT1-4	ER309L E309L E309LT-1	ER309L E309L E309LT-1	ER70S-3 E7018-1 E71T-1	CLASSE AWS	
6-4	6-5	6-5	6-5	6-5	6-4	Nº T	
1	8	8	8	8	1	Nº A	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	FLUXO + MARCA COMERCIAL	
ER70S-3 OK-4004-OK55.00 LSABTUROD 71 ULTRA	UTP A68 LC UTP 68 LC BOHLER EAS 2 PW-FD	UTP A68 LC UTP 68 LC BOHLER EAS 2 PW-FD	CONFORME LISTA DE CONSUMÍVEIS DE SODAGEM DA FIBTS KST TUB 4829 GEP	CONFORME LISTA DE CONSUMÍVEIS DE SODAGEM DA FRTS. KST TUB 4829 GEP	CONFORME LISTA DE CONSUMÍVEIS DA SOLDAGEM DA ITM15	MARCA COMERCIAL	
TIG-02.4=50/100 TIG-02.4=50/220 FR-02.4=60/200 ER-03.2=100/140 FR-03.2=100/180 AT-01.2=150/250	TIG-02.4=30/100 TIG-02.4=30/200 FR-02.5=60/100 FR-03.2=80/140 FR-03.2=100/200 AT-01.2=100/200 AT-01.6=160/260	TIG-02.4=40/170 TIG-02.4=50/200 FR-02.5=60/100 FR-03.2=80/140 FR-03.2=100/200 AT-01.2=100/200 AT-01.6=160/280	TIG-02.4=40/170 TIG-02.4=50/200 FR-02.5=60/100 FR-03.2=80/140 FR-03.2=100/200 AT-01.2=100/200 AT-01.6=160/280	TIG-02.4=40/170 TIG-02.4=50/200 FR-02.5=60/100 FR-03.2=80/140 FR-03.2=100/200 AT-01.2=100/200 AT-01.6=160/280	TIG-02.4=50/100 TIG-02.4=50/220 ER-02.5=60/100 ER-03.2=80/140 FR-04.0=120/220 AT-01.2=150/330	AMPERAGEM (A)	
TIG-02.4=8.14 TIG-02.4=8.14 FR-02.5=20.24 ER-02.5=20.24 FR-03.2=20.24 FR-03.2=20.25 AT-01.2=25.32	TIG-02.4=8.14 TIG-02.4=8.14 FR-02.5=20.24 ER-02.5=20.24 FR-03.2=20.24 AT-01.2=25.30 AT-01.6=25.32	TIG-02.4=8.14 TIG-02.4=8.14 FR-02.5=20.24 ER-02.5=20.24 FR-03.2=20.24 AT-01.2=25.30 AT-01.6=25.32	TIG-02.4=8.14 TIG-02.4=8.14 FR-02.5=20.24 ER-02.5=20.24 FR-03.2=20.24 AT-01.2=25.30 AT-01.6=25.32	TIG-02.4=8.14 TIG-02.4=8.14 FR-02.5=20.24 ER-02.5=20.24 FR-03.2=20.24 AT-01.2=25.30 AT-01.6=25.32	TIG-02.4=8.14 TIG-02.4=8.14 FR-02.5=20.24 ER-02.5=20.24 FR-03.2=20.24 AT-01.2=25.30 AT-01.6=25.32	VOLTAGEM (V)	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	ALTO DE AVANÇAMENTO	
2.4-12	2.4 - 3.2	2.4 - 3.2	2.4-3.2	2.4-3.2	2.4-3.2	TEMPO DE TURBILHÃO (mm)	
TIG + ARGÔNIO 10.20 AT-C02 15.25	TIG + ARGÔNIO 10/25 AT = C02 15.25	TIG + ARGÔNIO 10/25 AT = C02 15.25	TIG + ARGÔNIO 10/20 AT = C02 15.25	TIG + ARGÔNIO 10/20 AT = C02 15.25	TIG + ARGÔNIO 10/20 AT-C02 15.25	PROT. VAZÃO L/min	
N/A	TIG + AR 5/20	TIG + AR 5/20	N/A	N/A	N/A	APOIO LAMP	
DISCO ABRASIVO ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE VCO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE VCO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	TIPIZA INICIAL	
RETO	OSCIL MAX 35.0 DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	OSCIL MAX 35.0 DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	OSCIL MAX 35.0 DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	OSCIL MAX 35.0 DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	RETO	DEPOS. RETO OU OSCIL.	
DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	LIMPEZA ENTRE PASSES	
N/A	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	N/A	N/A	N/A	N/A	MÉTODO DE GOIVAGEM	
1G-PI ANA 2G-HORIZONTAL	1G-PI ANA 2G-HORIZONTAL	1G-PI ANA 2G-HORIZONTAL	1F-PLANA 2F-HORIZONTAL	1G-1F - PLANA 2G-2F - HORIZONTAL	1G-1F - PLANA 2G-2F - HORIZONTAL	POSIÇÃO DE SOLDAGEM	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	PROGRESSO DE SOLDAGEM	
TIG=100°C ER=100°C AT=100°C	TIG=25°C ER=25°C AT=25°C	TIG=25°C ER=25°C AT=25°C	TIG=25°C ER=25°C AT=25°C	TIG=25°C ER=25°C AT=25°C	TIG=50°C ER=50°C AT=50°C	PRÉ-AQUECIMENTO MÍNIMO	
250°C	150°C	150°C	150°C	150°C	250°C	INTERPASSO MÁXIMO	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	POS. AQUECIMENTO	
50°C	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	TEMPERATURA	
2H-15 MINUTOS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	TI MPO	
100% IP-Q-R-C A - RAD TOTAL	* 100% IP-Q-R-C A - Qdo Apliável	100% IP-Q-R-C A - RAD TOTAL	100% IP-Q	100% IP-Q	100% IP-Q	INSPEÇÃO	
						CROQUIMETRICO	
14412 10.06	14412 10.06 14412 11.06	14412 10.06 14412 11.06	14412 10.05	14412 10.05	14412 10.05	DESENHO	
						CROQUIMETRICO	

- (A) Rad total (B) Rad Parc (C) TH (D) US aps Sold (E) US aps TT (F) LP no chanfro (G) LP na ralz (H) LP aps Goiv.
 (I) LP aps Sold. (J) LP aps TT (K) PM no chanfro (L) PM na ralz (M) PM aps Goiv. (N) PM aps Sold. (O) PM Fluor aps TT
 (P) Visual no chanfro (Q) Visual aps Sold (R) Medição de Dureza (S) US aps TH (T) PM aps TH (U) Teste de Estanqueidade

WSPI	WSI SOPORTE DO ISOLAMENTO	WD + WR	WA3D3 - WB3V3	WA1V1 - WA2V1 WB1D1 - WB2D1	WA3 - WB3	Nº DA JUNTA	
02	17 + 18	24	14.19	2/8	14		POSIÇÃO DESENHO
SA-240-304I SA-240-304I	SA-240-304I SA-240-304I	SA-240-304I SA-182-F104I	SA-105 SA-105	SA-182-F104I SA-182-F104I	SA-516 GR 70 SA-105		MATERIAL ESPECIFICAÇÃO
E 1	E 1	8.1	1.2	8.1	1.2		Nº P. N. S
198.10 195.01	198.10 195.01	198.10 195.01	156A/09 158A/09 208A/09	398.10 195.01	156A/09 158A/09 208A/09	LPS N°	PREÇO FABRICAÇÃO DE SOLUÇÃO
LR (≤ 12 mm) LR (≤ 64 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	LR (≤ 12 mm) LR (≤ 64 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	LR (≤ 12 mm) LR (≤ 64 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	TIG (≤ 28 mm) LR (≤ 203 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	TIG (≤ 12 mm) LR (≤ 64 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	LR (≤ 28 mm) LR (≤ 203 mm) AT SPRAY (≤ 203 mm)	PROJ. DI SOLD FAIXA 1 SP. DI POS	MATERIAL BASE
ER108-L E308-L-17 E308-LT1-4	ER108-L E308-L-17 E308-LT1-4	ER108-L E308-L-17 E308-LT1-4	ER108-S E108-1 E71T-1	ER108-L E308-L-17 E308-LT1-4	ER108-S E108-1 E71T-1	CLASSE AWS	
6.5	6.5	6.5	6.4	6.5	6.4	Nº F	
R	R	R	1	8	1	Nº A	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	FLUIDO + MARCA COMERCIAL	
UTP A68 LC UTP 68-LC BOFHILFERAS 2 PW-FD	UTP A68 LC UTP 68-LC BOFHILFERAS 2 PW-FD	UTP A68 LC UTP 68-LC BOFHILFERAS 2 PW-FD	ER 70S1 OK 4804 /OK55.00 ESABTUROB 71 ULTRA	UTP A68 LC UTP 68-LC BOFHILFERAS 2 PW-FD	ER 70S3 OK 4804 /OK55.00 ESABTUROB 71 ULTRA	MARCA COMERCIAL	
TIG-02.4 = 50.170 TIG-02.4 = 70.200 ER-02.5 = 60.100 FR-01.2 = 80.140 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 160.260	TIG-02.4 = 50.170 TIG-02.4 = 70.200 ER-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 80.140 ER-01.2 = 80.140 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 160.260	TIG-02.4 = 50.170 TIG-02.4 = 70.200 ER-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 80.140 ER-01.2 = 80.140 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 160.260	TIG-02.4 = 50.170 TIG-02.4 = 50.220 ER-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 80.140 ER-01.2 = 80.140 ER-01.2 = 100.140 ER-01.2 = 120.180 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 150.250	TIG-02.4 = 50.170 TIG-02.4 = 50.220 ER-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 80.140 ER-01.2 = 80.140 ER-01.2 = 100.140 ER-01.2 = 120.180 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 150.250	TIG-02.4 = 50.170 TIG-02.4 = 50.220 ER-02.5 = 60.100 ER-02.5 = 80.140 ER-01.2 = 80.140 ER-01.2 = 100.140 ER-01.2 = 120.180 AT-01.2 = 100.200 AT-01.6 = 150.250	AMPERAGEM	
TIG-02.4 = 8.14 TIG-02.4 = 8.14 ER-02.5 = 20.27 ER-01.2 = 20.30 AT-01.2 = 25.30 AT-01.6 = 25.32	TIG-02.4 = 8.14 TIG-02.4 = 8.14 ER-02.5 = 20.27 ER-01.2 = 20.30 AT-01.2 = 25.30 AT-01.6 = 25.32	TIG-02.4 = 8.14 TIG-02.4 = 8.14 ER-02.5 = 20.27 ER-01.2 = 20.30 ER-01.2 = 20.30 AT-01.2 = 25.30 AT-01.6 = 25.32	TIG-02.4 = 8.14 TIG-02.4 = 8.14 ER-02.5 = 20.27 ER-01.2 = 20.30 ER-01.2 = 20.30 AT-01.2 = 25.30 AT-01.6 = 25.32	TIG-02.4 = 8.14 TIG-02.4 = 8.14 ER-02.5 = 20.27 ER-01.2 = 20.30 ER-01.2 = 20.30 AT-01.2 = 25.30 AT-01.6 = 25.32	TIG-02.4 = 8.14 TIG-02.4 = 8.14 ER-02.5 = 20.27 ER-01.2 = 20.30 ER-01.2 = 20.30 AT-01.2 = 25.30 AT-01.6 = 25.32	VOLTAGEM (V)	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS
2.4 + 1/2	2.4 + 3.2	2.4 + 3.2	2.4 + 3.2	2.4 + 3.2	2.4 + 3.2	VELOC. DE AVASIO (mm/min)	
TIG = ARGONIO 10.25 AT = Co2 15.25	TIG = ARGONIO 10.25 AT = Co2 15.25	TIG = ARGONIO 10.25 AT = Co2 15.25	TIG = ARGONIO 10.25 AT = Co2 15.25	TIG = ARGONIO 10.25 AT = Co2 15.25	TIG = ARGONIO 10.25 AT = Co2 15.25	TIPO VAZÃO L/min	GAS
TRG + AR 5.20	N/A	TIG + AR 5.20	N/A	TRG + AR 5.20	N/A	APORO L/min	
DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	LIMPEZA INICIAL	
OSCI. MAX. X DA ALMA DO ELETRODO OXÍDICO	OSCI. MAX. X DA ALMA DO ELETRODO OXÍDICO	OSCI. MAX. X DA ALMA DO ELETRODO OXÍDICO	RFIO	OSCI. MAX. X DA ALMA DO ELETRODO OXÍDICO	RTIO	DEPOS. REILO OU OSCII	TECNICA
DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	LIMPEZA ENTRE PASSES	
N/A	N/A	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	N/A	N/A	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	MÉTODO DE GOIVAGEM	
1F+1G-PLANA 2F+2G-HORIZONTAL	1F-PLANA 2F-HORIZONTAL	1G+1F-PLANA 2G+2F-HORIZONTAL	1F+1G-PLANA 2G+2F-HORIZONTAL	1G+1F-PLANA 2G+2F-HORIZONTAL	1F+1G-PLANA 2F+2G-HORIZONTAL	POSIÇÃO DE SOLDAGEM	PÓSITAO
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	PROGRESSÃO DE SOLDAGEM	
TIG = 25°C LR = 25°C AT = 25°C	TIG = 24°C LR = 25°C AT = 25°C	TIG = 25°C LR = 25°C AT = 25°C	TIG = 100°C LR = 100°C AT = 100°C	TIG = 25°C LR = 25°C AT = 25°C	TIG = 100°C LR = 100°C AT = 100°C	PRF-AQUI CMB N.10 MINIMO	CONTROLE DE LIMPRA/TOCA
140°C	140°C	140°C	250°C	150°C	250°C	INTERPASSO MÁXIMO	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	POS AQUECIMENTO	
N/A	N/A	N/A	60°	N/A	60°	TEMPERATURA	
N/A	N/A	N/A	2H 15 MINUTOS	N/A	2H 15 MINUTOS	TEMPO	
100% P-Q	100% I-Q	100% I-P-Q-I-C * II-Qdo Aplicável	100% I-P-Q-C	100% I-P-Q-I-C	100% I-P-Q-R-I-C * II-Qdo Aplicável	INSPEÇÃO	
						CROQUIS DA JUSTA	
14412 10.01 14412 11.01	14412 10.02 14412 11.02	14412 10.06 14412 11.06	14412 10.06 14412 11.06	14412 10.06 14412 11.06	14412 10.06 14412 11.06	DESINHO	

- (A) Rad total (B) Rad Parc (C) TH (D) US após Sold (E) US após TT (F) LP no chanfro (G) LP na ralz (H) LP após Goiv.
 (I) LP após Sold. (J) LP após TT (K) PM no chanfro (L) PM na ralz (M) PM após Goiv. (N) PM após Sold. (O) PM Fluor apôs TT
 (P) Visual no chanfro (Q) Visual apôs Sold (R) Medição de Dureza (S) US apôs TH (T) PM apôs TH (U) Teste de Estanquedade

W1	LA1-LA2-LA3	II	III	IV	C6.3 REVESTIMENTO	Nº DA JUNTA
1.2	2.2	2	01/01	L*1	1	POSIÇÃO DENENHO
SA-516 GR 70 SA-516 GR 70	SA-516 GR 70 SA-516 GR 70	SA-240-304L SA-240-304L	SA-516 GR 70 SA-516 GR 70	SA-182-E304L SA-516 GR 70	SA-516 GR 70	MATERIAL ESPECIFICAÇÃO
1.2	1.2	8.1	1.2	1.2+8.1	1.2	Nº P. N° S
150A/09 150A/09 200A/09	2140/03 213/03 209/01	308/10 194/01	155A/09 138A/09 208A/09 119A/09	402/10	424R/11	EPS N°
TIG (\leq 28 mm) ER (\leq 204 mm) AT SPRAY (\leq 203 mm)	TIG (\leq 25.4 mm) ER (\leq 203 mm) AT SPRAY (\leq 25.4 mm)	TIG (\leq 12 mm) ER (\leq 64 mm) AT SPRAY (\leq 20 mm)	TIG (\leq 28 mm) ER (\leq 203 mm) AT SPRAY (\leq 20 mm)	TIG (\leq 25.4 mm) ER (\leq 203 mm) AT SPRAY (\leq 20 mm)	LR REVESTIMENTO	PROX. DI SOLD.) TAIXA ESP. DI POS.
LR708-3 LR708-1 LR717-1	LR708-3 LR708-1 E717-1	LR308-L E708-L-17 E708-L-T1-4	LR708-L E708-L-17 E708-L-T1-2K	LR308-L E708-L-17 E702-E7112K	E708-L-17 (ATMOTADA) E708-L-17 (DEMAIS CAMADAS)	CLASSE AWS
6.4	6.4	6.5	6.4	6.5	5	Nº F
1	1	8	1	8	8	Nº A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	JFLUXO - MARCA COMERCIAL
GÉRAL: TIG E LR7083 OK 4804-E OK55500 JSAUTUBROD 711 ITA	CONFORME LISTA DE CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM DA EBT'S	UTP 682 LC UTP 682 LC	GÉRAL: TIG LR7083 OK 4804-E OK55500 JSAUTUBROD 711 ITA ARC EM 12K-LINCOLN 865	WT T. 300L WT SI-17	UTP 682 LC UTP 682 LC	MARCA COMERCIAL
TIG-02-4=50/190 TIG-02-4=50/220 ER-02-5=60/80 FR-03-2=100/140 FR-04-0=120/180 AT-01-2=150/250 AT-01-2=150/250	TIG-02-4=50/190 TIG-02-4=50/220 ER-02-5=60/120 FR-03-2=100/140 FR-04-0=120/180 AT-01-2=100/250 AT-01-6=160/260	TIG-02-4=50/190 TIG-02-4=50/220 ER-02-5=60/80 FR-03-2=100/140 FR-04-0=120/180 AT-01-2=100/250 AT-01-6=160/260	TIG-03,2=70/140 ER-03,2=80/150 ER-04,0=120/170	ALMOFADA ER-03,2=80/150 DEMAIS CAMADAS FR-03,2=80/150 ER-04,0=120/170	AMPERAGEM (A)	
16-02-4=8/14 TIG-03,2=8/14 ER-02-5=20/24 LR-03,2=20/24 TR-04-0=20/25 AT-01-2=20/28	16-02-4=8/14 TIG-03,2=8/14 ER-02-5=20/24 LR-03,2=20/24 TR-04-0=20/25 AT-01-6=25/32	TIG-02-4=8/14 TIG-03,2=8/14 ER-02-5=20/24 ER-03,2=20/24 LR-03,2=20/24 TR-04-0=20/25 AT-01-6=25/32	TIG-03,2=12/25 LR-03,2=20/30 LR-04,0=24/32	ALMOFADA ER-03,2=20/30 DEMAIS CAMADAS TR-03,2=20/30 TR-04,0=24/32	VOLTAGEM (V)	
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	VALOR DE AVANÇO (mm)
24.3.2	24.3.2	2.4 + 3.2	24.3.2	24.3.2	N/A	LT. TROPOMÉTRO TUNING (CÓDIGO)
TR-02-10/20 AT-02-15/25	TR-02-10/20 AT-02-15/25	TR-02-10/20 AT-02-15/25	TR-02-10/20 AT-02-15/25	N/A	PROJ. VAZÃO I (mls)	
N/A	N/A	TR-02-5/20	N/A	N/A	N/A	APORO LUMIN
DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	LIMPEZA INICIAL
RETO	RETO	OSCI MAX X 0 DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	RETO	OSCI MAX X 0 DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	OSCI MAX X 0 DA ALMA DO ELETRODO OU RETO	DÉPOS RETO OU OSCL
DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	LIMPEZA ENTRE PASSOS
N/A	N/A	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO E ESCOVA DE AÇO	DISCO ABRASIVO COM ALMA DE NYLON E ESCOVA DE AÇO	N/A	MÉTODO DE GOVAGEM
IG-PIANA 2H-HORIZONTAL	IG-PIANA 2G-HORIZONTAL	IG-PIANA 2G-HORIZONTAL	IG-PIANA 2G-HORIZONTAL	IG-PIANA 2G-HORIZONTAL	IG-PIANA	POSIÇÃO DL SOLDAGEM
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	PROGRESSÃO DE MELHORAMENTO
110-100°C ER-100°C AT-100°C	110-100°C ER-100°C AT-100°C	110-24°C ER-25°C AT-25°C	TIG-100°C ER-100°C AT-100°C AS-100°C	50°C	TR-50°C	PRI-AQUECIMENTO MÍNIMO
250°C	250°C	150°C	250°C	150°C	150°C	INTERPASSO MÁXIMO
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	POSS AQUECIMENTO
600°	N/A	N/A	600°	N/A	630°	TEMPERATURA
2H 15 MINUTOS	N/A	N/A	2H 15 MINUTOS	N/A	2H 15 MINUTOS	TEMPO
100% I-P-Q A- RAD TOTAL * II-Qdo Aplicável	100% I-P-Q-I-C A- RAD TOTAL * II-Qdo Aplicável	100% I-P-Q-I-C A- RAD TOTAL * II-Qdo Aplicável	100% I-P-Q-I-C A- RAD TOTAL * II-Qdo Aplicável	100% I-P-Q-I-C A- RAD TOTAL * II-Qdo Aplicável	100% I-P-Q-I-C A- RAD TOTAL * II-Qdo Aplicável	INSPEÇÃO
14412 10 04	14412 10 05	14412 10 01 14412 11 01	14412 10 05	14412 10 04 *14412 10 05	14412 10 05	DURÍSSIMO
						RODILHA JUNTA
						ALTURA MÍNIMA DE 6 MM 1ª CANTO 30° 1ª CANTO 30° 1ª CANTO 30° 1ª CANTO 30°

***10 – ANEXO II – ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE
SOLDAGEM***

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM
WELDING PROCEDURE SPECIFICATION

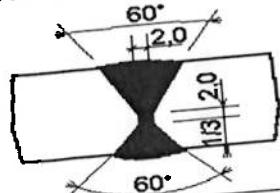
EPS (WPS)	REV. 4
DATA DATE	FOLHA SHEET 1/2

Registros de Qualificação de Procedimento de Soldagem nº: 380/10
 Welding Procedure Qualification Records

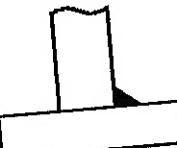
Processo de Soldagem: Arame Tubular
 Welding Process: FCAW

Tipo: Semi-Automático
 Type: Semi-Automatic

DETALHES DAS JUNTAS (QW-402) Todas conforme desenhos e planos de soldas
 JOINTS DETAILS



Todas conforme desenhos e planos de soldas



METAIS DE BASE (QW-403)

BASE METALS

Nº P: 8
 P Nr.:

Especificação: SA-240
 Specifications

Com

With

Especificação: SA-240
 Specifications

Grupo nº: 1
 Group Nr.:

Com nº P: 8
 With P Nr.:

Grupo nº: 1
 Group Nr.:

Tipo ou Grau: 304-L
 Type or grade:

Tipo ou Grau: 304-L
 Type or grade:

Análise Química e Propriedade Mecânica: Cr - Ni 485 Mpa

Chemical Analysis and Mechanic Prop.:

Com

With

Análise Química e Propriedade Mecânica: Cr - Ni 485 Mpa

Chemical Analysis and Mechanic Prop.:

**FAIXA DE ESPESSURA:
 THICKNESS RANGE**

Metal de Base Chanfro: 4,8 a 76,0 mm
 Base Metal Groove:

Faixa de Diâmetro do Tubo: Chanfro: todas
 Pipe Diameter Range Groove: all

Outros:
 Others:

Ângulo: todas
 Fillet: all

Ângulo: todas
 Fillet: all

METAIS DE ADIÇÃO (QW-404)

FILLER METALS

Especificação SFA: 5.22
 Specification SFA:

Nº F: 6
 F Nr.:

Marca Comercial: BOEHLER EAS 2 PW-FD
 Trade Name: —

* Obs:

Classificação AWS: E308L T1-4
 AWS Classification:

Nº A: 8
 A Nr.:

Diâmetros: 1,2 - 1,6 mm
 Diameters:

**FAIXA DE ESPESSURA
 THICKNESS RANGE**

Chanfro: ≤ 76,0 mm
 Groove:

OUTROS (Others):

Ângulo: todas
 Fillet: all

EPS - ANALISADA E ADEQUADA DE ACORDO COM ASME IX ED.2010

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM WELDING PROCEDURE SPECIFICATION				EPS (WPS)	REV.																		
				DATA DATE	FOLHA SHEET 2/2																		
POSIÇÕES (QW-405) POSITIONS		TRAT. TÉRMICO APÓS SOLDAGEM (QW-407) POSTWELD HEAT TREATMENT																					
Posição(es) do Chanfro: Plana-Horizontal <i>Position(s) of Groove: flat-horizontal</i> Posição(es) de Ângulo:Plana-Horizontal <i>Position(s) of Fillet: flat-horizontal</i> Progressão de Soldagem: Ascendente <i>Welding Progression:</i>		Temperatura: N/A <i>Temperature:</i> Tempo: N/A <i>Time:</i> Outros: N/A <i>Others:</i>																					
PRÉ AQUECIMENTO (QW-406) PREHEAT		GÁS (QW-408) GAS <table border="1"> <thead> <tr> <th>Gas (es) Gas (es)</th> <th>Mistura (%) Mixture</th> <th>Vazão l/min Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Co2</td> <td>99,99</td> <td>15/25</td> </tr> <tr> <td></td> <td>N/A</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>N/A</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Gas (es) Gas (es)	Mistura (%) Mixture	Vazão l/min Flow Rate	Co2	99,99	15/25		N/A			N/A							
Gas (es) Gas (es)	Mistura (%) Mixture	Vazão l/min Flow Rate																					
Co2	99,99	15/25																					
	N/A																						
	N/A																						
Temperatura de pré-aquec.: mín. 25°C <i>Preheat temperature:</i> Temperatura de Interpass: máx. 150°C <i>Interpass temperature:</i> Manutenção do pré-Aquecimento: N/A <i>Preheat Maintenance:</i> Outros: <i>Others:</i>																							
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW-409) ELECTRICAL CHARACTERISTICS		Tipo: N/A <i>Type:</i> Veloc. Arame: <i>Wire Feed Speed:</i>																					
Eletrodo de Tungstênio- diâmetro: N/A <i>Tungsten Electrode Diameter:</i> Modo de Transferência (MAG/MIG): Spray <i>Mode of Metal Transfer (GMAW):</i>																							
TÉCNICA (QW-410) TECHNIQUE		Retilíneo <i>Rectilinear</i>																					
		Oscilado <i>Oscillated</i> Diâm. do Bocal: 10 - 20 mm <i>Size Hole:</i>																					
Oscilação: Max. 0,5x Ø do bocal. <i>Oscillation: Max. oscillation of hole 0,5 x Ø</i> Limpeza inicial e entre passes: disco abrasivo alma de nylon e escova de aço inox. <i>Initial and Interpass Cleaning: Abrasive disc with nylon core and stainless steel wire brush</i> Método de Goivagem: Disco abrasivo alma de nylon e escova de aço inox. <i>Method of Back Gougin: Abrasive disc with nylon core and stainless steel wire brush</i> Distância entre o tubo de contato e a Peça: 13 - 16 mm <i>Contact Tube to Work Distance:</i> Passes Simples ou Múltiplos: múltiplos <i>Multiple or Single Electrodes: multiple</i> Eletrodos Simples ou Múltiplos: simples <i>Multiple or Single Electrodes: single</i> Martelamento: N/A <i>Peening</i> Outros: <i>Others:</i>																							
REPAROS: Caso haja reparos de defeitos de soldagem, os mesmos deverão ser executados conforme este documento.		METAL DE ADIÇÃO <i>Filler Metal</i> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nº DE CAMADA(S) Layer(s) Nr.</th> <th rowspan="2">PROCESSO Process</th> <th colspan="2">CORRENTE <i>Current</i></th> <th rowspan="2">VOLTAGEM <i>Voltage</i></th> <th rowspan="2">VELOC. AVANÇO <i>Travel Speed</i> cm/min.</th> <th rowspan="2">OUTROS <i>Others</i></th> </tr> <tr> <th>CLASSE AWS <i>AWS Class</i></th> <th>DIÂMETRO <i>Diameter</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>Arame Tubular FCAW</td> <td>E-308L-T1-4</td> <td>1,2 mm 1,6 mm</td> <td>CC (+) CC (+)</td> <td>100/200 160/260</td> <td>25/30 25/32</td> <td>18 25</td> <td>20,0 Kj/cm 20,0 Kj/cm</td> </tr> </tbody> </table>				Nº DE CAMADA(S) Layer(s) Nr.	PROCESSO Process	CORRENTE <i>Current</i>		VOLTAGEM <i>Voltage</i>	VELOC. AVANÇO <i>Travel Speed</i> cm/min.	OUTROS <i>Others</i>	CLASSE AWS <i>AWS Class</i>	DIÂMETRO <i>Diameter</i>		Arame Tubular FCAW	E-308L-T1-4	1,2 mm 1,6 mm	CC (+) CC (+)	100/200 160/260	25/30 25/32	18 25	20,0 Kj/cm 20,0 Kj/cm
Nº DE CAMADA(S) Layer(s) Nr.	PROCESSO Process	CORRENTE <i>Current</i>		VOLTAGEM <i>Voltage</i>	VELOC. AVANÇO <i>Travel Speed</i> cm/min.			OUTROS <i>Others</i>															
		CLASSE AWS <i>AWS Class</i>	DIÂMETRO <i>Diameter</i>																				
	Arame Tubular FCAW	E-308L-T1-4	1,2 mm 1,6 mm	CC (+) CC (+)	100/200 160/260	25/30 25/32	18 25	20,0 Kj/cm 20,0 Kj/cm															
REVISÃO 3: EPS, REQUALIFICADA, ATENDENDO A MARCA COMERCIAL DO CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM EPS - ANALISADA E ADEQUADA DE ACORDO COM ASME IX ED.2010																							