



I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR

ROMILDO RUDEK JUNIOR

**USO DE ULTRASSOM EM SUBSTITUIÇÃO A RADIOGRAFIA NA
FABRICAÇÃO DE REATORES PARA SERVIÇOS COM H₂.**

CURITIBA-PR

2013

ROMILDO RUDEK JUNIOR

**USO DE ULTRASSOM EM SUBSTITUIÇÃO A RADIOGRAFIA NA
FABRICAÇÃO DE REATORES PARA SERVIÇOS COM H₂.**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem do curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Okimoto.

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

ROMILDO RUDEK JUNIOR

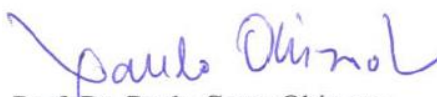
USO DE ULTRASSOM EM SUBSTITUIÇÃO A RADIOGRAFIA NA FABRICAÇÃO DE REATORES PARA SERVIÇOS COM H2.

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia da Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora :


Prof. Dr. Hélio Padilha
UFPR


Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes
UFPR


Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

AGRADECIMENTOS

À Petrobras, pela oportunidade.

Ao Alexandre Jorge da Silveira Salgado, por tornar possível a realização deste trabalho.

Aos docentes do curso, pela contribuição ao conhecimento e aprendizado.

Aos colegas de curso, pela amizade, companheirismo e agradável convivência.

A Denise, Gustavo e Vitor, que mesmo distantes, não deixaram de demonstrar apoio, incentivo e carinho.

A Deus, por tudo.

RESUMO

A inspeção por ultrassom em soldas de vasos de pressão utilizando a técnica *phased array* e TOFD vem sendo realizada pelos fabricantes nacionais e internacionais, de forma a cumprir com os requisitos da norma Petrobras N-1704 – “Requisitos adicionais para vasos de pressão em serviço com hidrogênio” em substituição ao ensaio radiográfico.

A utilização das técnicas *phased array* e TOFD agregam maior qualidade da inspeção realizada, onde é possível obter todo o registro do ensaio na forma de dados, aumentando a confiabilidade da análise das indicações encontradas.

O presente trabalho visa apresentar a utilização das técnicas *phased array* e TOFD no controle da qualidade de fabricação em substituição ao ensaio radiográfico.

PALAVRAS-CHAVE: Reator, Ultrassom.

ABSTRACT

The ultrasonic inspection of welds in pressure vessels using phased array and TOFD technique is being addressed by national and international manufacturers, in order to comply with the standard requirements Petrobras N-1704 - "Additional requirements for pressure vessels in service with hydrogen "to replace radiographic testing. The use of phased array and TOFD techniques add better quality of inspection performed, where you can get the entire record of the trial in the form of data, increasing the reliability of the analysis of the indications found. This paper presents the use of phased array and TOFD techniques to control manufacturing quality to replace radiographic testing.

KEYWORDS: Reactor, Ultrasonic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. - Curvas de Nelson (API RP 941, 2008).....	14
Figura 3.2 – Varredura eletrônica.....	17
Figura 3.3 – Focalização eletrônica.....	17
Figura 3.4 – Varredura setorial.....	18
Figura 3.5 – Geração da onda difratada a partir de uma onda incidente na descontinuidade ..	18
Figura 3.6 – Princípios do ensaio TOFD e as fases dos quatro principais ecos.....	20
Figura 3.7 – Demonstração esquemática da transformação do sinal A-scan não retificado em imagem em escala de cinza	21
Figura 3.8 – Demonstração esquemática da transformação dos sinais A-scan na apresentação tipo D-scan em escala de cinza.....	22
Figura 3.9 - Imagem real do método TOFD e do A-scan. Base de tempo na horizontal e o movimento dos cabeçotes na vertical	23
Figura 3.10 - Ferramentas para dimensionamento de descontinuidades.....	24
Figura 3.11 - Zona morta no método TOFD	24
Figura 4.1 – Desenho e características do reator	27
Figura 4.2 - Detalhe das juntas soldadas longitudinais e circunferenciais do casco do reator .	28
Figura 4.3 - Detalhe das juntas soldadas entre casco e conexões do reator	28
Figura 4.4 - Desenho esquemático das 3 varreduras com os respectivos transdutores	29
Figura 4.5 - Plano de varredura (scan plan).....	30
Figura 5.1 - Varredura realizada com o par de transdutores de 45°	31
Figura 5.2 - Varredura realizada com o par de transdutores de 60°	32
Figura 5.3 - Varredura realizada com o par de transdutores de 70°	33
Figura 5.4 - Vista C-SCAN	34
Figura 5.5 - Vista S-SCAN.....	34
Figura 5.6 - Vista A-SCAN	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Tamanho máximo de descontinuidades, conforme critério do ASME.	36
--	----

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVO	11
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	Vaso de pressão.....	12
3.2	O código de projeto de fabricação de vasos de pressão	12
3.3	Material utilizado para fabricação do reator.	13
3.4	Espessuras utilizada para fabricação do reator.....	15
3.5	Ultrassom Phased-Array	16
3.6	Ultrassom TOFD (<i>Time Of Flight Diffraction</i>).....	18
3.6.1	Visualização de Dados	20
3.6.2	Ferramentas de Dimensionamento	23
3.6.3	Limitações do Método Tofd.....	24
3.7	Processo ARCO SUBMERSO (SAW) e descontinuidades características.	25
3.7.1	Falta de fusão e inclusão de escória.	25
3.7.2	Trinca de solidificação	25
3.7.3	Trincas por hidrogênio.	25
3.7.4	Porosidade	25
4.	METODOLOGIA	27
4.1	Fabricação do equipamento.....	27
4.2	Juntas soldadas para inspeção com ultrassom.....	28
4.3	A escolha do ensaio do método de ensaio de ultrassom.	28
4.4	O projeto do ensaio TOFD.	29
4.5	O projeto do ensaio Phased Array com as respectivas varreduras.....	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1	Registros TOFD	31
5.2	Registros Phased Array	33

5.3	Critério de aceitação das descontinuidades do ultrassom	35
5.4	Comparativo do ultrassom realizado no reator com a radiografia.	36
6.	CONCLUSÃO	38
7.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	39
8.	REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

Com a utilização de aços cada vez mais elaborados para situações críticas na fabricação de equipamentos, como reatores, o controle de qualidade com maior qualidade desta fabricação torna-se imperativo para a utilização segura deste tipo de equipamento.

Este trabalho visa demonstrar o processo de controle de qualidade realizado em um reator, especificamente o ensaio não destrutivo de ultrassom ao invés da utilização da tradicional técnica radiográfica, utilizada desde os primeiros equipamentos deste tipo fabricados no mundo.

O ensaio de ultrassom com as técnicas TOFD e Phased Array permitirá não só o acompanhamento da fabricação, como possibilitarão monitorações futuras quanto a danos por hidrogênio em serviço, considerando o ensaio inicial realizado na fabricação.

2. OBJETIVO

Avaliar a utilização da técnica de ultrassom em soldas de vaso de pressão para uso com hidrogênio em substituição a radiografia na fabricação e futuras inspeções em serviço.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Vaso de pressão

Vaso de pressão são equipamentos que contém fluidos sob pressão interna ou externa. Reator é um tipo de vaso de pressão, cuja finalidade é conter o fluido enquanto este reage quimicamente com o catalisador também presente em seu interior.

Nas refinarias de petróleo os reatores são utilizados basicamente para realizar a reação entre um combustível, por exemplo, o diesel, e o hidrogênio. Esta reação busca a retirada do enxofre do combustível.

3.2 O código de projeto de fabricação de vasos de pressão

Relaciona-se dois documentos utilizados para o projeto e fabricação do reator que são:

1. O código ASME INTERNATIONAL (BPVC), 2010, a Seção VIII, Divisão 2, contempla em seu texto: fórmulas para o cálculo da espessura, métodos de fabricação, ensaios e outros requisitos para projeto e construção de uma vaso de pressão, no caso reator.

A ASME é a Associação Americana de Engenheiros Mecânicos, entidade que publica um código para projeto e construção de equipamentos, como por exemplo, reator.

Na seção VIII, divisão 2 da sua publicação, que é especificamente a parte do projeto e construção correlata a este reator é citado que “todas as soldas de topo sob pressão devem ser totalmente radiografadas”.

Em 1996 a ASME publica o “CASE 2235”, o qual admite que o ensaio por ultrassom possa ser utilizado no lugar do ensaio radiográfico para controle de qualidade em juntas soldadas de vasos de pressão. Posteriormente este “CASE” foi adicionado ao corpo do código. O “CASE 2235” possui o critério de aceitação para descontinuidades baseado em mecânica da fratura, diferente do que o código ASME utilizava anteriormente, que seria o critério de aceitação tradicional, baseado em descontinuidades deixadas na solda realizada por um soldador de qualidade mediana. Adicionalmente existem requisitos específicos no “CASE 2235” para o ensaio ultrassônico, que são:

- A inspeção deve ser realizada utilizando dispositivo para aquisição de dados automática baseado em computador.
- Os dados gravados na forma que foram adquiridos, sem tratamento posterior.

- O procedimento do ensaio deve ser demonstrado em corpo de prova contendo no mínimo três descontinuidades.
 - Pessoal treinado e participar da demonstração do procedimento.
 - Técnicas baseadas em amplitude e técnicas baseadas em difração podem ser utilizadas.
 - Plano de varredura mostrando a localização do transdutor com a respectiva área de cobertura na peça.
2. Prática Recomendada API-934-A, 2008, cuja aplicação destina-se a novos vasos de pressão de grande espessura de parede em refinarias de petróleo, petroquímicas e indústrias químicas, nas quais o hidrogênio é processado em temperaturas e pressões elevadas. É baseado nas experiências operacionais das indústrias e nos resultados das experimentações e testes conduzidos por fabricantes e compradores independentes. Apresenta requisitos de fabricação e matérias, especialmente a liga 2 1/4Cr-1Mo, que é o caso do exemplo do reator.

No documento de compra que o reator, objeto deste trabalho, foi adquirido constaram-se os dois documentos.

3.3 Material utilizado para fabricação do reator.

Os reatores trabalham em pressões na faixa de 100 a 240 kgf/cm², temperaturas da ordem de 430°C e elevadas pressões parciais de H₂ e H₂S. No caso específico do equipamento em questão, os dados de projeto são: pressão de projeto: 154,9kgf/cm²(15,2MPa) e temperatura de projeto: 430°C

Conforme literatura consultada (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010) os limites de utilização do aço carbono e aços CrMo pode ser visto nas “Curvas de Nelson”, conforme Figura 3.1, que foram originalmente estabelecidas por G. A. Nelson em 1967 com base em experiência obtida destes aços em operação.

No eixo vertical da Figura 3.1, localiza-se temperatura de projeto, 430°C no caso, e no eixo horizontal a pressão de projeto, no caso 154,9kgf/cm²(15,2MPa), este ponto de interseção, marcado na figura, localiza-se abaixo do material liga 2 1/4Cr-1Mo, que fundamentalmente resiste ao ataque por hidrogênio em alta temperatura, e é o material escolhido para o projeto.

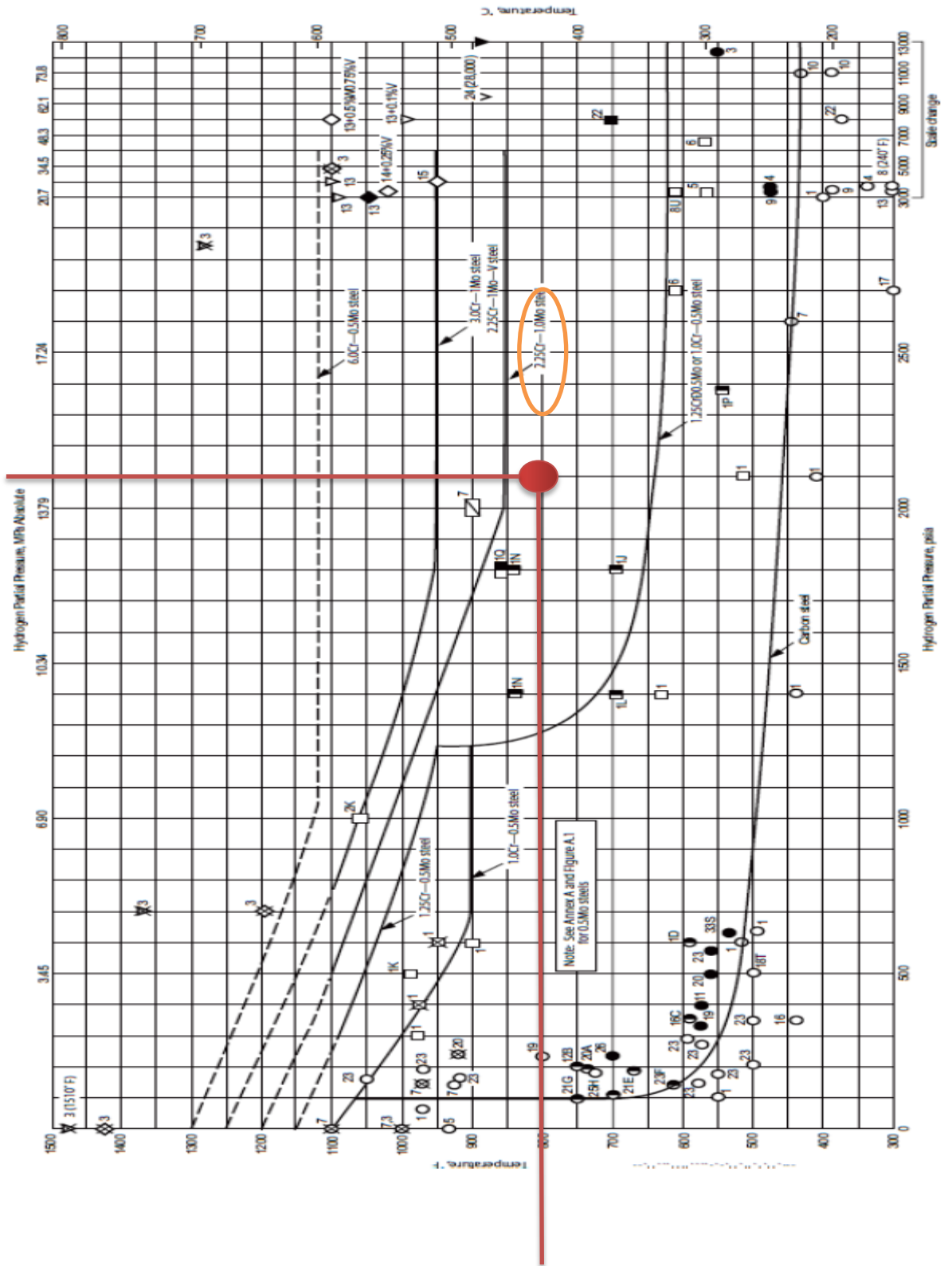


Figura 3.1. - Curvas de Nelson (API RP 941, 2008)

Conforme literatura consultada (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008), cujo o título é “Aços para Serviço com Hidrogênio a Elevada Pressões e Temperaturas em Refinarias de Petróleo e Plantas Petroquímicas”, referencia esta curva e os respectivos materiais e traz também recomendações sobre ensaios para acompanhamentos deste tipo de deterioração, cujo ultrassom é apresentado como importante ferramenta na detecção.

3.4 Espessuras utilizada para fabricação do reator.

O reator basicamente é composto por dois tampos esféricos e um casco cilíndrico.

Conforme literatura consultada (ASME INTERNATIONAL; 2010) O cálculos das espessuras destes componentes foi realizado de acordo com as Equações 3.1 e 3.2, retiradas do código de projeto ASME, 2010, Seção VIII, Divisão 2.

$$t = \frac{0.5PR}{S - 0.25P}$$

Equação 3.1

$$t = \frac{PR}{S - 0.5P}$$

Equação 3.2

Onde:

t = espessura, em mm

R = raio interno, em mm

P = pressão interna, em kgf/cm²;

S = tensão admissível do material em função da temperatura, em kgf/cm²

Resultando em valores de espessuras para os tampos esféricos de 100,7 mm e para o casco cilíndrico de 206,8 mm.

3.5 Ultrassom Phased-Array

Conforme literatura consultada (GINZEL, 2006) ondas ultrassônicas são vibrações mecânicas induzidas em um meio elástico por um transdutor piezoeletrico excitado por uma tensão elétrica. A maioria das aplicações industriais requer frequências entre 0,5 MHz e 15 MHz.

O ultrassom convencional utiliza transdutores mono cristal com feixe divergente, que se propaga ao longo de um eixo acústico com ângulo de refração. A divergência do feixe pode contribuir para detecção e dimensionamento de pequenas trincas sem orientação.

Pode-se considerar o ultrassom phased array como uma serie de cristais com determinado alinhamento entre si montados em mesmo conjunto.

Considerando que todos os cristais tem as mesmas dimensões, com largura muito menor que o comprimento, cada pequeno cristal destes pode ser considerado uma linha de saída de ondas cilíndricas. As frentes de onda do novo bloco acústico interferirão umas com a outras, gerando uma frente de onda maior.

As pequenas frentes de onda podem ser defasadas no tempo e sincronizadas por fase e amplitude, de maneira a criar feixe um focalizado com capacidade de direção.

A principal característica da tecnologia de ultrassom phased array é a excitação controlada por computador (atraso e amplitude) de elementos individuais (por exemplo: cristais), em um transdutor de muitos elementos. A excitação de elementos piezo compostos pode gerar um feixe ultrassônico localizado com a possibilidade de modificar os parâmetros do feixe como ângulo, distancia e tamanho do ponto focal por meio de programas.

A varredura do feixe é focalizada e pode detectar por meio de reflexão trincas sem orientação definida. Estas trincas podem estar localizadas aleatoriamente fora do eixo do feixe. Um simples transdutor de cristal, com movimento limitados e ângulo fixo do feixe, possui uma grande probabilidade de não detectar trincas sem orientação, ou trincas localizadas longe do eixo do feixe.

Para gerar um feixe em fase e com uma interferência construtiva, os vários elementos ativos são excitados com uma pequena defasagem de tempo. O eco do ponto focal desejado atinge vários elementos com uma mudança de tempo computável. Os sinais dos ecos recebidos em cada elemento do transdutor são ajustados no tempo antes de serem somados juntos. O resultado da soma é um A-scan, que trata-se da visualização da amplitude do sinal em relação a espessura, que enfatiza a resposta do ponto focal desejado e atenua os vários outros ecos de outros pontos no material.

Existem três padrões principais de varreduras controladas por computador:

- Varredura eletrônica: a mesma lei focal e o atraso são multiplexados através de um grupo de elementos ativos, conforme Figura 3.2, a varredura é realizada em ângulo constante e ao longo do comprimento do transdutor phased array.

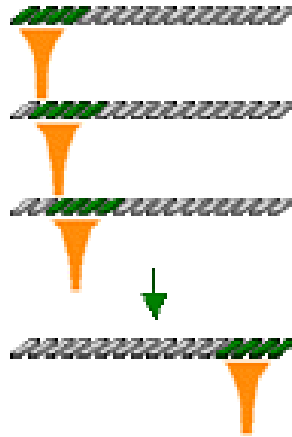


Figura 3.2 – Varredura eletrônica

- Focalização eletrônica ou foco dinâmico da profundidade: a varredura é realizada com diferentes profundidades focais. Na prática, uma simples transmissão do pulso focalizado é utilizada, e uma nova focalização é realizada na recepção para todas as profundidades programadas, conforme Figura 3.3.

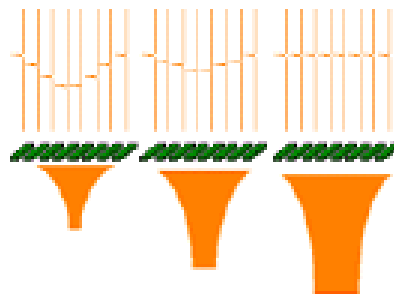


Figura 3.3 – Focalização eletrônica

- Varredura setorial ou varredura azimutal ou varredura angular: o feixe é movimentado através de um intervalo de varredura para uma específica profundidade focal, usando os mesmos elementos, outras faixas de varredura com diferentes profundidades focais podem ser adicionadas. Os setores angulares podem ter diferentes valores.

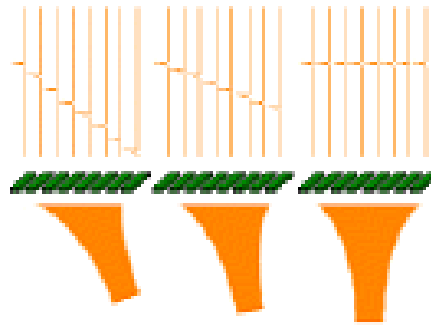


Figura 3.4 – Varredura setorial

3.6 Ultrassom TOFD (*Time Of Flight Diffraction*)

Quando um feixe ultra-sônico incide em uma descontinuidade, além dos fenômenos já conhecidos de reflexão e transmissão, ocorre também a difração sônica, que consiste na geração de uma onda circular, que se propaga em todas as direções. Para descontinuidades planares (trinca, falta de fusão, falta de penetração) a onda difratada é gerada nas extremidades (pontas) das mesmas, conforme Figura 3.5.

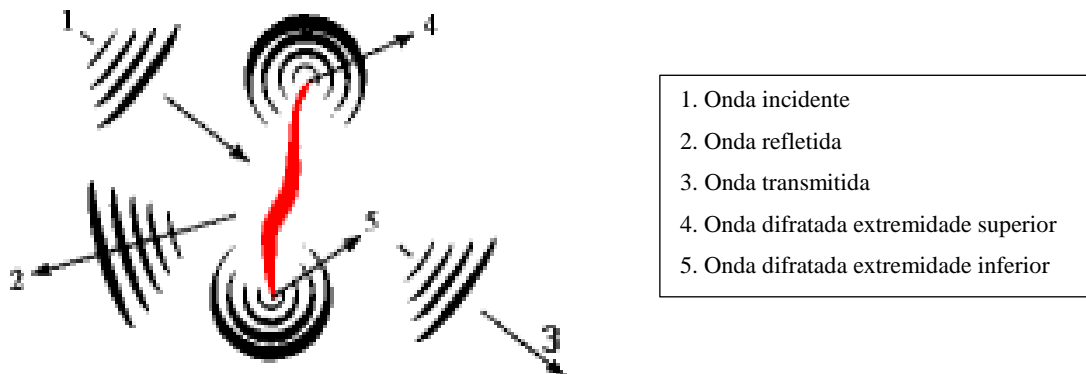


Figura 3.5 – Geração da onda difratada a partir de uma onda incidente na descontinuidade

O método utiliza dois cabeçotes angulares, um como emissor e outro como receptor (método por transparência), podendo ser movimentados paralelamente à solda (TOFD linear) ou transversalmente à solda, para frente e para trás (TOFD raster). O TOFD raster coleta mais dados e é mais preciso, enquanto que o método linear é mais rápido. No caso do TOFD raster geralmente o reforço da solda é removido para que a varredura se processe também sobre a solda.

A detecção e dimensionamento das descontinuidades são feita através da detecção, registro e análise dos sinais difratados das extremidades (pontas) das mesmas. O método é utilizado para a detecção e dimensionamento das descontinuidades.

Quatro tipos de ondas são utilizadas no método TOFD:

- 1) Onda lateral: Onda superficial longitudinal, gerada pela divergência do feixe sônico;
- 2) Reflexão do eco de fundo: Onda longitudinal, refletida na parede posterior do metal de base;
- 3) Onda refletida: Onda Longitudinal, refletida por descontinuidades planares paralelas à superfície;
- 4) Onda difratada: Onda circular, difratada nas extremidades da descontinuidade. Tanto ondas longitudinais como transversais são geradas, mas, tipicamente as longitudinais é que são utilizadas.

O método TOFD é baseado nos seguintes princípios, conforme Figura 3.6:

- Os cabeçotes são altamente amortecidos (pulso=1,5 λ) e de alta frequência (> 6 MHz);
- A divergência do feixe sônico é tão grande que permite ao mesmo tempo a geração de onda lateral e a reflexão de eco de fundo, de maneira que toda a espessura da peça é mostrada de uma só vez;
- Geralmente os cabeçotes são posicionados de maneira centralizada em relação à solda;
- Para espessuras acima de 75 mm são utilizados dois ou mais conjuntos de cabeçotes TOFD;
- Precisam ser previamente conhecidos ou deduzidos os parâmetros referentes às sapatas de retardo, velocidade sônica na peça, tempo decorrido da onda lateral, tempo decorrido da do eco de fundo, espessura da peça e distância dos cabeçotes ao centro da solda;
- Os ecos das extremidades superior e inferior da descontinuidade têm fase inversa;
- Os sinais difratados são geralmente 20 a 30 dB menores em amplitude que o eco de um furo transversal com 3 mm de diâmetro, no mesmo percurso e por isso precisam ser amplificados;
- A amplitude máxima dos sinais é obtida com feixe de 70 graus;
- As ondas longitudinais são preferidas em relação as transversais por terem maior velocidade (chegam mais rápido no cabeçote receptor) e por terem menor atenuação no material;
- A varredura linear é feita com varredura única, paralela à linha de centro da solda.

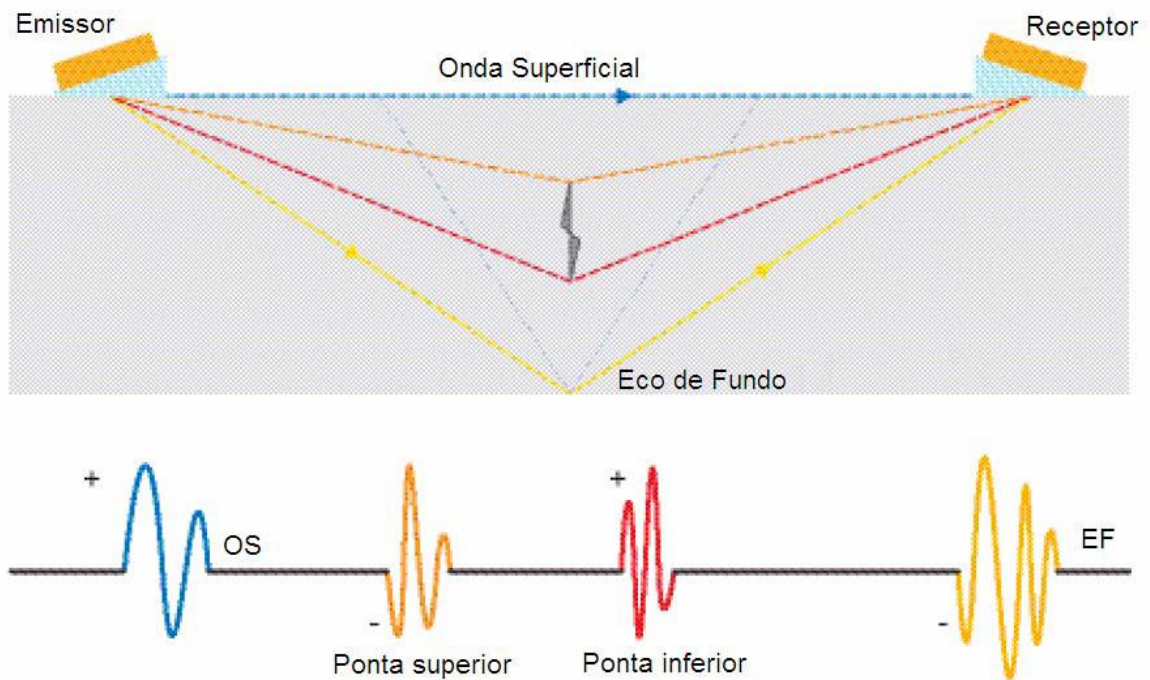


Figura 3.6 – Princípios do ensaio TOFD e as fases dos quatro principais ecos

Assumindo que a descontinuidade está posicionada simetricamente entre os cabeçotes, as seguintes fórmulas são utilizadas para dimensionar a altura da mesma e a também como também a distância entre a superfície da peça e a extremidade superior da descontinuidade.

3.6.1 Visualização de Dados

Os resultados do método TOFD são geralmente apresentados como uma imagem em escala de cinza gerada a partir dos A-Scan, não retificados (sinal RF), digitalizados, conforme Figura 3.7. Os sinais positivos tendem para a cor branca, enquanto que os sinais negativos para a cor preta.

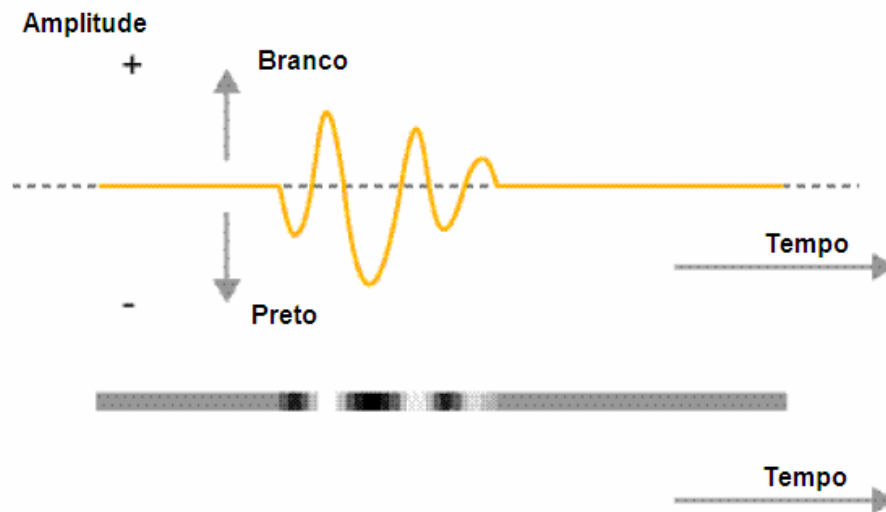


Figura 3.7 – Demonstração esquemática da transformação do sinal A-scan não retificado em imagem em escala de cinza

As imagens do método TOFD são geradas pelo somatório das imagens em escala de cinza, transformadas a partir dos A-scan. Os sinais da onda lateral e do eco de fundo são visíveis como linhas multiciclos contínuas. A visualização das descontinuidades dentro da peça consiste de sinais das extremidades superior e inferior das mesmas. Estes sinais aparecem como sinais multiciclos entre a onda lateral e o eco de fundo (ver figura 4). A esta visualização dá-se o nome de “Apresentação D-scan”.

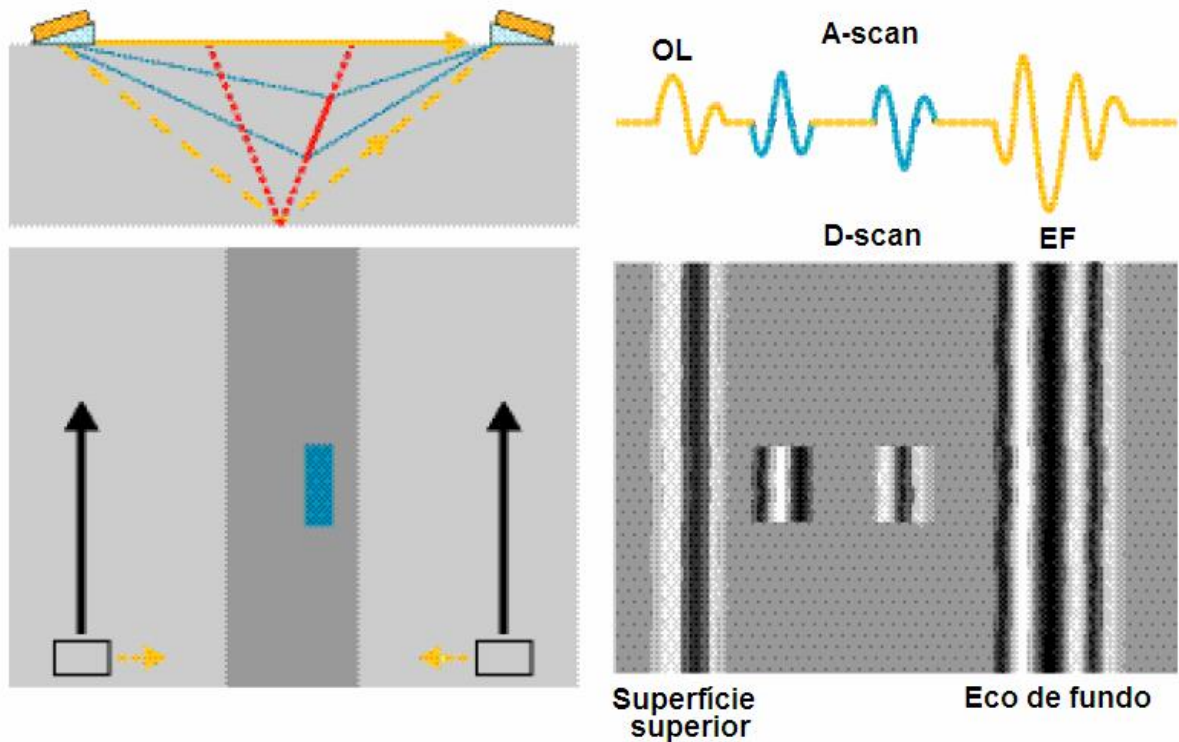


Figura 3.8 – Demonstração esquemática da transformação dos sinais A-scan na apresentação tipo D-scan em escala de cinza

As imagens em escala de cinza mostram mudanças de fase, sendo alguns sinais branco-preto-branco e outros preto-branco-preto. Isto permite a identificação da origem da onda (topo ou parte inferior da descontinuidade) e assim possibilita o dimensionamento da descontinuidade. Dependendo da fase do pulso incidente (normalmente com voltagem negativa), a onda lateral será positiva e então o primeiro sinal difratado (topo da descontinuidade) será negativo o segundo sinal difratado (parte inferior da descontinuidade) será positivo e o eco de fundo negativo. Isto pode ser observado esquematicamente na Figura 3.8. Estas informações de fase são úteis para a interpretação dos sinais e, por isso, o método TOFD utiliza os sinais de RF não retificados. A informação da fase é usada para a correta identificação dos sinais (normalmente o topo e a parte inferior da descontinuidade, se possível diferenciar) e para determinar precisamente a profundidade e altura das descontinuidades.

A Figura 3.9 mostra uma imagem real do método TOFD. A base de tempo está na horizontal e o eixo de movimento é vertical (igual ao mostrado esquematicamente na Figura 3.8). A onda lateral é a que apresenta um pulso multiciclos forte na esquerda e o eco de fundo é o pulso multiciclos forte na direita da imagem. As descontinuidades são mostradas como pulsos multiciclos cinza e branco entre a onda lateral e o eco de fundo. A varredura mostra diversas descontinuidades (falta de fusão, porosidade, falta de penetração e escória). O ruído

ultrassônico geralmente origina-se nas reflexões dos grãos do material, o que limita a frequência que pode ser utilizada. O método TOFD somente pode mostrar as ondas lateral e eco de fundo junto com ruído. Também existem informações ultrassônicas disponíveis após os sinais do eco de fundo (tipicamente difração de ondas transversais), mas geralmente elas não são utilizadas.

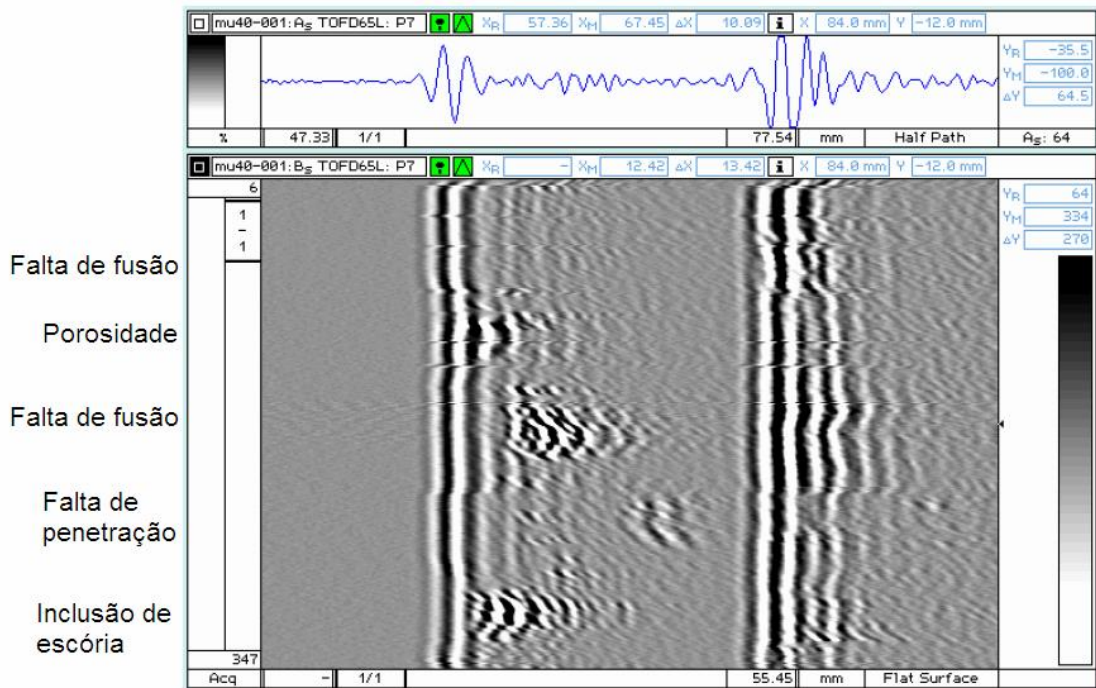


Figura 3.9 - Imagem real do método TOFD e do A-scan. Base de tempo na horizontal e o movimento dos cabeçotes na vertical

3.6.2 Ferramentas de Dimensionamento

As variáveis do método TOFD são:

- 1) Espaçamento dos cabeçotes;
- 2) Espessura do material;
- 3) Velocidade sônica no material;
- 4) Retardo do cabeçote;
- 5) Tempo decorrido da onda transversal;
- 6) Tempo decorrido do eco de fundo.

Nem todas as variáveis precisam ser conhecidas para o dimensionamento de discontinuidades.

Por exemplo, a calibração utilizando apenas os sinais da onda lateral e do eco de fundo pode ser feita sem conhecer o retardo do cabeçote, o espaçamento e a velocidade. Os dados do

tempo decorrido da onda lateral (t_1) e do eco de fundo (t_2) são introduzidos no software do computador e através do posicionamento de cursores as dimensões são automaticamente calculadas, conforme Figura 3.10.

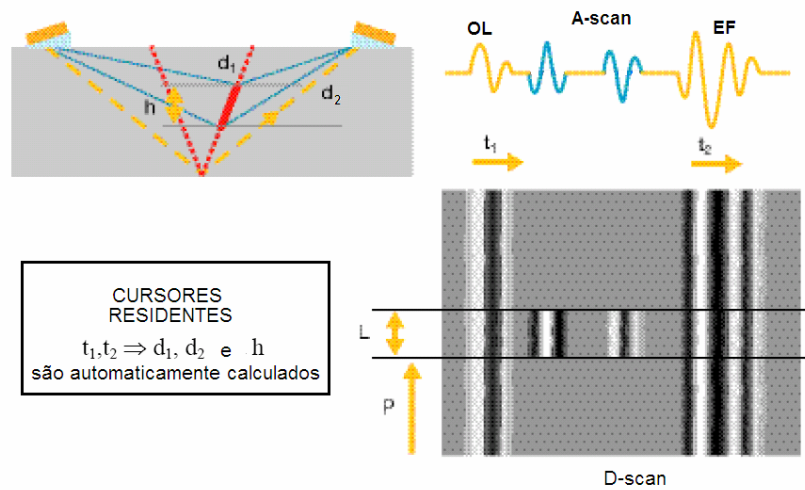


Figura 3.10 - Ferramentas para dimensionamento de descontinuidades

3.6.3 Limitações do Método Tofd

- As descontinuidades não vão estar sempre simetricamente posicionadas entre os dois cabeçotes. Normalmente o método TOFD é executado com um par de cabeçote montados equidistantes ao eixo da solda, porém, as descontinuidades geralmente não estão localizadas no centro da solda e nem são perpendiculares à superfície da peça. Estas diferenças em relação á simetria são fatores de erro no método.
- Descontinuidades localizadas próximas das superfícies superior e inferior são difíceis de detectar devido às zonas mortas da onda lateral e do eco de fundo, conforme Figura 3.11. A extensão da zona morta depende da freqüência dos cabeçotes, do comprimento de pulso, espessura do material, da velocidade sônica e do espaçamento entre cabeçotes.

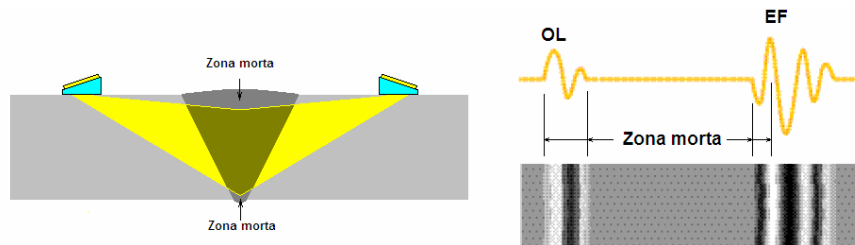


Figura 3.11 - Zona morta no método TOFD

3.7 Processo ARCO SUBMERSO (SAW) e discontinuidades características.

Conforme literatura consultada (ASM INTERNATIONAL, 1998) o fato de que o arco submerso ser um processo de alta energia de soldagem sob a proteção de uma camada de fluxo diminui muito a chance de defeitos de solda. No entanto, defeitos, tais como falta de fusão, inclusão de escória, trincas de solidificação, trincas por hidrogênio, ou porosidade podem ocorrer ocasionalmente.

3.7.1 Falta de fusão e inclusão de escória.

Defeitos de falta de fusão e inclusão de escória são mais comumente causados pelo desalinhamento do cordão de solda em relação ao chanfro. Falta de fusão geralmente associada a baixa energia de soldagem.

3.7.2 Trinca de solidificação

Ao longo do centro do cordão de solda, é geralmente devido ao formato do cordão de solda, projeto da junta ou escolha incorreta de consumíveis de soldagem. Um cordão de solda convexo com uma relação largura-profundidade superior a um, diminuirá a tendência de ocorrência de trincas de solidificação. Projeto da junta também pode contribuir para que haja uma tensão de contração excessiva, aumentando assim o risco de trinca de solidificação.

Devido às trincas estarem relacionadas diretamente com as tensões de soldagem, materiais de alta resistência, como aço liga 2,25%Cr 1%Mo serão mais susceptíveis.

3.7.3 Trincas por hidrogênio.

Ao contrário das trincas de solidificação, que aparece imediatamente após a soldagem, trincas por hidrogênio é um processo demorado e pode ocorrer a partir de várias horas depois da soldagem ter sido concluída. Para minimizar a trinca por hidrogênio, todas as possíveis fontes de hidrogênio (por exemplo, água, óleo, graxa e sujeira) presente no fluxo, eletrodos, ou na junta devem ser eliminadas.

3.7.4 Porosidade

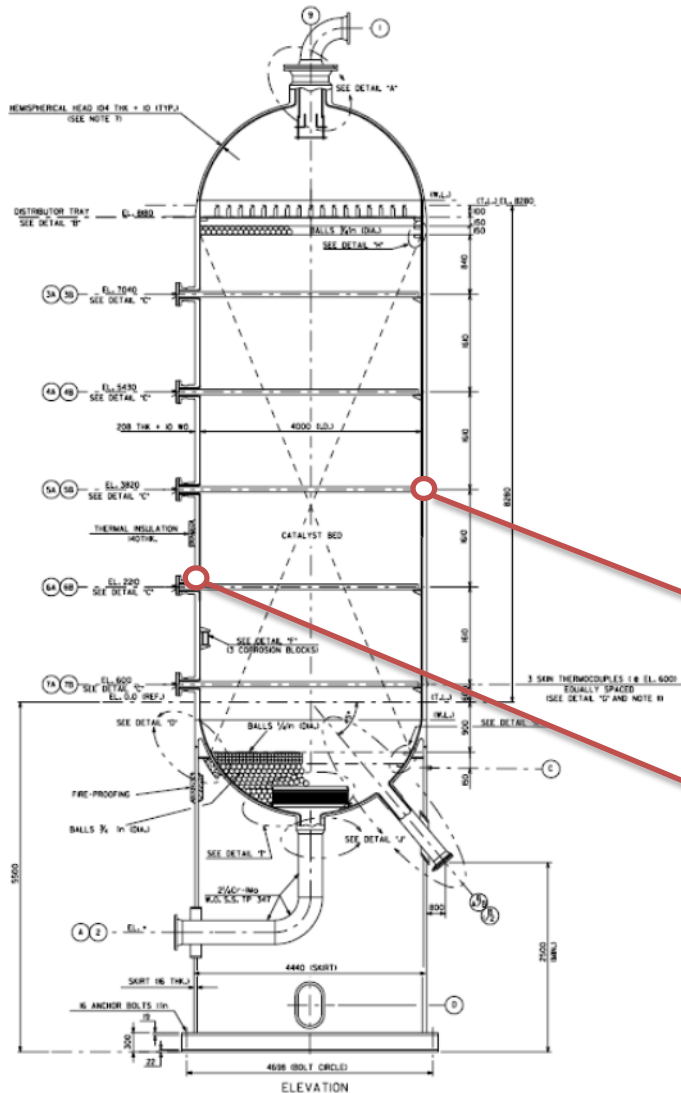
Causada pelo aprisionamento de gases não é comum em SAW, devido à proteção fornecida pelo fluxo. Quando ocorre a porosidade, que pode ser sob a forma de porosidade interna ou como depressões na superfície do cordão. As bolhas de gás que causam porosidade ocorrem devido à falta de proteção da poça de fusão do ambiente ou de contaminantes, tais como água,

óleo, graxa e sujeira. Outra causa de porosidade no SAW é velocidade de deslocamento excessiva.

4. METODOLOGIA

4.1 Fabricação do equipamento.

O equipamento fabricado foi um reator (vaso de pressão) com as seguintes características, conforme Figura 4.1:



Dados de projeto:

Código de Projeto: Asme VIII – Div.2

Requisitos Adicionais: API-RP 934 A

Pressão de projeto: 154,9 kgf/cm² (15,2 MPa)

Temperatura de projeto: 430°C

Diâmetro interno: 4,00 m

Comprimento: 8,28 m

Material: SA 387 Gr.22 Cl 2

Espessura do casco: 208 mm

Detalhe na Figura 4.2

Detalhe na Figura 4.3

Figura 4.1 – Desenho e características do reator

O processo de fabricação utilizado é o de soldagem a arco submerso (SAW), basicamente pelo seu rendimento de deposição.

4.2 Juntas soldadas para inspeção com ultrassom.

Basicamente as juntas soldadas no reator, com espessura de 208 mm, apresentam as seguintes geometrias:

- Juntas soldadas longitudinais e circunferenciais do casco do reator, conforme Figura 4.2.

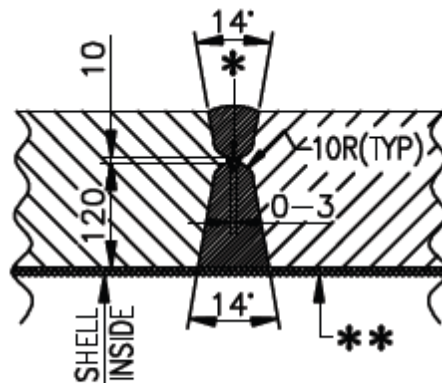


Figura 4.2 - Detalhe das juntas soldadas longitudinais e circunferenciais do casco do reator

- Juntas soldadas entre casco e conexões do reator, conforme Figura 4.3

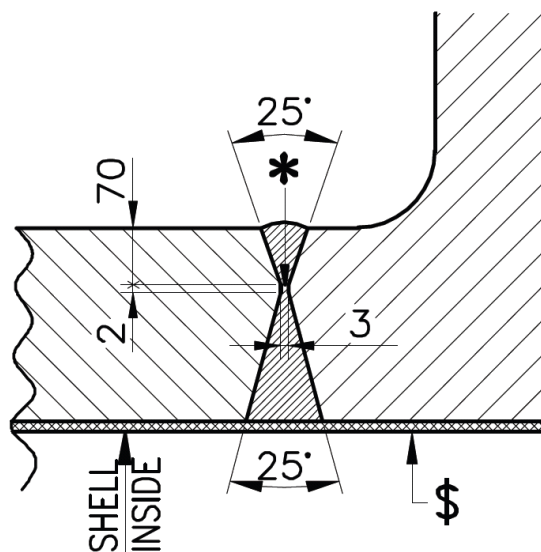


Figura 4.3 - Detalhe das juntas soldadas entre casco e conexões do reator

4.3 A escolha do ensaio do método de ensaio de ultrassom.

Tanto os métodos de ultrassom Phased Array e TOFD atendem aos requisitos do código de projeto em relação à substituição a radiografia, considerando que os equipamentos dos mesmos possuam registro das inspeções.

O método TOFD, por se fundamentar na difração ao invés da reflexão como no método Phased Array, pode ser considerado mais exato no dimensionamento das discontinuidades, algo em torno de 0,5 mm.

Então a escolha natural seria a opção pelo TOFD para inspeção de todas as juntas soldadas do reator, mas as limitações geométricas das juntas da Figura 4.3, não permitem o arranjo de dois transdutores do método TOFD, de ambos os lados da junta soldada, optando-se para o método Phased Array este tipo de junta.

Deste modo inspecionaram-se com TOFD as juntas da Figura 4.1 e com Phased Array as juntas da Figura 4.2.

4.4 O projeto do ensaio TOFD.

Nas juntas da Figura 4.2, para abranger todo o volume da junta soldada, realizaram-se 3 varreduras com par de transdutores de 45°, 60° e 70°, com distancia entre centros de transdutores (PCS) em 400mm, 325mm e 160mm respectivamente, conforme desenho esquemático da Figura 4.4.

Considerando que cada varredura passa-se um par de transdutores de mesmo ângulo pela junta, de modo a atender aos três ângulos é necessário passar três vezes longitudinalmente pela junta.

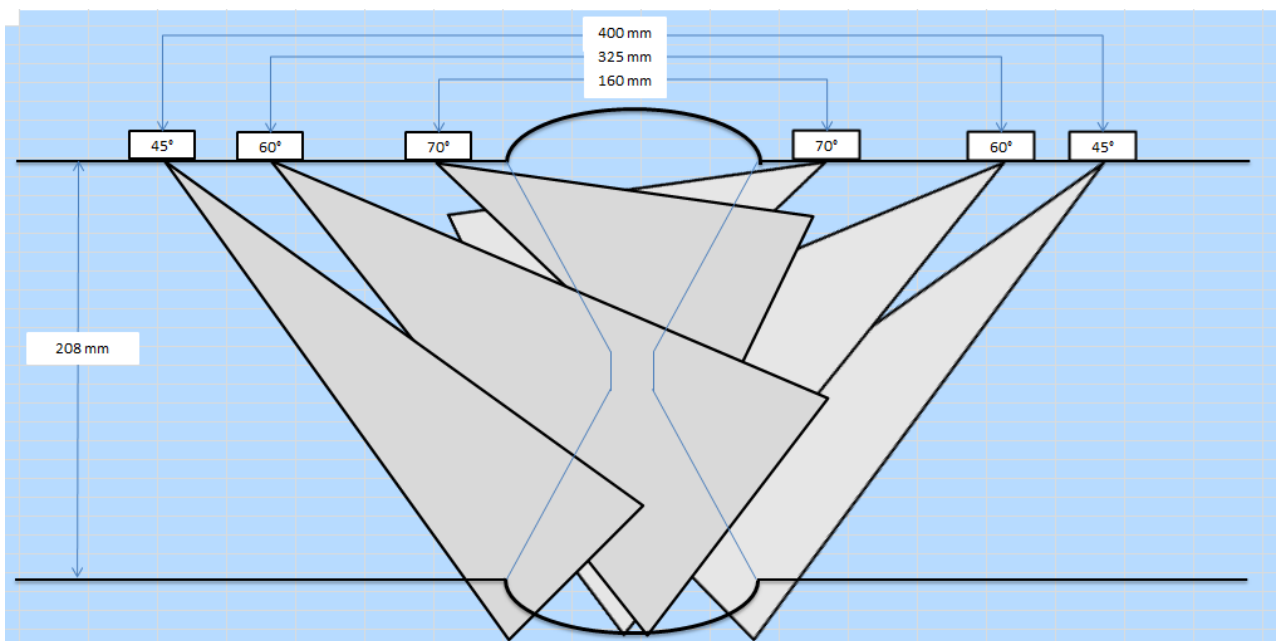


Figura 4.4 - Desenho esquemático das 3 varreduras com os respectivos transdutores

4.5 O projeto do ensaio Phased Array com as respectivas varreduras.

O plano de varredura consiste na verificação da intersecção do feixe com a geometria do chanfro, de modo a garantir-se que todo o volume da solda seja inspecionado.

Nas juntas soldadas do reator, conforme mostrado na Figura 4.8, com espessura de 208 mm, observa-se o projeto de varredura realizado, note-se que a geometria da junta somente permite a inspeção por um único lado, o que torna a necessidade de varredura mais abrangente.

A distancia dos transdutores ao centro da solda é chamado de “stand off”, neste caso precisa-se varrer quatro vezes com o mesmo transdutores em “stand off” deferentes, no caso 35 mm, 70 mm, 90 mm e 200 mm.

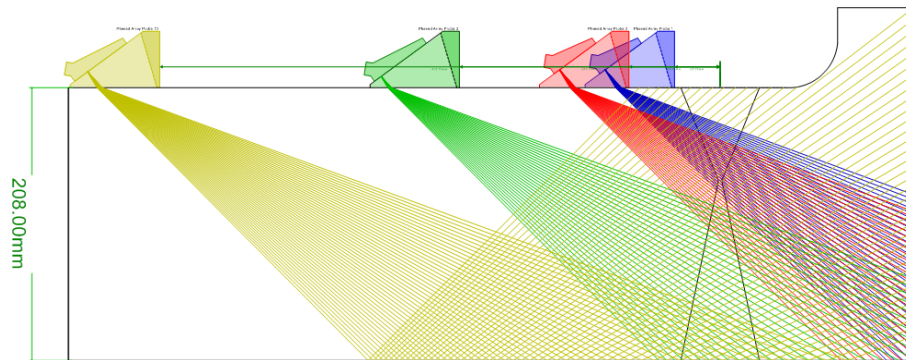


Figura 4.5 - Plano de varredura (scan plan)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Registros TOFD

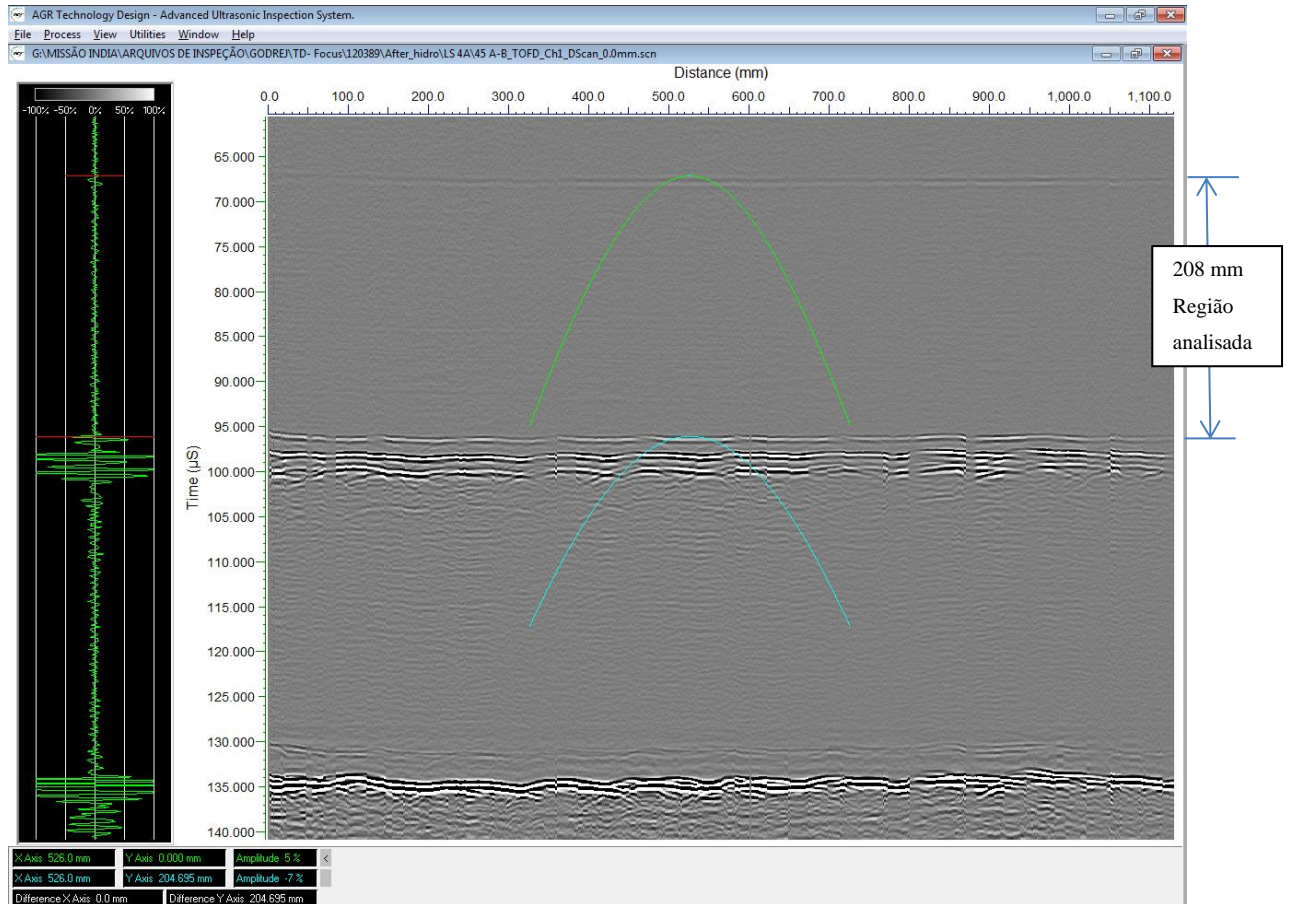


Figura 5.1 - Varredura realizada com o par de transdutores de 45°

Na Figura 5.1 observa-se entre as parábolas a espessura do material, como o ângulo do transdutor é 45°, nota-se o eco de fundo sendo uma linha mais pronunciada como consequência deste ângulo. Entre a espessura não há descontinuidade.

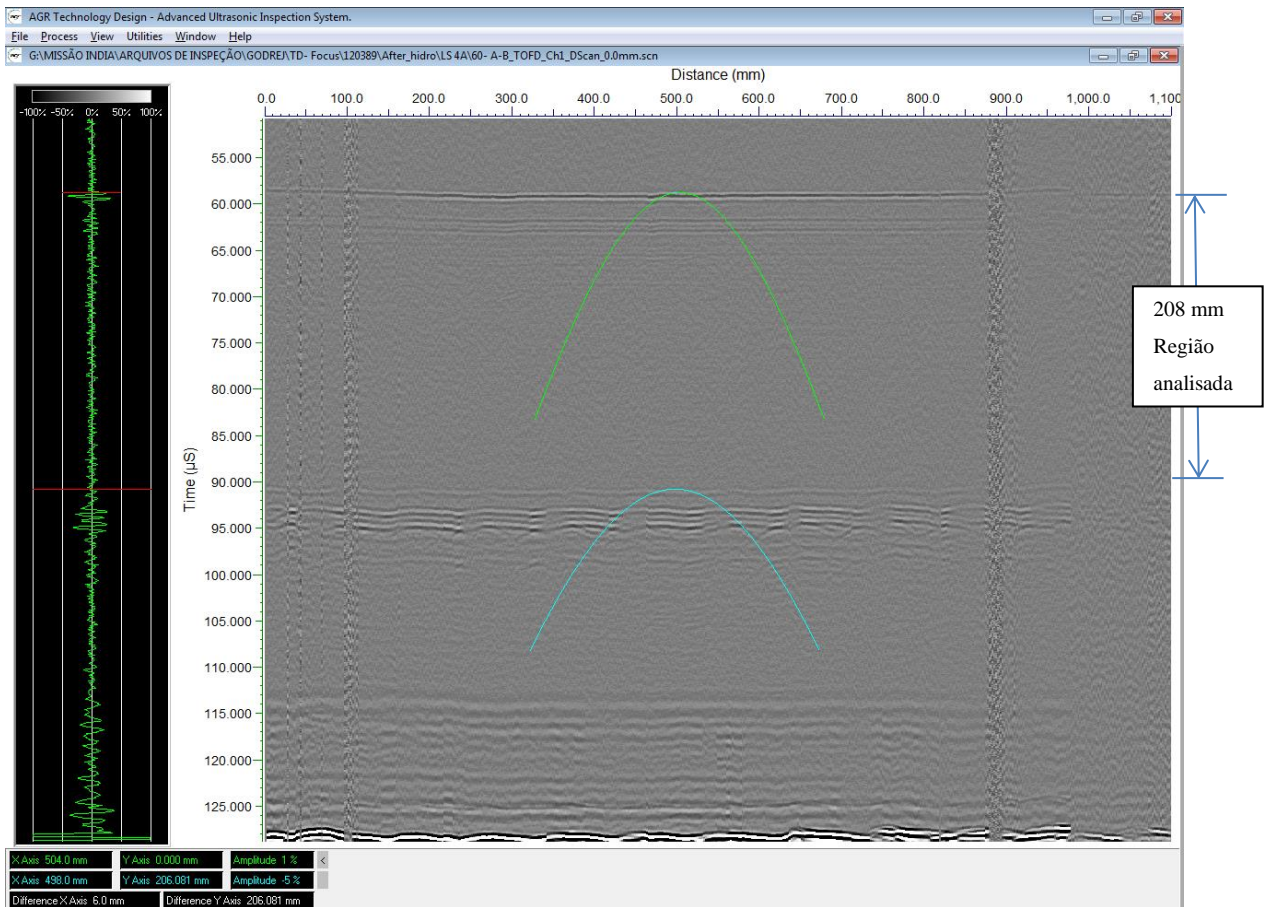


Figura 5.2 - Varredura realizada com o par de transdutores de 60°

Na figura 5.2 observa-se entre as parábolas a espessura do material, como o ângulo do transdutor é 60°, tanto o eco de fundo quanto a linha da superfície do material aparecem em mesma tonalidade como consequência deste ângulo nesta espessura. Entre a espessura não há descontinuidade.

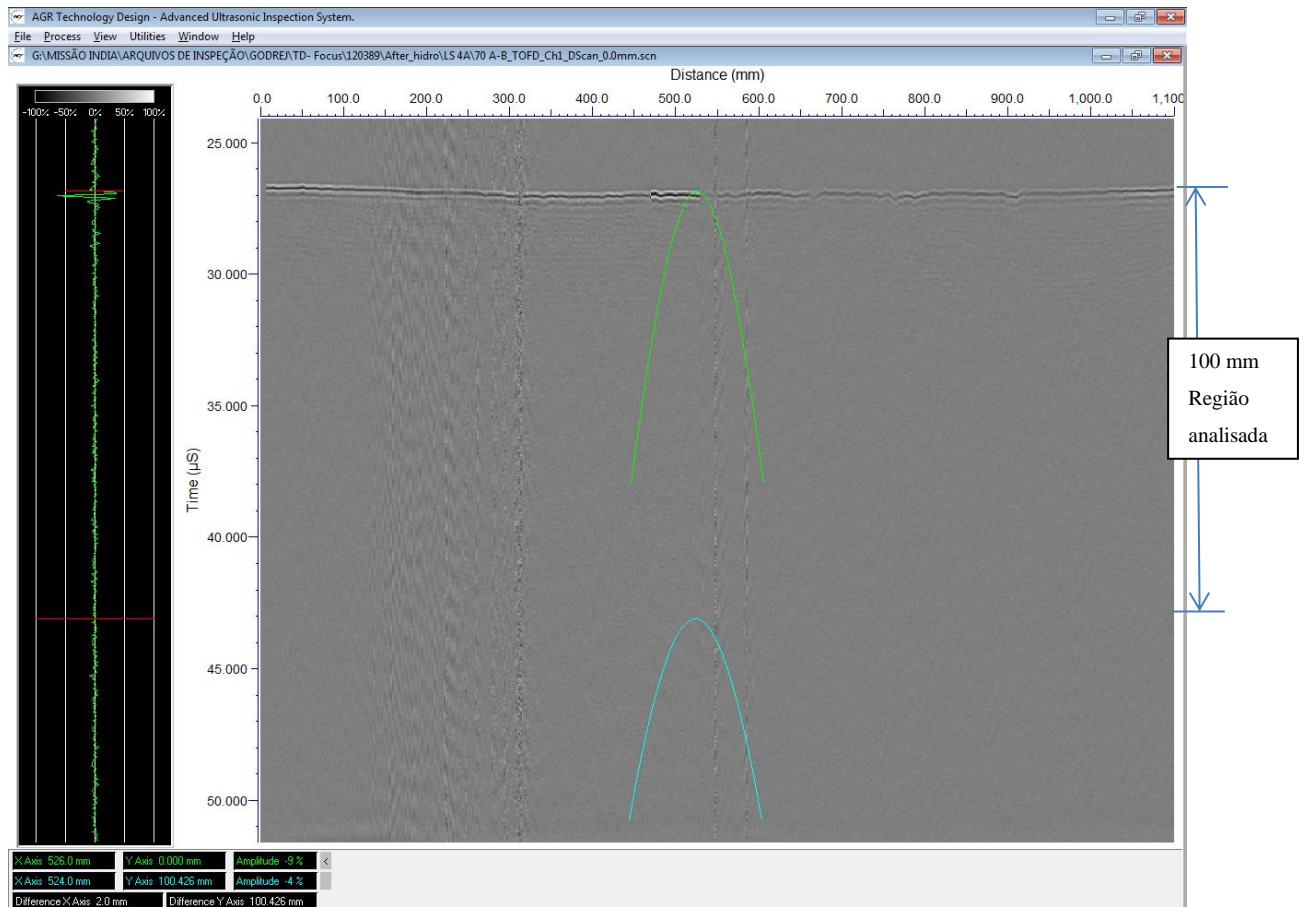


Figura 5.3 - Varredura realizada com o par de transdutores de 70°

Na Figura 5.3 observa-se entre as parábolas parte da espessura do material, em torno de 100mm, como o ângulo do transdutor é 70°, a onda lateral que corresponde a superfície do material aparece mais pronunciada como consequência deste ângulo nesta espessura. Nesta espessura não há descontinuidade.

Para o dimensionamento da descontinuidade caso houvesse, ou seja comprimento e altura, basta colocarmos as parábolas que constam por exemplo na Figura 5.3, para o dimensionamento eletrônico da mesma.

5.2 Registros Phased Array

Na avaliação dos registros, localiza-se a indicação através da imagem C-scan, Figura 5.4, onde é realizado o dimensionamento do seu comprimento posicionando-se os cursores nos extremos da descontinuidade onde ocorre a queda dos 6 dB's. A queda dos 6 dB's trata-se de um método bastante tradicional em ultrassom, que consiste na medição da amplitude do sinal de reflexão e maximizá-lo, com ajuste de ganho, no instrumento ou computador para que

atinja 100 % da tela de visualização, após isto movimentar-se o cursor até que o sinal diminua para 50 % da tela, este ponto é considerado a borda da descontinuidade.

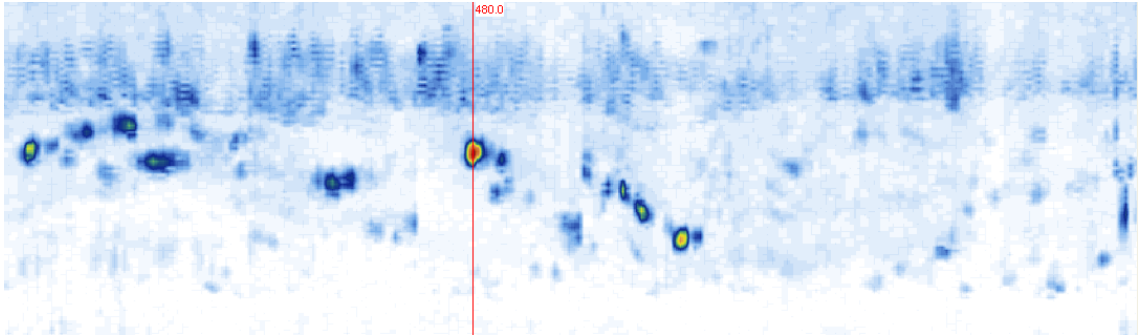


Figura 5.4 - Vista C-SCAN

Na vista S-Scan, Figura 5.5, é realizado o dimensionamento da altura a partir do posicionamento dos cursores nos extremos inferior e superior, conforme a queda dos 6 dB's verificados a partir da vista A-Scan, Figura 5.6.

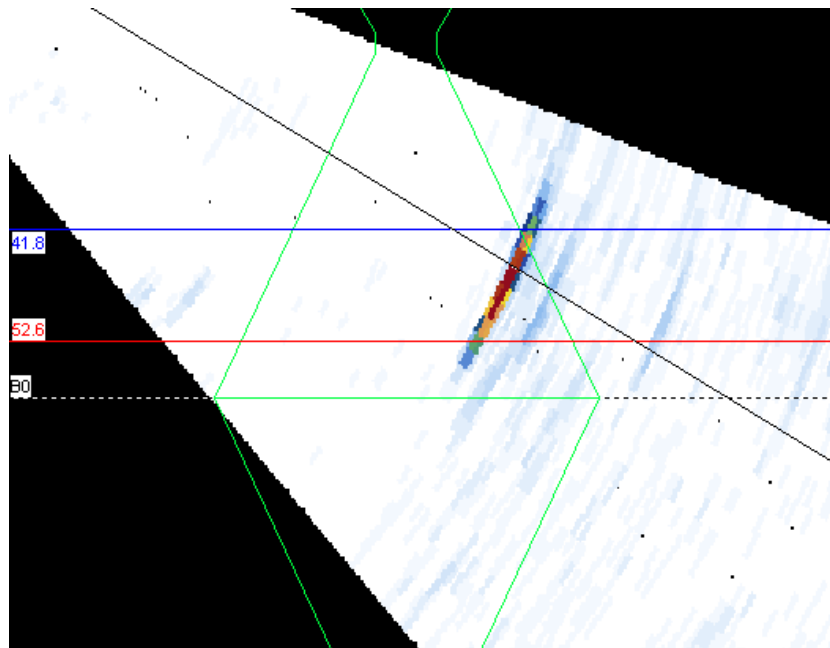


Figura 5.5 - Vista S-SCAN

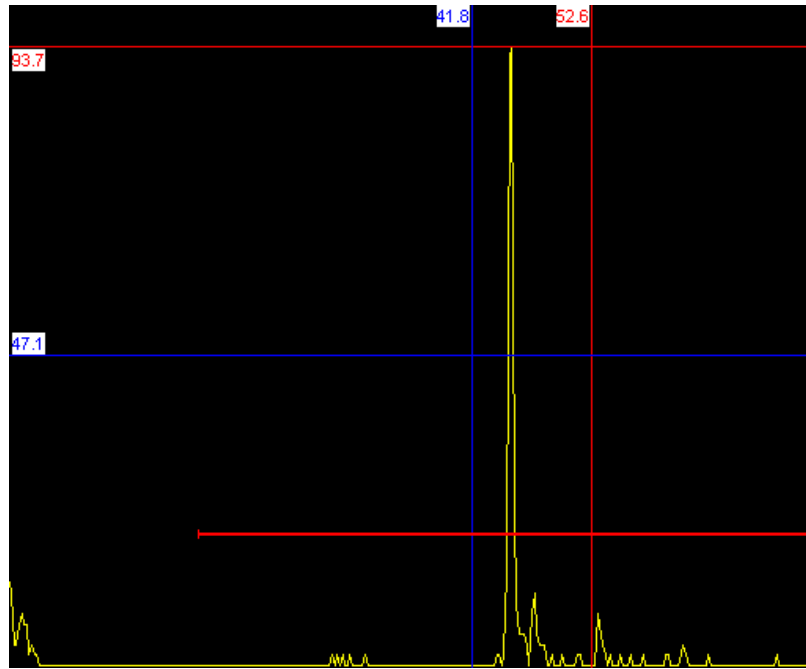


Figura 5.6 - Vista A-SCAN

Na Figura 5.5, a altura da descontinuidade é o valor de 52,6 mm menos 41,8 mm que resulta em 10,8 mm, levando em conta o aspecto circunferencial mostrado na Figura 5.4, considera-se o comprimento também em 10,8 mm e sendo uma descontinuidade imersa, pelo critério de aceitação das descontinuidades na Tabela 5.1, esta estaria aprovada.

5.3 Critério de aceitação das descontinuidades do ultrassom

Conforme critério de aceitação do código de projeto do equipamento, no caso o ASME VIII Div 2, que trata de tamanho admissível de descontinuidades em relação a duas classificações prévias que são: descontinuidades superficiais e descontinuidades imersas na espessura.

Para espessura de 208 mm, teremos o seguinte critério, conforme Tabela 5.1:

Tabela 5.1 - Tamanho máximo de descontinuidades, conforme critério do ASME.

Descontinuidade superficial		Descontinuidade imersa	
Comprimento (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Altura (mm)
832	4,0	832	8,3
83,2	4,2	91,5	9,2
45,8	4,6	52,0	10,4
34,7	5,2	40,2	12,1
29,1	5,8	34,3	13,7
27,5	6,9	31,6	15,8
26,3	7,9	30,5	18,3
26,1	9,2	30,3	21,2
26,0	10,4	30,2	24,1
23,6	10,6	31,0	27,9
21,6	10,8	31,6	31,6

A utilização da tabela 5.1 significa o tamanho máximo do retângulo que a descontinuidade colocada dentro deste estaria aprovada.

Por exemplo: Supondo uma descontinuidade no interior da solda com comprimento de 832 mm seria considerada aprovada se a sua altura fosse menor que 8,3 mm. Para o caso desta descontinuidade fosse ligada a superfície do equipamento e também tivesse 832 mm de comprimento, a mesma estaria aprovada se a sua altura fosse menor que 4 mm, ou seja para descontinuidades ligadas a superfície o critério é mais severo.

5.4 Comparativo do ultrassom realizado no reator com a radiografia.

- Não houve exposição à radiação durante a execução do ensaio, ou seja, o ensaio não interrompeu serviços paralelos.
- Pelos princípios fundamentais dos ensaios, radiografia é mais sensível a descontinuidades volumétricas e ultrassom a descontinuidades perpendiculares a direção do feixe das ondas mecânicas. Concluindo ultrassom é mais sensível a trincas, descontinuidade mais temida em qualquer processo de soldagem.
- Todos os registros gerados estão disponíveis no computador, podendo ser localizados facilmente e disponíveis para quaisquer dúvidas e futuras comparações dimensionais, enquanto com radiografia teríamos um filme armazenado em meio físico.

- As descontinuidades puderam ser vistas durante a execução do ensaio, muitas duvidas forma resolvidas de imediato, no ensaio radiográfico isto gera um atraso de aproximado de 6 horas devido ao tempo de revelação do filme.
- As técnicas Phased Array e TOFD atenderam aos requisitos prescritos pela norma de projeto do reator em relação ao controle de qualidade da soldagem.

6. CONCLUSÃO

O trabalho demonstra que dentro dos critérios da própria norma de projeto do equipamento é possível realizar a substituição da radiografia pelo ensaio ultrassônico.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilização das mesmas técnicas de ensaios não destrutivos, TOFD e Phased Array, no acompanhamento em operação do equipamento, para eventuais danos por hidrogênio em alta temperatura.

8. REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 934A**: Materials and Fabrication of 2 1/4Cr-1Mo, 2 1/4Cr-1Mo-1/4V, 3Cr-1Mo, 3Cr-1Mo-1/4V Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High Pressure Hydrogen Service, Second Edition, 2008.

ASME INTERNATIONAL (BPVC). **2010 ASME Boiler & Pressure Vessel Code: IX** – Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators, 2010.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API TR 934D**: Technical Report on the Materials and Fabrication Issues of 1 1/4Cr-1/2Mo and 1Cr-1/2Mo Steel Pressure Vessels, First Edition, 2010.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook**: Volume 6 Welding, Brazing, and Soldering. 1998.

GINZEL, E. A. **Automated Ultrasonic Testing for Pipeline Girth Welds: A Handbook**. R/D Tech document number DUMG070A. Waltham, MA: Olympus NDT, Jan. 2006.