

UFMG UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Dissertação de Mestrado

Ensaio por ultrassom com as técnicas convencional A – Scan e *Phased Array* em juntas soldadas dissimilares de aços carbono e aço inoxidável austenítico

Autor: Antônio Claret da Costa

Orientador: Paulo J. Modenesi

Junho de 2011

## Sumário

Sumário.....	i
Siglas e abreviaturas: .....	vi
2 - Objetivo .....	5
3 - Revisão bibliográfica. ....	6
3.1 Soldabilidade de juntas dissimilares com metal de solda de aços inoxidáveis austeníticos.....	6
3.2 Soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos. ....	9
3.3. História dos Métodos Acústicos.....	11
3.4 Principais conceitos da tecnologia ultrassônica de <i>Phased Array</i> .....	13
3.5 Técnica <i>Phased Array</i> para o ensaio ultrassônico em soldas austeníticas .....	31
3.6 Qualificação de procedimentos de ensaio por ultrassom.....	37
4 - Materiais e Métodos .....	42
4.1. Introdução .....	42
4.2. Materiais.....	42
4.3. Equipamentos e Laboratórios.....	43
4.4. Metodologia.....	45
5. Resultados e discussões .....	56
5.1 Caracterização da junta soldada .....	56
5.2 Ensaio de dureza .....	60
5.3 Análise Química .....	60
5.4 Teste de corrosão intergranular.....	61
5.5 Avaliação dos resultados dos ensaios para caracterização metalográfica, análise química e dureza da junta soldada.....	62
5.6 Ensaio por ultrassom nas peças de teste .....	64
6 Conclusões .....	101
7 Sugestões para trabalhos futuros.....	103
7.1 Contribuição dos resultados da pesquisa na aplicação do ensaio em equipamentos PETROBRÀS fabricados por juntas dissimilares entre aço carbono e aços inoxidáveis austeníticos.....	103
7.2 - Contribuição dos resultados sobre a inovação tecnológica. ....	103
8 Referências Bibliográficas.....	104

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Torre de Destilação Atmosférica – Bocais – Cortesia DELP Engenharia .....	3
Figura 3.1 - Corrosão intergranular <sup>(8)</sup> .....	7
Figura 3.2 - Diagrama de SCHAEFFLER <sup>(10)</sup> .....	8
Figura 3.3 - Exemplo da aplicação da tecnologia de ultrassom <i>Phased Array</i> em um componente de geometria complexa <sup>(13)</sup> . .....	17
Figura 3.4 - Formação do feixe sônico pelo controle na variação do tempo de atraso para emissão e recepção de ondas de múltiplos cristais (mesma fase e amplitude). .....	18
Figura 3.5 - Componentes básicos de um sistema <i>Phased Array</i> e sua interação interna. ....	19
Figura 3.6 - Lei de Snell – Refração das ondas longitudinais e transversais.....	20
Figura 3.7 - Exemplo de visualização de uma onda transversal frontal em um bloco de vidro com um transdutor de feixe linear de 7,5 MHz, com 12 elementos de 2,0mm de largura. A onda longitudinal refratada de 40° é seguida pela onda transversal de 24°.....	20
Figura 3.8 - Princípio focal do feixe para incidência normal (a) e angular (b). ....	22
Figura 3.9 - Princípio da varredura eletrônica para varredura de ângulo reto <sup>(13)</sup> .....	23
Figura 3.10 - Exemplo de detecção de corrosão e mapeamento 3-D feito através de varredura eletrônica de ângulo zero usando um transdutor de feixe linear, 10MHz de 64 elementos, p=0,5mm <sup>(13)</sup> .....	23
Figura 3.11 - Exemplo de varredura eletrônica com ondas longitudinais para detecção de trincas em um forjado, usando um transdutor de 15°e 5MHz, n = 32, p=1,0mm <sup>(13)</sup> .....	24
Figura 3.12 - Exemplo de visualização de um ensaio por ultrassom de varredura setorial ( <i>S-Scan</i> ) com correção de volume, detectando um grupo de trincas de corrosão sob tensão. (faixa: 33°- 58°).....	25
Figura 3.13 - Esquerda: princípios da profundidade focal. Centro: dimensionamento das pontas de trincas de corrosão sob tensão (stress-corrosion crack – SCC) com ondas longitudinais de 12MHz e incidência normal, usando as leis da profundidade focal. Direita: comparação por macrografia da extremidade da trinca. <sup>(13)</sup> .....	25
Figura 3.14 - Exemplo de tempo de atraso e formato para uma faixa angular de 90° (-45° a +45°). Neste a sonda <i>Phased Array</i> possui 32 elementos e foi programada	

para gerar ondas longitudinais para a detecção de cinco furos laterais. O transdutor não possui cunha e está em contato direto com a peça de teste. .26	
Figura 3.15 - Tempos de atraso (esquerda) e princípios de profundidade de varredura (direita) para um transdutor linear de 32 elementos focando a 15,0 mm, 30,0 mm e 60,0 mm, utilizando ondas longitudinais.....27	27
Figura 3.16 - Dependência do tempo de atraso em relação ao tamanho do elemento.....28	28
Figura 3.17 - Esquerda: exemplo de posicionamento dos elementos e profundidade focal em um transdutor sem cunha (ondas longitudinais entre 15° e 60°). Direita: Exemplo da dependência do tempo de atraso no ângulo gerado.....28	28
Figura 3.18 - Exemplo do tempo de atraso e seu formato para detecção de três furos laterais com ondas de corte. A sonda possui 16 elementos e está montada em uma cunha de Plexiglas® de 37° (ângulo natural no aço é de 45°).....29	29
Figura 3.19 - Exemplo da dependência do tempo de atraso na posição do elemento e ângulo de refração para um transdutor <i>Phased Array</i> em uma cunha Plexiglas® de 37° ( $H_1=5,0\text{mm}$ ). .....30	30
Figura 3.20 - Dados característico de um transdutor <i>Phased Array</i> de ondas longitudinais (15). Variação da amplitude do sinal com o ângulo de varredura do feixe sônico .....33	33
Figura 3.21 - Amplitude das ondas longitudinais em relação ao tempo de percurso, para cada ângulo de incidência, gerada no transdutor <i>Phased Array</i> .....34	34
Figura 3.22 - Esquema experimental para a atualização do ensaio <sup>(16)</sup> . .....35	35
Figura 3.23 - Imagem dos entalhes TD (Tempo x Deslocamento) gerada com um ângulo de incidência de 45° usando um transdutor de ondas longitudinais <sup>(16)</sup> .....36	36
Figura 3.24 - Imagem dos entalhes TD (Tempo x Deslocamento) gerada com um ângulo de incidência de 70° usando um transdutor de ondas longitudinais .....37	37
Figura 3.25 - Curva DAC .....38	38
Figura 4.1 - Aparelho de ultrassom Olympus Omniscan MX. ....44	44
Figura 4.2 - Peça A – Croqui.....46	46
Figura 4.3 – Foto do bloco padrão para calibração da sensibilidade do ensaio por ultrassom retirado da peça A. ....46	46
Figura 4.4 - Peça B - Desenho distribuição das descontinuidades artificiais .....47	47
Figura 4.5 - Peça B após o corte do tubo rente à junta soldada .....48	48
Figura 4.6 – Bloco padrão para o ensaio por ultrassom .....49	49
Figura 4.7 - Corte dos corpos de prova para os ensaios metalográficos .....50	50
Figura 4.8 – Seção transversal dos corpos de prova .....50	50
Figura 4.9 – Retirada dos corpos de prova para micrografia .....52	52

Figura 4.10 – Croqui de varredura da junta no software <i>Beam Tools</i> .....	53
Figura 5.1 – Macroestrutura da junta. Peça horizontal: aço carbono caldeado. Peça vertical: aço inoxidável austenítico. Ataque: Marble.....	56
Figura 5.2 - Microestrutura do MB1 (aço carbono) - ataque nital 3%: ampliação original 200 vezes .....	57
Figura 5.3 - Microestrutura da ZAT 1. Ataque: nital 3%. Ampliação original 200 vezes. ....	58
Figura 5.4 - Microestrutura da ZAT 2. Ataque: Ácido oxálico 10%. Ampliação original 200 vezes. ....	58
Figura 5.5 Microestrutura do Metal Soldado. Ataque eletrolítico: Ácido oxálico 10%. Ampliação original 200 vezes. ....	59
Figura 5.6 Microestrutura do MB 2. Ataque Eletrolítico: Ácido oxálico 10%. Ampliação original 200 vezes. ....	59
Figura 5.7 - Resultado do teste de corrosão intergranular. Ataque: Ácido oxálico 10% eletrolítico. Ampliação 200 vezes.....	62
Figura 5.8 - Incidência simultânea de ondas longitudinais e transversais .....	65
Figura 5.9 Ecos de duas reflexões simultâneas no mesmo ponto na linha de varredura, provenientes de dois refletores posicionados de forma que o percurso sônico de um seja o dobro do outro. ....	67
Figura 5.10 – Detecção dos furos usando cabeçote SE.....	68
Figura 5.11 – Detecção dos furos usando cabeçote 45°.....	69
Figura 5.12 – Detecção dos furos 3 com cabeçote de 60°.....	70
Figura 5.12 (Continuação) – Detecção dos furos 3 com cabeçote de 60°.....	71
Figura 5.13 – Posicionamento dos transdutores – incidência direta.....	72
Figura 5.14 – Transdutor com coluna d’água. ....	73
Figura 5.15 – Dispositivo com coluna d’água.....	73
Figura 5.16 – Sapata de acrílico preenchida com água. ....	74
Figura 5.17 – Lado aço carbono, ponto 1: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).....	76
Figura 5.18 – Lado aço carbono, ponto 2: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).....	77
Figura 5.19 – Lado aço carbono, ponto 3: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).....	78
Figura 5.20 – Lado aço inoxidável, ponto 1: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).....	79
Figura 5.21 – Lado aço inoxidável, ponto 2: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).....	80

Figura 5.22 – Lado aço inoxidável, ponto 3: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).....	81
Figura 5.23 – Comparação dos resultados entre o ensaio por ultrassom <i>Phased Array</i> e pelo ensaio radiográfico. Descontinuidades cor vermelha detectadas pelo ensaio radiográfico e cor azul detectadas pelo ensaio por ultrassom. ....	83
Figura 5.24 – Imagem descontinuidade 01 do intervalo de 0 a 100 mm.....	84
Figura 5.25 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 0 a 100 mm.....	85
Figura 5.26 – Imagem da descontinuidade 03 do intervalo de 0 a 100 mm.....	86
Figura 5.27 – Imagem da descontinuidade 04 do intervalo de 0 a 100 mm.....	87
Figura 5.28 – Imagem da descontinuidade 01 do intervalo de 100 a 200 mm.....	88
Figura 5.29 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 100 a 200 mm.....	89
Figura 5.30 – Imagem da descontinuidade 01 do intervalo de 200 a 300 mm.....	90
Figura 5.31 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 200 a 300 mm.....	91
Figura 5.32 – Imagem da descontinuidade 03 do intervalo de 200 a 300 mm.....	92
Figura 5.33 – Imagem da descontinuidade 01 do intervalo de 300 a 400 mm.....	93
Figura 5.34 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 300 a 400 mm.....	94
Figura 5.35 – Imagem da descontinuidade 03 do intervalo de 300 a 400 mm.....	95
Figura 5.36 – Imagem da descontinuidade 01 do intervalo de 400 a 490 mm.....	96
Figura 5.37 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 400 a 490 mm.....	97
Figura 5.38 – Imagem da descontinuidade 03 do intervalo de 400 a 490 mm.....	98
Figura 5.39 – Imagem da descontinuidade 04 do intervalo de 400 a 490 mm.....	99
Figura 5.40 – Imagem da descontinuidade 05 do intervalo de 400 a 490 mm.....	100

**Siglas e abreviaturas:**

*A-SCAN* – Sistema de apresentação da imagem na tela do aparelho por ecograma. Amplitude x distância da reflexão sobre uma linha de varredura.

*B-SCAN* – Sistema de apresentação da imagem na tela do aparelho da seção transversal da peça, ou peça em corte através de relação tempo x distância.

*C-SCAN* - Sistema de apresentação da imagem na tela do aparelho representando a planta ou vista superior da peça.

*S-SCAN* - Sistema de apresentação da imagem na tela do aparelho com varredura setorial representando a seção transversal da peça.

Bocais de Vaso: Conexões flangeadas utilizadas para acoplar sistema de tubulações ao vaso.

$Cr_{eq}$  – Cromo equivalente.

Curvas DAC – Curvas de decaimento da energia com a distância.

END – Ensaio Não Destrutivo.

FN – Número de ferrita (“ferrite number”).

GMAW – Gas Metal Arc Welding – processo de soldagem MIG/MAG.

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding – processo de soldagem TIG.

HIC – Hydrogen Induced Cracks, trincas induzidas por hidrogênio.

$Ni_{eq}$  – Níquel equivalente.

TOFD – Técnica de Ultrassom que usa o princípio da difração do som para detecção de descontinuidades (Time of Flight Diffraction).

ZAT – Zona Afetada Termicamente.

## Resumo

O ensaio não destrutivo em juntas soldadas de bocais de torres de destilação, fabricadas com chapas cladeadas proporciona um grande desafio a gestão de qualidade, devido às limitações das técnicas aplicáveis como o ultrassom e ensaio radiográfico, que na maioria das vezes não são capazes de atender completamente os requisitos normativos. O presente projeto teve por objetivo analisar a aplicabilidade do ensaio por ultrassom utilizando-se ondas longitudinais e a técnica *Phased Array* como possíveis soluções para o ensaio destes bocais de forma a atender os referidos requisitos. Os testes realizados demonstram ser o *Phased Array* a técnica de maior confiabilidade para os citados equipamentos tendo em vista seus resultados comparados aos das demais técnicas que se mostraram insuficientes ou completamente inaplicáveis.

**Abstract**

The non-destructive testing of internal structure of welded joints of nozzles in distillation towers, made of clad sheets, provides a great challenge to quality management, due to limitations of applicable techniques such as ultrasonic and radiographic testing, which in most cases are not able to fully meet regulatory requirements. This project aimed to evaluate the applicability of the test by using ultrasound longitudinal waves and Phased Array techniques and possible solutions for the testing of these nozzles to meet those requirements. Tests show the phased array is the most reliable technique for the listed equipment in order of their results compared to other techniques that are insufficient or completely inapplicable.

## 1 - Introdução

A garantia da qualidade em vasos de pressão, torres de destilação atmosférica, trocadores de calor, filtros, condensadores, reatores de plantas químicas, refinaria de petróleo e de utilidades em plataformas de prospecção é obtida pela rigorosa aplicação e cumprimento dos requisitos mandatórios das normas contratuais de projeto, fabricação e inspeção dos equipamentos. Estas normas contêm requisitos para aplicação de ensaios não destrutivos nas juntas soldadas e exigem a qualificação dos procedimentos de soldagem em uma junta de teste, utilizando todos os parâmetros aplicados na soldagem. Posteriormente, desta junta de teste devem ser retirados corpos de prova, que devem ser ensaiados para constatar as propriedades mecânicas, físicas e a composição química do metal soldado e da zona afetada termicamente (ZAT).

As propriedades mecânicas e a análise química apresentadas nos relatórios dos ensaios devem atender às normas contratuais de fabricação e às especificações de engenharia. As propriedades mecânicas devem ser superiores às dos materiais que estão sendo soldados (metais de base).

Para obter as propriedades desejadas, deve-se fazer uma seleção adequada dos consumíveis antes da soldagem e a utilização de parâmetros de soldagem otimizados, principalmente, velocidade, intensidade de corrente, tensão, modo de transferência de metal e controle de temperaturas.

O código americano de fabricação de vaso de pressão (ASME VIII Div I) <sup>(1)</sup>, adotado pela PETROBRAS, exige que os parâmetros utilizados na soldagem da junta estejam de acordo com um procedimento de soldagem qualificado conforme os requisitos do código ASME IX <sup>(2)</sup>. O código ASME VIII Div. I <sup>(1)</sup> exige a qualificação de todos os soldadores envolvidos na fabricação e a aplicação de ensaios não destrutivos nas soldas compostas por partes pressurizadas. A qualificação dos soldadores deve ser conforme o código ASME IX <sup>(2)</sup>.

As indústrias nacionais de fabricação de equipamentos petroquímicos têm conhecimento e domínio suficientes sobre os requisitos de soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos e de juntas dissimilares. Tais requisitos são contratuais e mandatórios nas normas de fabricação e nas especificações de engenharia dos usuários destes equipamentos, como é o caso da PETROBRAS, que possui suas próprias normas de

fabricação, específicas para cada tipo de equipamento (N 268 F<sup>(3)</sup>, N 1706 F<sup>(4)</sup>, N 133 G<sup>(5)</sup>).

A maioria destes fabricantes já possui especificações de procedimentos qualificados (EPS) e registros da qualificação dos procedimentos de soldagem (RQPS) para execução destas soldas. Nestes RQPS constam os resultados obtidos através de ensaios de tração, dobramento e testes de impacto tipo Charpy (para vasos que operam a temperaturas abaixo de 20°C). Normalmente, contudo, não constam os resultados da caracterização metalúrgica destas soldas, quanto à sua eficácia em resistir a meios agressivos na presença de tensão e conseqüentemente à formação de trincas durante a operação do equipamento.

O teste de corrosão intergranular ou sensitização (conforme requisitos da norma ASTM E 262<sup>(6)</sup>) não é requisito mandatório do código ASME VIII DIV 1<sup>(1)</sup>, nem das normas da PETROBRAS, mas pode ser um requisito adicional nas especificações de engenharia. Tal teste deve ser aplicado à seção transversal das juntas soldadas com metal de solda austenítico de vasos de pressão que operam em meios contaminados pelo ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S). Este teste detecta a formação de carboneto de cromo nos contornos de grãos, o que normalmente aumenta a susceptibilidade à formação de trincas durante a operação do equipamento em meios corrosivos.

Torres de destilação (Fig.1.1), fabricadas por chapas cladeadas, devem ser soldadas seguindo as normas específicas do usuário do equipamento e o código ASME VIII Div. I<sup>(1)</sup> e a norma PETROBRAS N 133 G<sup>(5)</sup>. Os bocais destas torres para conexão das tubulações também devem ter revestimento anticorrosivo e, normalmente, são fabricados de chapas calandradas, porém limitados a diâmetros superiores a 305 mm (12"). Bocais com diâmetros menores que 305 mm (12") são fabricados de tubos de aço inoxidável austenítico.

Um desafio para a garantia da qualidade das juntas soldadas destes bocais é a baixa confiabilidade dos ensaios não destrutivos requeridos nas normas de fabricação PETROBRAS N-268-F<sup>(3)</sup>, N-1706-F<sup>(4)</sup> e ASME VIII DIV I<sup>(1)</sup>, para a detecção de descontinuidades internas, sejam de natureza física ou metalúrgica.

Descontinuidades superficiais são facilmente detectadas pelo ensaio por líquido penetrante, porém a detecção de descontinuidades internas pelos métodos de ensaio por

ultrassom ou por radiografia nem sempre é confiável e está sujeito a muitas limitações técnicas.

O ensaio radiográfico tem a sua aplicação limitada à juntas de topo e, portanto, não se aplica a bocais soldados. Além disso, este ensaio tem sua sensibilidade diminuída para detecção de pequenas descontinuidades, tais como microtrincas e falta de fusão, principalmente em juntas soldadas com espessuras superiores a 38 mm.

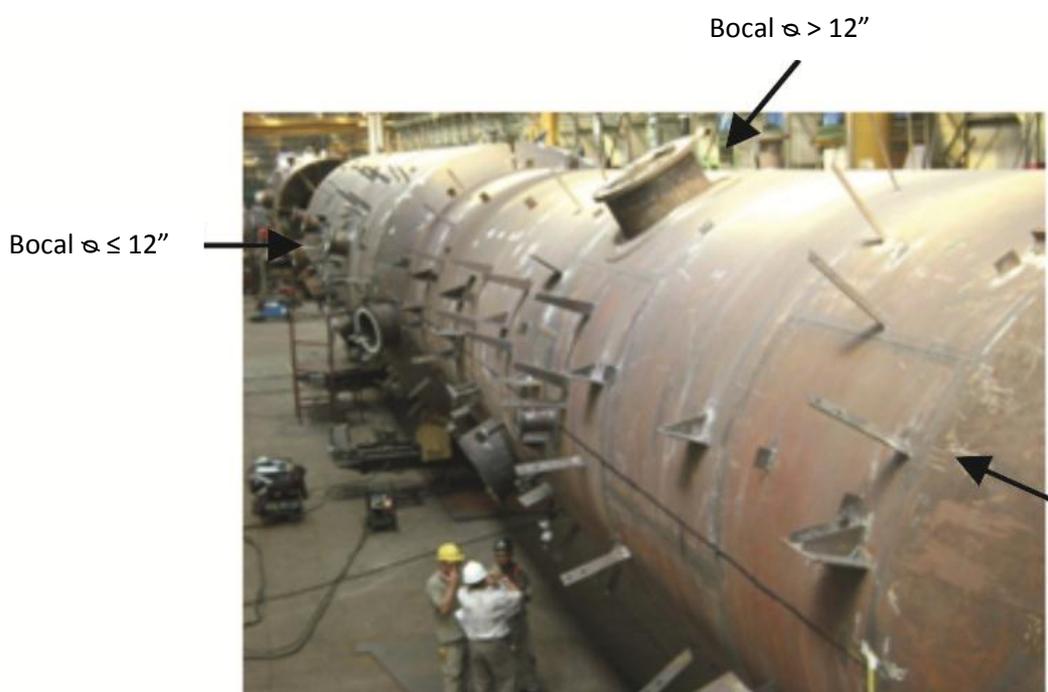


Figura 1.1 - Torre de Destilação Atmosférica – Bocais – Cortesia DELP Engenharia

A aplicação do ensaio por ultrassom independe da espessura e é bastante sensível à detecção de micro trincas, porém tem sua capacidade de detecção de pequenas descontinuidades prejudicada em soldas de aços inoxidáveis austeníticos.

A estrutura bruta de fusão do metal soldado austenítico é composta por grandes grãos colunares, que causam a reflexão do feixe sônico em seus contornos e a formação de ruídos que se confundem com os sinais de pequenas descontinuidades. Nestas juntas, o ensaio fica limitado pelo alinhamento dos grãos e pela formação de precipitados nos

contornos dos grãos. Estas características causam interferência e desvios no feixe sônico, tais como espalhamento, dispersão, atenuação sônica e mudança de modo de onda. Estas interferências, por sua vez, tornam o ensaio convencional, mesmo utilizando transdutores angulares de ondas transversais com baixa frequência (menores ou iguais a 2 MHz) inviável. Portanto, há necessidade de se desenvolver uma técnica confiável para aplicação do ensaio por ultrassom na referida junta.

Neste contexto, o presente trabalho pretende avaliar técnicas do ensaio por ultrassom que podem ser adotadas para garantir a qualidade das juntas soldadas dissimilares, compostas por bocais de aço inoxidável austenítico com aço carbono.

## 2 - Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar, dentre as técnicas disponíveis do ensaio por ultrassom, aquela mais confiável para detecção de descontinuidades internas, a fim de garantir a sanidade do metal soldado e da ZAT em juntas soldadas dissimilares compostas por aço inoxidável austenítico e aço carbono, soldadas com metais de adição austeníticos.

Para atingir este objetivo, os seguintes objetivos específicos foram buscados:

Caracterizar a estrutura da junta soldada através de testes metalográficos, ensaios de dureza, análise química e testes de corrosão intergranular.

Estudar a interferência desta estrutura na relação sinal–ruído do ensaio por ultrassom.

Estudar a viabilidade e confiabilidade do ensaio convencional para avaliar este tipo de junta, considerando a seleção de frequências e o tipo de onda (longitudinal e transversal) a serem utilizadas no ensaio.

Desenvolver e confeccionar uma sapata acústica, preenchida com água, para executar o ensaio somente com onda longitudinal, sem interferência da onda transversal.

Estudar a viabilidade e confiabilidade do ensaio utilizando a técnica *Phased Array*.

### 3 - Revisão bibliográfica.

#### 3.1 Soldabilidade de juntas dissimilares com metal de solda de aços inoxidáveis austeníticos.

As técnicas e processos de soldagem utilizados em juntas dissimilares são as mesmas utilizadas para o aço carbono comum e para os aços inoxidáveis austeníticos. A soldagem pode ser executada pelos processos SMAW, GMAW, SAW, FCAW e GTAW ou combinações destes. O processo GTAW é mais indicado dentre os citados, para a soldagem da raiz das juntas de tubulações e dos bocais, porque garante a penetração solda, sem a necessidade de goivagem pelo lado interno. Deve-se tomar alguns cuidados relacionados ao controle de resfriamento e de temperatura entre passes, e com a utilização de ferramentas específicas para corte e esmerilhamento e à seleção do consumível mais adequado. Já são de conhecimento e domínio das empresas fabricantes de equipamentos petroquímicos, os aspectos relevantes sobre a soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos e de juntas dissimilares. A maioria dos fabricantes já possui especificações de procedimentos qualificados para execução destas soldas.

No metal de solda de aço inoxidável austenítico, durante o resfriamento, não ocorre a transformação da austenita para a ferrita e seus agregados, como ocorre no aço carbono. Neste tipo de aço, a austenita permanece estável ou meta-estável durante o resfriamento até a temperatura ambiente, com a possibilidade de formação de alguma ferrita e martensita, dependendo da composição química do aço. O tamanho de grão final da zona fundida em metais soldados de aço inoxidável austenítico é muito maior do que em soldas equivalentes de aço carbono. Esta é caracterizada por uma estrutura de grãos alongados e finos, originando uma região soldada de alta anisotropia acústica <sup>(7)</sup>.

O metal soldado austenítico tende, dependendo do seu teor de carbono, a formar precipitados de carboneto de cromo nos contornos de grão que, exposto em ambiente corrosivo e sob tensão, fica susceptível a formar trincas inter-granulares (Fig. 3.1) <sup>(8)</sup>.

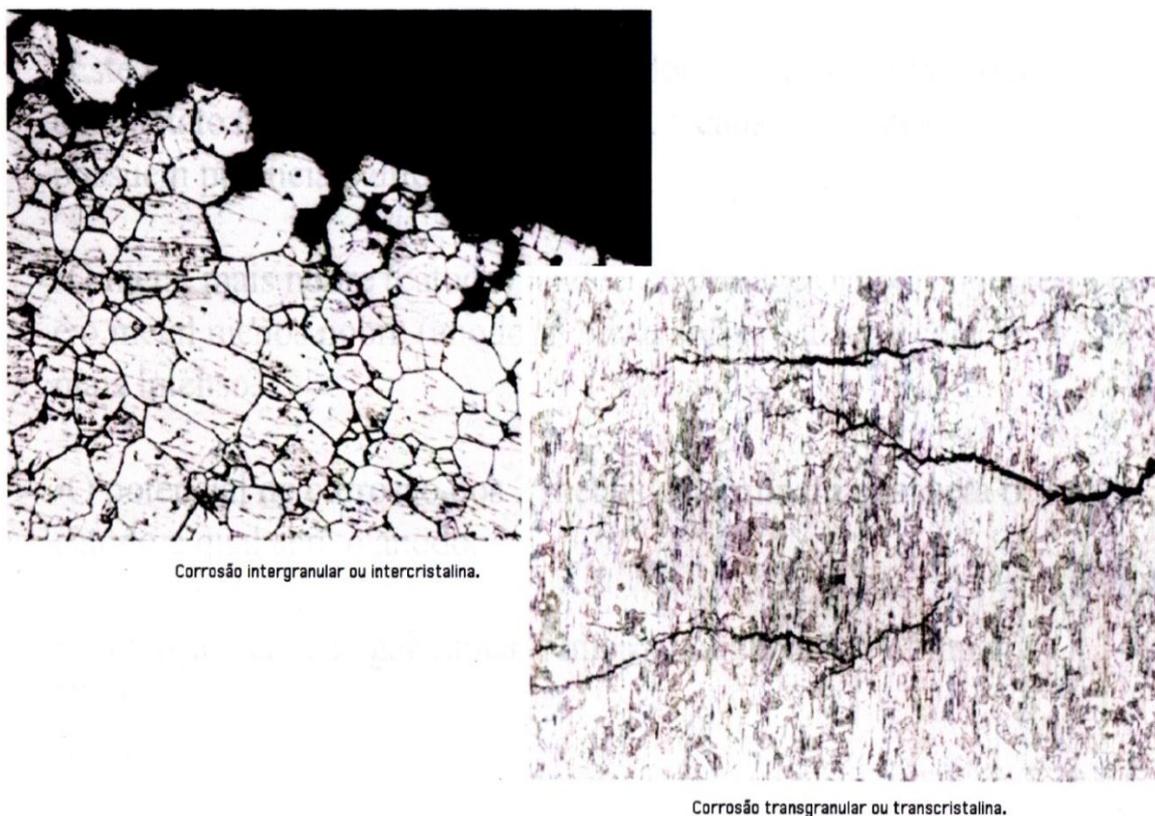


Figura 3.1 - Corrosão intergranular <sup>(8)</sup>

Bocais de aço inoxidável austenítico AISI 304 L (níquel e cromo equivalentes,  $Ni_{eq}$  e  $Cr_{eq}$  de cerca de 10 % e 19 %, respectivamente) soldados em cascos de aço carbono ( $Ni_{eq} = 2\%$  e  $\%Cr_{eq} = 3,5\%$ , aproximadamente) caracterizam uma junta soldada dissimilar, para a qual seria ideal uma microestrutura localizada na região central do Diagrama de SCHAEFFLER, onde predomina uma microestrutura com número de ferrita igual a aproximadamente 4. Entretanto, devido à diluição entre o metal de solda e o metal de base, não é possível obter esta microestrutura ideal.

O consumível de soldagem pode ser selecionado com auxílio do diagrama de SCHAEFFLER, considerando-se os valores de níquel e cromo equivalentes e a diluição entre os metais de base e de adição. Considerando a soldagem GMAW com uma participação relativa do metal de base austenítico de 40%, a microestrutura de uma solda formada apenas pelos metais de base seria a indicada pelo retângulo de cor verde sobre a reta vermelha, mostrado no diagrama da figura 3.2. Esta está localizada na região com, aproximadamente, o  $Ni_{eq}$  igual a 6% e o  $Cr_{eq}$  igual a 12 %. A utilização de um consumível com o cromo equivalente e níquel equivalente apresentados nesta região, seria inviável

por ser uma microestrutura totalmente martensítica e com número de ferrita (NF) igual a zero. Se tal consumível fosse utilizado, a soldabilidade da junta seria baixa, exigindo um rigoroso controle térmico e posterior tratamento térmico de alívio de tensões. A experiência acumulada<sup>(7)</sup> sugere a seleção de um consumível cujo metal soldado apresente uma microestrutura austenítica, localizada na região central do diagrama e com um teor de ferrita de NF 4. O consumível que tem apresentado os melhores resultados na soldabilidade destes metais de base dissimilares é o da série AISI 309, com um  $Ni_{eq}$  de 12 a 14% e um  $Cr_{eq}$  de 22 a 25% e indicado no diagrama pelo quadrado amarelo. A sua microestrutura tende a ser formada por austenita e ferrita, apresentando um número de ferrita igual a 2.

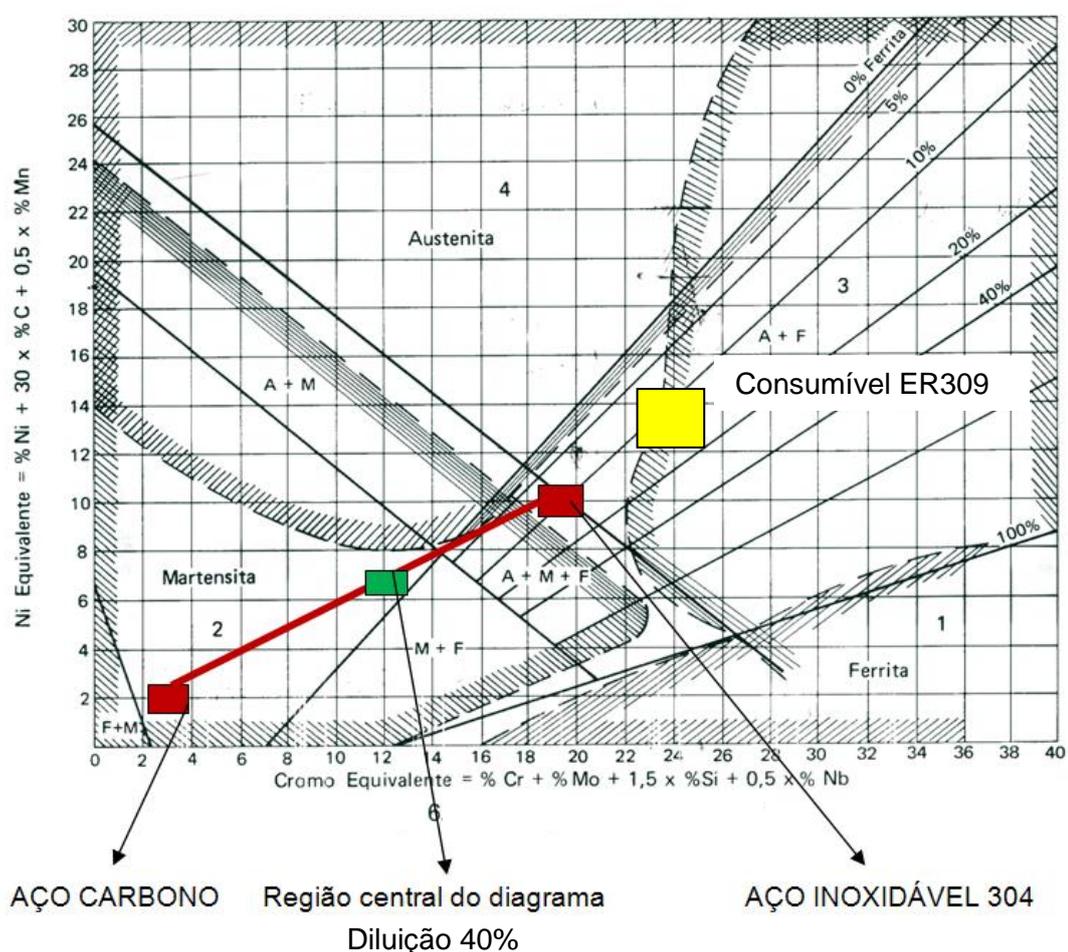


Figura 3.2 - Diagrama de SCHAEFFLER<sup>(10)</sup>

Os consumíveis de soldagem (metal de adição) E 309 -16 (SMAW) e ER309 (GTAW/GMAW) são frequentemente utilizados para soldagem de juntas dissimilares. Eles são recomendados pelas normas ASME II C 2007 <sup>(9)</sup> e Petrobras N 133 G <sup>(5)</sup> e apresentam resultados satisfatórios nos ensaios de impacto, tração e dobramento, exigidos na qualificação dos procedimentos de soldagem. Os consumíveis ER 309 Mo L - 16 (SMAW) e ER 309 Mo L (GTAW/GMAW) também são recomendados, porque contêm uma adequada quantidade de molibdênio (2%) para estabilizar a ferrita e prevenir contra a formação da fase  $\sigma$  (sigma) e, conseqüentemente, evitar a fragilização da solda e desta forma melhorar, por exemplo, o desempenho durante a fadiga dos equipamentos sujeitos às variações cíclicas de temperatura <sup>(8)</sup>.

Em equipamentos sujeitos a ambientes corrosivos, principalmente ambientes nos quais o ácido sulfídrico ( $H_2S$ ) está presente, deve-se utilizar os referidos consumíveis com baixo teor de carbono ( $C \leq 0,04\%$ ), cuja classificação é E 309 L-16 (SMAW) e ER 309 L (GTAW / GMAW), para evitar a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos. Ver figura 3.1 (ASME II D; 2007 – Appendix A – A 320 <sup>(10)</sup> e PETROBRAS N 1706 C<sup>(4)</sup>)

### **3.2 Soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos.**

Os aços inoxidáveis podem ser definidos como ligas que contêm o mínimo de 10,5% Cr e não mais que 1,5% C e teor de Fe maior do que de qualquer outro elemento adicional. Há cinco grupos de aços inoxidáveis:

- Martensíticos.
- Ferríticos
- Austeníticos.
- Endurecidos por precipitação – aços PH
- Duplex ferríticos / austeníticos.

Cada grupo requer diferentes considerações de soldabilidade. No processo de qualificação do procedimento de soldagem, deve ser considerada a seleção adequada do consumível (metal de adição), que seja compatível com o metal de base, quanto às suas propriedades químicas, mecânicas e sua propriedade de resistência à corrosão. Na qualificação do procedimento de soldagem para juntas soldadas de vasos de pressão, é necessário que a resistência à tração do metal soldado, seja superior ou igual à resistência a tração especificada para o metal de base. Além da adequada seleção dos

consumíveis, devem-se selecionar técnicas e processos adequados de soldagem para prevenção de trincas. Trincas podem ocorrer a temperaturas elevadas próximas à temperatura de solidificação do material (trincas a quente), ou a temperaturas mais baixas, próximas ou iguais a temperatura ambiente.

As trincas a quente podem aparecer no metal soldado, normalmente, ao longo da linha de centro da solda e estão, em geral, associadas com a ocorrência de segregação ao final da solidificação. As trincas a quente também podem surgir em forma de pequenas fissuras no metal soldado, na ZAT ou na linha de fusão. Elas são mais comuns em aços inoxidáveis austeníticos, mas também podem ocorrer em outros aços <sup>(11)</sup>.

Trincas a frio (HIC – *Hydrogen Induced Cracks*) ocorrem tanto na ZAT, quanto no metal de solda em baixas temperaturas (abaixo de 150°C), devido à ocorrência simultânea de solicitações mecânicas, devidas, por exemplo, a tensões residuais e a um alto grau de restrição da junta, quantidade suficiente de hidrogênio e presença de uma microestrutura martensítica <sup>(11)</sup>.

A maioria dos aços inoxidáveis austeníticos mantém uma estrutura não totalmente austenítica, pois uma pequena quantidade de ferrita pode surgir durante a solidificação. A austenita pode ser estável ou metaestável a temperaturas menores ou iguais à temperatura ambiente. Algumas ligas austeníticas podem se transformar, em parte, em martensita, por trabalho a frio, ou por resfriamento rápido a temperaturas criogênicas. As ligas que se solidificam como ferrita primária são mais resistentes à formação de trincas à quente. Por outro lado, ligas que se solidificam completamente como austenita são mais suscetíveis à formação de trincas a quente. A experiência<sup>(7)</sup> recomenda o número de ferrita (FN) igual a 4 para assegurar a não ocorrência de problemas relacionados a trincas à quente em metais soldados austeníticos <sup>(11)</sup>.

Quando soldas sensitizadas de aço inoxidável austenítico com teor suficientemente alto de carbono ( $C > 0,04\%$ ) são expostas a ambientes corrosivos, principalmente com cloro e enxofre, elas sofrem corrosão localizada nos contornos de grão. A corrosão associada as tensões residuais na solda permitem a formação de trincas nos contornos de grão (trincas intergranulares). Com relação a este processo, as medidas preventivas adotadas geralmente são: dissolver os precipitados de carboneto de cromo, formados nos contornos de grão, através de um tratamento térmico de solubilização após a soldagem (realizado entre 1050°C e 1150°C, com resfriamento rápido); e a utilização de

consumíveis com baixo teor de carbono ( $C < 0,04\%$ ) e utilização de consumíveis estabilizados com nióbio, titânio ou tântalo. Estes elementos têm forte afinidade com o carbono, que, em quantidades suficientes, previne a formação de carboneto de cromo <sup>(11)</sup>.

A existência da fase sigma em aços inoxidáveis austeníticos, martensíticos, ferríticos e duplex pode reduzir significativamente sua ductilidade e tenacidade. A fase sigma é formada em uma faixa de temperatura de 565°C a 925°C. Fatores que contribuem para a formação da fase sigma incluem a quantidade de ferrita, o intervalo de tempo para a transformação, existência de segregação, alto teor de cromo e a presença de elementos estabilizadores de ferrita, particularmente molibdênio, nióbio e titânio. A formação da fase sigma pode ser minimizada ou prevenida por uma seleção adequada da composição química do material. A fase sigma também pode ser transformada em austenita e ferrita por um adequado aquecimento seguido de resfriamento rápido <sup>(12)</sup>.

### **3.3. História dos Métodos Acústicos**

Desde a antiguidade o homem utiliza o som para determinar características dos materiais. Por exemplo, a diferença de som produzido por peças com ou sem grandes defeitos auxiliava os povos antigos na inspeção de peças sólidas de vidro, cerâmica e metal.

Ainda hoje a percussão de materiais e análise do som produzido é utilizada para determinar o estado ou a qualidade de produtos ou serviços. Como exemplo de uso técnico pode-se citar a verificação da compacidade e aderência de refratários, através da percussão produzida com um martelo, onde é possível determinar regiões defeituosas pela comparação entre o som emitido por estas e por outras com boa qualidade.

Estes métodos, embora de grande utilidade, fornecem apenas informações grosseiras que em muitos casos não são suficientes para garantir a integridade e segurança operacional de um equipamento. A necessidade de detectar descontinuidades cada vez menores fez com que houvesse a mudança dos testes audíveis para testes mais sofisticados, utilizando-se o ultrassom.

A geração e detecção de ondas ultrassônicas só foi possível pela descoberta do efeito piezométrico. Esta descoberta foi feita pelos irmãos Curie em 1880. Eles descobriram que amostras retiradas de uma maneira determinada de alguns cristais produziam corrente

elétrica quando submetidas a pressão. Um ano após, Lippman apresentou a teoria do efeito piezométrico reverso, que é a mudança da forma do cristal pela aplicação de corrente elétrica e a sugestão de que estes materiais cristalinos poderiam produzir vibrações pela aplicação de uma corrente elétrica alternada adequada.

Outros fatores que contribuíram para o desenvolvimento do aparelho de ultrassom foi o desenvolvimento do ecobatímetro, motivado pelo desastre do Titanic (detecção de icebergs) e impulsionado pela Primeira Guerra Mundial, do tubo de raios catódicos e do radar, desenvolvidos nas décadas de 30 e 40.

O primeiro aparelho de ultrassom foi desenvolvido em 1942 por Sproule. Entretanto, foi Sokolov, na Rússia em 1929, quem primeiro registrou experiências usando cristais de quartzo para introduzir vibrações ultrassônicas em materiais. Sokolov demonstrou que ondas ultrassônicas poderiam ser utilizadas em lugar dos raios-X para detectar discontinuidades em materiais. Estes estudos, além dos desenvolvidos por um grupo de alemães (Mulhauser, Pohlman e outros), eram baseados no método por transmissão sônica e teve grande sucesso na inspeção de fundidos. Porém, até o desenvolvimento do método pulso-eco por Sproule, os resultados não foram satisfatórios em forjados e outros materiais com pouca absorção sônica.

Após a segunda guerra mundial descobriu-se que *Trost* e *Gots*, na Alemanha, e *Firestone*, nos EUA, haviam desenvolvido, independentemente, sistemas similares. Em 1947, *Sproule* desenvolveu o cabeçote angular, que permitia a introdução do som em diversos ângulos no material, sem a produção de sinais indesejáveis. Por muitas décadas, os princípios gerais do método permaneceram os mesmos. Os maiores desenvolvimentos foram na instrumentação eletrônica e processamento de dados e, mais recentemente, o avanço se deve à introdução da microinformática. Os anos cinquenta serviram para aprender a usar esta nova ferramenta. O grande desenvolvimento e utilização do ensaio por ultrassom só ocorreu, entretanto, a partir dos anos 60.

No Brasil o ensaio por ultrassom teve, em 1979, o seu grande impulso em termos de utilização, com a construção das primeiras plataformas de produção de petróleo na Bacia de Campos e o início da qualificação de inspetores de ultrassom pela PETROBRAS. Atualmente, este ensaio tem uma grande aceitação, principalmente como alternativa ao ensaio radiográfico, para as situações onde existem dificuldades quanto à proteção radiológica ou quanto ao cumprimento dos prazos contratuais.

### 3.3.1 Princípios Básicos

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo, no qual um feixe sônico de alta frequência é introduzido no material a ser inspecionado com o objetivo de detectar discontinuidades internas e superficiais. O som que percorre o material é refletido pelas interfaces e é detectado e analisado para determinar a presença e localização de discontinuidades.

As ondas sônicas são quase totalmente refletidas em interfaces metal-gás. Reflexões parciais ocorrem em interfaces metal líquido ou entre um metal e outro sólido, sendo o percentual de energia dependente de certas propriedades físicas dos materiais que compõem a interface. Trincas, laminações, rechupes, poros, falta de fusão e outras discontinuidades que atuam como interfaces metal-gás podem ser facilmente detectadas por ultrassom. Inclusões e outras discontinuidades podem também ser detectadas pela reflexão parcial ou espalhamento do feixe sônico, ou até mesmo pela produção de outros efeitos detectáveis.

A maioria dos aparelhos para o ensaio por ultrassom detecta discontinuidades através da monitoração das reflexões sônicas transmitidas ao material através de um cabeçote acoplado à peça. O aparelho geralmente dispõe de um visor que possibilita determinar a intensidade da energia refletida e a localização das interfaces. Pela análise destas reflexões o inspetor consegue determinar a existência ou não de discontinuidades no material. Mesmo com estas características pode-se dividir em três categorias principais o método de ensaio: convencional, automatizado e técnicas especiais.

O método convencional caracteriza-se pela movimentação ou manipulação manual dos transdutores pelo operador para execução do ensaio, apresentação *A-Scan* (ecograma amplitude x distância), uso de ondas transversais nos transdutores angulares e longitudinais nos transdutores normais ou duplo cristal. Este é o método mais utilizado pela indústria para ensaios em soldas.

O método automatizado tem características similares ao convencional, mas a movimentação dos transdutores sobre a superfície de ensaio é executada por equipamentos automatizados em velocidade pré-programadas, cabendo ao operador somente a avaliação dos resultados obtidos, podendo ser auxiliado por sistemas automáticos de análise. Este tipo de ensaio é principalmente utilizado no ensaio de chapas.

Técnicas especiais compreendem métodos de ensaio que, em geral, envolvem princípios e características diferentes, sendo as mais comuns, o TOFD (*Time of Flight Delay*), o uso de transdutores angulares especiais emissores de ondas longitudinais e o próprio *Phased Array*, objeto do presente estudo. Além disto, estas técnicas valem-se dos modos de apresentação diferentes (*B-Scan*, *C-Scan*, e *S-Scan*) e podem ainda gerar registro permanente dos resultados de ensaios.

Devido a suas características e versatilidade, o ensaio por ultrassom é um dos ensaios não destrutivos mais importantes, sendo utilizado para a detecção e avaliação de descontinuidades internas, detecção de descontinuidades superficiais, medição de espessuras e avaliação de corrosão e, menos frequentemente, para determinar propriedades físicas, estrutura, tamanho de grão e constantes elásticas de materiais.

### **3.4 Principais conceitos da tecnologia ultrassônica de *Phased Array* .**

#### **3.4.1 Desenvolvimento histórico e requisitos industriais**

A tecnologia do ultrassom *Phased Array* foi transferida campo médico para o industrial no início da década de 1980. Em meados daquela década, materiais piezocompostos já haviam sido desenvolvidos e estavam à disposição para a fabricação de sondas *Phased Array* de composição complexa.

No início dos anos 1990, a tecnologia *Phased Array* foi incorporada como um novo método de Ensaio Não Destrutivo (END). A maior parte das aplicações desta tecnologia, entre os anos 1985 a 1992, era voltada para vasos de pressão de usinas nucleares (bocais), grandes eixos forjados e componentes de baixa pressão para turbinas.

Novos avanços na tecnologia de materiais piezo compostos, micro usinagem, microeletrônica e na capacidade de computação (incluindo pacotes de simulação para o projeto de sondas e interação dos componentes do feixe) contribuíram para um revolucionário desenvolvimento da tecnologia *Phased Array* no final da década de 1990. Também foram desenvolvidos programas à medida que a capacidade computacional aumentava.

A aplicação da tecnologia de ultrassom *Phased Array* para ensaios não destrutivos foi gerada pelas seguintes necessidades e requisitos gerais e pelas especificações dos geradores de potência na área nuclear:

- 1- Diminuição do tempo de preparo e inspeção (o que leva ao aumento da produtividade);
- 2- Aumento na confiabilidade do ensaio.
- 3- Detecção de trincas de orientação aleatória em diferentes profundidades, usando a mesma sonda em uma posição fixa.
- 4- Melhoria na relação sinal/ruído e capacidade de dimensionamento em juntas dissimilares aço carbono – inoxidáveis e soldas em tubos fundidos de aço inoxidáveis austeníticos centrifugados de aço inoxidável austenítico (por exemplo, ASTM A 351 – HK 40).
- 5- Detecção e dimensionamento de pequenas trincas de corrosão sob tensão em componentes de turbinas de geometria complexa.
- 6- Aumento de precisão na detecção, dimensionamento, localização e orientação de defeitos críticos, independente de sua orientação. Este requisito demandou múltiplos feixes focais com a habilidade de mudança de sua profundidade focal e ângulo de varredura.

Outras indústrias, como a aeroespacial, a de defesa, a petroquímica, e a de fabricação demandavam melhorias semelhantes, embora requisitos específicos variem para cada aplicação industrial.

Todos os requisitos abaixo centram-se em diversas características da tecnologia de ultrassom *Phased Array* <sup>(13)</sup> :

- 1- Velocidade. A tecnologia *Phased Array* permite varredura automática, o que é algo como uma ordem de magnitude mais rápida, que a equivalente varredura convencional.
- 2- Flexibilidade. Um único transdutor *Phased Array* pode cobrir uma grande gama de aplicações, diferentemente dos transdutores convencionais.
- 3- Preparo eletrônico. O preparo é efetuado simplesmente com o carregamento de um arquivo e calibração. Diferentes esquemas de parâmetros são facilmente acomodados através de arquivos pré-configurados.

- 4- Pequenas dimensões do transdutor. Para algumas aplicações, o acesso limitado é um problema grave e uma pequena sonda *Phased Array* pode prover os mesmos resultados de múltiplos transdutores convencionais.
- 5- Inspeções complexas. Um equipamento *Phased Array* pode ser programado para inspeção automatizada e com registro completo de varredura de juntas soldadas com geometrias complexas, tais como juntas tubulares e juntas de bocais com certa facilidade. O equipamento pode também ser facilmente programado para realizar varreduras especiais, como Tandem, TOFD (*Time of Flight Diffraction*) multiangular.
- 6- Detecção confiável de defeitos. A tecnologia *Phased Array* pode detectar defeitos com uma melhor relação sinal/ruído usando feixes focalizados. A probabilidade de detecção é ampliada devido à deflexão de feixe angular (*S-Scan* – varredura setorial).
- 7- Imagem. O *Phased Array* fornece um novo e único processo de formação de imagem, como o *S-Scan* (varredura setorial), que permite uma maior facilidade de análise e interpretação.

#### 3.4.2 Princípios.

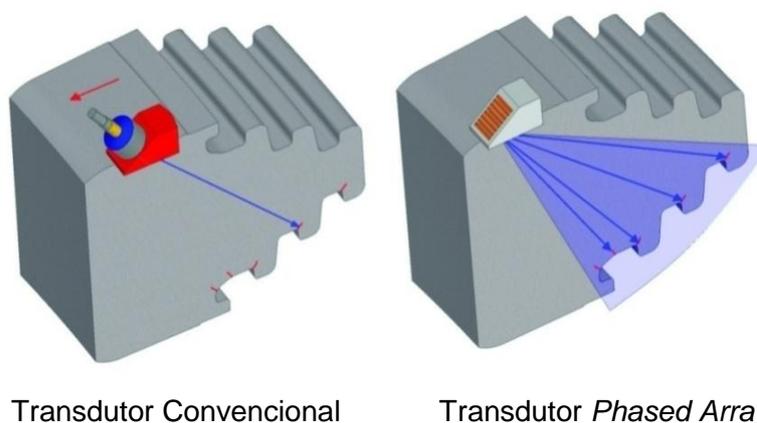
Inspeções por ultrassom convencional usam vários transdutores com um único cristal com feixes divergentes. Em alguns casos, sondas de duplo-cristal ou monocristal com lentes focais são usadas para reduzir a zona morta e aumentar a resolução. Em todos os casos, o campo sônico se propaga por um eixo acústico com um único ângulo de refração.

O sistema convencional de varredura utilizando ângulo único possui limitada capacidade de detecção e dimensionamento de descontinuidades, pois o feixe sônico não incide totalmente perpendicular em relação as superfícies de todas orientações das descontinuidades existentes na peça. As práticas normativas para o ensaio convencional requerem, que as varreduras sejam efetuadas com vários transdutores, sendo cada um com um único ângulo fixo pré-determinado, geralmente variando de 10° a 15° entre cada transdutor, para ampliar a probabilidade de detecção. A inspeção de componentes de geometria complexa, com grande espessura e/ou com acesso limitado para o acoplamento e movimentação do transdutor torna-se ainda mais difícil.

O mesmo não ocorre no uso de um transdutor *Phased Array*, este permite a varredura angular em todo o volume da solda somente com o movimento de um único transdutor no

sentido longitudinal ao longo da solda, ou seja, sem a necessidade do movimento no sentido transversal. Estes fatores possibilitam o ensaio em situações onde transdutores convencionais são completamente ineficientes.

A varredura angular ou setorial (S-Scan) permite detectar descontinuidades em quaisquer profundidades e com qualquer geometria ou orientação (Fig. 3.3) <sup>(13)</sup>.



**Esquerda:** inspeção convencional com transdutores de ângulo fixo requer múltiplas varreduras angulares e movimentos da sonda.

**Direita:** um transdutor de feixe com varredura angular pode deslocar o feixe focal pela região apropriada do componente sem movimento da sonda.

Figura 3.3 - Exemplo da aplicação da tecnologia de ultrassom *Phased Array* em um componente de geometria complexa<sup>(13)</sup>.

O processo usual de fabricação de um transdutor *Phased Array* consiste em cortar único cristal em vários pequenos cristais idênticos, cujas larguras são muito menores que seu comprimento. Cada pequeno cristal pode ser considerado um gerador individual de ondas ultrassônicas. Neste tipo de construção, a geração de ondas pelo transdutor ocorre quando cada cristal emite ondas que interferem com as ondas dos cristais adjacentes, gerando globalmente uma nova onda com regiões de interferências construtivas e destrutivas. As ondas emitidas por cada cristal individual podem ser atrasadas e sincronizadas em suas fases e amplitudes para criar o feixe sônico. Esta onda baseada na interferência construtiva produz um feixe sônico com a geometria desejada, podendo este ser focalizado ou divergente e os ângulos de varredura serem previamente estabelecidos através de softwares apropriados. A geometria do feixe é obtida pelo

controle por computador dos tempos de atraso de cada onda gerada pelos cristais individuais. Um exemplo de uma malha de sinais emitidos e recebidos por um equipamento *Phased Array* pode ser visto na Figura 3.4 <sup>(13)</sup>.

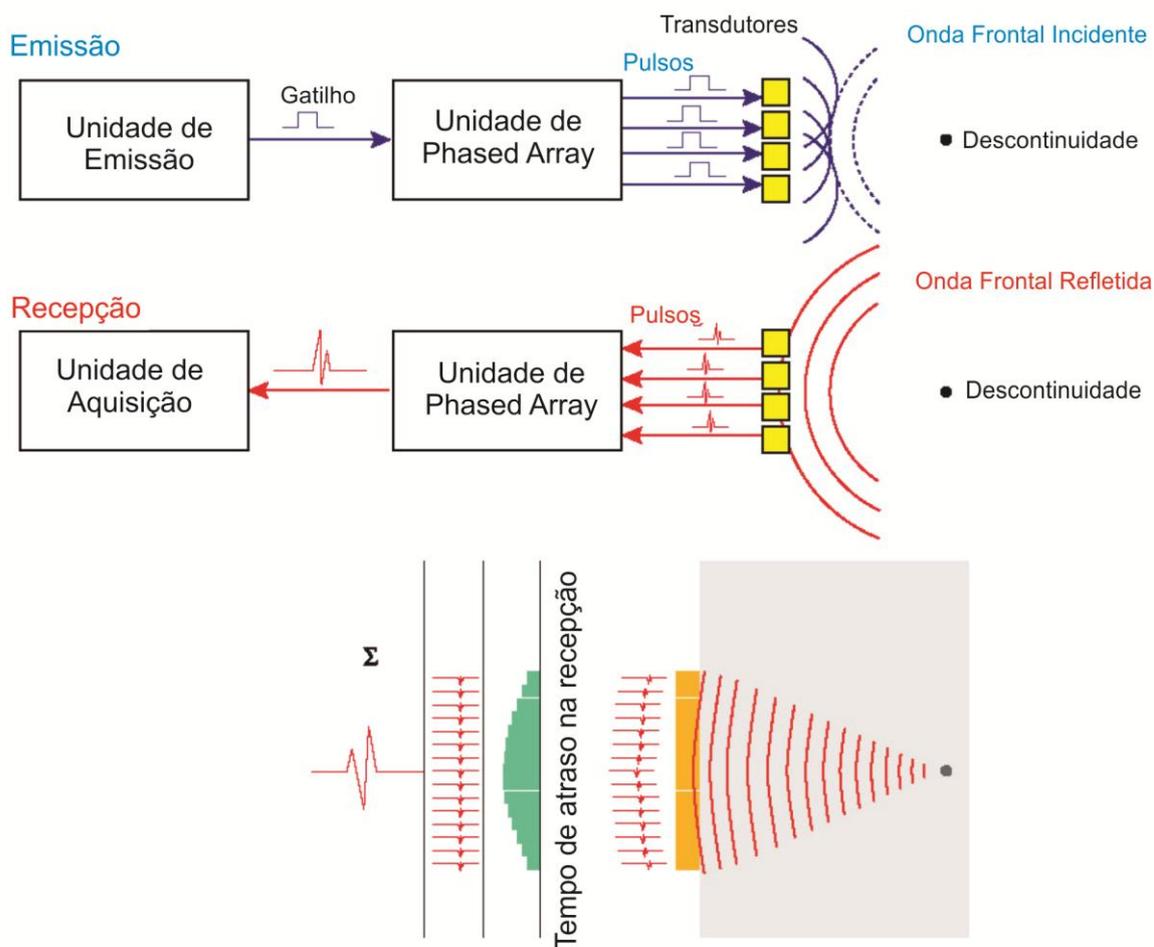


Figura 3.4 - Formação do feixe sônico pelo controle na variação do tempo de atraso para emissão e recepção de ondas de múltiplos cristais (mesma fase e amplitude).

Os principais componentes para um sistema de varredura básica com equipamentos *Phased Array* são apresentados na figura 3.5 <sup>(13)</sup>.

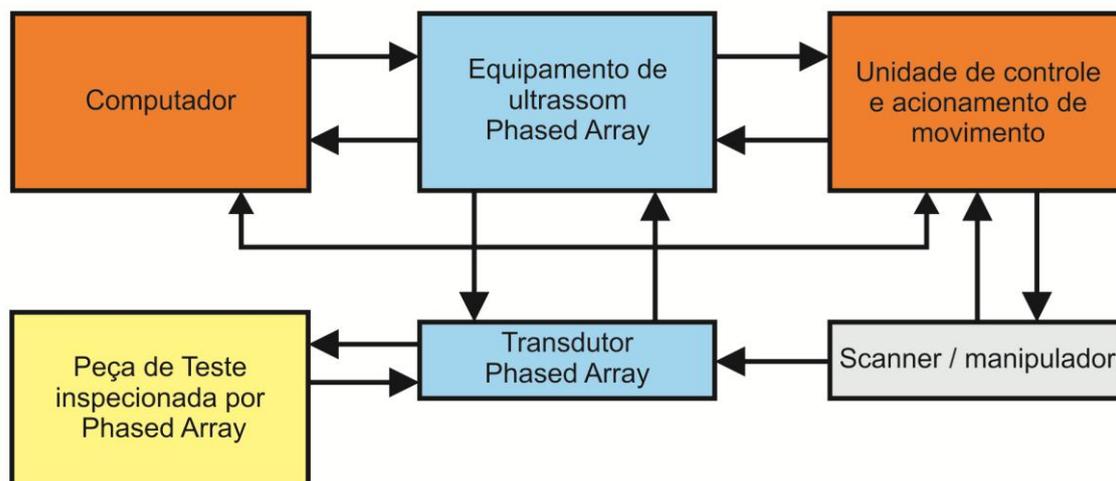


Figura 3.5 - Componentes básicos de um sistema *Phased Array* e sua interação interna.

Os transdutores *phased array* produzem ondas longitudinais e transversais como ocorre também nos transdutores convencionais. Pela lei de Snell, quando uma onda incidente longitudinal intercepta uma interface oblíqua de matérias com diferentes velocidades de propagação do som, uma parte da onda é refratada como onda longitudinal e outra é refratada como transversal. O ângulo da onda longitudinal, em relação a um plano normal à superfície, será sempre maior que o ângulo da onda transversal refratada. Quando a onda longitudinal refratada atinge o ângulo de 90°, há incidência para dentro do material a ser ensaiado somente de onda transversal (Ver figura 3.6 e equação 3.1) <sup>(18)</sup>.

$$\frac{\text{Sen} \alpha}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen} \beta_1}{V_{L2}} = \frac{\text{Sen} \beta_2}{V_{T2}} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde  $\alpha$  é o ângulo de incidência,  $\beta_1$  e o ângulo de refração de ondas longitudinais,  $\beta_2$  é o ângulo de refração de ondas transversais,  $V_{L1}$  é a velocidade de ondas longitudinais no acrílico,  $V_{L2}$  é a velocidade de ondas longitudinais no aço inoxidável e  $V_{T2}$  é a velocidade de ondas transversais no aço inoxidável.

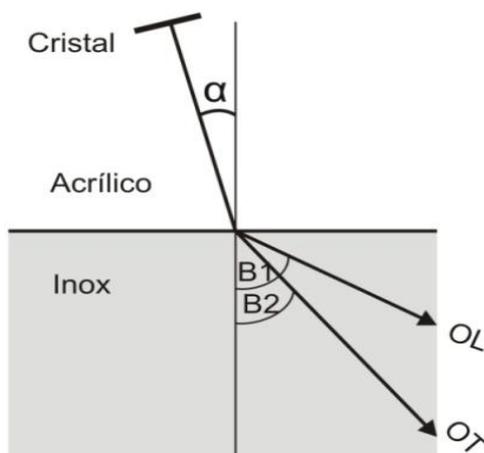
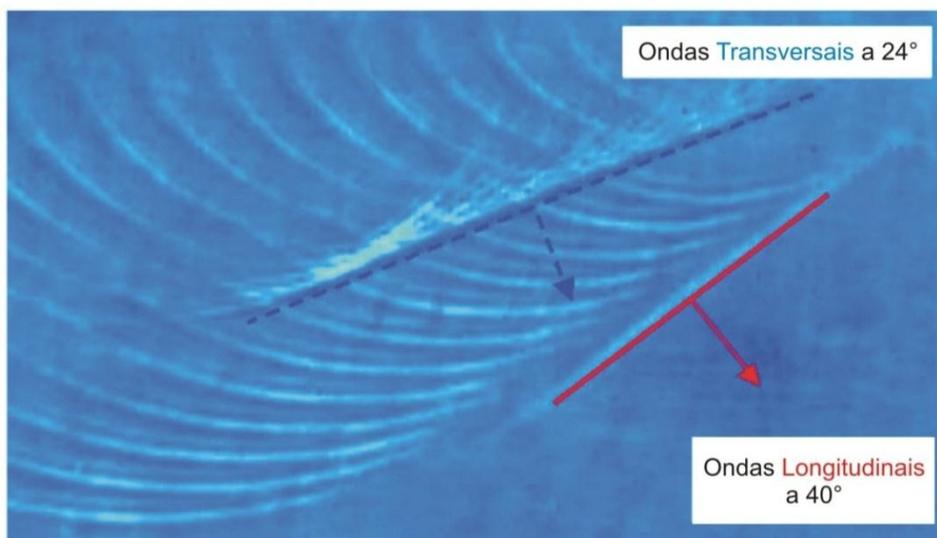


Figura 3.6 - Lei de Snell – Refração das ondas longitudinais e transversais

Um exemplo de visualização da onda frontal pode ser visto na figura 3.7. Esta técnica de visualização ilustra as ondas longitudinais e transversais formadas pelo o processo de interferência destrutiva e construtiva das ondas geradas nos multi-cristais mencionados anteriormente <sup>(13)</sup>.



*Courtesy of Material Research Institute, Canada*

Figura 3.7 - Exemplo de visualização de uma onda transversal frontal em um bloco de vidro com um transdutor de feixe linear de 7,5 MHz, com 12 elementos de 2,0mm de largura. A onda longitudinal refratada de 40° é seguida pela onda transversal de 24°.

A principal característica da tecnologia ultrassônica do *Phased Array* é o controle computadorizado da excitação (amplitude e atraso) de elementos individuais em um transdutor de múltiplos elementos. A excitação de elementos piezocompostos pode gerar feixes com parâmetros definidos, como ângulo, distância e tamanho do ponto focal através de *software*.

Para gerar um feixe em fase e com interferências construtivas, as múltiplas ondas frontais devem ter o mesmo tempo global de chegada ao ponto de interferência, como ilustrado na Figura 3.7. Este efeito só pode ser alcançado, se os vários elementos de sonda ativos são pulsados e coordenados em curtos períodos de tempo. Como mostrado na Figura 3.4, o eco do ponto focal desejado atinge os vários elementos do transdutor com uma diferença de tempo computável. Os sinais de eco recebidos por cada elemento do transdutor são ligeiramente atrasados antes de serem somados juntos. A soma resultante é a apresentação de uma linha em uma varredura com apresentação *A-Scan* na tela do aparelho (Ecograma), que enfatiza a resposta do foco desejado e atenua vários outros ecos de outros pontos no material. Os equipamentos *Phased Array* normalmente apresentam simultaneamente na tela do aparelho os modos *A-SCAN* e *S-SCAN* <sup>(13)</sup>.

Na recepção, os sinais chegam com diferentes valores de tempo de percurso, então, eles são alterados para cada elemento de acordo com a lei de recepção focal. Todos os sinais dos elementos individuais são então somados para formar um único pulso ultrassônico, que é enviado ao instrumento de aquisição. O princípio de formação para os ângulos de incidência é ilustrado na figura 3.8 <sup>(13)</sup>.

Durante a transmissão, o instrumento de aquisição envia um sinal de disparo ao equipamento *Phased Array*. Este converte o sinal em pulsos de alta tensão com amplitude pré-programada e tempo de atraso. Cada elemento recebe apenas um destes pulsos. Os sinais de múltiplos elementos criam um feixe com ângulo específico e ponto focal a uma profundidade específica. O feixe atinge o defeito e é refletido assim como no ultrassom convencional <sup>(13)</sup>.

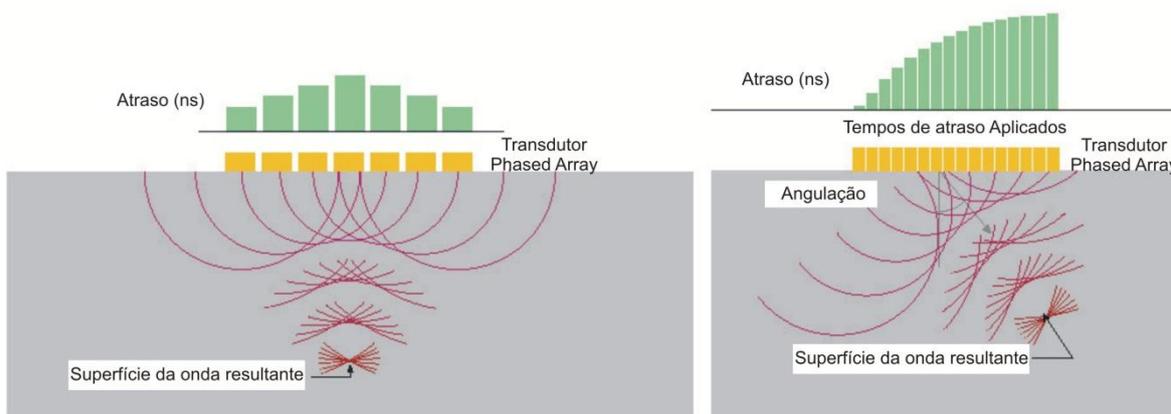


Figura 3.8 - Princípio focal do feixe para incidência normal (a) e angular (b).

O valor de atraso para cada elemento depende da abertura do elemento ativo do transdutor do *Phased Array*, tipo de onda, ângulo de refração e profundidade do ponto focal<sup>(13)</sup>. Toda física empregada na técnica do pulso eco com um único cristal e apresentação A – SCAN (convencional) é a mesma empregada no *Phased Array*. Portanto as fórmulas para cálculo da geometria do feixe sônico, atenuação acústica, velocidade do som, tipos de ondas e lei de Snell (leis para reflexão, refração e conversão de modo das ondas) são as mesmas.

Há três métodos principais de varredura controlada por computador:

#### 3.4.2.1 Varredura eletrônica (também chamada E-scan e originalmente chamada varredura linear):

A mesma lei focal e de atraso é distribuída através de um grupo de elementos ativos (Figura 3.9). A varredura é executada com um ângulo constante e ao longo do comprimento do transdutor *Phased Array* por um grupo de elementos ativos equivalente à um transdutor ultrassônico convencional que, por exemplo, executa uma varredura para mapeamento de corrosão (veja Figura 3.10).

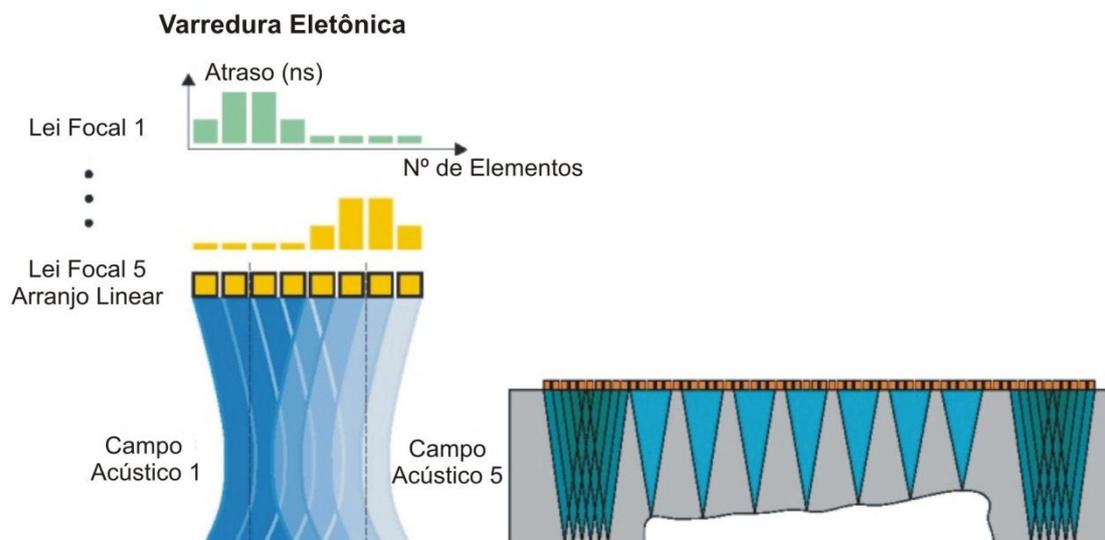


Figura 3.9 - Princípio da varredura eletrônica para varredura de ângulo reto <sup>(13)</sup>.

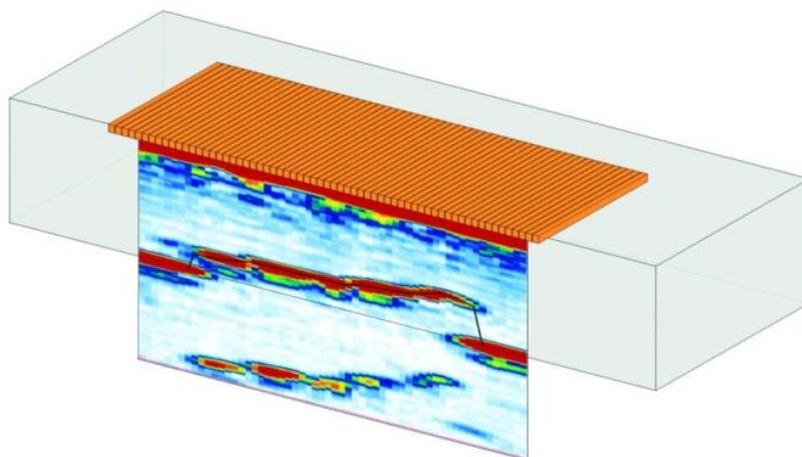


Figura 3.10 - Exemplo de detecção de corrosão e mapeamento 3-D feito através de varredura eletrônica de ângulo zero usando um transdutor de feixe linear, 10MHz de 64 elementos,  $p=0,5\text{mm}$  <sup>(13)</sup>

Sondas lineares de contato direto também podem ser usadas em varreduras eletrônicas angulares. Esta configuração é muito útil na detecção de falta de fusão em soldas e detecção de trincas internas e subsuperficiais (Figura 3.11) <sup>(13)</sup>.

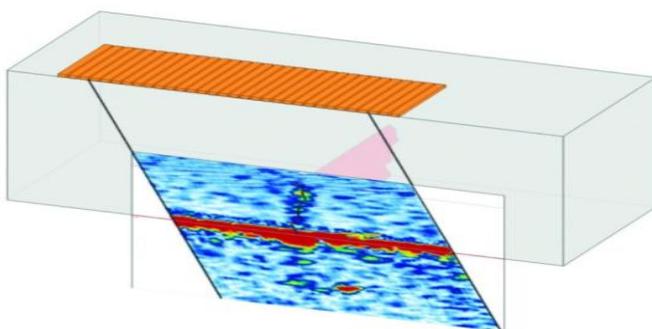


Figura 3.11 - Exemplo de varredura eletrônica com ondas longitudinais para detecção de trincas em um forjado, usando um transdutor de 15° e 5MHz,  $n = 32$ ,  $p=1,0\text{mm}$  <sup>(13)</sup>.

#### 3.4.2.2 Varredura setorial (também conhecida como *S-Scan*, varredura azimutal ou varredura angular):

O feixe é emitido em uma determinada faixa de ângulos para uma determinada profundidade focal, usando os mesmos elementos. A varredura é executada em uma faixa de ângulos, com diferentes profundidades focais. (Figura 3.12). A faixa de ângulos de varredura depende da quantidade de cristais no transdutor, da cunha acoplada e o tipo de onda. Transdutores angulares de ondas transversais possuem cunhas acopladas aos cristais, cujos ângulos de varredura refratados na interface entre a superfície da cunha e a superfície da peça de ensaio são determinados pela lei de Snell. <sup>(14)</sup>.

#### 3.4.2.3 Foco dinâmico de profundidade (DDF - *Dynamic Depth Focusing*):

A varredura é executada com diferentes profundidades focais (Figura 3.13). Na prática, um único pulso focalizado é emitido e a mudança do ponto focal é executada na recepção para todas as profundidades programadas.

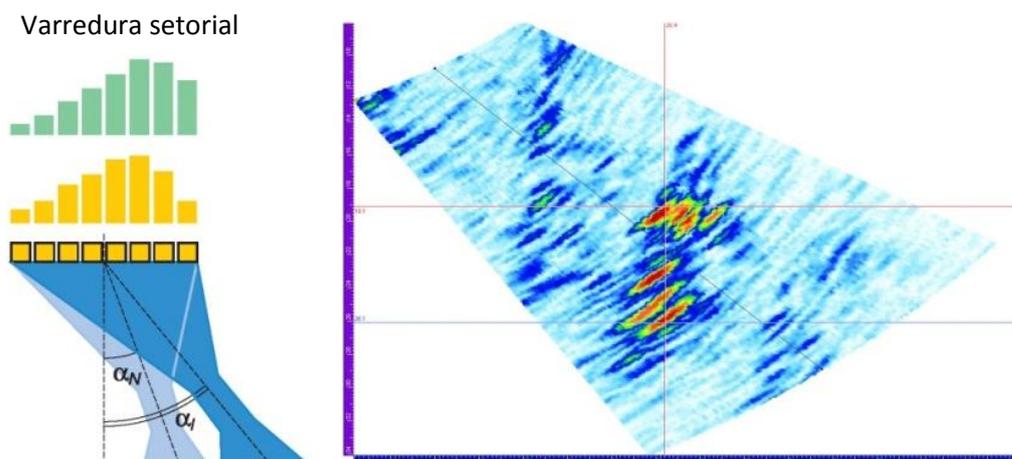
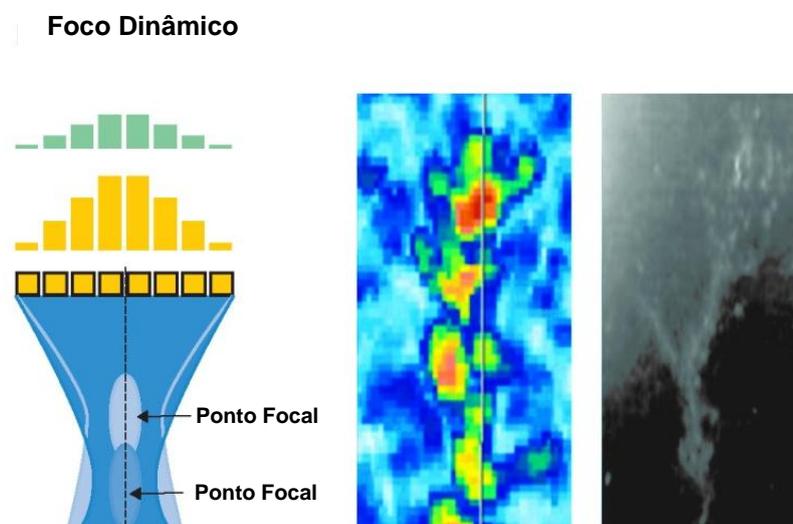


Figura 3.12 - Exemplo de visualização de um ensaio por ultrassom de varredura setorial (S-Scan) com correção de volume, detectando um grupo de trincas de corrosão sob tensão. (faixa: 33°- 58°).



*Courtesy of Ontario Power Generation Inc., Canada*

Figura 3.13 - Esquerda: princípios da profundidade focal. Centro: dimensionamento das pontas de trincas de corrosão sob tensão (stress-corrosion crack – SCC) com ondas longitudinais de 12MHz e incidência normal, usando as leis da profundidade focal. Direita: comparação por macrografia da extremidade da trinca. <sup>(13)</sup>

### 3.4.3 Lei do Tempo de Atraso ou Lei Focal.

Para a construção programada do perfil do feixe sônico em cada região desejada da peça ensaiada, o pulso individual de cada elemento (cristal) do transdutor *Phased Array* deve ser controlado por computador. Para obter uma emissão sequencial correta de pulsos, em intervalos de tempo precisos e programados, é necessário utilizar uma lei focal. Lei focal é o nome dado a um banco de dados programados para emissão dos pulsos de cada elemento, com suas respectivas amplitudes, tempos de atraso, etc. O tempo de atraso em cada elemento depende da configuração de inspeção, do ângulo de varredura, do tipo e ângulo da cunha, da quantidade de elementos e do tipo de transdutor <sup>(13)</sup>.

Um exemplo de tempos de atraso medido em nano segundos ( $10^{-9}$  s) para um transdutor de 32 elementos de feixe linear, que gera ondas longitudinais é apresentado na Figura 3.14. Nesta imagem, a detecção de furos laterais é executada com ângulos negativos (esquerda) e ângulos positivos (direita). O tempo de atraso para cada elemento muda conforme o ângulo, como mostrado no fundo desta figura <sup>(13)</sup>.

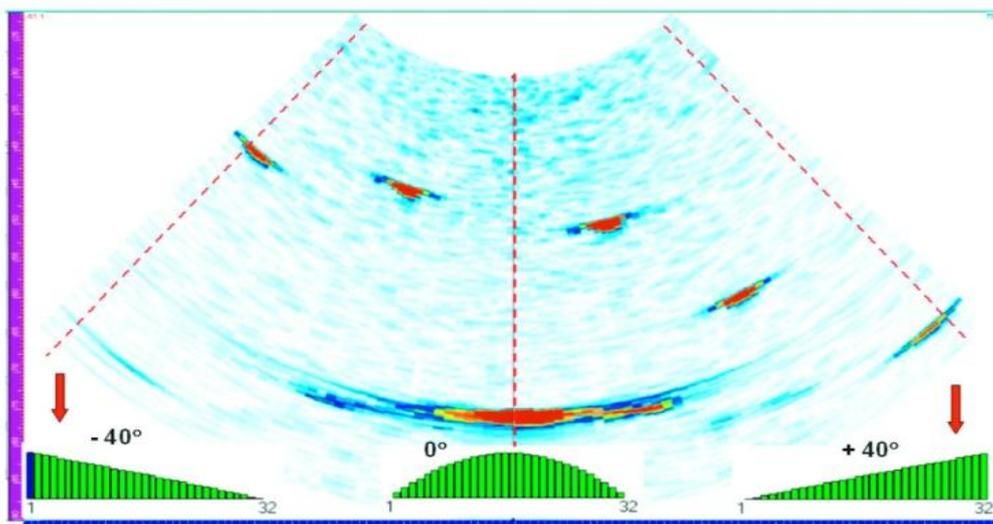


Figura 3.14 - Exemplo de tempo de atraso e formato para uma faixa angular de 90° (-45° a +45°). Neste a sonda *Phased Array* possui 32 elementos e foi programada para gerar ondas longitudinais para a detecção de cinco furos laterais. O transdutor não possui cunha e está em contato direto com a peça de teste.

A lei focal de atraso possui formato parabólico para a focagem de profundidade. O atraso aumenta das bordas da sonda em direção ao centro. O tempo de atraso será dobrado quando a distancia focal estiver reduzida à metade (ver figura 3.15). A temporização dos elementos possui um aumento linear conforme o tamanho dos elementos (ver figura 3.16). Para uma varredura setorial (azimutal) sem cunhas, o intervalo de tempo de atraso entre os elementos idênticos depende da posição de cada um destes elementos na composição para abertura do ângulo de varredura gerado (figura 3.16) <sup>(13)</sup>.

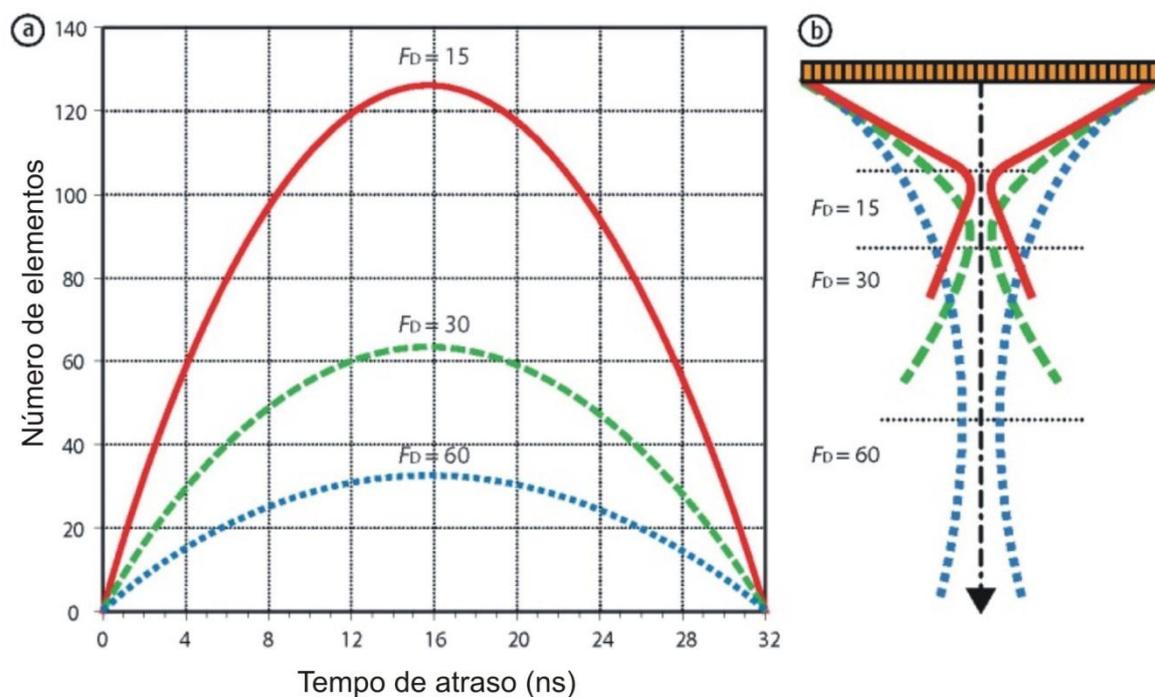


Figura 3.15 - Tempos de atraso (esquerda) e princípios de profundidade de varredura (direita) para um transdutor linear de 32 elementos focando a 15,0 mm, 30,0 mm e 60,0 mm, utilizando ondas longitudinais.

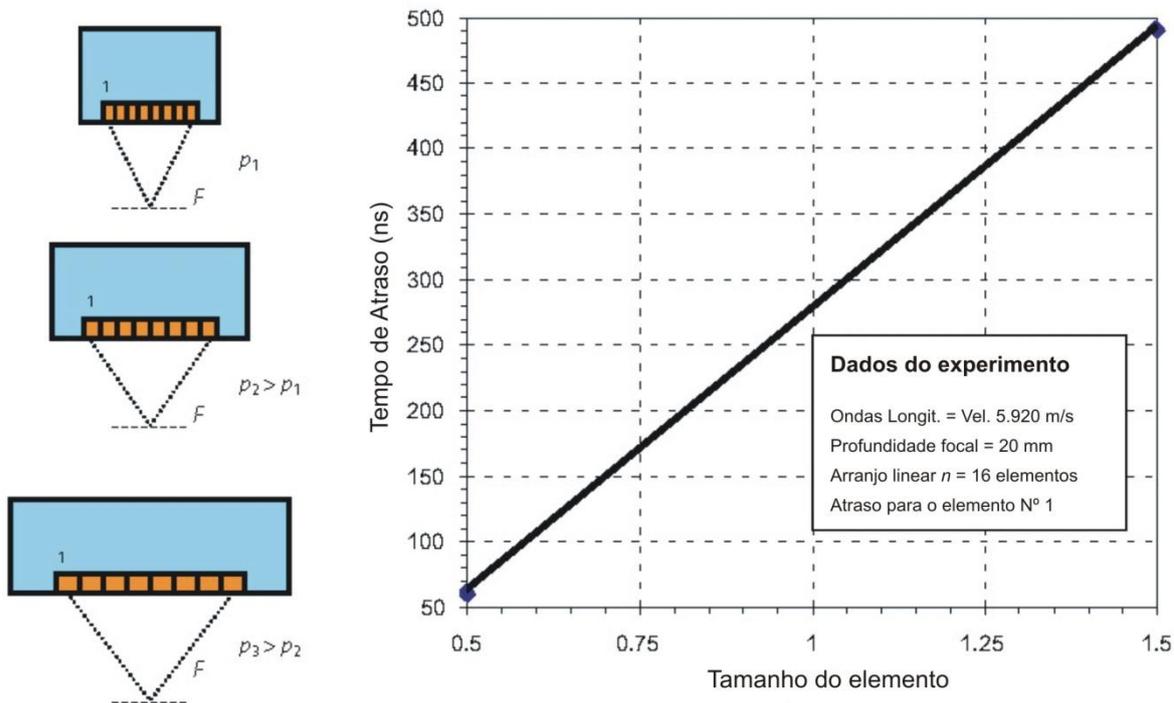


Figura 3.16 - Dependência do tempo de atraso em relação ao tamanho do elemento.

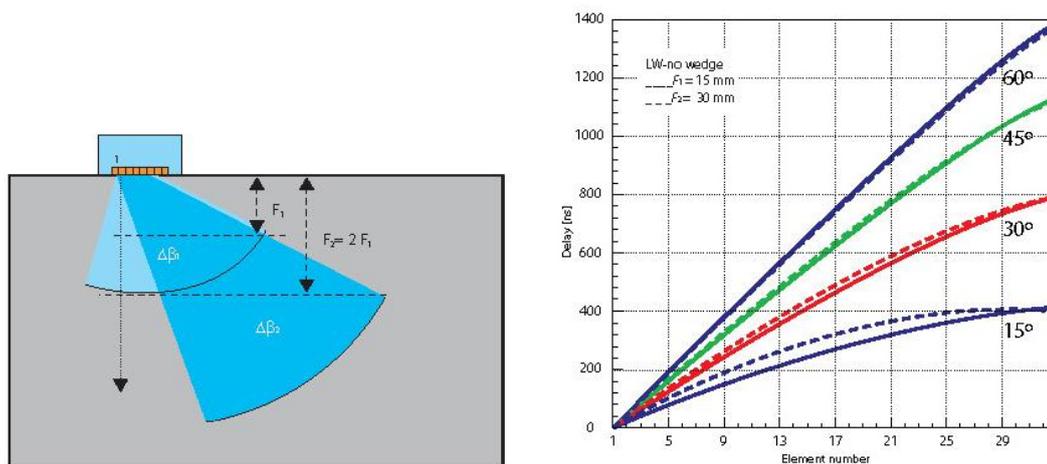


Figura 3.17 - Esquerda: exemplo de posicionamento dos elementos e profundidade focal em um transdutor sem cunha (ondas longitudinais entre 15° e 60°). Direita: Exemplo da dependência do tempo de atraso no ângulo gerado.

Se a sonda *Phased Array* está acoplada a uma cunha, o tempo de atraso também depende da geometria da cunha e velocidade do som nesta, como também do posicionamento dos elementos e do ângulo de refração (ver figura 3.18) <sup>(13)</sup>.

A variação do tempo de atraso possui uma forma parabólica para o ângulo refratado fornecido pela Lei de Snell ( $45^\circ$  na figura 3.19). Para ângulos menores que o ângulo natural proporcionado pela Lei de Snell, o tempo de atraso aumenta da parte traseira para a parte frontal da sonda. No caso de ângulos maiores que o ângulo refratado, o tempo de atraso é maior na parte traseira da sonda, uma vez que o feixe gerado pelos elementos da frente possui um caminho mais longo a percorrer na cunha e, assim, os elementos frontais devem ser excitados primeiro <sup>(13)</sup>.

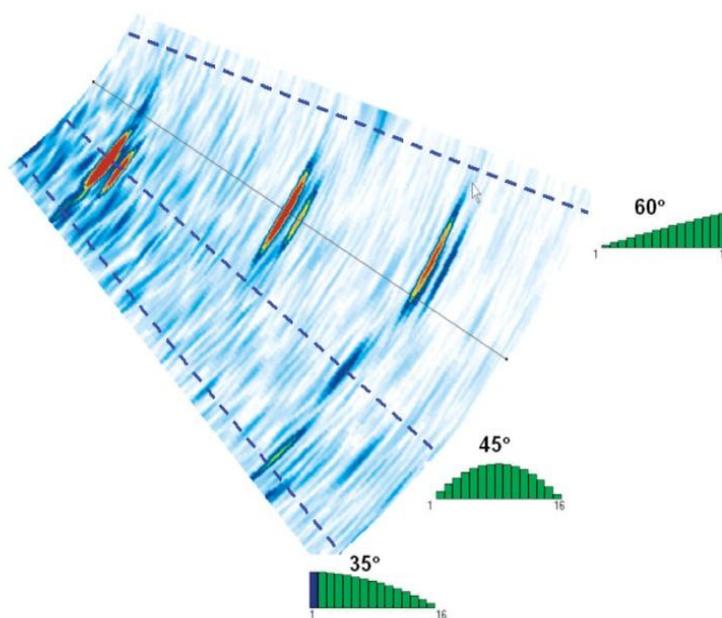


Figura 3.18 - Exemplo do tempo de atraso e seu formato para detecção de três furos laterais com ondas de corte. A sonda possui 16 elementos e está montada em uma cunha de Plexiglas® de  $37^\circ$  (ângulo natural no aço é de  $45^\circ$ ).

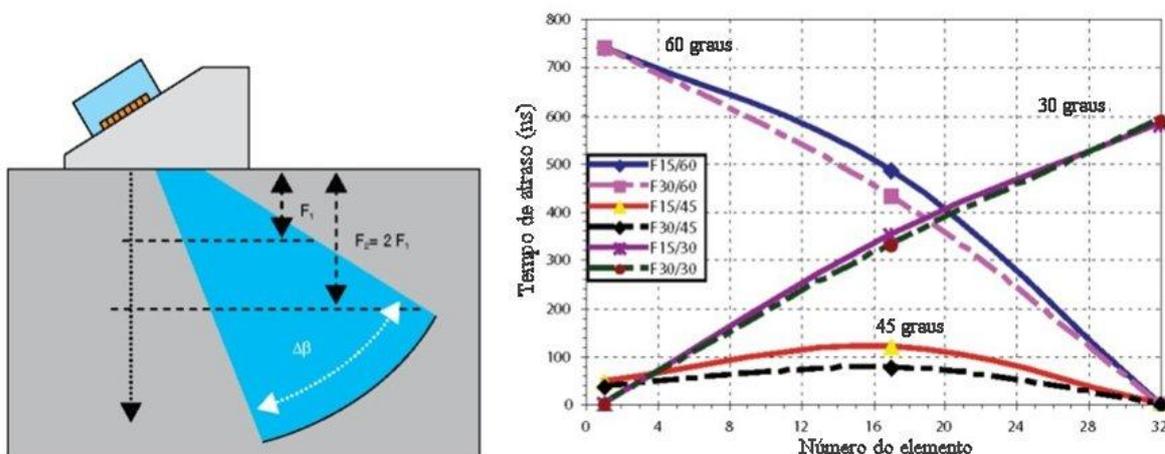


Figura 3.19 - Exemplo da dependência do tempo de atraso na posição do elemento e ângulo de refração para um transdutor *Phased Array* em uma cunha Plexiglas® de 37° ( $H_1=5,0\text{mm}$ ).

Em todos os exemplos acima, o tempo de atraso deve ser precisamente controlado. O tempo de atraso determina a máxima frequência de um transdutor e pode ser usada de acordo com a equação 3.2.

$$\Delta t_{\text{atraso}} = \frac{n}{f_c} \quad (\text{em microssegundos, } \mu\text{s}) \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

$n$  = número de elementos.

$f_c$  = frequência central (em MHz).

A tolerância no tempo de atraso está entre 0,5 e 2 ns dependendo das configurações do equipamento.

Outros tipos de sondas *Phased Array* (por exemplo, de matriz ou cônicas) podem requerer simulações avançadas para a determinação das leis de tempo de atraso e para avaliação do feixe <sup>(13)</sup>.

### 3.5 Técnica *Phased Array* para o ensaio ultrassônico em soldas austeníticas

Soldas em metais de base austeníticos demandam técnicas próprias para ensaios por ultrassom, devido ao comportamento anisotrópico destes materiais. Muitas atividades de pesquisa vêm sendo desenvolvidas em laboratórios e indústrias em todo mundo utilizando a técnica *Phased Array*, mas até o ano de 2005 não havia nenhuma solução normativa e conclusiva para resolver todos os problemas relacionados<sup>(15)</sup>. Para aperfeiçoar a capacidade de se detectar defeitos em tais materiais, algumas adaptações são feitas para melhorar a relação sinal-ruído, como por exemplo, a utilização de ondas longitudinais em substituição às transversais, utilização de perfil do feixe sônico focalizado e a aplicação de cabeçotes com duplos cristais. Dependendo da espessura da parede do componente soldado, mais que um cabeçote com ângulos diferentes são necessários para o ensaio completo, ou seja, para permitir a varredura de toda a área da solda e do metal de base adjacente, quando é aplicada a técnica convencional A SCAN. O Ensaio pode ser aplicado por um único transdutor, se a técnica *Phased Array* for adotada, o que levou alguns pesquisadores a desenvolverem um transdutor (cabeçote) emissor-receptor específico para a utilização da referida técnica.<sup>(15)</sup>

A detecção de defeitos em soldas e áreas adjacentes é influenciada pela geometria da raiz da solda. As dificuldades para detecção de defeitos em soldas austeníticas são causadas pela baixa relação sinal-ruído, que é insuficiente para distinguir os sinais de ruído provenientes de reflexões dos contornos dos grãos e dos sinais provenientes de refletores padrões (entalhes). Esta relação é o mais importante parâmetro para avaliar a capacidade de detecção.

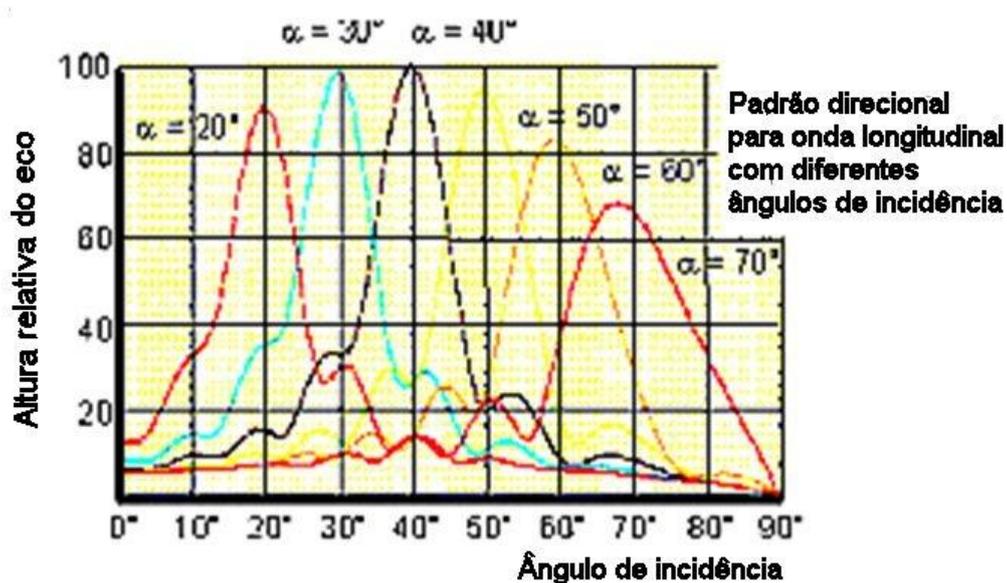
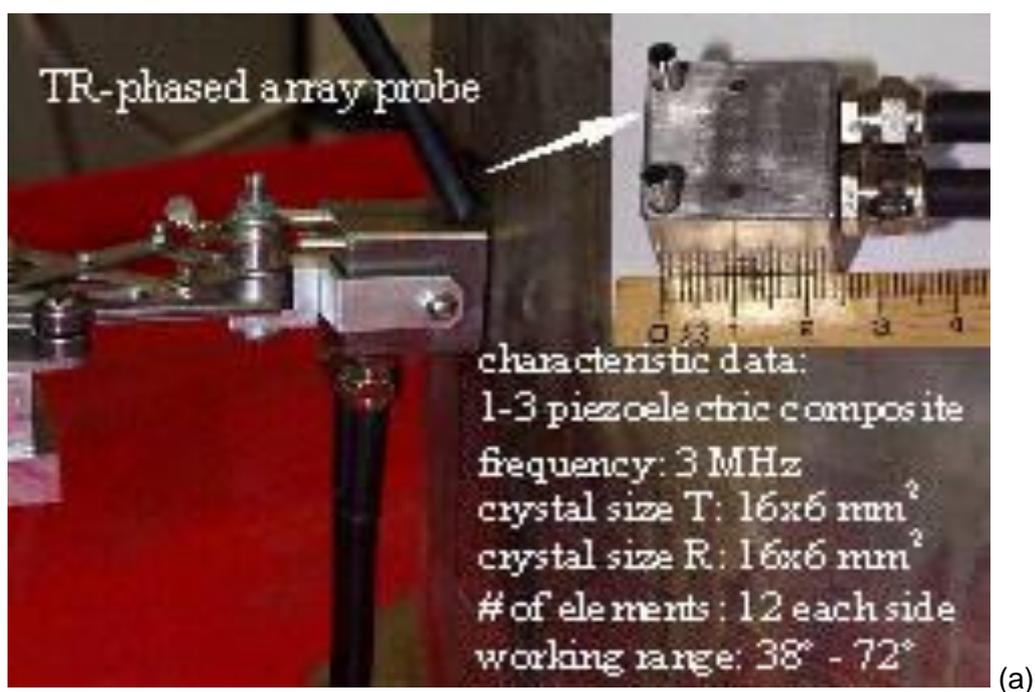
Os transdutores convencionais focalizados apresentam boa relação sinal-ruído, mas são de difícil operação. O ensaio requer uma maior área de varredura e os feixes focalizados se interceptam no ponto focal e, após este, se divergem, causando grande abertura do feixe resultante. Devido a estas dificuldades, é inviável a utilização de transdutores com feixe sônico focalizado. Uma solução para aplicação prática é a utilização de transdutores focalizados tipo SE (Emissor-Receptor), com distâncias focais constantes, previamente conhecidas e inferiores a espessura da solda a ser ensaiada. Estes transdutores devem ser acoplados sobre a superfície da solda, com o reforço esmerilhado rente ao metal de base<sup>(15)</sup>.

Com a propagação do feixe sônico com cabeçote angular a certas distâncias, a área de sensibilidade para reflexão é reduzida, devido à interação entre os grãos dos materiais e o feixe sônico. Para espessuras acima de 15 mm, mais que um transdutor angular é, frequentemente, necessário. Com o Transdutor TR-*Phased Array* (Emissor-Receptor) não há necessidade de utilização de outros transdutores, porque, devido à varredura angular (varredura setorial), a área de sensibilidade é adaptável para cada profundidade.

Pesquisas como as de Evhard e seus colaboradores <sup>(15)</sup>, baseadas na execução de ensaio em peças de testes com entalhes refletoras em diferentes profundidades, têm ajudado a demonstrar a capacidade de detecção de trincas, tanto na superfície, interna, quanto na superfície externa, quando se utiliza o transdutor *Phased Array* TRPA.

O transdutor *Phased Array* de ondas longitudinais mostrado na figura 3.19 foi desenvolvido por Evhard e colaboradores <sup>(15)</sup> para ensaiar juntas soldadas austeníticas em tubulações. O tamanho do corpo do transdutor é de 25 x 25 mm<sup>2</sup>. Este tamanho permite o acoplamento do transdutor à curvatura do tubo. O transdutor tem 12 cristais emissores e receptores, cuja frequência é de 3 MHz e o tamanho de cada cristal é 2mm x 6 mm. A soma das dimensões dos cristais é de 16 mm x 6 mm, tanto para o transmissor, como para o receptor.

A figura 3.20 mostra as propriedades acústicas do transdutor desenvolvido por Evhard e colaboradores <sup>(15)</sup> quanto à amplitude (intensidade de energia acústica, dB) para diferentes ângulos de incidência. Para uma faixa ampla dos ângulos de incidência, a amplitude é quase constante. Também a diferença na altura dos ecos entre os ângulos principais e os demais ângulos está em uma faixa aceitável. Calcula-se uma diferença máxima de 3 dB. Estas diferenças nas alturas dos ecos devem ser corrigidas durante o ensaio. Isto garante uma avaliação objetiva dos dados obtidos independente do ângulo de incidência <sup>(15)</sup>.



(b)

Figura 3.20 – (a) Dados característicos de um transdutor *Phased Array* de ondas longitudinais (15). (b) Variação da amplitude do sinal com o ângulo de varredura do feixe sônico.

Exames práticos, usando transdutores de ondas longitudinais, requerem parâmetros de sensibilidade determinados em furos de fundo cilíndrico ou fundo plano e a maioria dos procedimentos de avaliação está baseada em diagramas distancia x amplitude DAC<sup>(9)</sup>. Sendo assim, tais diagramas devem estar disponíveis para transdutores *Phased Array* de ondas longitudinais com sua extensiva faixa de ângulos de incidência. Na figura 3.21, vê-se a dependência da amplitude das ondas longitudinais em relação ao tempo de percurso, para diversos ângulos de incidência.

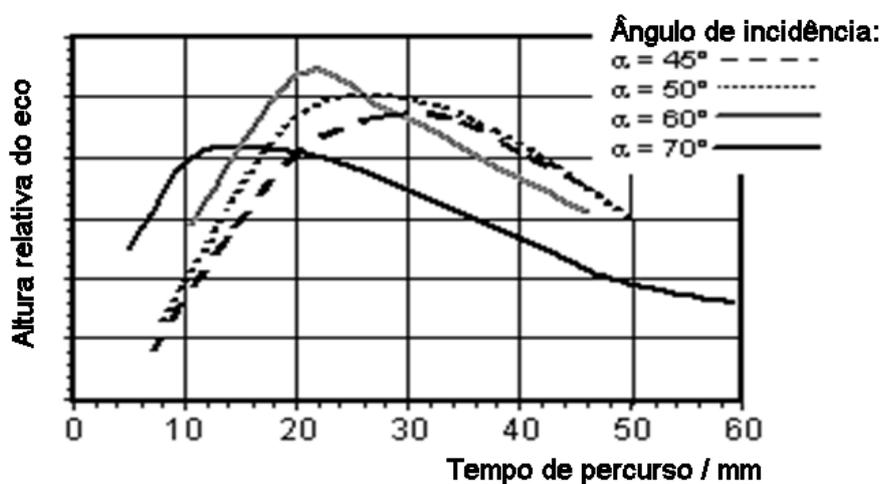


Figura 3.21 - Amplitude das ondas longitudinais em relação ao tempo de percurso, para cada ângulo de incidência, gerada no transdutor *Phased Array*.

Evhard e colaboradores<sup>(15)</sup> executaram testes no corpo mostrado na figura 3.22 de uma junta tubular soldada de topo utilizando o transdutor *Phased Array* da figura 3.19. Foram usinados 16 entalhes nas superfícies interna e externa do tubo. A tabela da figura 3.22 mostra os entalhes com profundidades entre 2,0 a 7,0mm. Estes entalhes foram feitos para a calibração do aparelho de ultrassom.

Para o ensaio, a peça de teste foi fixada em uma mesa giratória para simular uma inspeção automatizada por ultrassom. Durante a rotação da peça, o ângulo de incidência variou numa faixa de  $40^\circ$  a  $70^\circ$ , utilizando ondas longitudinais.



Figura 3.22 - Esquema experimental para a atualização do ensaio<sup>(16)</sup>.

A figura 3.23 apresenta uma imagem TD (Tempo x Deslocamento) dos entalhes gerada com um ângulo de incidência de 45°, usando um transdutor de ondas longitudinais posicionado a 40 mm de distância da linha de centro da solda. Os entalhes da superfície interna são detectáveis com uma razão média de sinal/ruído em torno de 16 dB. Esta é uma relação sinal/ruído considerada boa o suficiente para aplicação em campo.

A figura 3.24 apresenta uma imagem TD (Tempo x Deslocamento) dos entalhes gerada com um ângulo de incidência de 70°, usando um transdutor de ondas longitudinais posicionado a 10 mm e a 20 mm de distância da linha de centro da solda. Nesta figura observa-se o aparecimento simultâneo das imagens dos entalhes detectadas pelas ondas longitudinais e transversais, com o transdutor localizado a distancia de 20 mm em relação ao centro da solda.

Nas figuras 3.23 e 3.24, as imagens dos entalhes são apresentadas sobre a superfície planificada do tubo, onde o eixo horizontal representa a distância em relação a linha de centro da solda e o eixo vertical representa a posição em graus radianos em torno do perímetro do tubo.

A imagem TD fornece uma boa avaliação sobre a detecção dos entalhes na superfície interna e externa. O número de entalhes nas imagens TD das figuras 3.23 e 3.24 é o mesmo mostrado na tabela da figura 3.22. Esta pesquisa demonstra que a técnica de *Phased Array*, utilizando um transdutor em cada lado da solda, é viável. A detecção de defeitos superficiais ou defeitos internos pode ser feita variando o ângulo de incidência durante a varredura entre  $40^\circ$  e  $70^\circ$  <sup>(15)</sup>.

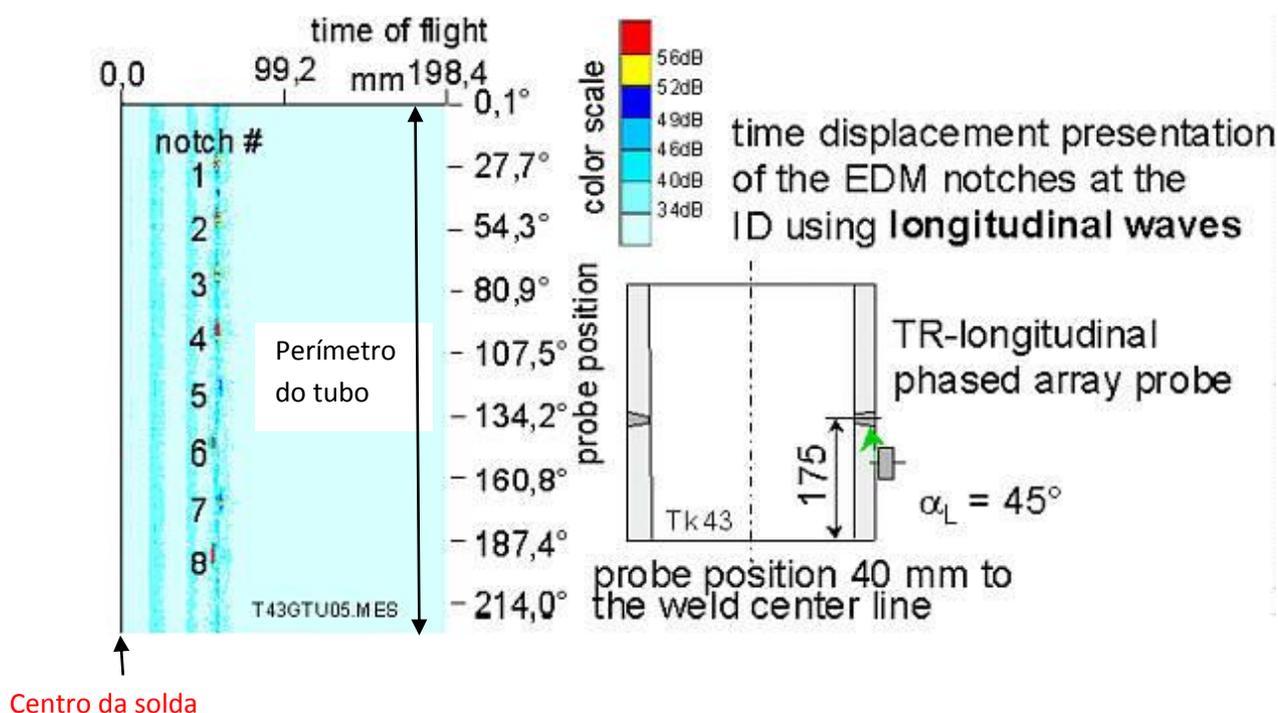


Figura 3.23 - Imagem TD (Tempo x Deslocamento) dos entalhes gerada com um ângulo de incidência de  $45^\circ$  usando um transdutor de ondas longitudinais<sup>(16)</sup>

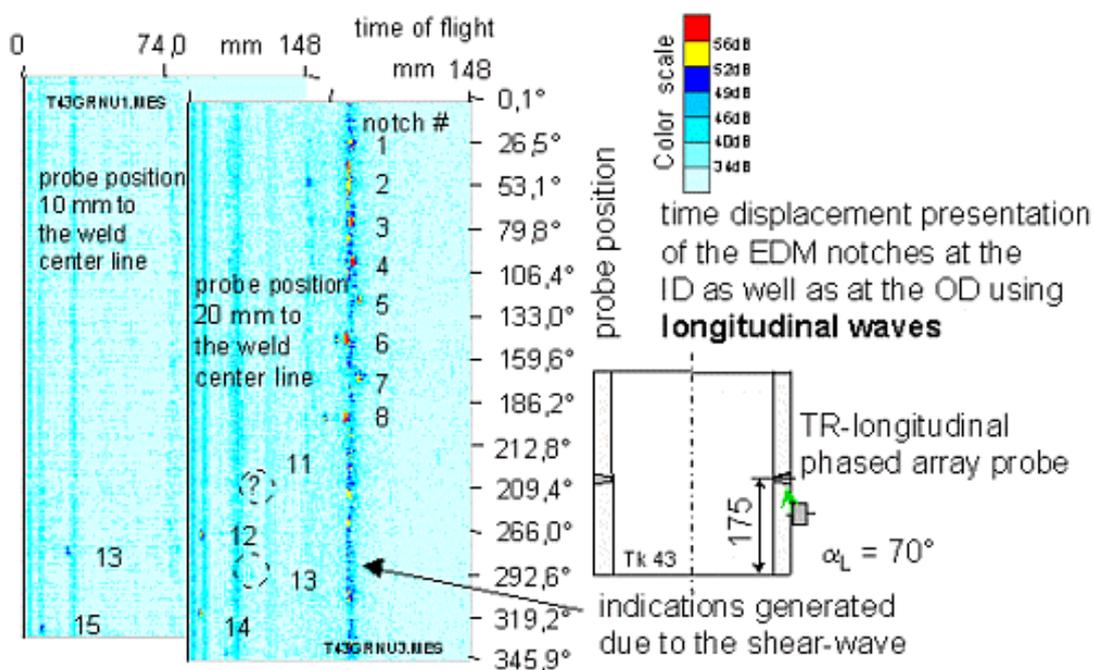


Figura 3.24 - Imagem TD (Tempo x Deslocamento) dos entalhes gerada com um ângulo de incidência de  $70^\circ$  usando um transdutor de ondas longitudinais

Os testes sobre a possibilidade de inspeção das soldas em tubos austeníticos demonstram vantagens do uso da técnica de ultrassom *Phased Array*, uma vez que é possível a detecção de trincas e defeitos internos na solda e no metal de base adjacente.

### 3.6 Qualificação de procedimentos de ensaio por ultrassom

Conforme a norma PETROBRAS N-1590-F<sup>(17)</sup>, um procedimento de ultrassom é considerado qualificado, quando for possível estabelecer uma curva de Distância Amplitude (DAC) das reflexões (ecos) provenientes de todos os furos com dimensões padronizadas e posicionados estrategicamente em regiões da solda e da ZAT. Esta curva DAC deverá ser traçada somente por ecos provenientes dos furos, não sendo admitidas outras reflexões provenientes de outros sinais, tais como quinas, reforços de soldas, parede do tubo ou excesso de ruído (grama) excessivo na tela do aparelho que possa diminuir a resolução acústica do ensaio (Figura 3.25).

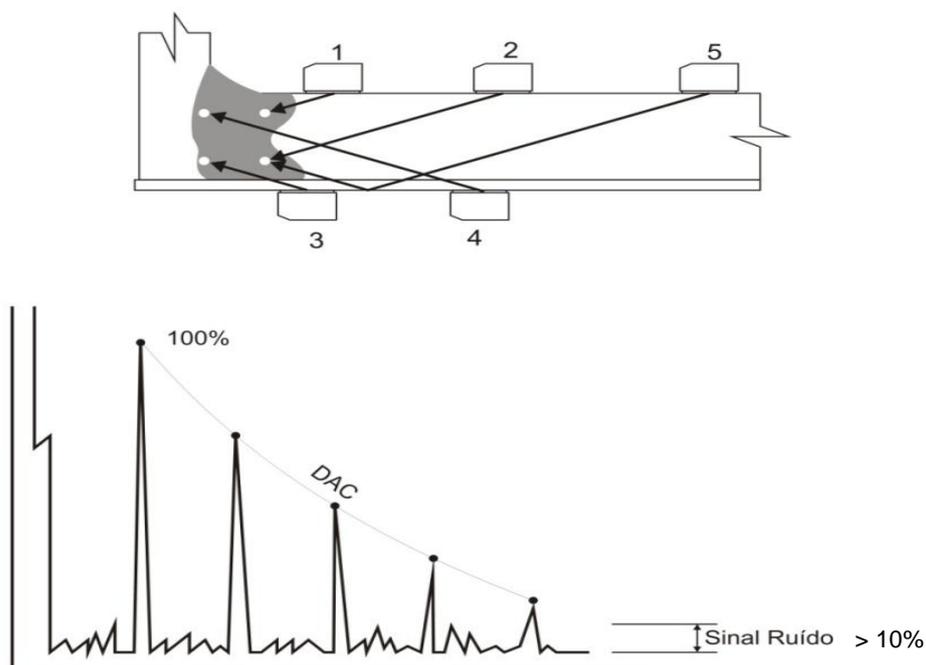


Figura 3.25 - Curva DAC.

Relação sinal/ruído ideal, para evitar a interferência negativa de ruídos, deve ser maior ou igual a 10 (20 dB), ver equação 3.3. A norma EN BS 12668-3 requer uma relação sinal/ruído superior a 2 (6 dB). O diâmetro do menor furo padrão para o ensaio em juntas soldadas da norma ASME V é 2,4 mm.

$$\frac{\% \text{ Eco do furo padrão}}{\% \text{ Ruído}} > \frac{10}{1} \quad (\text{Equação 3.3})$$

Para que os ruídos gerados por reflexões em contornos de grão não sejam significativos, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) do feixe sônico deve ser maior que o tamanho de grão ( $\phi$ ). O comprimento de onda se relaciona com a velocidade do som no material ( $V$ ) e a sua frequência ( $f$ ) pela relação:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (\text{Equação 3.4})$$

Por exemplo, um transdutor de 4 MHz de ondas transversais gera comprimento de onda na ordem de 0,8 mm, ou seja provavelmente haverá ruído significativo se o tamanho dos

grãos forem superiores a 0,8 mm. Logo, uma boa relação sinal ruído depende do tamanho do grão do material da peça a ser ensaiada.

Há, em princípio, duas formas de aumentar o valor da relação sinal/ruído.

A primeira é a utilização de ondas transversais com baixa frequência (até 2 MHz). Contudo, estas têm baixa sensibilidade para detecção de pequenas descontinuidades e aumentam a divergência do feixe sônico<sup>(18)</sup>. Frequências elevadas (4 MHz) são mais sensíveis para a detecção de pequenas descontinuidades, porém causam maiores reflexões de ruídos provenientes de contornos de grão.

A segunda seria a utilização, no ensaio, de transdutores angulares que emitissem somente ondas longitudinais. Neste caso, seria necessário desenvolver a construção de transdutores angulares que emitissem feixes angulares somente de ondas longitudinais, o que seria impraticável, pois, pela lei de Snell, quando uma onda incidente longitudinal intercepta uma interface oblíqua de matérias, com diferentes velocidades de propagação do som, uma parte da onda é refratada como onda longitudinal e outra é refratada como transversal. O ângulo da onda longitudinal, em relação a um plano normal à superfície, será sempre maior que o ângulo da onda transversal refratada. Quando a onda longitudinal refratada atinge o ângulo de 90°, há incidência para dentro do material a ser ensaiado somente de onda transversal (figura 3.6 e equação 3.1)<sup>(18)</sup>.

Contudo, é possível desenvolver um transdutor que isole as ondas transversais no recebimento (retorno), baseado no princípio de que as ondas transversais só se propagam nos líquidos a distâncias muito curtas, ou seja, da ordem de menos de 1 mm<sup>(7)</sup>.

Das duas alternativas apresentadas para o aumento da relação sinal-ruído, a mais adequada seria a utilização do ensaio apenas com onda longitudinal, pois esta tem a vantagem de não sofrer grandes atenuações e espalhamento do feixe sônico nos contornos de grãos. Porém, com esta técnica tem-se o inconveniente de executar o ensaio com dois tipos de ondas simultaneamente, o que torna extremamente complexo distinguir as reflexões com seus respectivos tipos de ondas, ou seja, não se pode determinar se os ecos que aparecem na tela do aparelho correspondem às reflexões da onda transversal ou às da onda longitudinal. O ideal seria executar o ensaio com um transdutor que operasse somente com onda longitudinal.

Ruídos excessivos são provenientes de reflexões dos contornos de grãos na zona fundida e na ZAT, que no caso dos aços inoxidáveis austeníticos tendem a ser grandes, colunares e anisotrópicos. Quando a quantidade de energia refletida nos contornos de grãos é aproximadamente 10% da quantidade de energia refletida dos furos padrões ( $\emptyset$  2,4 mm), significa que o tamanho de grão é da ordem de 0,024 mm e, conseqüentemente, uma microtrinca com dimensões da mesma ordem poderia não ser diferenciada (resolvida), comparando-se aos tamanhos de grãos de mesma ordem <sup>(18)</sup>. Ver equações 3.5 e 3.6 <sup>(18)</sup>.

Pode-se calcular pela equação 3.5 a variação de energia necessária para a queda da amplitude do eco de 100% (eco do refletor) para 10% (eco dos ruídos) da altura apresentada na da tela do aparelho.

$$\Delta dB = 20 \log \frac{H_2}{H_1} \quad \text{(Equação 3.5)}$$

Onde:  $\Delta dB$  é a queda de intensidade em Decibéis,

$H_1$  é a altura do eco a 100% da tela,

$H_2$  é a altura de ecos a 10% da tela.

$$\Delta dB = 20 \log \frac{100}{10} \rightarrow \Delta dB = 20 \text{dB}$$

Para a mesma quantidade de variação de energia (20 dB), pode-se calcular pela equação 3.6 o tamanho mínimo de um refletor cilíndrico que pode ser detectado pela incidência perpendicular do feixe sônico.

$$\Delta dB = 10 \log \frac{\emptyset_2}{\emptyset_1} \quad \text{(Equação 3.6)}$$

$\emptyset_2$  = diâmetro furo padrão 2,4 mm

$\emptyset_1$  = diâmetro menor refletor detectável

Para uma variação de 20 dB, ter-se-ia,  $20 \text{dB} = 10 \log \frac{2,4}{\emptyset_1}$ , e, portanto,:

$$\emptyset_1 = 0,024 \text{mm}$$

Baseado nas equações 3.5 e 3.6 e no desenvolvimento apresentado acima, e considerando-se que o material do bloco padrão é o mesmo material da solda a ser ensaiada, os grãos com tamanhos da ordem de 0,024 mm de diâmetro ou maiores poderiam ser detectados e causariam reflexões com amplitude, de no mínimo a 10% da altura da tela, pois os contornos dos grãos são interfaces que refletem ecos quando se utiliza frequências maiores ou iguais a 4 MHz<sup>(18)</sup>. Logo, seria necessário comprovar através do ensaio por ultrassom pelo método convencional, utilizando transdutores de ondas transversais de 4 MHz, se seria possível traçar a curva DAC de todos os furos padrão da peça de teste sem a interferência dos contornos dos grãos maiores que 0,024 mm que poderiam estar presentes no depósito soldado austenítico e na ZAT.

Além da interferência do tamanho elevado de grão no material austenítico na relação sinal-ruído, também será necessário verificar a influência dos contornos de grãos no desvio do ângulo do feixe sônico. A variação do percurso sônico a partir da incidência no aço carbono em direção ao depósito austenítico deve ser avaliada, pois na interface entre a solda e o metal de base há uma pequena mudança na velocidade da onda transversal do som (para o aço carbono,  $V_t(ac) = 3,1$  km/s; para o aço inoxidável  $V_t(ai) = 3,25$  km/s). Há outros fenômenos acústicos que ocorrem nos contornos dos grãos e que interferem na interpretação do ensaio, tais como: conversão de modo da onda, dispersão do feixe e atenuação acústica. Tais fenômenos devem ser considerados no estudo da relação sinal-ruído.

## 4 - Materiais e Métodos

### 4.1. Introdução

A metodologia adotada inclui a aquisição e análise de dados experimentais provenientes dos ensaios mecânicos, metalográficos, radiográficos, e de análises químicas e de ensaios por ultrassom, aplicados a duas peças de teste, que simulam a junta soldada dos bocais.

Os resultados dos ensaios metalográficos, análises químicas e ensaios mecânicos, foram usados para a caracterização metalúrgica da junta soldada e definição de suas propriedades mecânicas e químicas.

Os dados das propriedades e da caracterização metalográfica da junta soldada auxiliaram na definição da viabilidade do ensaio por ultrassom e na determinação da técnica mais adequada para este ensaio, ao considerar as implicações destes resultados sobre as mudanças e as interferências no feixe sônico, tais como: conversão de modo de onda, espalhamento, difração, dispersão, atenuação e velocidade do som. Uma vez determinada a técnica mais adequada, o desempenho do ensaio por ultrassom foi avaliado pela comparação com os resultados obtidos pelo ensaio radiográfico aplicado a uma junta de um bocal contendo defeitos artificiais.

### 4.2. Materiais

As peças de teste foram duas juntas soldadas simulando as juntas típicas de bocais do vaso. A peça A é composta por uma chapa de aço inoxidável austenítico ASTM A-240 grau 304L e uma chapa de aço carbono ASTM A-516 Gr. 60 cladeada com uma chapa de aço inoxidável ASTM A-240 T304L. A peça de teste B é composta por um tubo de aço inoxidável austenítico ASTM A-312 TP 304L e uma chapa de aço carbono ASTM A-516 Gr. 60 cladeada com uma chapa de aço inoxidável ASTM A-240 grau 304L.

As tabelas 4-1 e 4-2 mostram as composições químicas especificadas destes aços.

Tabela 4-1 Composição química especificada para o metal de base ASTM A 516 gr 60.

C	Si	Mn	P	S
0,23	0,15 – 0,40	0,85 – 1,20	0,035	0,030

Valores em % em peso. Valores únicos são os máximos especificados.

Tabela 4-2 – Composição química especificada para os metais de base  
ASTM A 312 TP 304 L e ASTM A 240 gr 304 L.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,035	1,00	2,00	0,045	0,030	18,20	NA	8,13	NA

Valores em % em peso. Valores únicos são os máximos especificados.

### 4.3. Equipamentos e Laboratórios.

#### 4.3.1. Soldagem

Os seguintes equipamentos e consumíveis de soldagem foram usados para a fabricação da junta:

- Máquina de solda *Castolin Eutectic*, modelo GS425 Itaipú
- Eletrodos revestidos Kestra KST 4829Mo – ASME SFA A5.4 E309Mo16.
- Eletrodos revestidos Boelher Thyssen UTP 653 – ASME SFA A5.4 E309 Mo17.
- Eletrodos revestidos Boelher Thyssen UTP 68-Mo1C – ASME SFA A5.4 E316L-17.

A caracterização metalográfica desta junta foi realizada nos laboratórios da FIEMG-SENAI-LAMAT – Itáúna MG e Laboratório Falcão Bauer em São Paulo

#### 4.3.2. Ensaio por ultrassom

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

##### 4.3.2.1. Aparelhos

- **USM 35XS – General Electrics – GE- Ensaio Convencional.**

Este equipamento portátil e digital é utilizado para o ensaio na técnica convencional com apresentação A SCAN, ou seja, apresenta na tela do aparelho apenas o ecograma das discontinuidades. Não permite registro automatizado e nem digitalizado das imagens durante a varredura, sendo sua operação somente manual. As técnicas utilizadas para o ensaio neste equipamento são técnicas de reflexão pulso-eco e de transparência, ambas

com pulso-eco, utilizando em cada varredura no máximo dois transdutores, sendo cada um operando com um único cristal.

- **Omniscan MX – Olympus – Ensaio através das técnicas TOFD e *Phased Array* (Figura 4.1).**

Este equipamento portátil e digital é utilizado para o ensaio na técnica convencional e nas técnicas *Phased Array* e TOFD com as apresentações A SCAN, (ecograma das descontinuidades), S SCAN (imagem digitalizada da varredura do feixe sônico sobre a seção transversal da solda), B SCAN (Imagem digitalizada *Phased Array* e TOFD do corte da seção longitudinal da solda), C-Scan. O aparelho permite o completo registro manual ou automatizado de todas as imagens durante a varredura. As operações manual ou automática são executadas através de um “scanner”. No “scanner” é acoplado um *encoder* (medidor de posição), que permite indicar a posição do transdutor ao longo do eixo da solda a partir de um ponto referencial zero. Cada imagem digitalizada, mostrada na tela do aparelho corresponde a uma determinada posição de varredura do transdutor em escala milimétrica. As técnicas utilizadas para o ensaio neste equipamento são técnicas de reflexão e de transparência com pulso eco *Phased Array* e difração TOFD.



Figura 4.1 - Aparelho de ultrassom Olympus Omniscan MX.

### 4.3.2.2. Transdutores

Os transdutores utilizados para este ensaio estão mostrados nas tabelas 4-3 e 4-4.

Tabela 4-3 - Transdutor Olympus (usado nas técnicas TOFD e *Phased Array*).

MODELO	Nº DE ELEMENTOS	RESOLUÇÃO (Graus)	ABERTURA DO FEIXE (Graus)	SAPATA
5L16 N55S	Angular	1°	0° a 72°	SA10-N60L.

Tabela 4-4 – Transdutores Krautkramer (usados no ensaio convencional e para ensaio com ondas longitudinais).

MODELO	TIPO	ÂNGULO (Graus)	FREQ. (MHz)	Observações
MWB45N4	Angular	45	4	NA
MWB60N4	Angular	60	4	NA
MWB70N4	Angular	70	4	NA
WB45N2	Angular	45	2	NA
WB60N2	Angular	60	2	NA
WB70N2	Angular	70	2	NA
MSY45-4	Angular	45	4	Transdutor de ondas longitudinais
MSY60-4	Angular	60	4	Transdutor de ondas longitudinais
MSY70-4	Angular	70	4	Transdutor de ondas longitudinais
MSEB4H	Duplo Cristal	-	4	NA

## 4.4. Metodologia.

### 4.4.1. Soldagem

Foram soldadas duas peças de teste (Peça A e Peça B). A peça A, figura 4.2, foi utilizada para a confecção dos corpos de prova para os ensaios metalográficos e mecânicos, análises químicas e para a confecção de um bloco padrão para o ensaio por ultrassom (Figura 4.3). A peça B foi usada para análise do desempenho do ensaio por ultrassom

(figuras 4.4 e 4.5). Nesta peça, foram inseridos na junta soldada pequenos pedaços de cerâmica de modo a produzir descontinuidades artificiais. A figura 4.4 apresenta um desenho da peça B com detalhes que mostram a posição destas descontinuidades artificiais. A localização transversal das descontinuidades é apresentada no detalhe 2 (Figura 4.5e) e a localização radial das descontinuidades em oito regiões equidistantes é apresentada na vista de planta (Figura 4.5b).

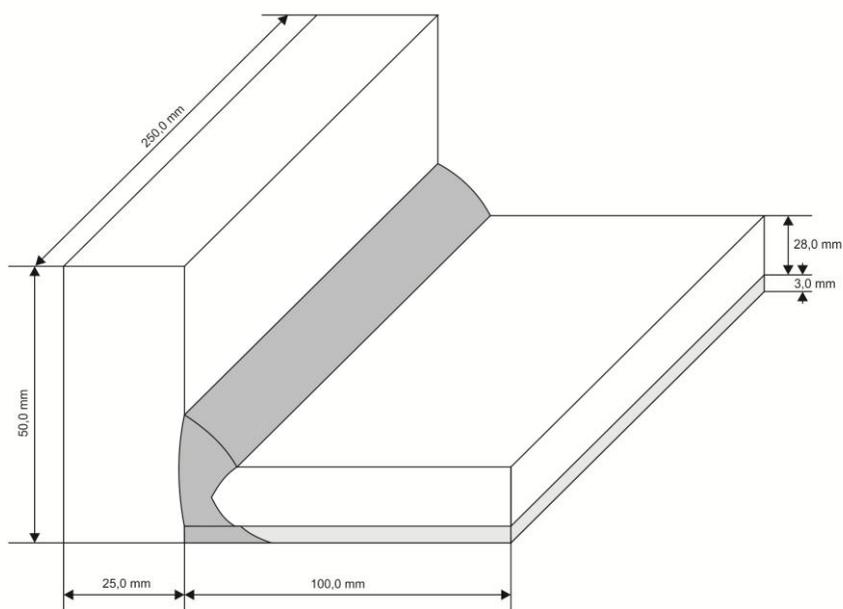


Figura 4.2 - Peça A – Croqui.



Figura 4.3 – Foto do bloco padrão para calibração da sensibilidade do ensaio por ultrassom retirado da peça A.

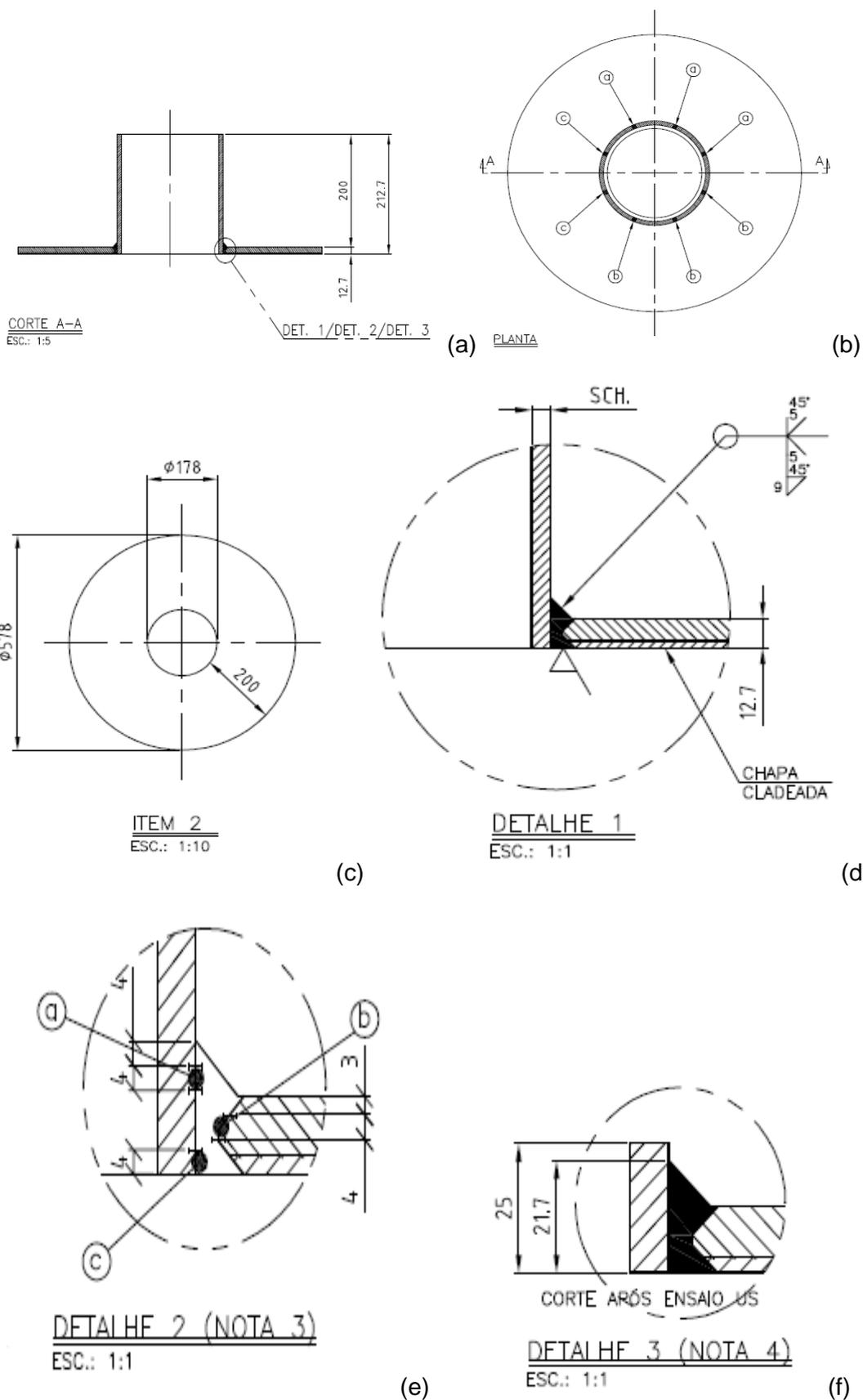


Figura 4.4 - Peça B - Desenho distribuição das descontinuidades artificiais



Figura 4.5 - Peça B após o corte do tubo rente à junta soldada

As peças A e B foram soldadas utilizando-se os mesmos parâmetros, seguindo as Especificações de Procedimento de Soldagem DELP N° 0607 e N° 0785 (Anexo I). A EPS 0785 foi aplicada para a soldagem da raiz, enchimento e acabamento na posição plana entre o aço carbono e o aço inoxidável, utilizando-se o eletrodo revestido ASME SFA A5.4 E309L-16 com uma temperatura de interpasse máxima de 150°C. A EPS 00607 foi aplicada para a soldagem na posição plana do revestimento cladeado sobre o metal soldado E309L-16, utilizando-se eletrodos ASME SFA A5.4 E309Mo-17 na primeira camada e ASME SFA A5.4 E316L-17 para a segunda e terceira camadas do revestimento.

#### 4.4.2 Corte e Usinagem dos Corpos de Prova.

A peça B foi utilizada para verificação da confiabilidade e avaliação do desempenho do ensaio por ultrassom tanto na técnica convencional *A-SCAN*, quanto pela técnica *Phased Array*. A avaliação do desempenho e confiabilidade do ensaio constituiu na comparação dos resultados do ensaio por ultrassom, com os resultados obtidos através de ensaio radiográfico. Para que fosse possível a execução do ensaio radiográfico, devido às limitações geométricas, o tubo da peça B foi cortado rente a solda (figura 4.5).

A peça A foi utilizada para confecção dos corpos de prova para os ensaios metalográficos e para a fabricação de um bloco padrão para o ensaio por ultrassom (figura 4.3 e figura 4.6). O bloco padrão para o ensaio por ultrassom foi fabricado pela usinagem de 03 furos

cilíndricos laterais sobre ambas as faces da seção transversal da solda, sendo um furo em uma face e dois furos em outra face, conforme as especificações da norma ASME V, 2008 e utilizado para duas funções: A primeira foi a calibração da sensibilidade do ensaio, utilizando-se o furo A, e a segunda foi o estudo sobre possibilidade de detecção dos furos B, C e D e suas relações sinal-ruído no metal soldado austenítico. Segundo a norma Petrobras N-1594-F, um procedimento de ensaio por ultrassom é qualificado, quando é possível a detecção de todos os furos localizados no metal soldado e na linha de fusão com uma relação sinal-ruído superior a 10.

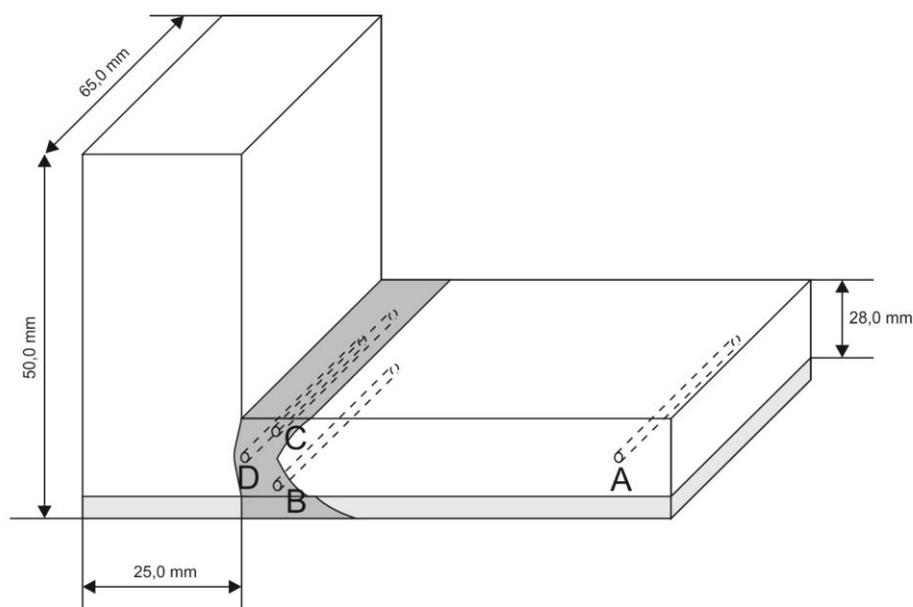


Figura 4.6 – Bloco padrão para o ensaio por ultrassom

Os corpos de prova para os ensaios mecânicos, químicos e metalográficos foram retirados da peça soldada, conforme figura 4.7 e 4.8.

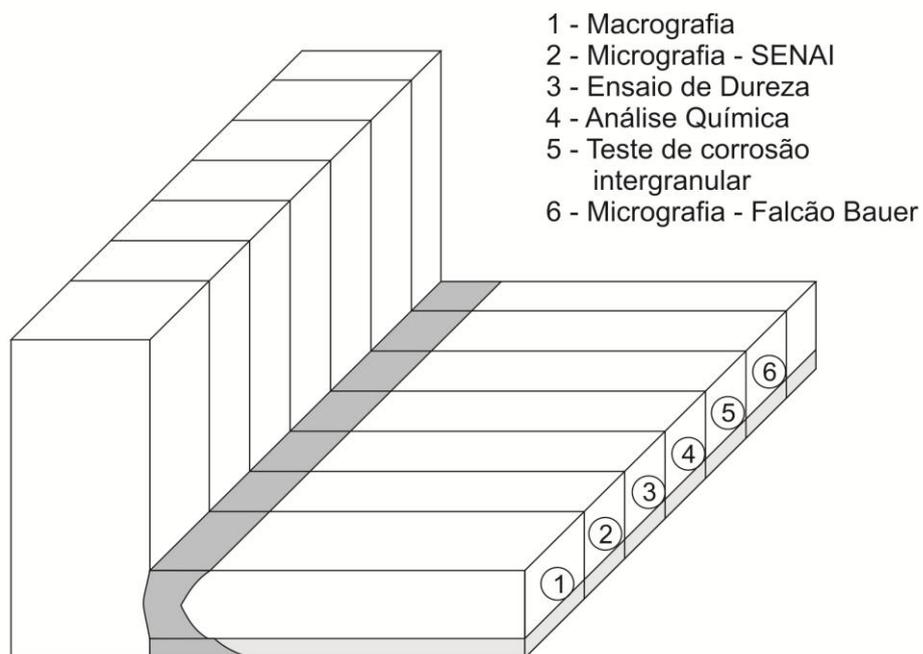


Figura 4.7 - Corte dos corpos de prova para os ensaios metalográficos

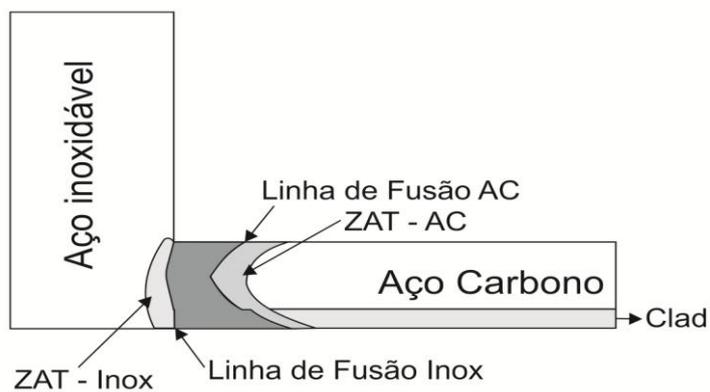


Figura 4.8 – Seção transversal dos corpos de prova

A peça de teste A da figura 4.3 foi cortada, gerando seis corpos de prova utilizados para a execução dos seguintes ensaios:

- CP 01 – Ensaio macrográfico – Laboratório SENAI.

- CP 02 – Ensaio micrográfico – Laboratório SENAI.
- CP 03 – Ensaio de dureza – Laboratório SENAI.
- CP 04 – Análise química – Laboratório SENAI.
- CP 05 – Teste de corrosão intergranular – Laboratório Falcão Bauer Ltda.
- CP 06 – Ensaio macrográfico – Laboratório SENAI.

#### **4.4.3. Ensaio Macrográfico**

O ensaio macrográfico foi executado sobre a seção transversal do CP 01 pelo laboratório SENAI – CETEF – LAMAT Itaúna. O reagente utilizado foi água régia. A imagem revelada da macrografia foi ampliada 5 vezes e fotografada.

#### **4.4.4 Ensaio Micrográfico**

##### **4.4.4.1 Localização das amostras.**

O ensaio micrográfico foi realizado sobre duas amostras distintas, para permitir uma análise de possíveis diferenças entre os resultados do ensaio. Uma foi enviada ao laboratório CETEF – LAMAT (CP 02) e a outra ao laboratório Falcão Bauer em São Paulo (CP 06).

Os ensaios micrográficos foram executados sobre a seção transversal dos corpos de prova, em cinco pontos distintos localizados no metal de solda (MS) e nas zonas afetadas termicamente do lado do aço inoxidável (ZAT 2) e do aço carbono (ZAT 1) e nos metais de base. As amostras foram retiradas na metade da espessura, ver figura 4.9. O reagente nital 3% foi utilizado nas amostras retiradas do metal de base do aço carbono e ZAT próxima. Os reagentes marble, super picral, e ácido oxálico foram utilizados nas amostras retiradas do metal de solda, ZAT e metal de base austeníticos. Os ensaios micrográficos foram executados conforme norma ASTM E 3 e as imagens foram fotografadas com a ampliação de 150 a 300 vezes.

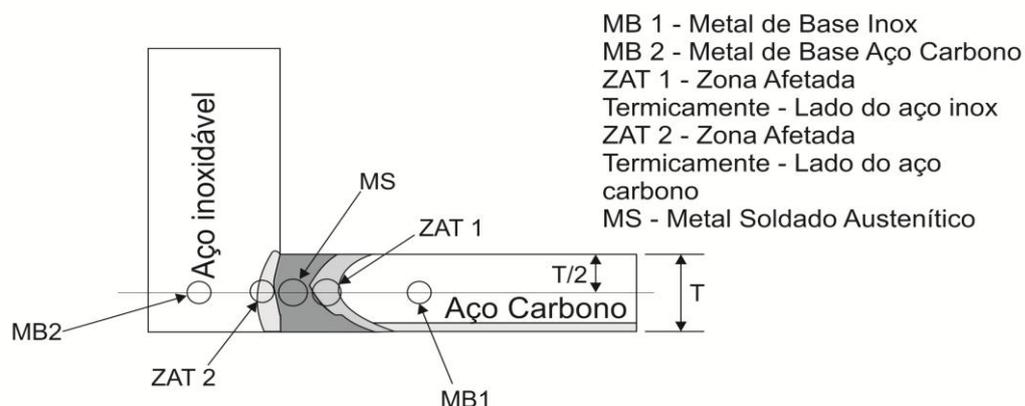


Figura 4.9 – Retirada dos corpos de prova para micrografia

#### 4.4.5 Ensaio por ultrassom convencional.

##### 4.4.5.1 Ensaio por ultrassom com a aplicação da técnica convencional *A-SCAN* com transdutor de ondas transversais de 2 MHz e 4 MHz:

O ensaio na peça de teste A pela técnica convencional (*A-Scan*) com onda transversal foi executado com o aparelho Krautkramer USM 35X e com transdutores de ondas transversais: MWB 45 N4, MWB 60 N4 e MWB 70 N4, WB 45 N2, WB 60 N2 e WB 70 N2.

##### 4.4.5.2 Ensaio por ultrassom nas peças de teste pela técnica convencional (*A-Scan*) com ondas longitudinais de 4 MHz

O ensaio na peça de teste A pela técnica convencional (*A-Scan*) com onda longitudinal foi executado com o aparelho Krautkramer USM 35X e com transdutores de ondas longitudinais: WSY45-4, MSY 60 N4 e MSY 70 N4 e MSEB4H (tabela 4-5).

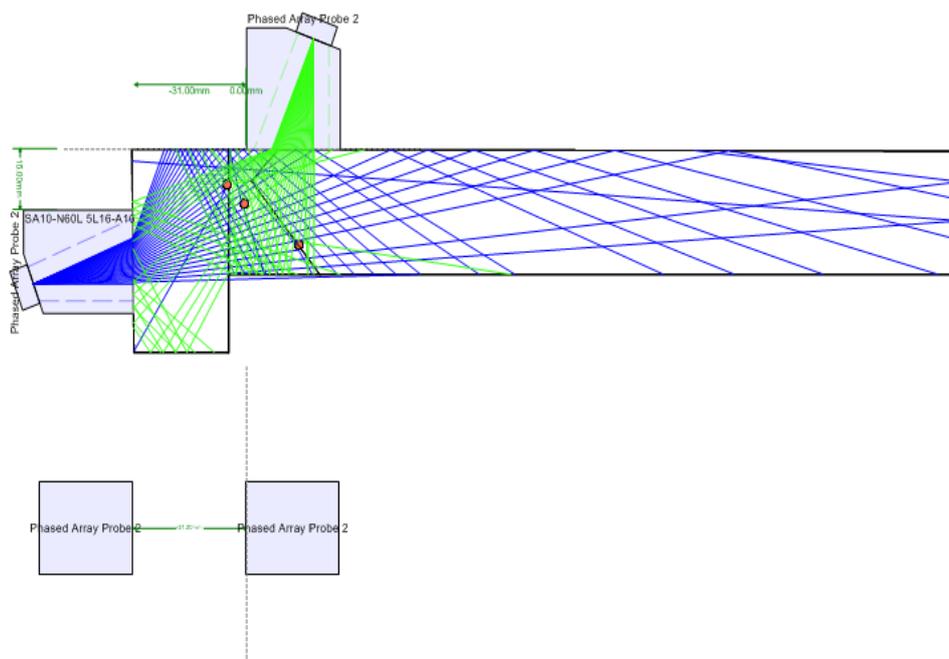
Os transdutores angulares utilizados nesta técnica emitem ondas longitudinais angulares, porém, devido à lei de Snell (equação 3.3), sempre vem acompanhados pela onda transversal, figura 3.25 (ASNT – Ultrasonic Testing Handbook, 1991).

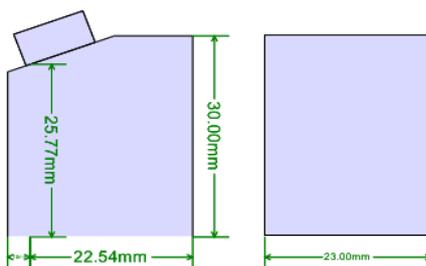
Tabela 4-5 – Transdutores angulares de onda longitudinal.

Transdutor	Ângulo Nominal	Ângulo da Onda Longitudinal	Ângulo da Onda Transversal
WSY 45	45°	45°	22°
WSY 60	60°	60°	28°
WSY 70	70°	70°	31°

#### 4.4.6 Ensaio na peça de teste através da técnica *Phased Array*.

O software “*Beam Tools*”, que acompanha o equipamento e permite a visualização da abertura de varredura do feixe sônico (faixa de varredura angular) com as respectivas incidências, refrações e reflexões para cada ângulo, foi utilizado, para verificar o tipo de transdutor mais adequado para a visualização da varredura completa da junta soldada, da ZAT e de 20 mm adicionais nos metais de base adjacentes. Com este programa, a abertura do feixe sônico de cada ângulo é projetada sobre a seção transversal da solda. A figura 4.10 mostra o croqui de varredura e a figura 4.11 apresenta o relatório do programa “*Beam Tolls*”, com o perfil do feixe sônico com ângulo de 0° a 72°, correspondente ao transdutor 5L16-A10 e a sapata SA10-N60L.

Figura 4.10 – Croqui de varredura da junta no software *Beam Tools*



### Piece – Peça

Material	Thickness	Shear Velocity	Compression Velocity
	Espessura	Velocidade transversal	Velocidade longitudinal
steel – Austenitic (Aço inox austenítico)	30mm	3.09mm/μs	5.74mm/μs

### Wedge – Sapata: SA10-N60L 5L16-A10

Velocity	Primary Offset	Height 1 <sup>st</sup> Element	Length	Width	Angle
Velocidade		Altura 1º elemento	Comprimento	Largura	Angulo
2.33mm/μs	22.54mm	25.77mm	25.64mm	23mm	20°

### Transduce - Transdutor: 5L16-A10

Num. of Elements	Element Pitch	Total Aperture
	Distancia entre elementos	Dimensão total dos elementos
16	0.6mm	9.6mm

### Sectorial Beamset – Dados do feixe sônico setorial

Law Config (Lei focal): Sectorial (setorial)	First Element	Min. Angle	Max Angle	Angle Steps	Focus Depth
Wave Type (Tipo de onda): Longitudinal Element Qty (Quantidade de elementos)	Primeiro elemento	Angulo minimo	Angulo maximo	Resolução	Profundidade de focal
16	1	0°	72°	2.32°	5mm

### Focusing

### Foco:

None Nenhum

Gate (Monitor) Start (inicio): 5mm Gate (monitor) Length (comprimento): 5mm

Estimate (Estimado) NearField (Campo proximo) Min: 42.56mm Estimated NearField Max: 43.93mm

Estimated Beam Spread (Espalhamento do feixe sonico) Min: 6.1° Estimated Beam Spread Max: 18.27°

Figura 4.11 – Relatório emitido pelo programa “Beam Tools”.

Os seguintes dados fornecidos pelo programa “*Beam Tools*” foram transferidos para o “*setup*” de calibração do aparelho:

- PCS( *Prob Center Size*) - Distância da borda do transdutor ao centro da solda: - 31 mm.
- Abertura do feixe: 0° a 72°.
- Material: aço carbono.
- Ondas: longitudinais.
- Velocidade do som: 5740 m/s.
- Espessura da peça: 30,0 mm.
- Transdutor: 5L16N55S.
- Sapata: SA10N60L.
- Quantidade elementos: 16.
- Início da abertura: 1º elemento.
- Resolução: 1°.

## 5. Resultados e discussões

### 5.1. Caracterização da junta soldada

Os ensaios macro e micrográficos apresentaram os seguintes resultados

#### 5.1.1. Macrografia

A figura 5.1 mostra a macrografia da junta soldada de teste produzida para este trabalho. A macrografia definiu bem as regiões da junta soldada, metal de base e zona afetada termicamente. A análise desta macrografia não indicou descontinuidades.



Figura 5.1 – Macroestrutura da junta. Peça horizontal: aço carbono caldeado. Peça vertical: aço inoxidável austenítico. Ataque: Marble

### 5.1.2 Micrografia

O metal de base do aço carbono (MB 1 figura 4.8) apresentou uma microestrutura de perlita esboroadada com alguma ferrita. Ver imagem na figura 5.2.



Figura 5.2 - Microestrutura do MB1 (aço carbono) - ataque nital 3%, ampliação original de 200 vezes.

A zona afetada termicamente do aço carbono (ZAT 1, Figura 4.8) apresentou uma microestrutura de martensita próxima à linha de fusão com microdureza de 350 HV, com pequenas inclusões de óxidos e de sulfetos. A amostra não apresentou descontinuidades. Ver imagem na figura 5.3.

A zona afetada termicamente do aço inoxidável (ZAT 2, Figura 4.8) apresentou uma microestrutura austenítica com microdureza de 274 HV, com pequenas inclusões de óxidos e de sulfetos. A amostra não apresentou descontinuidades.



Figura 5.3 - Microestrutura da ZAT 1. Ataque: nital 3%. Ampliação original 200 vezes.



Figura 5.4 - Microestrutura da ZAT 2. Ataque: Ácido oxálico 10%. Ampliação original 200 vezes.

O metal soldado (MS - Figura 4.8) apresentou uma microestrutura austenítica com veios de ferrita delta, típicos da solda deste material. Foram ainda observadas pequenas inclusões de óxidos e de sulfetos e determinada uma microdureza de 274 HV. A amostra não apresentou descontinuidades.

O metal de base de aço inoxidável (MB2 Figura 4.8) apresentou uma microestrutura austenítica com carbonetos dispersos. A amostra não apresentou descontinuidades, ver imagem na figura 5.6.

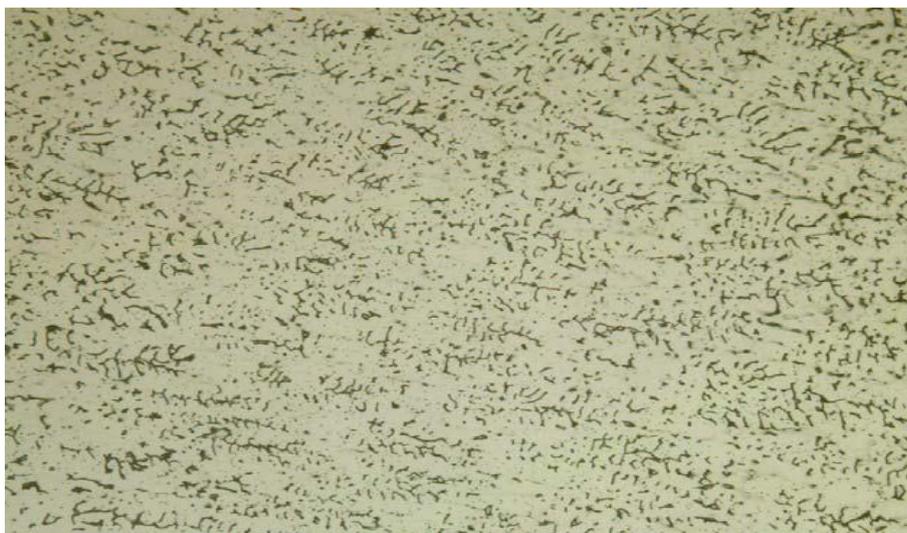


Figura 5.5 Microestrutura do Metal Soldado. Ataque eletrolítico: Ácido oxálico 10%. Ampliação original 200 vezes.



Figura 5.6 Microestrutura do MB 2. Ataque Eletrolítico: Ácido oxálico 10%. Ampliação original 200 vezes.

## 5.2. Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi executado sobre a seção transversal do CP 03 em três regiões distintas na metade da espessura da peça: ZAT 1, ZAT 2 e metal soldado, ver figura 4.9.

Dureza encontrada na ZAT 1 (aço carbono): Máxima: 358 HV. Mínima: 352 HV

Dureza encontrada no Metal Soldado: Máxima: 225 HV. Mínima: 223 HV

Dureza encontrada na ZAT 2 (aço inoxidável): Máxima: 215 HV. Mínima: 210 HV

Observa-se um alto valor de dureza na zona afetada termicamente (ZAT 1- Figura 4.8) do lado do aço carbono próximo à linha de fusão, devido à formação da martensita, anteriormente comprovada no ensaio micrográfico.

## 5.3. Análise Química

O ensaio foi executado através da técnica de Espectrometria a Plasma sobre a seção transversal do CP 4 na linha de fusão do lado do aço carbono (LF 1) e do lado do aço inox (LF 2), localizadas na metade da espessura do corpo de prova. A análise química da linha de fusão LF 2 (lado do aço inox) indicada na tabela 5 - 1, apresentou uma composição diferente da especificada para o metal soldado austenítico ASME SFA A5.4 E309L, devido à diluição. A composição química nesta linha de fusão se aproximou da composição química especificada para o metal de base ASTM A-240 Tp 304.

Tabela 5-1 – Resultado da análise química da LF 2 (% em massa).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,0485	0.507	1,145	0,0363	0,0049	17,775	0,0577	8,3309	0,0097
Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Sn	Mg	Fe
0,1488	0.0476	0,0108	< 0,0050	0,0478	< 0,0050	< 0,0050	< 0,0050	71,8242

A análise química da linha de fusão LF 1 (lado do aço carbono) indicada na tabela 5 - 2, apresentou uma composição química próxima da composição química especificada para o eletrodo revestido ASME SFA 5.5 – E 8018 - B2 utilizado normalmente para soldar aço carbono de baixa liga (Ver tabela 5 - 3). Metais soldados com esta composição química formam estruturas martensíticas se a velocidade de resfriamento não for controlada. A composição química do metal soldado ASME SFA 5.4 E309L foi alterada devido à diluição do metal de base aço carbono.

Tabela 5-2 – Resultado da análise química da LF 1 (% em massa).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,161	0.5176	0,446	0,0129	0,006	1,5933	0,4576	0,0787	0,0306
Co	Cu	Nb	Ti	V	Pb	Sn	Mg	Fe
< 0,0050	0.0163	< 0,0050	< 0,0072	0,0132	< 0,0020	< 0,0050	< 0,0050	96,652

Tabela 5-3 – Composição química especificada (%) para o metal soldado ASME II C SFA 5.5 - E 8018 - B2

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,05 – 0,12	0.80	0,90	0,03	0,003	1,0 – 1,5	0,40 – 0,65

#### 5.4 Teste de corrosão intergranular

Este ensaio foi executado sobre a seção transversal dos CPs, conforme norma ASTM A-262 prática A, com o objetivo de verificar o nível de sensitização nos contornos de grãos próximos à linha de fusão. Este teste, quando aprovado pela prática A da norma ASTM A-262, garante que o nível de sensitização, ou seja, a quantidade de precipitados nos contornos de grãos, não é suficiente para a formação de trincas intergranulares, quando o vaso estiver em operação em ambientes corrosivos. O ensaio apresentou resultados satisfatórios. A micrografia após o ataque ácido é mostrada na figura 5.7.



Figura 5.7 - Resultado do teste de corrosão intergranular. Ataque: Ácido oxalático 10% eletrolítico. Ampliação 200 vezes.

### **5.5. Avaliação dos resultados dos ensaios para caracterização metalográfica, análise química e dureza da junta soldada**

Através dos resultados obtidos nos ensaios macrográficos, micrográficos, ensaio de dureza, análise química e teste de corrosão intergranular, foi possível caracterizar a junta sobre os seguintes aspectos metalúrgicos em cada região da solda:

#### **Região: metal de base – aço carbono:**

A região do metal de base (MB 1) do lado do aço carbono apresentou uma estrutura com matriz de perlita com áreas de ferrita e tamanho de grão ASTM nº 8. Esta região é isotropicamente acústica e não apresenta nenhuma limitação para aplicação do ensaio por ultrassom utilizando a técnica convencional.

#### **Região: ZAT 1 – Lado aço carbono:**

A região ZAT 1 do lado do aço carbono apresentou uma microestrutura predominantemente martensítica próxima à linha de fusão, com elevada dureza (350 HV) e não apresentou descontinuidades. A composição química na linha de fusão próxima a

ZAT1, apresentada pela análise química (tabela 5-2), foi 1,5% Cr e 0,5% Mo, com a presença ainda de Mn, S, P e S. Esta composição química deve-se a diluição do metal de base do lado do aço carbono. É uma região susceptível a formação de trincas por hidrogênio devido a estrutura martensítica. Não foram detectadas pelos ensaios macrográfico e micrográficos trincas nesta região porque foram utilizadas técnicas de controle de temperaturas pré-aquecimento, temperatura máxima de interpasse e secagem dos consumíveis utilizados na soldagem.

Esta região representa a interface entre o aço carbono e o aço inoxidável e é onde ocorre a maior anisotropia acústica, com desvios e reflexões dos feixes sônicos, além de alta atenuação acústica. Aqui é onde são exigidos os maiores cuidados no ensaio por ultrassom, sendo imprescindível a varredura da ZAT 1 e da linha de fusão LF 1, a fim de garantir a inexistência de trincas por hidrogênio e outras descontinuidades nestas regiões.

#### **Região: Metal Soldado:**

A região do metal soldado de aço inoxidável austenítico apresentou estrutura tipicamente austenítica, com dureza de 274 HV, livre de descontinuidades. Esta região foi submetida e aprovada no teste de corrosão intergranular. Esta região é anisotropicamente acústica, ou seja, as propriedades acústicas tais como atenuação, dispersão, reflexão, refração, conversão de modo de onda, difração, variam de acordo com a direção do feixe sônico devido à heterogeneidade de orientação de grãos. Ela deve ser ensaiada por ultrassom utilizando-se vários ângulos de incidência de forma que eventuais descontinuidades possam ser detectadas independentemente de suas orientações.

#### **Região: ZAT2 – lado aço inoxidável:**

A região da ZAT 2, do lado do aço inoxidável, apresentou uma estrutura tipicamente austenítica similar à do metal soldado e livre de descontinuidades.

A região do metal de base aço inoxidável também apresentou uma estrutura tipicamente austenítica e livre de descontinuidades.

## **5.6 Ensaio por ultrassom nas peças de teste**

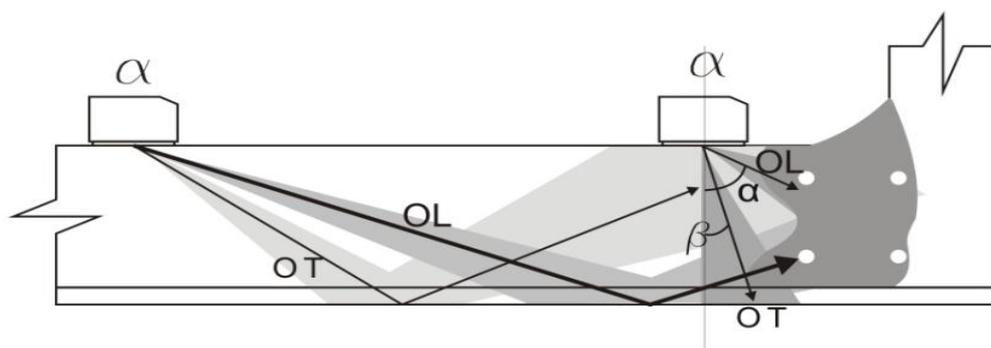
### **5.6.1 Ensaio por ultrassom com a aplicação da técnica convencional *A-SCAN* com transdutor de ondas transversais de 2 MHz e 4 MHz:**

Os transdutores tipo MWB N4, nos ângulos de 45°, 60° e 70° (4 MHz) tiveram resultados insatisfatórios na detecção de todos os furos do bloco, principalmente com o transdutor de 70°. Não houve uma boa relação sinal-ruído entre os ecos dos furos e os ruídos provenientes dos contornos dos grãos. Nestes transdutores, a relação sinal ruído foi inferior a 2 (altura dos ecos de ruído é maior que 50% da altura dos ecos dos furos) para a maioria dos furos, quando o mínimo o valor da relação sinal ruído especificado pelas normas PETROBRAS N 1494 C e BS EM 12668 - 3 é no mínimo 2. Para os transdutores tipo WB N2, o resultado foi mais eficiente que para os transdutores tipo MWB N4, mas foi insatisfatório na detecção de todos os furos e a relação sinal ruído dos furos detectados ficou próxima a 5 (altura dos ecos de ruído igual a 20% da altura dos ecos dos furos).

### **5.6.2 Ensaio por ultrassom nas peças de teste pela técnica *A-Scan* com ondas longitudinais de 4 MHz**

Os transdutores angulares apresentaram resultados satisfatórios com a relação sinal ruído maior que 10, para ondas longitudinais com reflexão direta (½ pulso), porém, devido à existência simultânea das ondas transversais, houve interferência entre as duas ondas para a detecção dos furos de Ø 2,0 mm com reflexão indireta (1 pulso), limitando a utilização somente à incidência direta (figura 5.8).

Cada transdutor do tipo MSY N4, mostrado na tabela 4-3, gera dois feixes de onda simultaneamente, tornando o ensaio tão complexo que o inviabiliza para a utilização com incidência indireta (mais de ½ pulso), devido à interferência entre as ondas longitudinais e transversais. Foram traçados simultaneamente dois feixes sônicos, um para onda longitudinal e outro para onda transversal, com objetivo de localizar discontinuidades, analisando separadamente cada feixe. O ensaio tornou-se bastante complexo, pois as ondas, além de apresentarem ângulos diferentes, também apresentaram velocidades diferentes (Vel. Ondas Longitudinais  $\approx$  1,8 x Vel. Ondas Transversais).



OL = Onda Longitudinal

OT = Onda Transversal

$\alpha$  = Ângulo de refração da onda longitudinal (equivale ao ângulo nominal do transdutor)

$\beta$  = Ângulo de refração da onda transversal

Figura 5.8 - Incidência simultânea de ondas longitudinais e transversais

Uma dificuldade muito comum de interpretação de resultados com o uso de transdutores do tipo WSY N4 é o inconveniente de se detectar duas reflexões simultâneas, de dois refletores de locais diferentes, sendo uma para cada tipo de onda, o que leva o inspetor a não conseguir distinguir qual das reflexões representa o sinal de qual dos dois refletores (figura 5.9). Por exemplo, considerando-se duas descontinuidades com localizada com um percurso sônico equivalente a 1,83 vezes o percurso sônico da outra ( $S_L = 1,83S_T$ ), as reflexões destas descontinuidades apareceriam na mesma posição na tela do aparelho ( $t_L = t_T$ ), uma vez que os aparelhos de ultrassom, na realidade, medem o tempo de percurso até os refletores. Assim:

$$V = \frac{S}{t} \quad (\text{equação 5.9})$$

$$S = V \cdot t \quad (\text{equação 5.10})$$

Sabe-se que:

$$V_L = 1,83V_T \quad (\text{equação 5.11})$$

Considerando:

$$S_L = 1,83 \cdot S_T \quad (\text{equação 5.12})$$

E substituindo-se a equação 5.10 em 5.12:

$$V_L \cdot t_L = 1,83V_T \cdot t_T \quad (\text{equação 5.13})$$

Substituindo-se 5.11 em 5.12:

$$1,83V_T \cdot t_L = 1,83V_T \cdot t_T \quad (\text{equação 5.14})$$

Logo:

$$\underline{t_L = t_T} \quad (\text{equação 5.15})$$

VT= velocidade da onda transversal (km/s)      SL= percurso sônico da onda longitudinal (mm)

V= velocidade do som (km/s)      ST= percurso sônico da onda transversal (mm)

S= percurso sônico (mm)

TL= tempo da onda longitudinal

t= tempo

TT= tempo da onda transversal

VL= velocidade da onda longitudinal (km/s)

Na calibração da escala para ondas longitudinais no bloco V1, utilizando raio de 100 mm, foi comprovada a reflexão de dois ecos, sendo o primeiro, o eco da onda longitudinal detectado a 100 mm e, o segundo, o eco da onda transversal detectado a 183 mm na linha de varredura (escala horizontal). Constatou-se que o tempo (posição dos ecos para o mesmo refletor – raio do V1) para a onda transversal foi 1.83 vezes o tempo para a onda longitudinal, comprovando a razão entre as velocidades.

$$\frac{Vl}{Vt} = \frac{5,9}{3,23} = 1,83 \quad (\text{equação 5.16})$$

Na detecção dos furos, o transdutor duplo cristal (MSEB4H) foi eficiente na detecção de todos, figura 5.10.

O transdutor de 45° apresentou resultados satisfatórios, pois as ondas longitudinais detectaram todos os furos sem a interferência das ondas transversais de baixo ângulo (22.2°) e baixa amplitude, figura 5.11.

Por sua vez, o transdutor de 60° apresentou resultados parcialmente satisfatórios, pois as ondas longitudinais detectaram os furos 1 e 2 sem a interferência das ondas transversais

de baixo ângulo ( $28,3^\circ$ ) e baixa amplitude, porém o furo 3 foi também detectado pelas ondas transversais. Tal fenômeno ocorre, porque o furo localiza-se na linha de fusão, o que torna possível a reflexão da onda transversal, figura 5.12.

O transdutor de  $70^\circ$  não detectou o furo 1, porém detectou os furos 2 e 3 com interferência das ondas transversais com alta amplitude.

A tabela 5.5 resume os resultados na detecção dos 03 furos do bloco padrão para cada cabeçote.

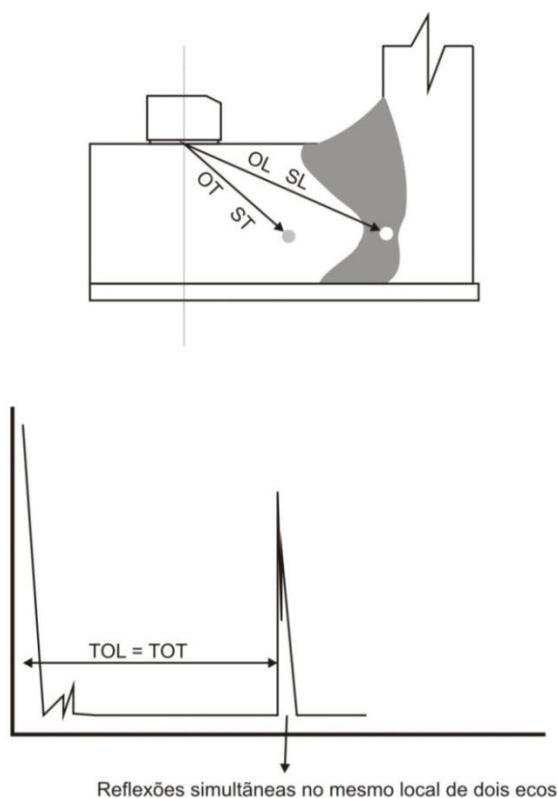


Figura 5.9 - Ecos de duas reflexões simultâneas no mesmo ponto na linha de varredura, provenientes de dois refletores posicionados de forma que o percurso sônico de um seja o dobro do outro.

Tabela 5-5 – Relação de transdutores e detecção dos furos no bloco padrão.

Furo N°	Cabeçotes						
	SE	45°		60°		70°	
	Long.	Long.	Transv.	Long.	Transv.	Long.	Transv.
1	D	D*	ND	D*	ND	ND	ND
2	D	D	ND	D	ND	D	D
3	D	D	ND	D	D	D	D

Legenda:

Long. – Ondas Longitudinais; Transv. – Ondas Transversais; D – Detecta; ND – Não Detecta; D(\*) – Detecção com baixa amplitude.

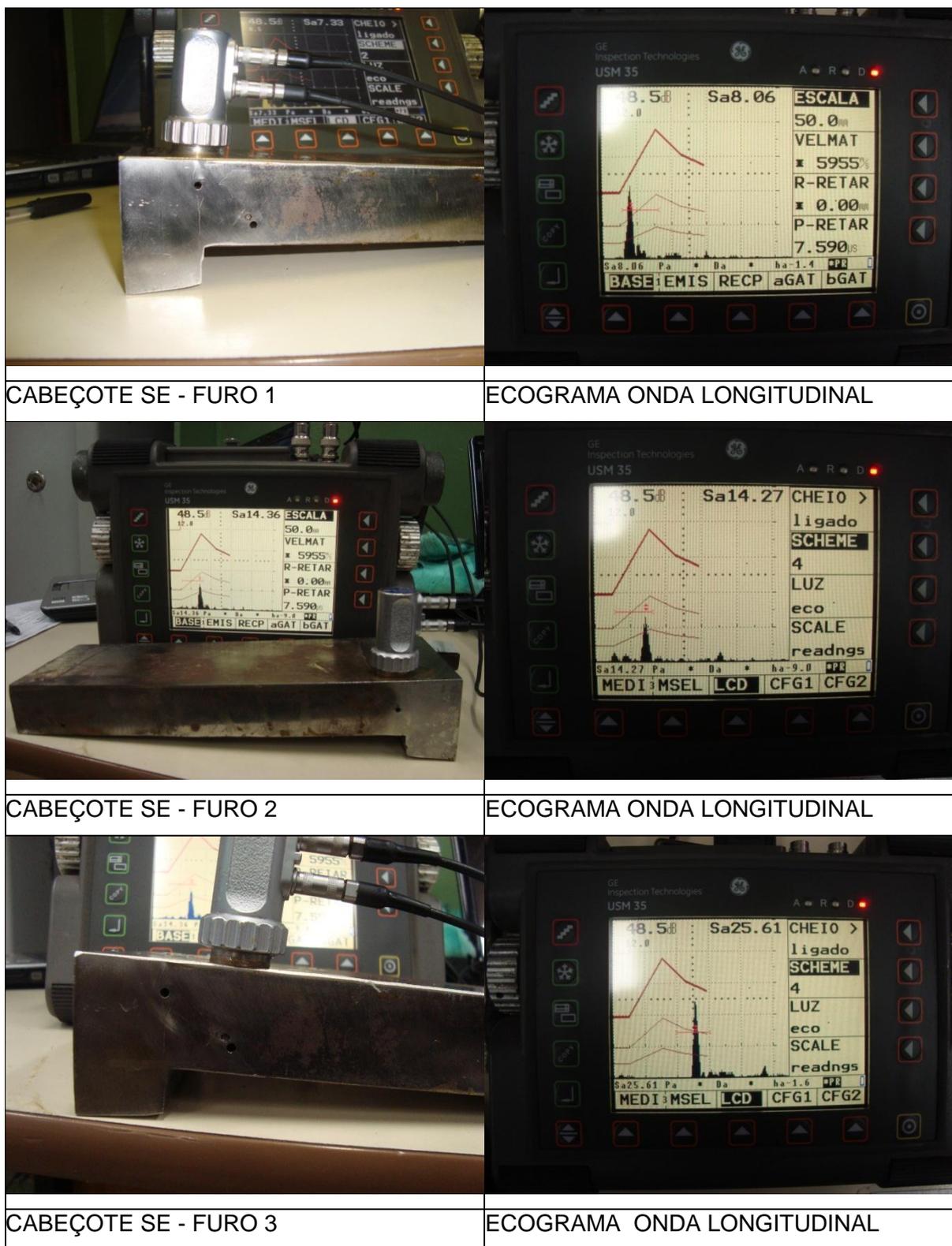


Figura 5.10 – Detecção dos furos usando cabeçote SE.

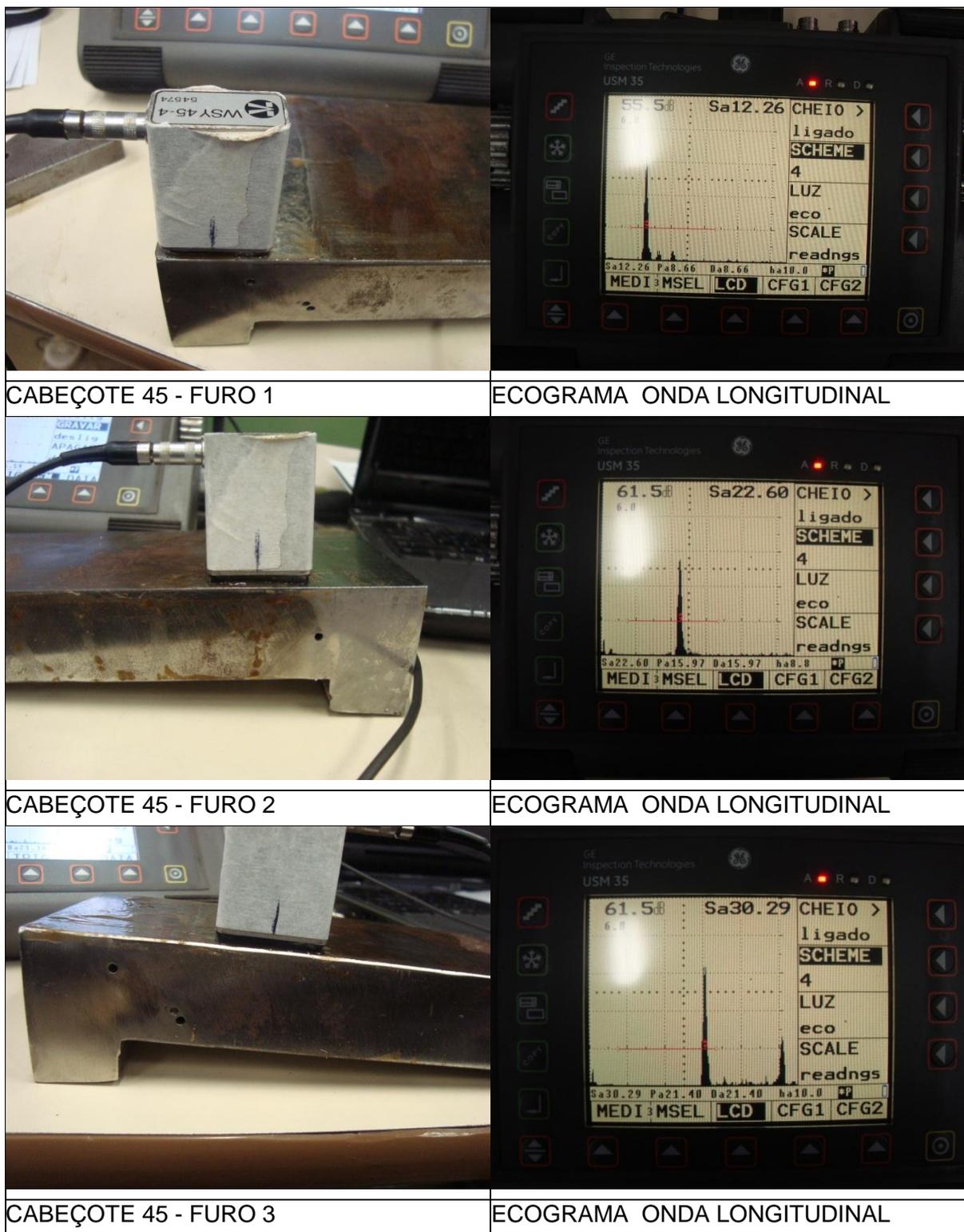


Figura 5.11 – Detecção dos furos usando cabeçote 45°.

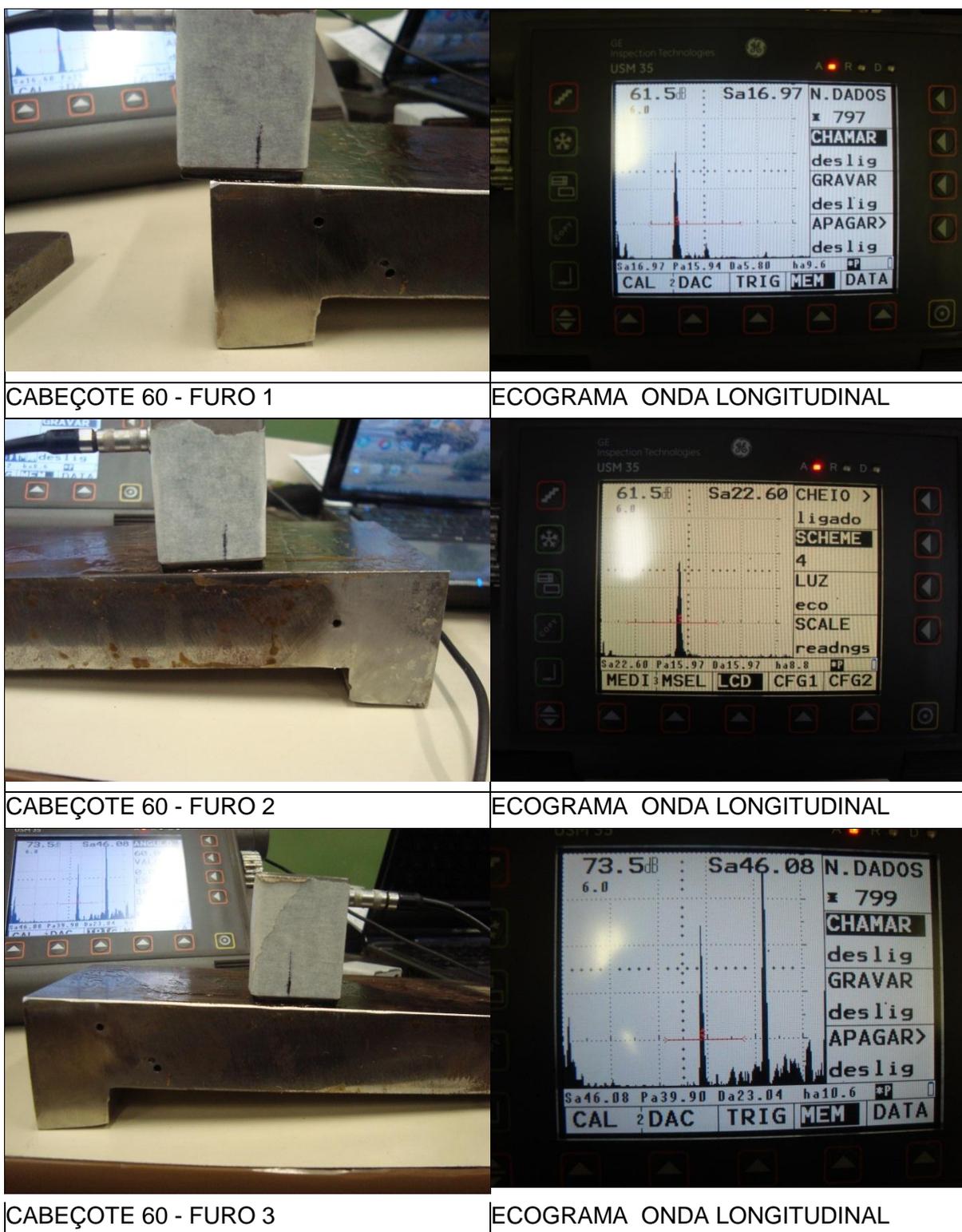


Figura 5.12 – Detecção dos furos 3 com cabeçote de 60°.

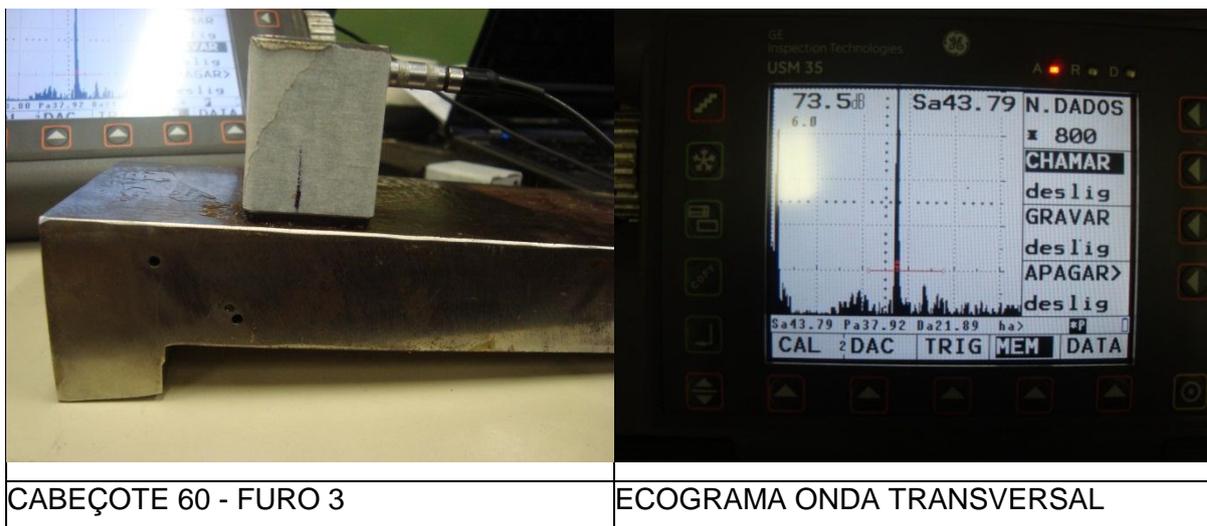


Figura 5.12 (Continuação) – Detecção dos furos 3 com cabeçote de 60°.

Apesar da complexidade do ensaio convencional, devido ao surgimento simultâneo dos dois tipos de onda, foi possível elaborar um procedimento de ensaio que é apresentado abaixo, utilizando-se transdutores de ondas longitudinais. Este procedimento, baseado na relação sinal-ruído satisfatória e da detecção dos furos do bloco padrão, somente pode ser executado utilizando os transdutores com ângulos de 60°, 45° e 0° (MSEB4H) e com o reforço de solda removido.

### 5.6.3 Procedimento para técnica convencional com ondas longitudinais:

O procedimento de ensaio pela técnica convencional, utilizando-se ondas longitudinais, é semelhante ao utilizado no método convencional de ondas transversais, porém adicionando-se os seguintes requisitos:

- 1- Remover o reforço da solda.
- 2- Utilizar somente transdutores MSEB 4H, WSY 60N4 e WSY 45N4.
- 3- Realizar varredura somente por incidência direta com os transdutores posicionados conforme mostra a figura 5.13, nas posições A, B e C.

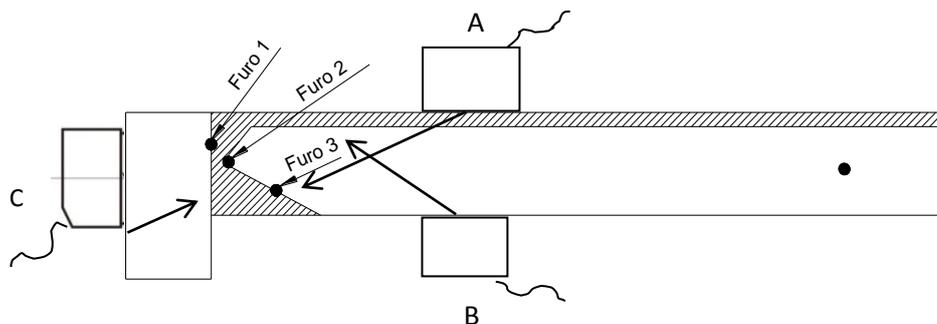


Figura 5.13 – Posicionamento dos transdutores – incidência direta

- 4- Utilizar croqui do feixe sônico com as duas ondas (longitudinal e transversal) simultâneas com seus respectivos ângulos.
- 5- Durante a varredura, considerar sempre o primeiro eco de reflexão (eco mais próximo ao eco de partida).
- 6- O ensaio fica limitado quanto à varredura e impossibilita a detecção de falta de fusão entre o tubo e a solda, se não houver acesso para a varredura com transdutores  $0^\circ$  (MSEB4H), pelo lado interno do mesmo, pois não é possível a incidência do feixe sônico com ângulo de  $70^\circ$  no metal soldado austenítico
- 7- O percurso sônico do primeiro eco, lido na tela do aparelho, deve sempre ser analisado pelo perfil do feixe sônico de ondas longitudinais. Para verificar o mesmo eco para ondas transversais, o percurso sônico deve ser multiplicado pelo fator de correção de velocidade ( $F=1,83$ ).

#### 5.6.4 Aplicação do ensaio através da técnica convencional utilizando sapata d'água

Devido às limitações do uso dos transdutores tipo WY-N2, houve necessidade de utilizar cabeçotes angulares somente de ondas longitudinais, porém, como já demonstrado, a onda transversal é inevitável e, portanto, deveria ser isolada no retorno (reflexão), utilizando-se transdutores angulares com coluna d'água, porém tal transdutor não foi encontrado no mercado para ser usado nesta pesquisa.

A construção de transdutores angulares, que emitam feixes sônicos de ondas longitudinais e isolem as ondas transversais no retorno através de uma coluna d'água, baseado no princípio que as ondas transversais só se propagam nos líquidos a distâncias muito curtas, não foi possível, devido a dificuldades técnicas de fabricação, tais como: micro-usinagem e aquisição de cristais piezelétricos específicos, que são restritas e patenteadas pelos fabricantes usuais destes equipamentos (Figura 5.14).

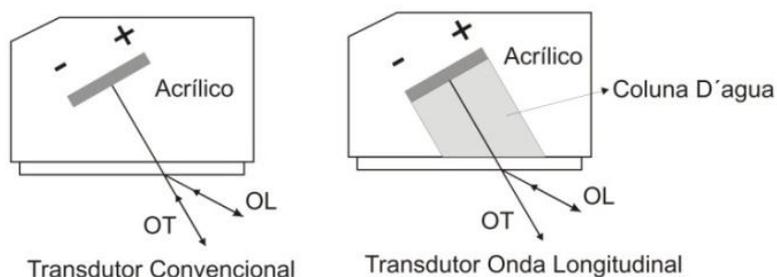


Figura 5.14 – Transdutor com coluna d'água.

Foi projetada uma sapata de acrílico (Figuras 5.15), preenchida com água, para ser fixada nos transdutores angulares convencionais do tipo MWB, a fim de obter no ensaio apenas ondas longitudinais, devido ao isolamento no retorno das ondas transversais. Tal sapata foi confeccionada (Figura 5.16), fixada ao transdutor e obteve êxito no isolamento da onda transversal, porém, devido à alta atenuação acústica da água e do acrílico, a onda longitudinal apresentou baixa intensidade de energia acústica (dB), inviabilizando o ensaio, pois sua performance não atendeu aos requisitos de calibração das normas europeias BSI BS EN 12668-3 e BSI BS EN 12668-2 e normas Petrobrás N 1590F. Além destes requisitos, a sapata fixada ao transdutor não conseguiu detectar todos os furos usinados na peça de teste e não permitiu a traçagem da curva DAC.

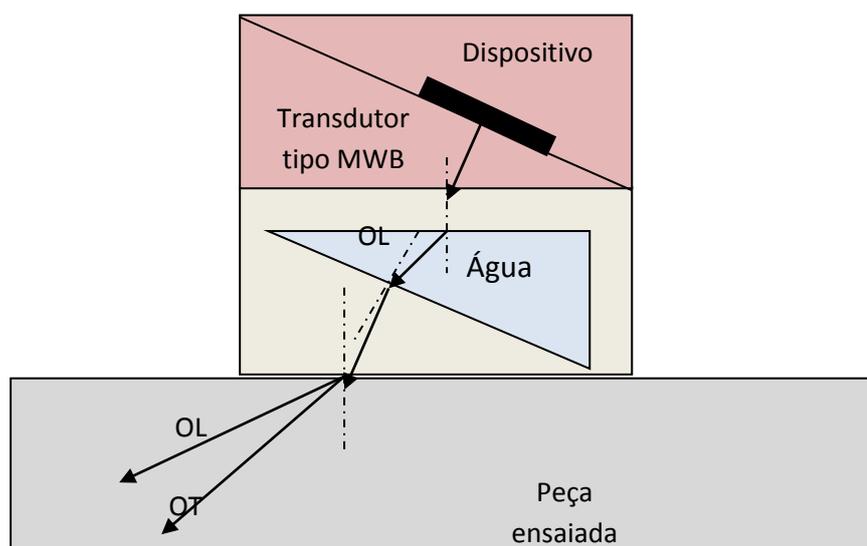


Figura 5.15 – Dispositivo com coluna d'água



Figura 5.16 – Sapata de acrílico preenchida com água.

Devido à impossibilidade de confecção do transdutor e à ineficiência da sapata, as juntas soldadas dos bocais podem ser ensaiadas parcialmente pela técnica convencional, conforme procedimento relatado no item 5.6.2.

### 5.6.5 Ensaio na peça de teste através da técnica *Phased Array*.

#### 5.6.5.1 Calibração

Os dados fornecidos pelo programa *Beam Tools* foram inseridos na calibração do aparelho Ominiscan. O *setup* é um programa que inclui aquisição de dados e calibração do aparelho para ensaio.

Basicamente, os dados fornecidos pelo *Beam Tools* são inseridos através da interface *Wizard*.

O setup de calibração é feito através da interface *Wizard*, que inclui a calibração de velocidade, da sapata e sensibilidade do ensaio.

Uma curva DAC (diagrama distância amplitude) é traçada eletronicamente, considerando as amplitudes das reflexões (ecos) e distância de cada furo cilíndrico correspondente na peça de teste. Esta curva é traçada utilizando-se as ferramentas *UT-Setings* e *Sizing-curve*.

Durante a traçagem da curva DAC, os seguintes comportamentos acústicos foram observados e registrados:

- 1- Foi possível a detecção de todos os furos cilíndricos da peça de teste. Nas figuras 5.17 a 5.22 podemos ver imagens do ecograma e varredura setorial da detecção dos furos. Este resultado atende à norma Petrobrás 1594-F e permite concluir que um procedimento de ensaio pode ser qualificado.
- 2- Todas as reflexões (ecos) apresentaram relação sinal-ruído superior a 10/1, isto é, as reflexões de ruídos ficaram abaixo de 10% das reflexões dos furos.
- 3- Todos os furos foram detectados com o transdutor incidindo tanto pelo lado do aço carbono, quanto pelo lado do aço inoxidável. Porém, neste último arranjo, observou-se uma maior atenuação acústica, devido à heterogeneidade dos contornos de grão na solda inoxidável austenítica.
- 4- Além dos furos, não foram detectadas outras descontinuidades. A linha de fusão e ZAT do lado do aço carbono apresentou excelente sanidade. O furo localizado na linha de fusão deste lado foi detectado com relação sinal-ruído de 20/1.
- 5- Cada furo cilíndrico foi localizado com um ângulo otimizado. O furo localizado na linha de fusão do lado do aço carbono foi mais bem detectado com o ângulo de 45°, enquanto que o furo localizado no metal soldado e na linha de fusão do lado do aço inoxidável foi melhor detectado com o ângulo de 70°. Esta observação indica que a varredura angular é um importante parâmetro a ser considerado, pois sempre existirá um ângulo ótimo para a detecção de descontinuidade em depósitos soldados austeníticos, devido à anisotropia acústica causada pela heterogeneidade de grãos. Este parâmetro de variação dos ângulos de incidência somente é possível através da técnica *Phased Array*. No caso, foram utilizados ângulos de 0° a 72° com resolução de 1°. Este resultado favorável não pode ser obtido através da técnica convencional, a qual permite detecção dos furos somente com os ângulos fixos de 45° e 60°. Todos os furos foram detectados pela técnica *Phased Array* com ondas longitudinais de baixo ângulo de refração (0° a 72°), sem interferência das ondas transversais, tornando o ensaio bastante confiável.
- 6- Além dos ecos de todos os furos serem mostrados na apresentação *A-Scan*, os mesmos também tiveram suas imagens digitalizadas mostradas na apresentação *S-Scan* e *C-Scan*, com suas respectivas dimensões e localizações reais na seção transversal e ao longo do eixo da solda, o que permite ao inspetor definir o local, o tipo e o tamanho de cada descontinuidade.

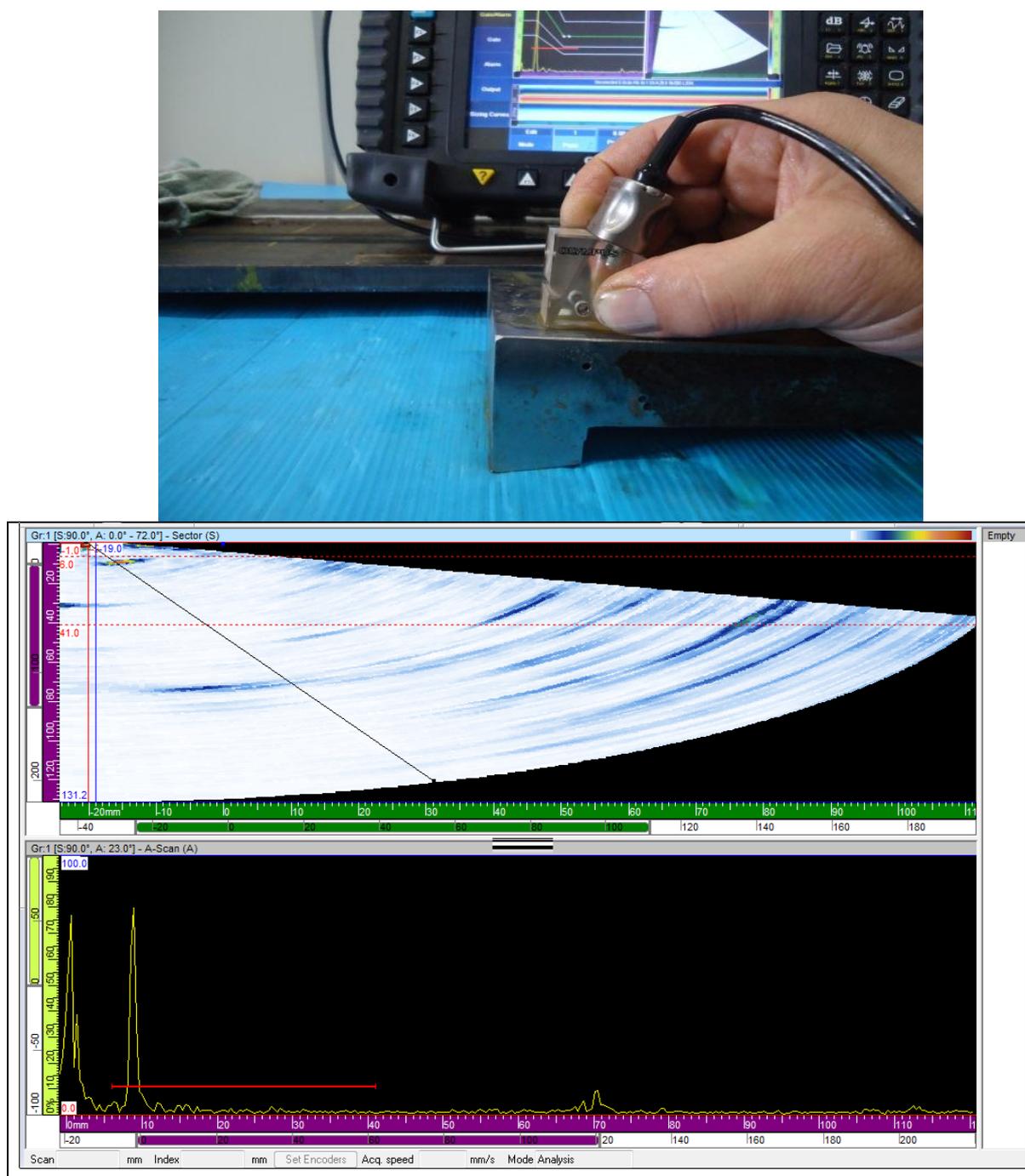


Figura 5.17 – Lado aço carbono, ponto 1: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).

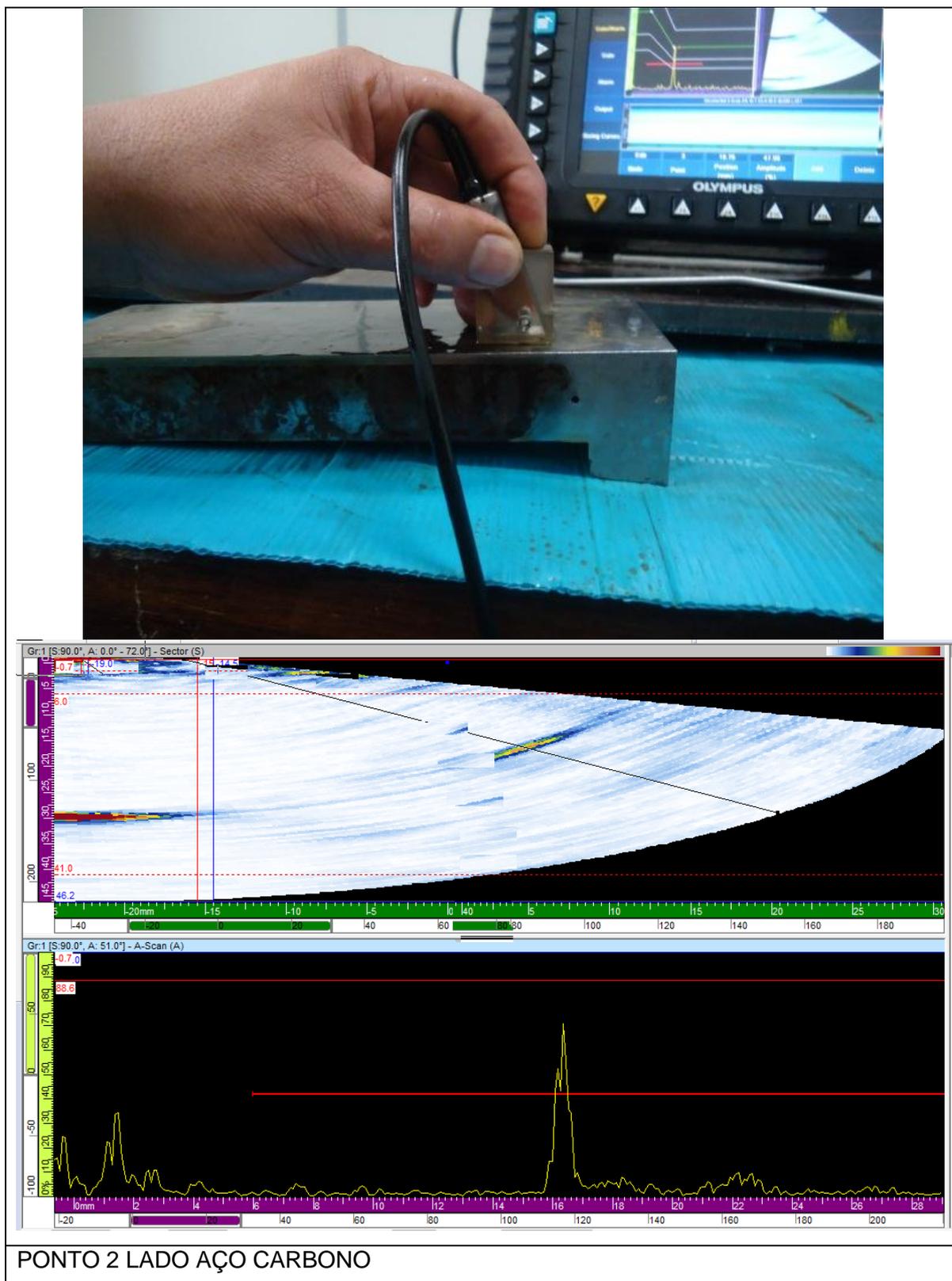


Figura 5.18 – Lado aço carbono, ponto 2: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).

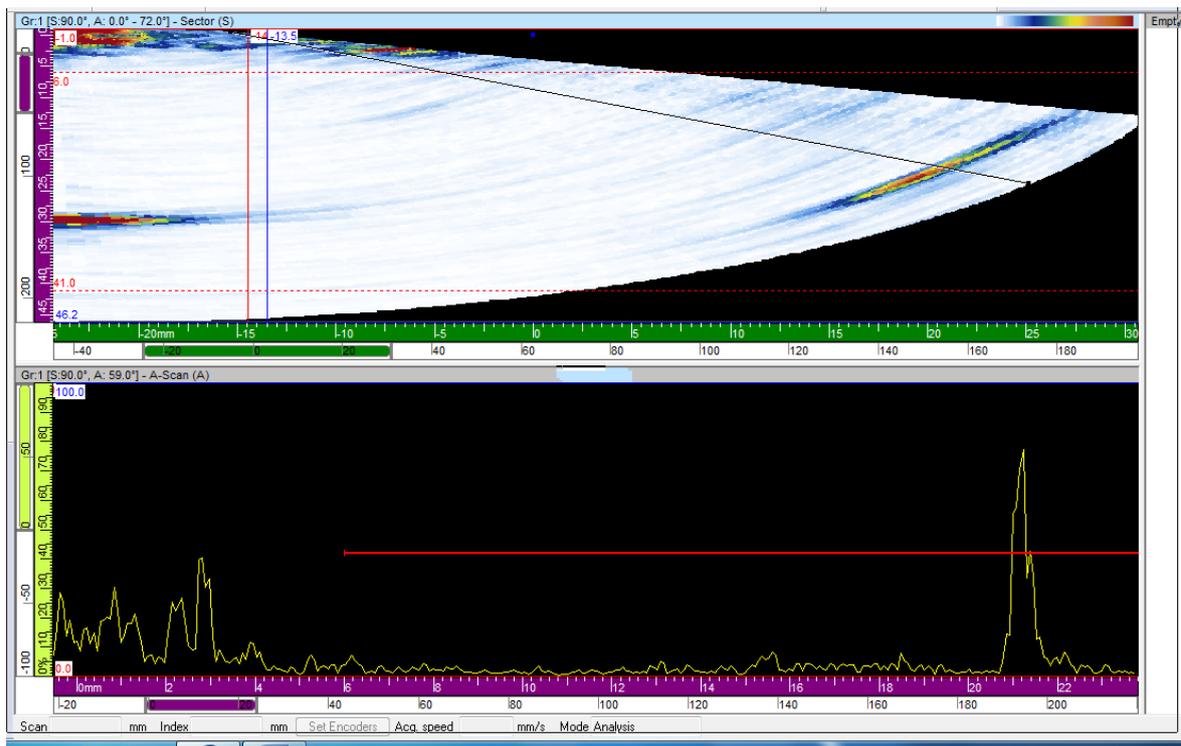
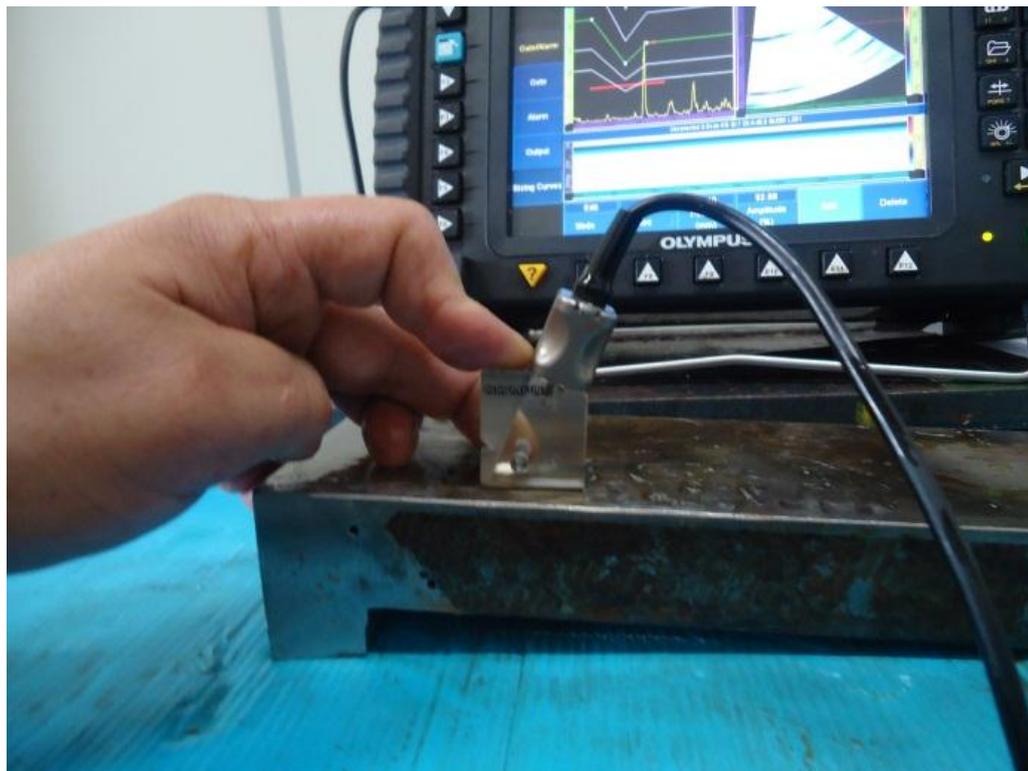


Figura 5.19 – Lado aço carbono, ponto 3: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).

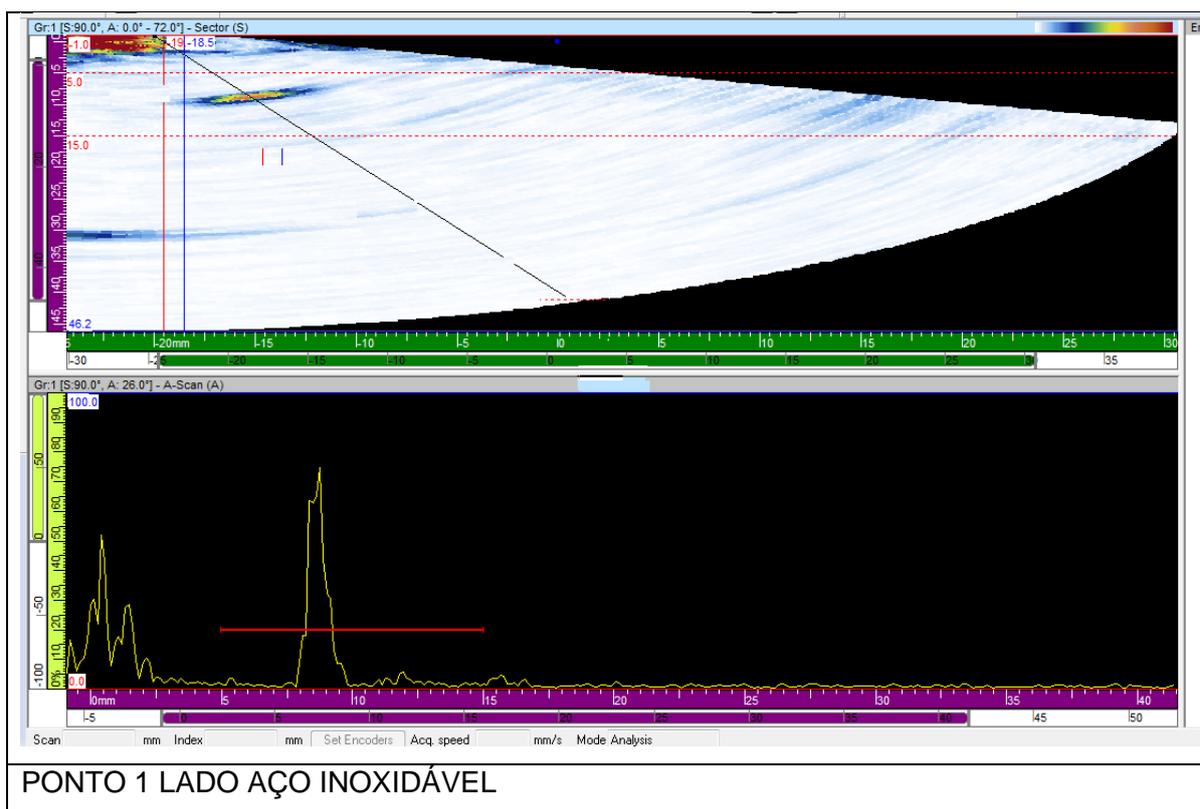
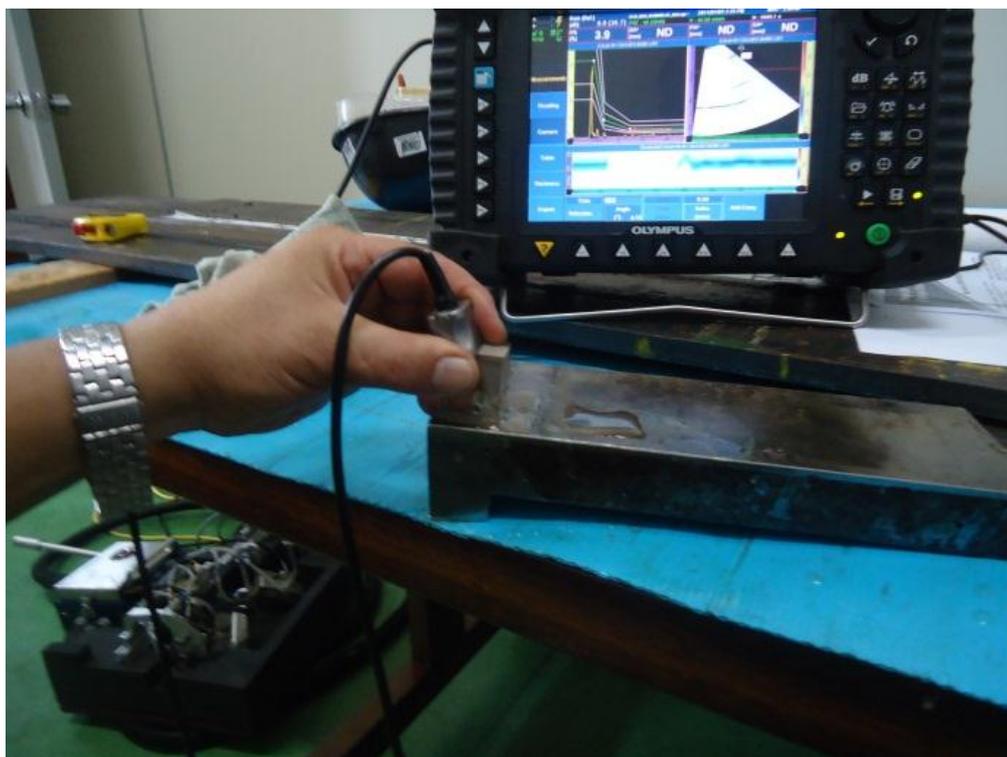


Figura 5.20 – Lado aço inoxidável, ponto 1: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).

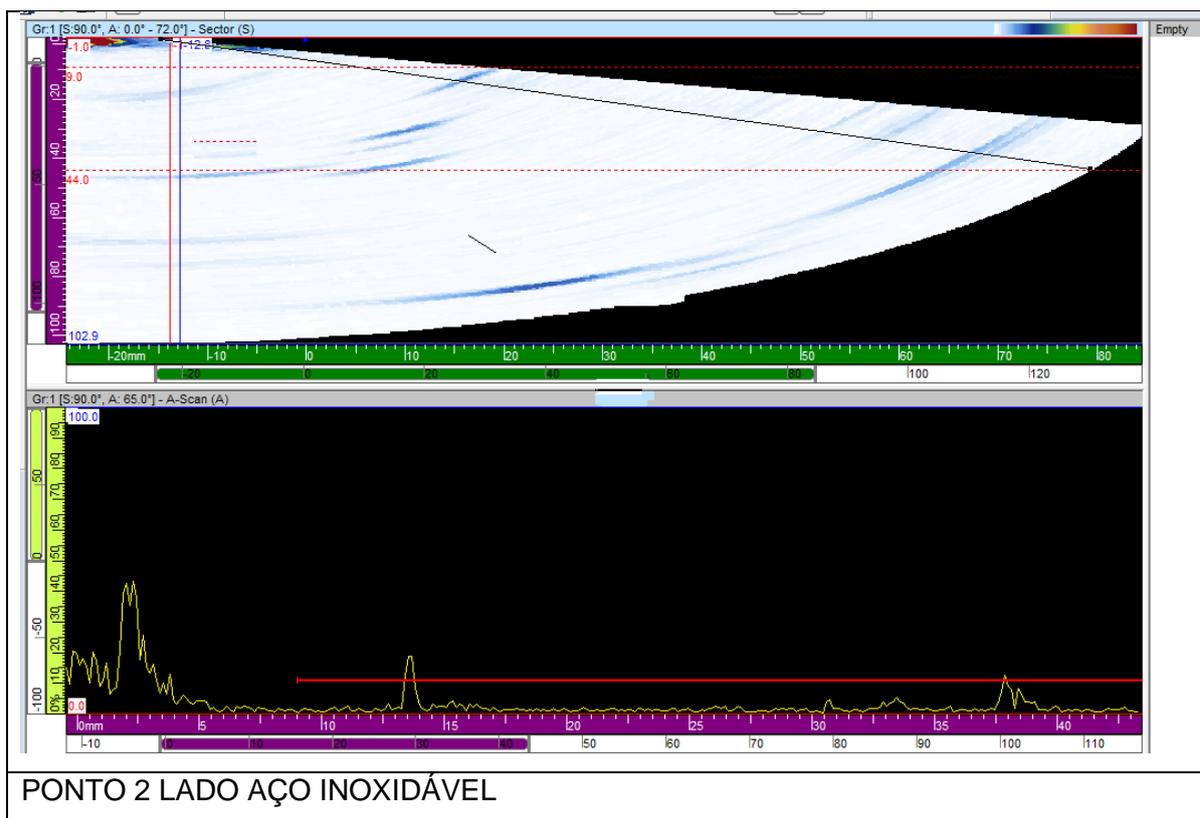


Figura 5.21 – Lado aço inoxidável, ponto 2: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo).

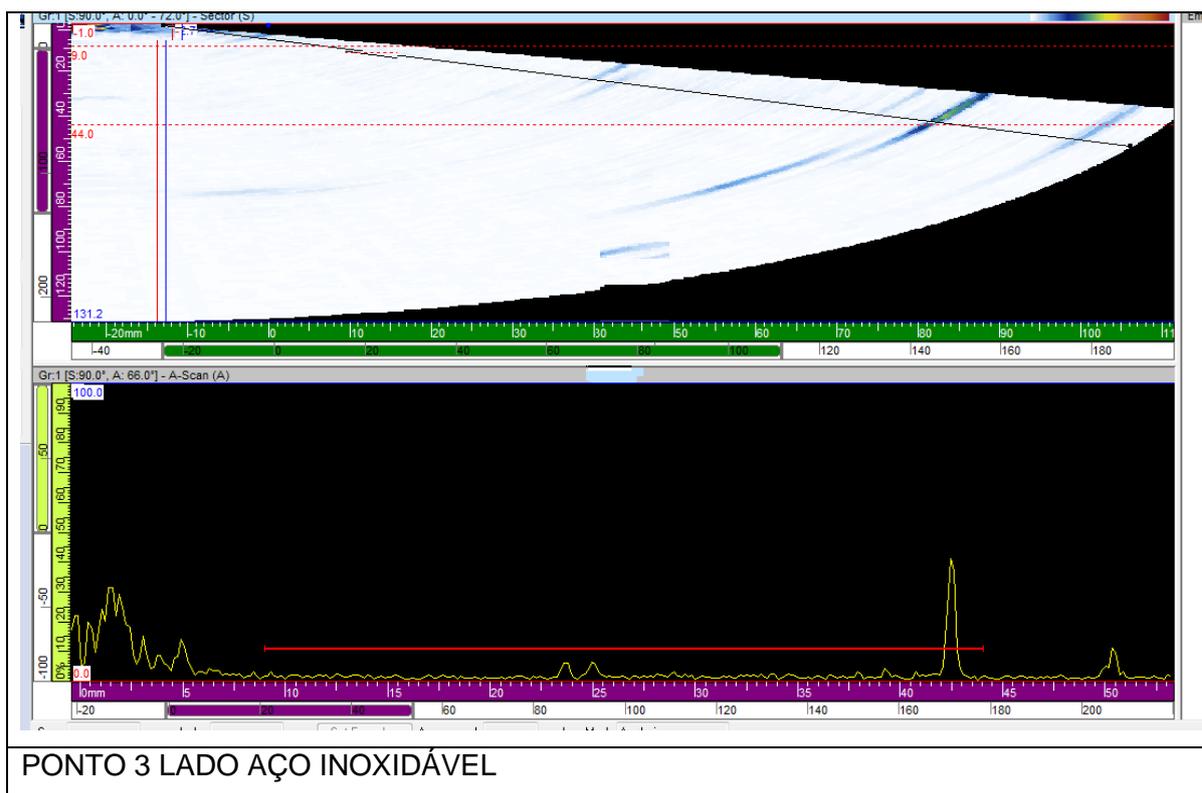
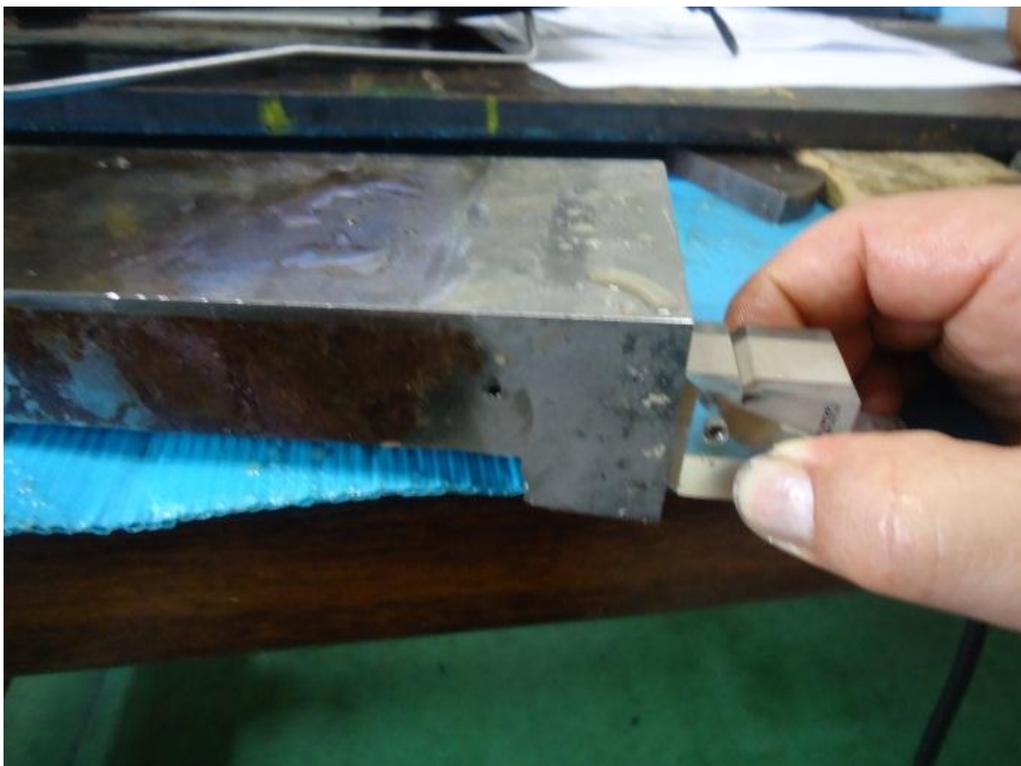


Figura 5.22 – Lado aço inoxidável, ponto 3: Posicionamento do cabeçote (a cima) e ecograma (a baixo)

### 5.6.5.2 Gravação dos Resultados

Todos os resultados e observações descritas no item 5.6.4.1 foram salvos, gravados e arquivados em um cartão de memória inserido no aparelho Omniscan. Este cartão pode ser transferido para um computador e, através do *software Tomo View*, é possível recuperar todos os dados do ensaio, incluindo a visualização de todos os furos, com seus respectivos ecos, imagens, localização e dimensões.

### 5.6.6 Análise do desempenho do ensaio - Varredura da peça B (figura 4-4).

A avaliação do desempenho consiste em comparar a imagem digitalizada da solda da peça B apresentada no ensaio por ultrassom, com a imagem apresentada nos filmes radiográficos. O desempenho foi considerado satisfatório, pois as indicações registráveis detectadas no ensaio radiográfico foram também detectadas pelo ensaio por ultrassom. As dimensões e localizações das descontinuidades detectadas no ensaio por ultrassom, foram próximas daquelas detectadas pela radiografia. O croqui mostrado na figura 5.23 compara os resultados do ensaio por ultrassom com a técnica *Phased Array* com os do relatório Radiográfico.

A junta soldada da peça B foi ensaiada em todo o contorno pela técnica *Phased Array* e as imagens foram registradas em intervalos de 100 mm. Os resultados da inspeção com esta técnica estão ilustrados nas figuras 5.24 a 5.40.

No intervalo de 0 a 100 mm foram detectadas 4 descontinuidades, cujas localizações, dimensões e imagens são mostradas nas figuras 5.24 a 5.27.

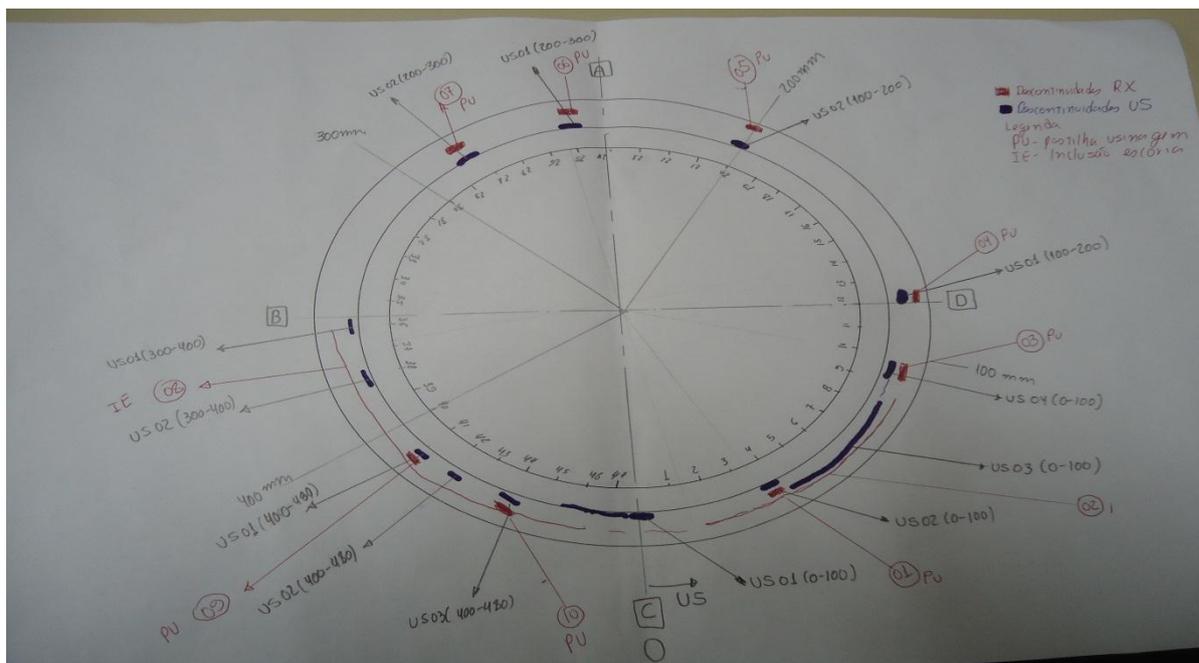


Figura 5.23 – Comparação dos resultados entre o ensaio por ultrassom *Phased Array* e pelo ensaio radiográfico. Descontinuidades cor vermelha detectadas pelo ensaio radiográfico e cor azul detectadas pelo ensaio por ultrassom.

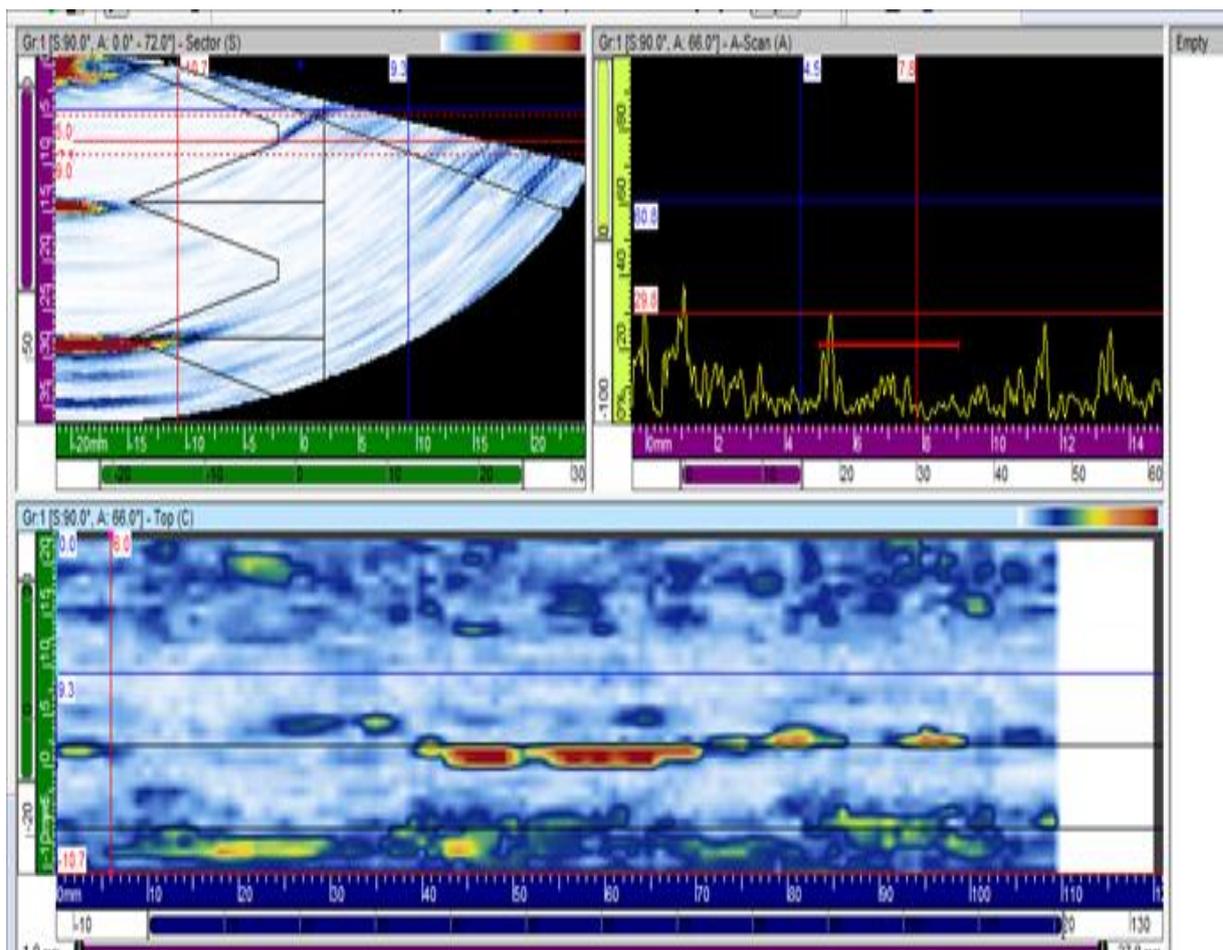


Figura 5.24 – Imagem descontinuidade 01 do intervalo de 0 a 100 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
2 *	1	70.0°	90.0°	37.0 mm	7.5 mm	25.0 mm	5.0 mm	12.0 mm	2.5 mm		

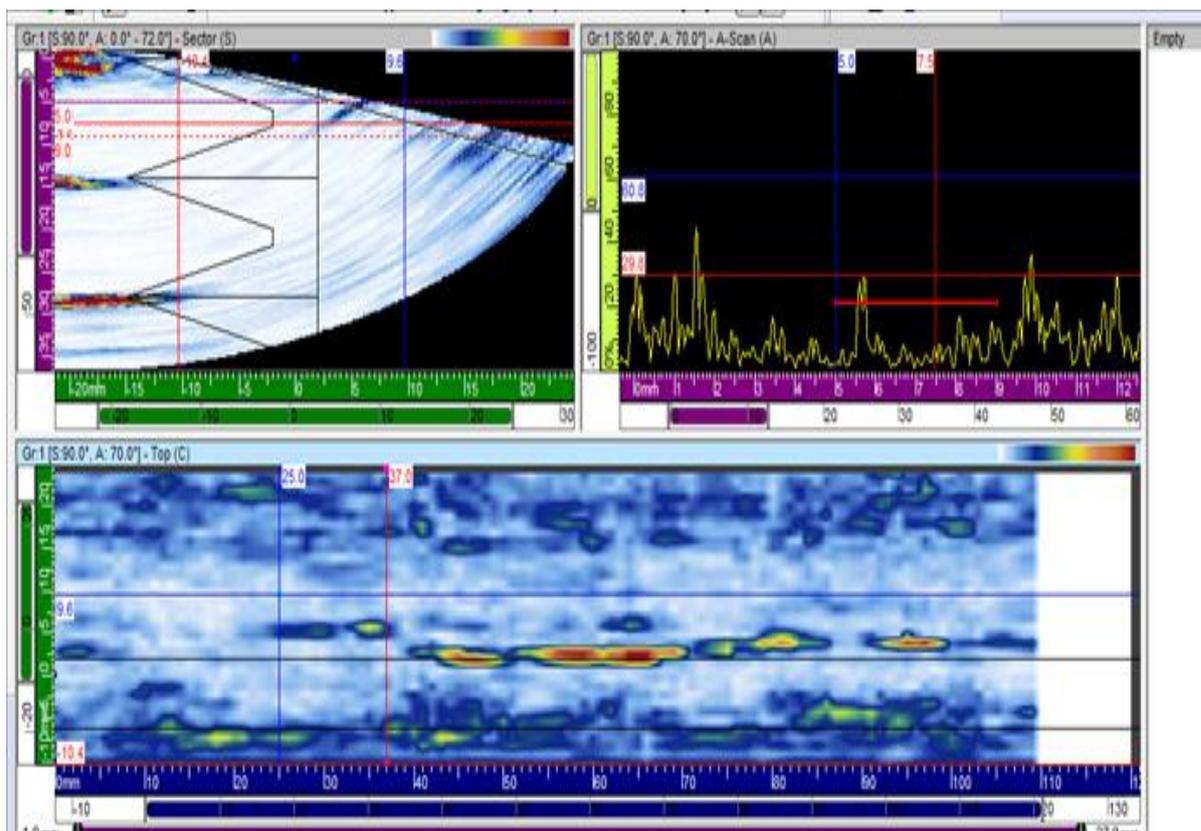


Figura 5.25 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 0 a 100 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
3 *	1	63.0°	90.0°	85.0 mm	6.8 mm	40.0 mm	4.0 mm	45.0 mm	2.8 mm		

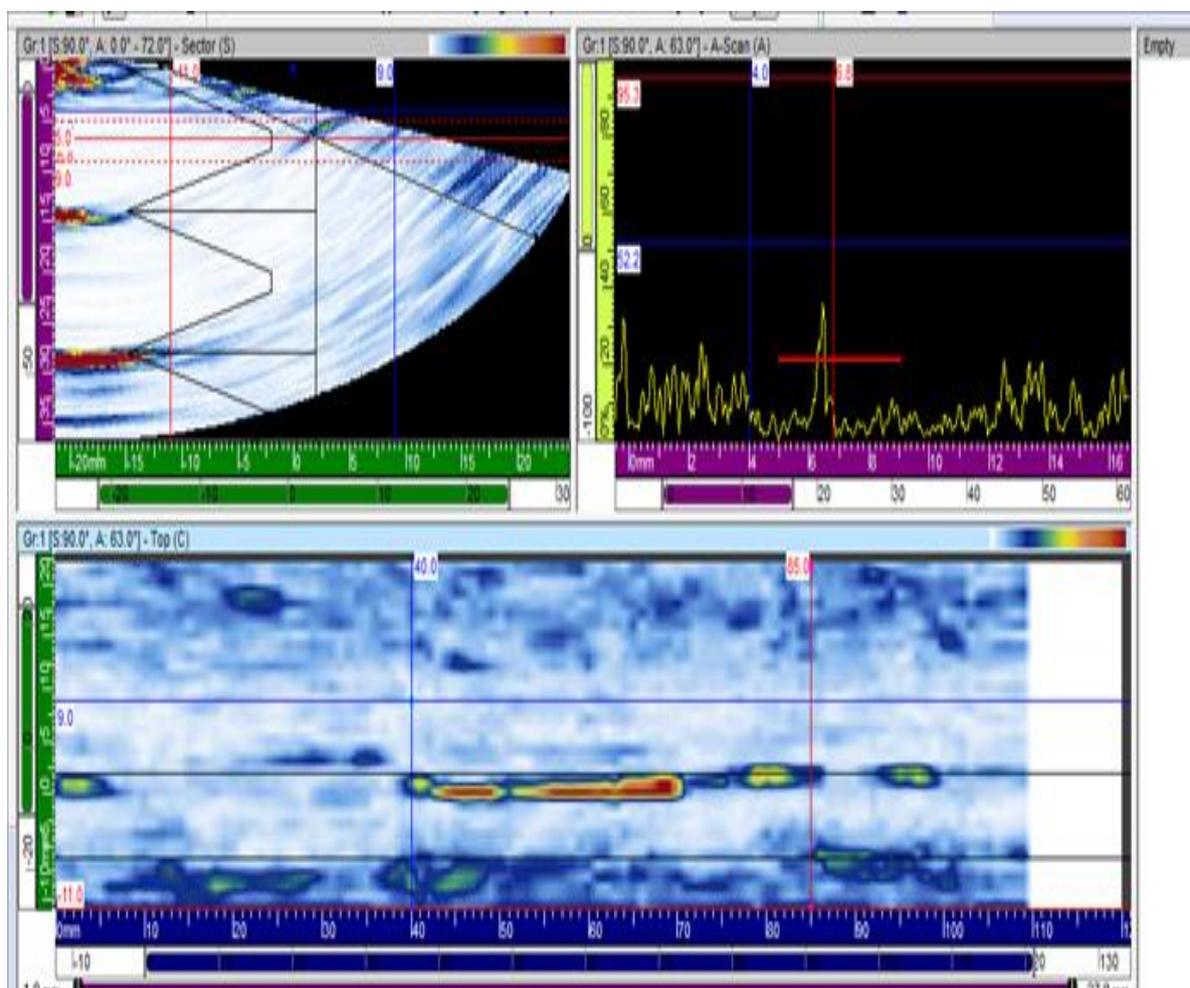


Figura 5.26 – Imagem da descontinuidade 03 do intervalo de 0 a 100 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
4 *	1	69.0°	90.0°	99.0 mm	6.4 mm	92.0 mm	4.0 mm	7.0 mm	2.4 mm		

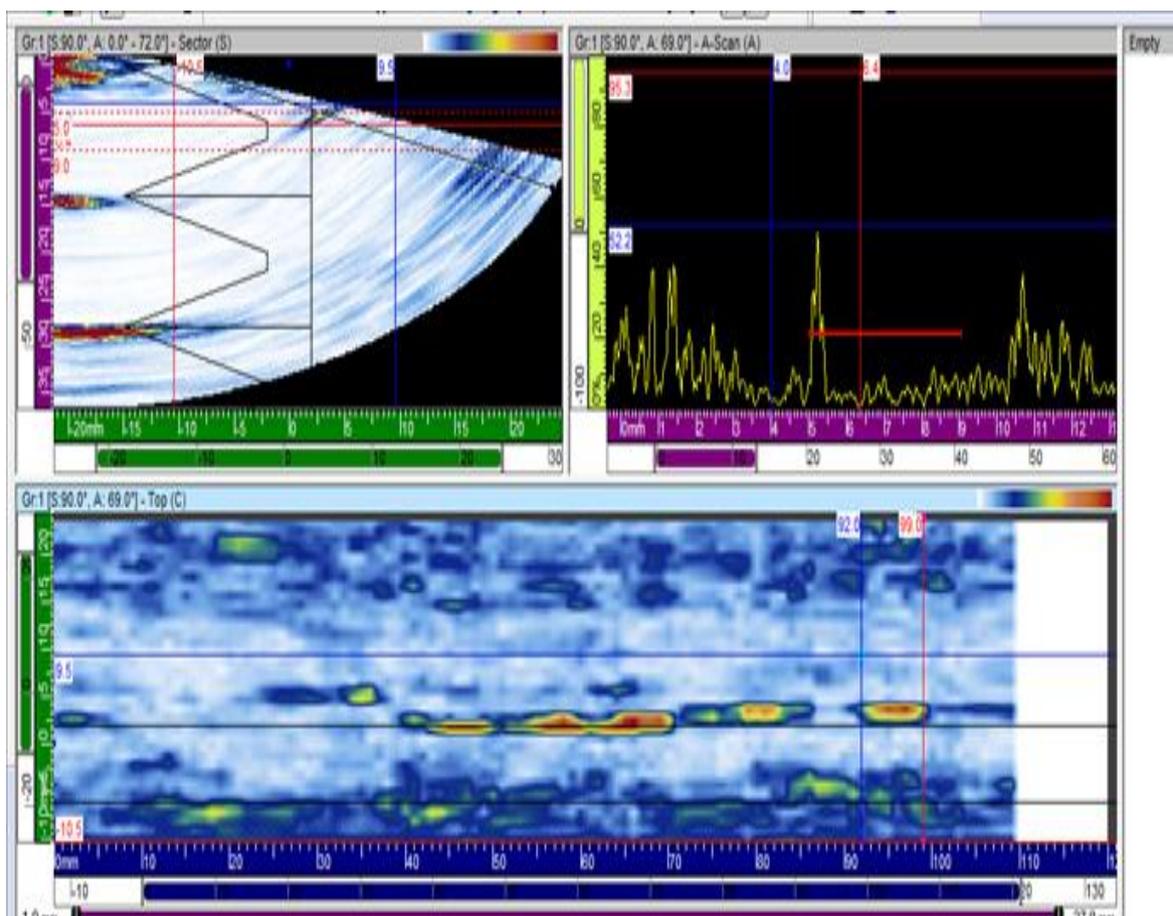


Figura 5.27 – Imagem da descontinuidade 04 do intervalo de 0 a 100 mm.

No intervalo de 100 a 200 mm foram detectadas 2 descontinuidades, cujas localizações, dimensões e imagens são mostradas nas figuras 5.28 e 5.29.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
1 *	1	69.0°	90.0°	124.0 mm	6.2 mm	112.0 mm	4.7 mm	12.0 mm	1.5 mm		

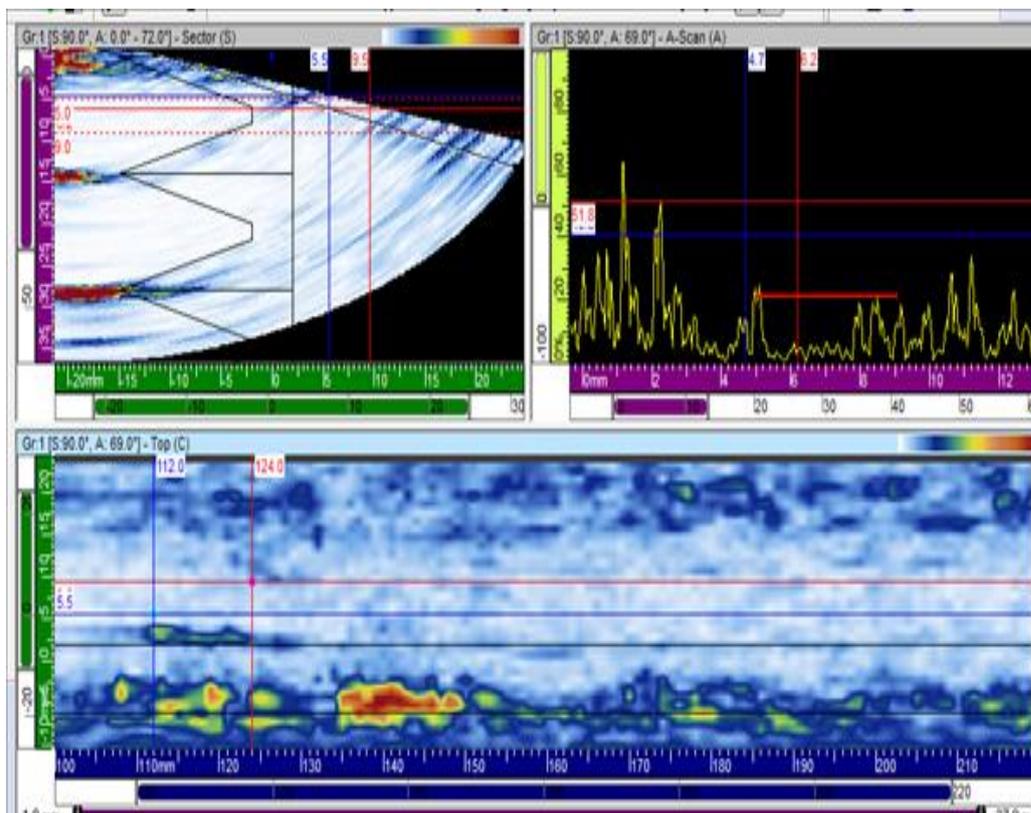


Figura 5.28 – Imagem da descontinuidade 01 do intervalo de 100 a 200 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
2 *	1	53.0°	90.0°	202.0 mm	6.2 mm	199.0 mm	4.5 mm	3.0 mm	1.7 mm		

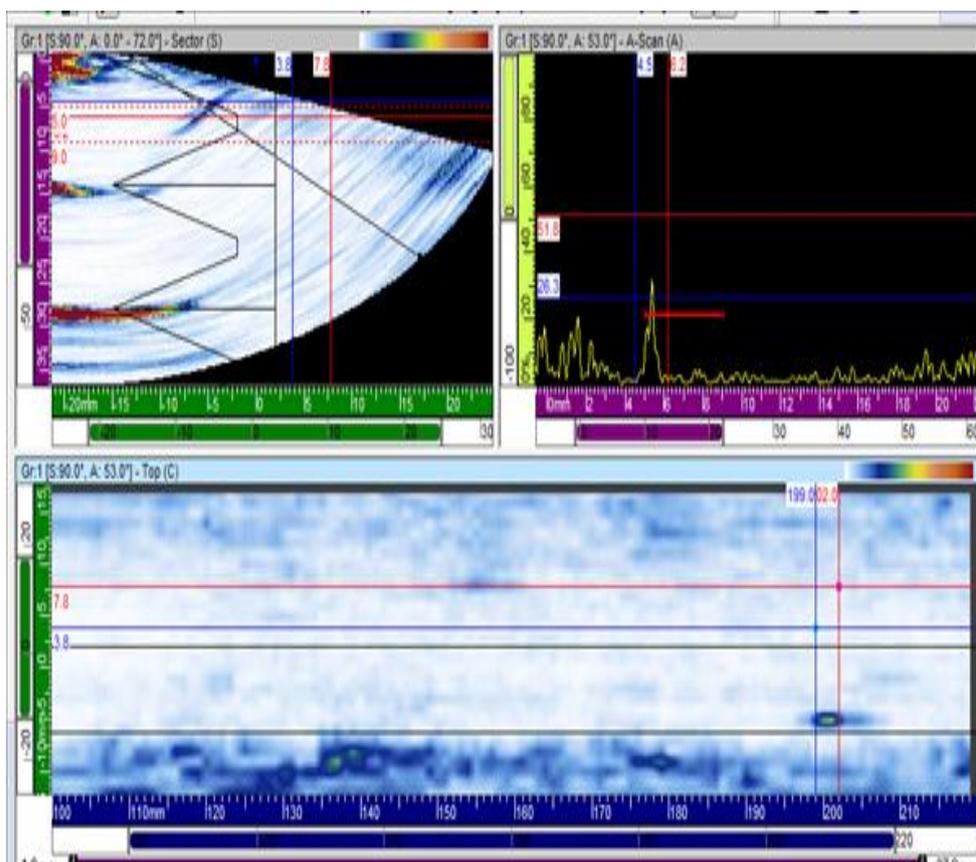


Figura 5.29 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 100 a 200 mm.

No intervalo de 200 a 300 mm foram detectadas 3 descontinuidades, cujas localizações, dimensões e imagens são mostradas nas figuras 5.30 a 5.32.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
1 *	1	60.0°	90.0°	258.0 mm	4.5 mm	251.0 mm	2.9 mm	7.0 mm	1.6 mm		

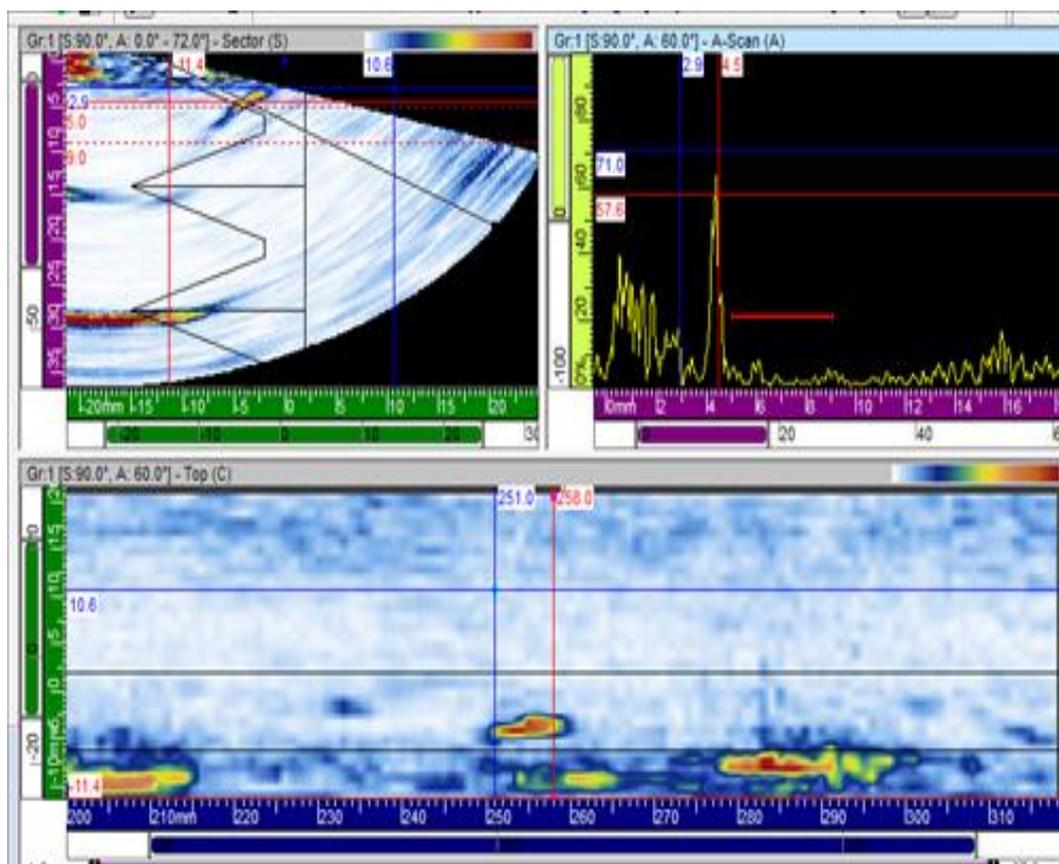


Figura 5.30 – Imagem da descontinuidade 01 do intervalo de 200 a 300 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
2 *	1	40.0°	90.0°	291.0 mm	10.7 mm	278.0 mm	8.6 mm	13.0 mm	2.1 mm		

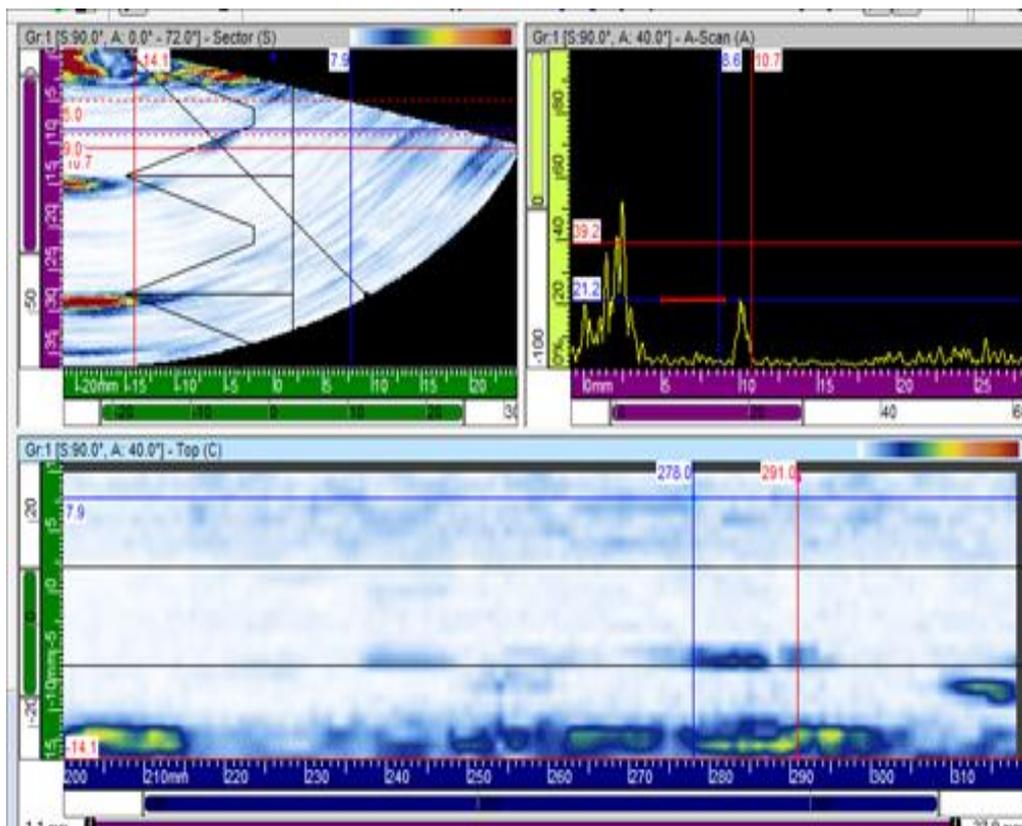


Figura 5.31 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 200 a 300 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
1		46.0°	90.0°	318.0 mm	7.2 mm	311.0 mm	4.4 mm	7.0 mm	2.8 mm		

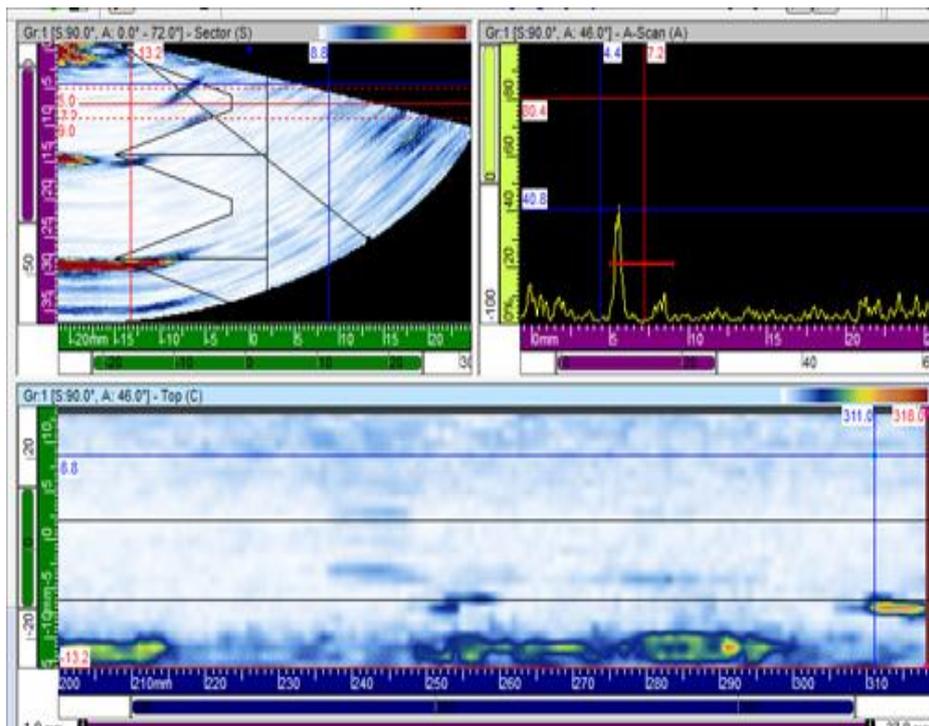


Figura 5.32 – Imagem da descontinuidade 03 do intervalo de 200 a 300 mm.

No intervalo de 300 a 400 mm foram detectadas 3 descontinuidades, cujas localizações, dimensões e imagens são mostradas nas figuras 5.33 a 5.35.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
1 *	1	56.0°	90.0°	363.0 mm	7.2 mm	359.0 mm	6.0 mm	4.0 mm	1.2 mm		

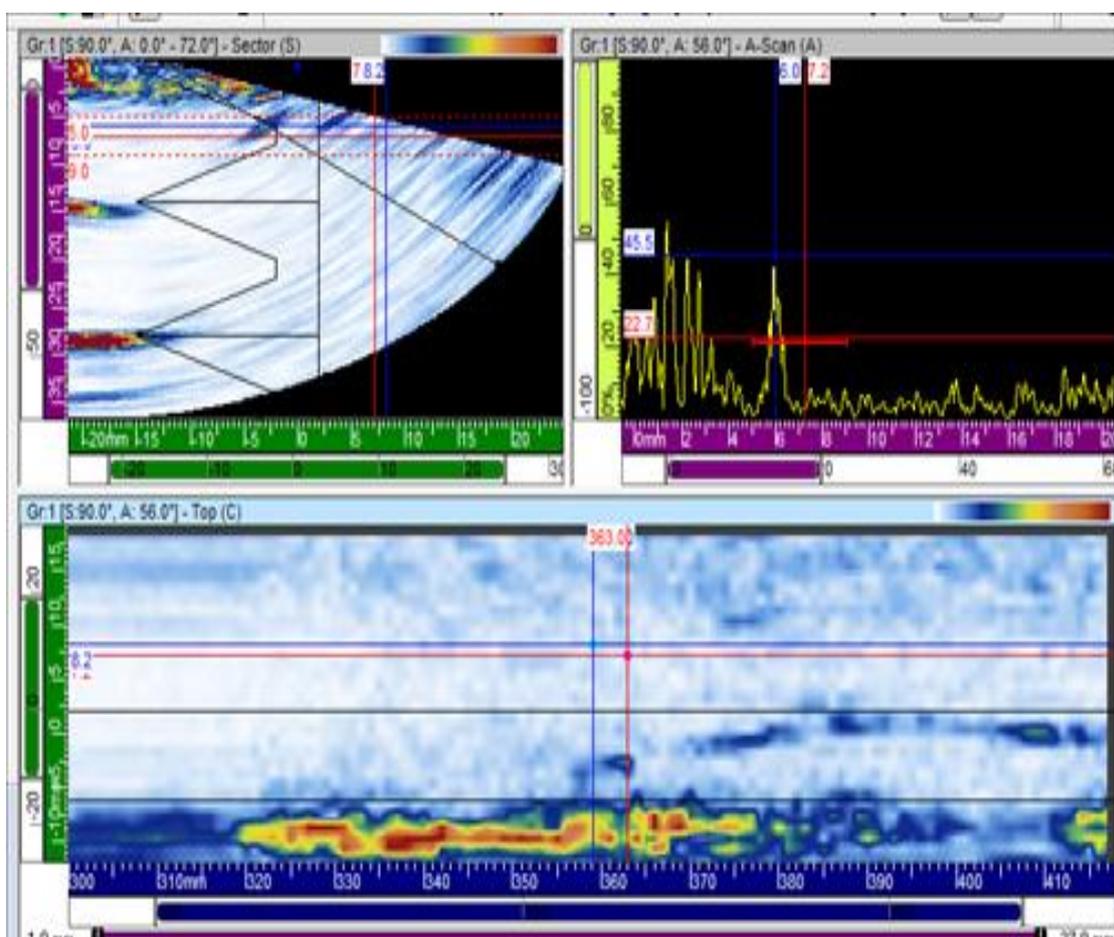


Figura 5.33 – Imagem da descontinuidade 01 do intervalo de 300 a 400 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
2 *	1	64.0°	90.0°	379.0 mm	8.2 mm	374.0 mm	5.1 mm	5.0 mm	3.1 mm		

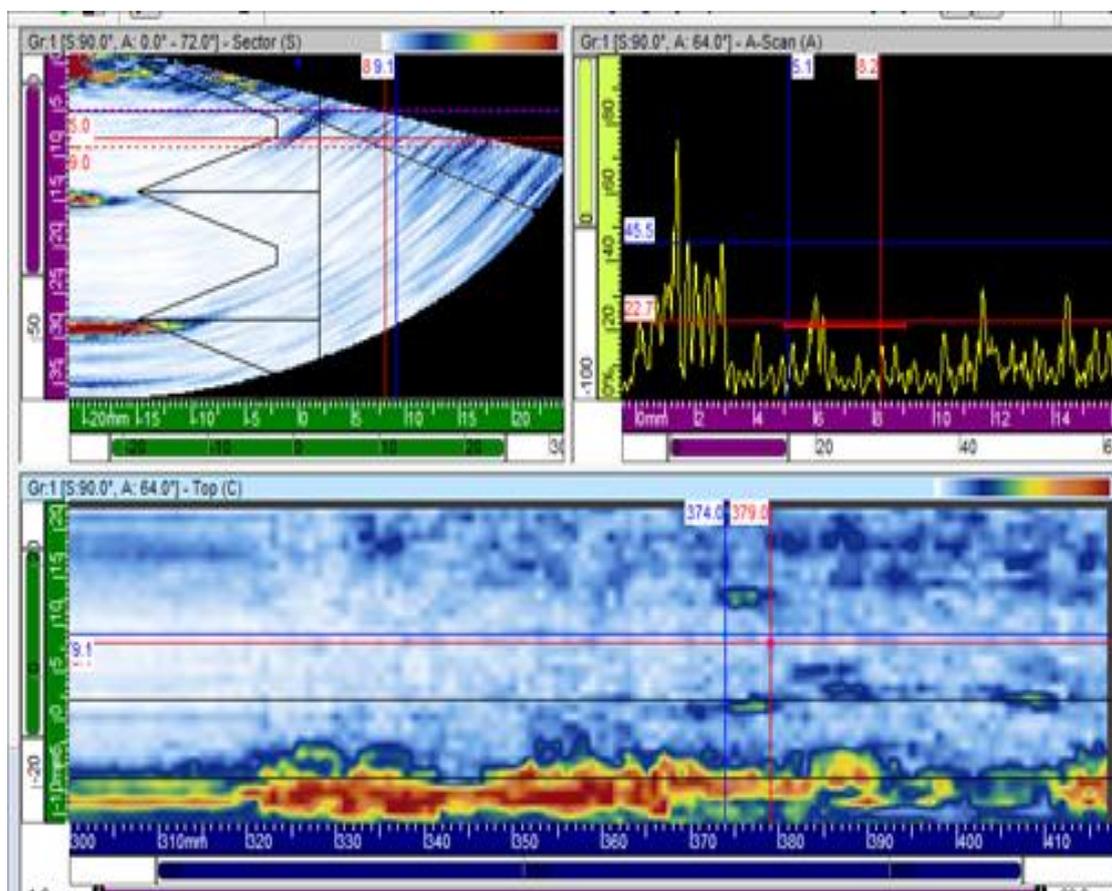


Figura 5.34 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 300 a 400 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
3 *	1	64.0°	90.0°	411.0 mm	8.9 mm	404.0 mm	5.1 mm	7.0 mm	3.8 mm		

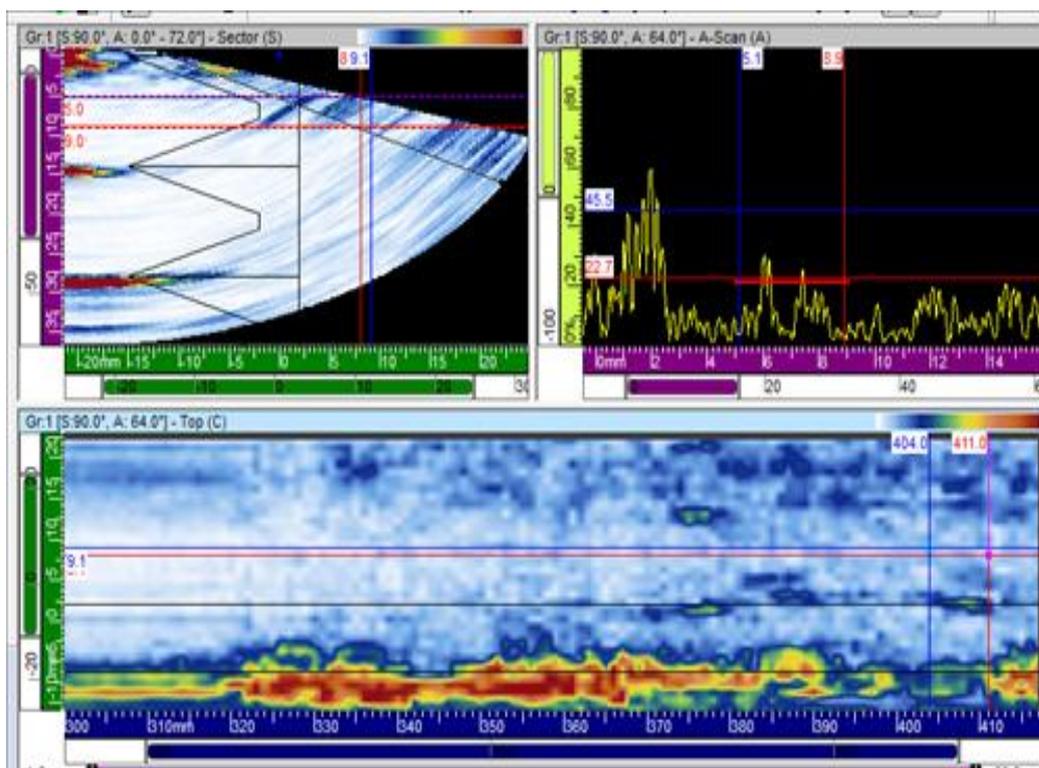


Figura 5.35 – Imagem da descontinuidade 03 do intervalo de 300 a 400 mm.

No intervalo de 400 a 490 mm foram detectadas 5 descontinuidades, cujas localizações, dimensões e imagens são mostradas nas figuras 5.36 a 5.40.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
1 *	1	60.0°	90.0°	422.0 mm	7.1 mm	420.0 mm	4.8 mm	2.0 mm	2.3 mm		

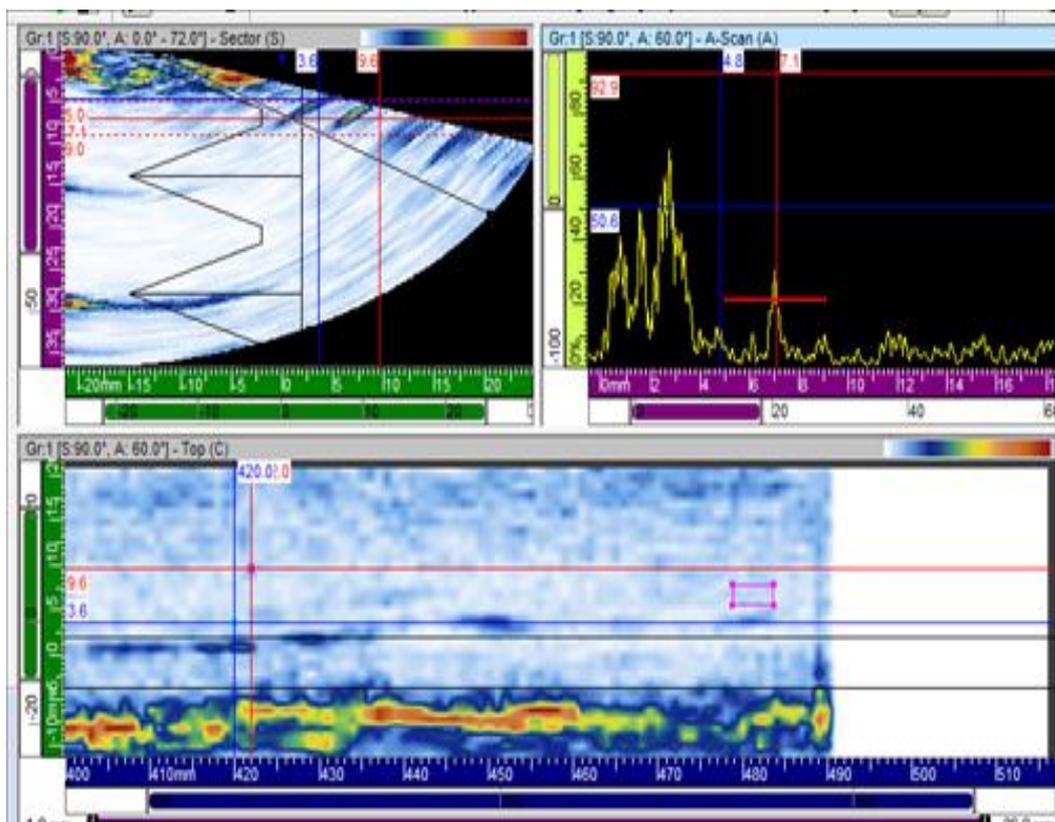


Figura 5.36 – Imagem da descontinuidade 01 do intervalo de 400 a 490 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
2 *	1	69.0°	90.0°	426.0 mm	8.2 mm	423.0 mm	5.8 mm	3.0 mm	2.4 mm		

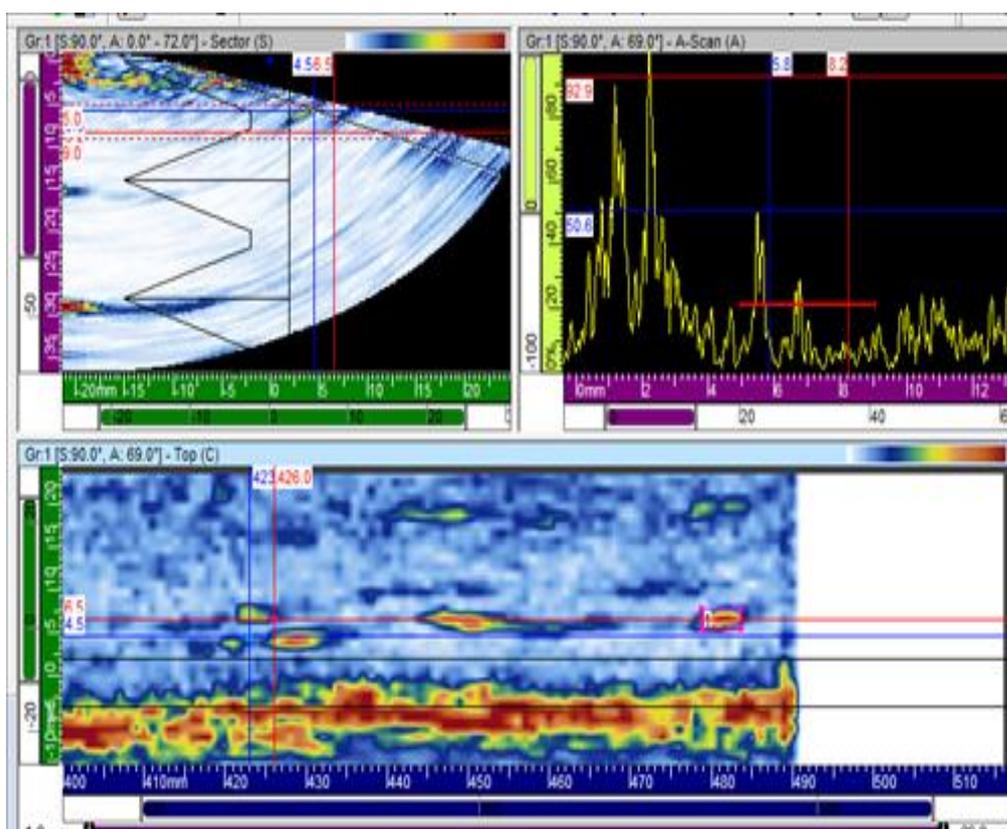


Figura 5.37 – Imagem da descontinuidade 02 do intervalo de 400 a 490 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
3 *	1	68.0°	90.0°	432.0 mm	7.2 mm	426.0 mm	5.0 mm	6.0 mm	2.2 mm		

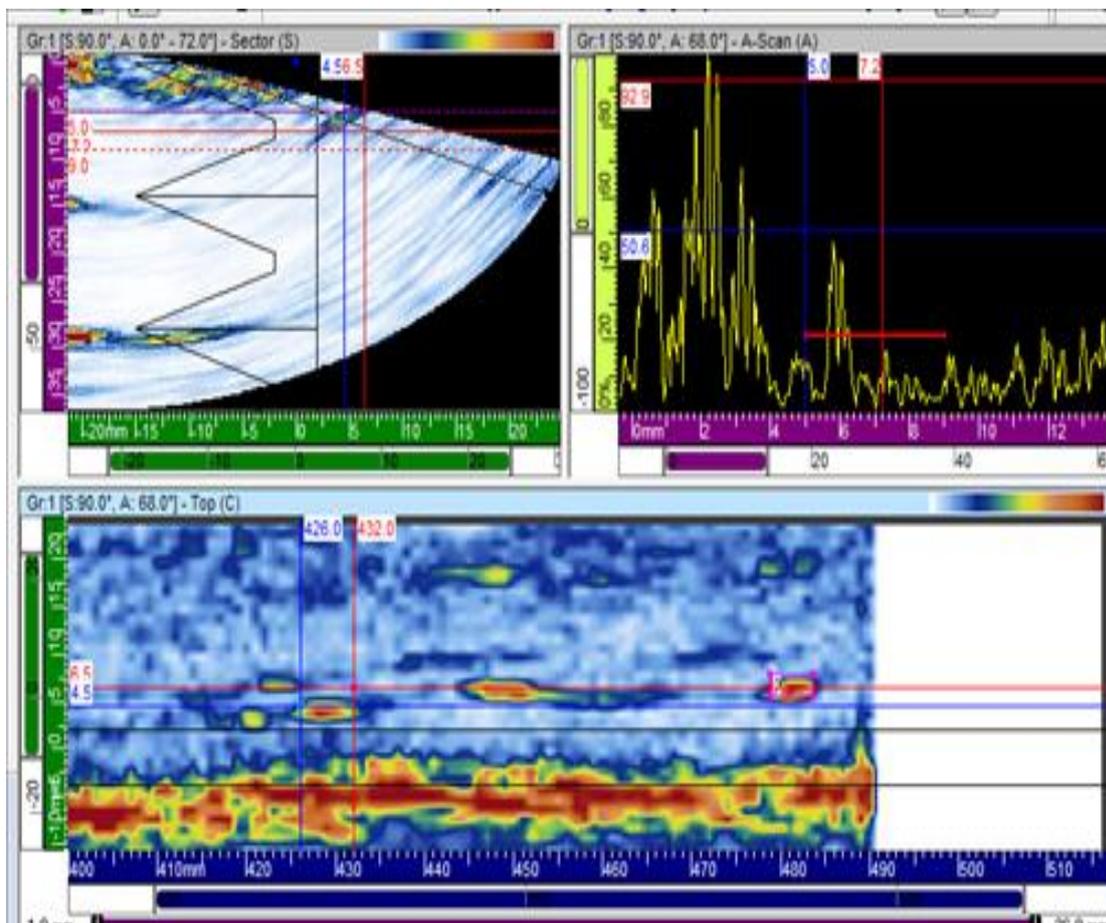


Figura 5.38 – Imagem da descontinuidade 03 do intervalo de 400 a 490 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
4 *	1	68.0°	90.0°	468.0 mm	7.8 mm	445.0 mm	5.8 mm	23.0 mm	2.0 mm		

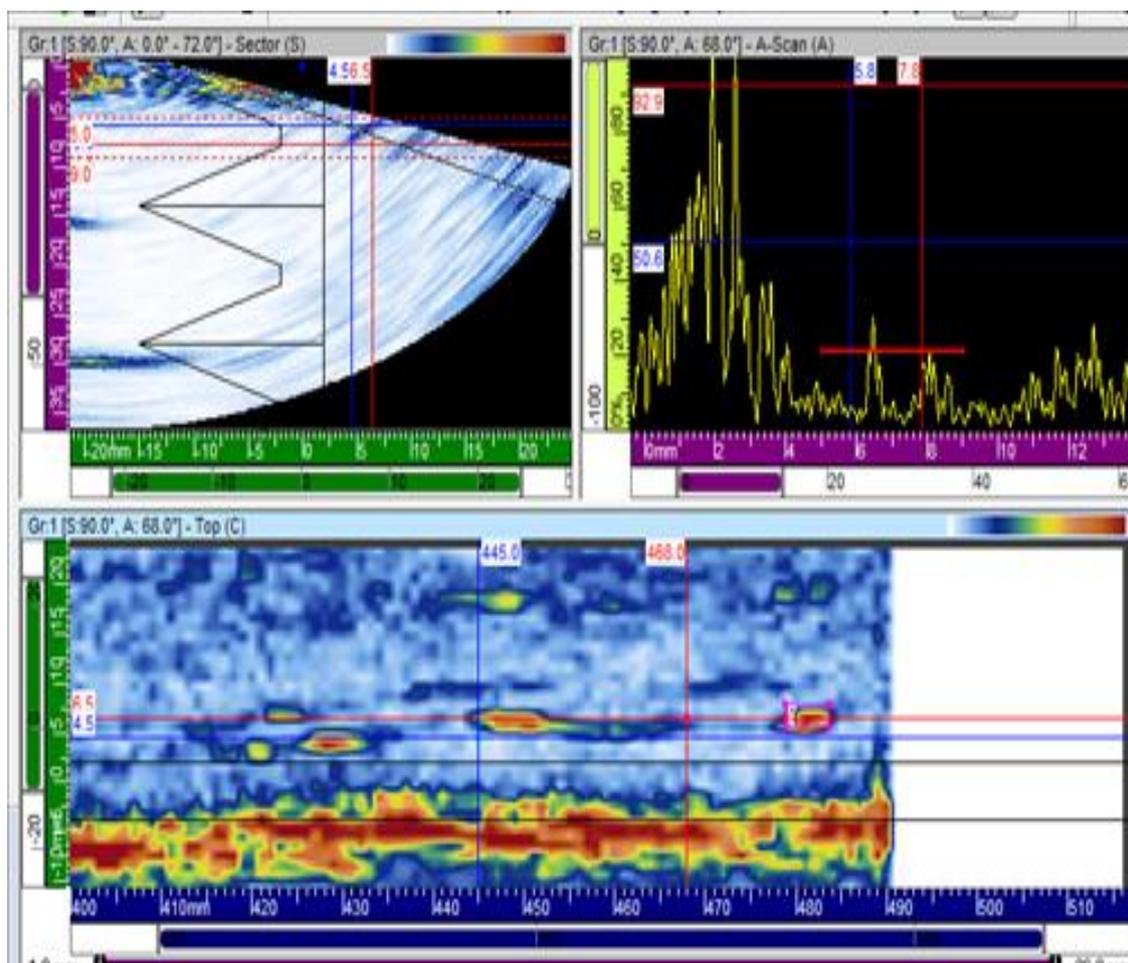


Figura 5.39 – Imagem da descontinuidade 04 do intervalo de 400 a 490 mm.

Entry #	Group	Law	Skew	S(r)	U(r)	S(m)	U(m)	S(m-r)	U(m-r)		
5 *	1	68.0°	90.0°	484.0 mm	7.9 mm	478.0 mm	5.8 mm	6.0 mm	2.1 mm		

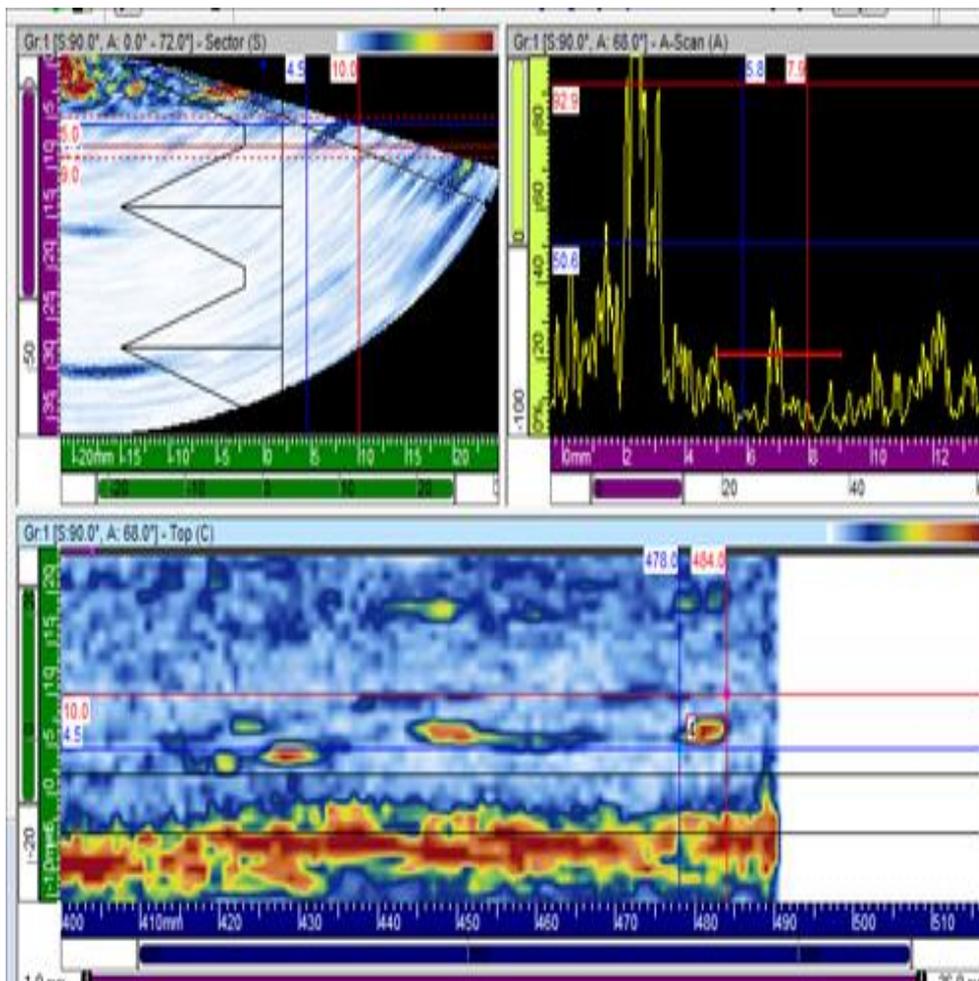


Figura 5.40 – Imagem da descontinuidade 05 do intervalo de 400 a 490 mm.

## 6 Conclusões

No presente trabalho foi feito um estudo para avaliar, dentre as técnicas disponíveis do ensaio por ultrassom, aquela mais confiável para detecção de descontinuidades internas para garantir a sanidade do metal soldado e da ZAT em juntas soldadas dissimilares compostas por aço inoxidável austenítico e aço carbono, soldadas com metais de adição austenítico. A partir dos resultados, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A técnica *Phased Array* foi a mais adequada para a aplicação pretendida e os resultados obtidos com esta foram os mais eficazes. Além disto, demonstrou-se que esta técnica pode ser usada com a garantia e a confiabilidade cobertas pelas normas ASME V e Petrobras N-1594-F. Com esta técnica, foi possível detectar todos os furos do bloco padrão e todas as descontinuidades da peça de teste que simulava bocais de vasos. Além disto, a relação sinal-ruído foi sempre maior do que 10:1, não houve interferência das ondas transversais e a técnica foi eficaz na detecção de descontinuidades na linha de fusão entre o aço carbono e o aço inoxidável.
- As demais técnicas estudadas e avaliadas neste trabalho não foram consideradas adequadas para a aplicação pretendida, porque somente permitiram a inspeção parcial da linha de fusão da solda. As principais vantagens da técnica *Phased Array* sobre as demais técnicas para o ensaio de metais soldados austeníticos foram:
  1. Permitiu a varredura com vários ângulos de incidência e indica o ângulo ótimo de detecção.
  2. A varredura pôde ser feita com ângulos de 0° a 72° em incidência direta (1/2 pulo), utilizando ondas longitudinais, geradas pela refração em uma sapata em ângulo (forma de cunha), sem o inconveniente da incidência simultânea de ondas transversais.
  3. Através da apresentação *S-Scan*, foi possível visualizar a imagem digitalizada da descontinuidade na seção transversal da solda.
- Assim como no ensaio de bocais de metal soldado de aço carbono, no ensaio de juntas dissimilares de bocais soldados de aço inoxidável austenítico, a varredura deve ser aplicada com cabeçotes pelo lado interno e externo no casco (posição A) e pelo lado interno do tubo do bocal (posição B). Porém, para bocais com diâmetro interno menor que 100 mm (4"), não há acesso para varredura na posição B, o que dificulta a detecção de falta de fusão na linha de fusão do lado do aço inoxidável. Tal limitação pode ser compensada utilizando-se um cabeçote duplo cristal focalizado como, por exemplo, MSEB4H na posição A, com o reforço esmerilhado rente ao metal base.

- O transdutor e a sapata utilizados na técnica *Phased Array* , foram respectivamente 5L16N55S e SA10N60L. Tal combinação permite varreduras angulares, com ângulo máximo de 72° e mínimo de 0°. A utilização desta combinação permite a utilização de parte da varredura nos ângulos de 68° a 72°, mais favoráveis para a detecção de falta de fusão na linha de fusão do lado do aço inoxidável.

## **7 Sugestões para trabalhos futuros**

### **7.1 Contribuição dos resultados da pesquisa na aplicação do ensaio em equipamentos PETROBRAS fabricados por juntas dissimilares entre aço carbono e aços inoxidáveis austeníticos.**

O ensaio por ultrassom em juntas soldadas dissimilares de bocais não tem sido executado devido às limitações e dificuldades apresentadas neste trabalho e pela falta de procedimento qualificado para o ensaio. O sistema nacional da qualificação e certificação de pessoal para ensaios não destrutivos e inspeção – ABENDI (Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção) – ainda não qualificou procedimentos para o referido ensaio e, desta forma, os fabricantes de equipamentos PETROBRAS não têm executado o ensaio nas juntas destes bocais.

Com o resultado satisfatório deste trabalho, a metodologia adotada para avaliação do desempenho e qualificação do procedimento poderá ser apresentada ao SEQUI - Setor de qualificação e inspeção da PETROBRAS.

### **7.2 - Contribuição dos resultados sobre a inovação tecnológica.**

Considerando a metodologia adotada e os resultados deste trabalho, acredita-se que a pesquisa proposta atingiu os seus objetivos e aponta para a possibilidade da qualificação de um procedimento de ensaio confiável para a detecção de descontinuidades, que possam ser avaliadas dentro do critério de aceitação estabelecido pelo código ASME VIII div. 1, sem a interferência de ruídos provenientes das heterogeneidades dos grãos e sem interferência de ondas transversais.

## 8 Referências Bibliográficas

- 1 ASME ; American Society of Mechanical Engineers; section VIII Div. 1; 2007
- 2 ASME; American Society of Mechanical Engineers; section IX; 2007
- 3 PETROBRAS; N 268F; Fabricação de vaso de pressão; julho 2005
- 4 PETROBRAS;N 1706C; Projeto de vaso de pressão para serviço com H<sub>2</sub>S; dezembro de 2005
- 5 PETROBRAS; N 133G; Soldagem; julho 2005
- 6 ASTM E 262; American Society for Testing and Materials; Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels<sup>1</sup>; 2004
- 7 ASNT – American Society for Nondestructive Testing – Ultrasonic Testing Hand Book 2000
- 8 JOHN A. BROOKS& JOHN C. LIPPOLD; ASM handbook; volume 6 ; Sandia National Laboratories ; Edson Welding Institute; Welding of dissimilar metals stainless steels; 2000
- 9 ASME II D; Metallurgical Phenomena; Non Mandatorry Apendix A 320 intergranular corrosion; 2007
- 10 ASME II D; Metallurgical Phenomena; Non Mandatorry Apendix A 320 intergranular corrosion; 2007
- 11 D.J.KOTECK ASM Handbook; volume 6; The Lincoln Eletric Company, Welding of stainless steels; 2000
- 12 ASME II D; Metallurgical Phenomena - Non Mandatorry Apendix A 340 – Sigma Phase Embrittlement; 2007
- 13 Olympus Not's R/D Tech; New Concepts of *Phased Array* UltrasonicTechnology, 2005
- 14 ASME ; American Society of Mechanical Engineers; section VII Div. 1; code case 2235-6; 2007
- 15 EVHARD G; SCHENK; W MOBILE; Ultrasonic *Phased Array* techinique for austenitic weld inspection, 2005
- 16 KOTECK, D.J.; ASM handbook; volume 6 ; Welding of stainless steels - Schaeffler constitution diagram; 2000
- 17 PETROBRAS; N 1590F; Ensaio não destrutivo – Qualificação de pessoal; dezembro de 2005
- 18 SANTINI, LUIZ; Ensaio por ultrassom; Editora Própria - 2004
- 19 DELP; Especificação de procedimento de soldagem nº 07805 e nº 00607, 2008

20 ASTM E 2491; American Society for Testing and Materials; Evaluating Performance Characteristics of Phased-Array Ultrasonic Examination Instruments and Systems; 2004.

21 S.PUDIKOV, A. BULAVINOV, M. KRÖNING, Ultrasonic Inspectability of austenitic stainless steel and dissimilar metal weld joints; 34. MPA Seminar, October 2008

22 MICHAEL T. ANDERSON, STEPHEN E. CUMBLIDGE, STEVEN R. DOCTOR; Through weld inspection of wrought stainless steel piping using *Phased Array* ultrasonic probes; Pacific Northwest National Laboratory – USA