

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

INSPEÇÃO POR TÉCNICA AVANÇADA DE ULTRASSOM (*PHASED ARRAY*) DE
TUBOS SOLDADOS POR FRICÇÃO

Rodrigo Marques Praetzel

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Thomas Gabriel Rosauro Clarke

Porto Alegre
2014

Dedico este trabalho de diplomação a meus pais e meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Thomas Clarke e Telmo Strohaecker pelo apoio e confiança no trabalho.

Ao LAMEF pela estrutura e oportunidade fornecidas.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Ao Engenheiro Conrado Pedro pela experiência e ajuda constantemente cedidas.

Aos colegas Allan Dias, Felipe Wu e Ricardo Jacques pela ajuda cedida.

Aos colegas do LAMEF que sempre se mostraram dispostos a ajudar.

À minha namorada Bianca Piazza pela ajuda e compreensão.

Aos familiares e amigos que sempre mantiveram apoio e compreensão durante o período em que estive envolvido com o trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Tubos para Gasodutos	2
2.2 Soldagem por Fricção	5
2.3 Inspeção por Ultrassom	6
2.4 Técnica de <i>Phased Array</i>	10
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 Inspeção Inicial	18
3.2 Confecção de Base para o Sensor	20
3.3 Inspeção da Junta Soldada por <i>Phased Array</i>	21
3.4 Inspeção da Junta Soldada com <i>Encoder</i>	24
3.5 Análise Metalográfica	25
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Determinação do Número Ideal de Elementos Excitados	27
4.2 Determinação do Ângulo Máximo	29
4.3 Confecção de Suporte para o Sensor	29
4.4 Inspeção da Junta Soldada	30
4.5 Inspeção com <i>Encoder</i>	39
4.6 Análise Metalográfica	41
5.0 CONCLUSÕES	45

6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema representando a soldagem de tubos por fricção com anel intermediário. (FAES et al. 2009)	6
Figura 2.2	Esquema representando a propagação de uma onda longitudinal e uma transversal. (BASSOLI 2001)	7
Figura 2.3	Esquema representando a incidência de uma onda longitudinal e suas ondas resultantes. (SANTIN 2003)	9
Figura 2.4	Esquema representando a formação do feixe sônico através da interferência das ondas de diferentes elementos do transdutor. (KOMURA et al 1984)	11
Figura 2.5	Esquema representando algumas das possíveis configurações de emissões de onda por <i>Phased Array</i>	12
Figura 2.6	Esquema de uma representação em A-scan. a) ecograma de amostra com defeito. b) ecograma de amostra sem defeito. (NEPOMUCENO 1980)	13
Figura 2.7	Exemplo de representação em <i>B-scan</i> . (KOMURA et al 1984)	14
Figura 2.8	Exemplo de representação em <i>C-scan</i> de inspeção de uma junta soldada. (RD TECH 2004)	14
Figura 2.9	Exemplo de representação em <i>S-scan</i> de uma varredura setorial de uma junta soldada. (RD TECH 2004)	15
Figura 2.10	Exemplo de sinal de TOFD em <i>D-scan</i> . (A) onda lateral, (B) Sinais de Difrações, (C) Eco de Fundo. (MOREIRA 2003).....	16
Figura 3.1	Equipamento de <i>Phased Array</i> utilizado para aquisição de dados, conectado ao computador via cabo USB.....	18
Figura 3.2	Máquina de Soldagem por Fricção (MASF 1500) projetada e desenvolvida pelo LAMEF.	19
Figura 3.3	Sapata de acrílico Rexolite® utilizada para acoplamento do sensor de <i>Phased Array</i>	19
Figura 3.4	Suporte de ABS projetado para acoplamento do sensor e impresso em impressora 3D, utilizado para emissão do feixe em ângulo adequado.....	20
Figura 3.5	Tubo dividido em intervalos a fim de facilitar a varredura e a localização dos defeitos.	21
Figura 3.6	Sensor posicionado sobre a base de ABS inspecionando por imersão o tubo a partir do lado B da solda.	22

Figura 3.7	<i>Encoder</i> acoplado ao sensor de <i>Phased Array</i> utilizado na última inspeção da solda.	25
Figura 3.8	Esquema representando os cortes para análise metalográfica. A) Tubo original. B) Tubo após corte paralelo à solda. C) Segmentos de tubo após cortes transversais à solda.	26
Figura 4.1	Desnível interno entre o anel utilizado para a solda e os tubos detectado por inspeção visual.	31
Figura 4.2	Sinal resultante da reflexão do defeito número 1, obtido através do <i>software</i> Multi2000 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda.....	36
Figura 4.3	Sinal resultante da reflexão do defeito número 2, obtido através do <i>software</i> Multi2000 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda.....	37
Figura 4.4	Sinal resultante da reflexão do defeito número 3, obtido através do <i>software</i> Multi2000 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda.....	38
Figura 4.5	Sinal resultante da reflexão do defeito número 4, obtido através do <i>software</i> Multi2000 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda.....	39
Figura 4.6	Sinal resultante da última inspeção por <i>Phased Array</i> , utilizando o <i>encoder</i> , abrangendo a área entre as regiões 6 e 10. Os defeitos estão destacados e representados pelos respectivos números.....	40
Figura 4.7	Macrografia da região do defeito número 1. Metal atacado quimicamente com Nital 10%. O defeito foi encontrado na região em destaque.....	41
Figura 4.8	Macrografia da região do defeito número 2. Metal atacado quimicamente com Nital 10%. O defeito foi encontrado na região em destaque.....	42
Figura 4.9	Macrografia da região do defeito número 3. Metal atacado quimicamente com Nital 10%.....	43
Figura 4.10	Macrografia da região do defeito número 4. Metal atacado quimicamente com Nital 10%. O defeito foi encontrado na região em destaque.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição química de diferentes classes de aços da família API 5LX conforme especificação (% em massa).	3
Tabela 2.2	Propriedades mecânicas das diferentes classes de aços da família API 5LX conforme especificação.	4
Tabela 4.1	Relação entre número de elementos excitados para produção do feixe sônico e amplitude do maior pico para um feixe sônico focado em 4 mm de profundidade.	27
Tabela 4.2	Relação entre número de elementos excitados para produção do feixe sônico e amplitude do maior pico para um feixe sônico focado em 8 mm de profundidade.	28
Tabela 4.3	Relação de defeitos encontrados na primeira inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção..	30
Tabela 4.4	Relação de defeitos encontrados na segunda inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção..	32
Tabela 4.5	Relação da posição dos defeitos encontrados na segunda inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção.	33
Tabela 4.6	Relação de defeitos encontrados na terceira inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção..	34
Tabela 4.7	Relação da posição dos defeitos encontrados na terceira inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção.	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno;
API	Instituto Americano do Petróleo;
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga;
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials;</i>
e	Tamanho do Cristal;
END	Ensaio Não Destrutivo;
f	Frequência;
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física;
MASF	Máquina de Soldagem por Fricção;
R	Índice de Refração;
T	Índice de Transmissão;
T _{nr}	Temperatura de Não-Recristalização;
TOFD	<i>Time of Flight Diffraction;</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
USB	<i>Universal Serial Bus;</i>
v	Velocidade;
Z	Impedância Acústica;
ZAC	Zona Afetada pelo Calor.
α	Ângulo de Entrada
β	Ângulo de Saída
λ	Comprimento de Onda;
ρ	Massa Específica;
Θ_m	Ângulo máximo com que o feixe pode ser produzido;

RESUMO

Este trabalho tem, como principal objetivo, o desenvolvimento de um procedimento para inspeção e avaliação da qualidade da solda realizada pela MASF 1500 através da técnica avançada de ultrassom *Phased Array*, além da comparação entre os resultados obtidos por ultrassom com os resultados da análise metalográfica.

Para atingir estes objetivos, foram realizados experimentos utilizando o aparelho de *Phased Array* modelo Multi-X da marca M2M com um transdutor com frequência de 5 MHz e com 128 elementos dispostos em um arranjo linear. O tubo inspecionado é feito de aço API 5L X46 com diâmetro externo de 220 mm, 8,5 mm de espessura e 365 mm de comprimento. Foram utilizados três modos de emissão do feixe de ultrassom: varredura angular de 40 a 65°, emissão a 60° sem foco definido e emissão a 60° com foco a 4 mm de espessura. Além da inspeção via ultrassom, foi realizada inspeção visual interna e externa, revelando um desalinhamento entre os tubos soldados.

Para todos os modos de emissão de feixe foram detectados defeitos, sendo a região mais crítica o intervalo entre as marcações 6 e 9 do tubo. Foram encontrados quatro principais defeitos, sendo o primeiro encontrado próximo à marcação de número 6 a profundidade de 3,5 mm. Os defeitos números 2, 3 e 4 foram encontrados próximos às marcações de número 8, 9 e 7, respectivamente, a profundidades de 4,5 mm, 6,0 mm e 5,0 mm respectivamente. Através da análise metalográfica, realizada utilizando-se Nital 10%, apenas o defeito número 3 não foi detectado. Os outros três defeitos foram localizados em regiões próximas às fornecidas pela inspeção via ultrassom, porém com profundidades e tamanhos diferentes.

Com este estudo, foi possível concluir que os modos de emissão do feixe foram satisfatórios para detectar defeitos, porém não apresentaram bons resultados quanto a localização e dimensionamento dos mesmos. A solda apresentou defeitos presentes no centro da solda e na interface entre a zona afetada pelo calor e o metal base, além de apresentar desnível entre os tubos.

ABSTRACT

This work has, as main goal, the development of a procedure for inspection and evaluation of the quality of a welded joint, made by MASF 1500, through the advanced ultrasound technique Phased Array, besides of the comparison between the results obtained from the ultrasound inspection with metallographic analysis.

To achieve these goals, some experiments have been done using the Phased Array equipment model Multi-X and brand M2M with a 5 MHz frequency transducer compound by 128 elements linearly arranged. The inspected pipe is an API 5L X46 steel pipe with 220 mm external diameter, 8.5 mm thickness and 365 mm length. Were used three modes to emit the ultrasonic beam: angular scanning from 40 to 60°, emission at 60° without specific focus and emission at 60° focusing at 4 mm depth. Besides of the ultrasound inspection, an internal and external visual inspection has also been done, revealing misalignment between the welded pipes.

All emission modes detected defects, being the most critic region the interval between the marks 6 and 9 in the pipe. Four main defects have been found, the first one being detected next to the mark 6 and at 3.5 mm depth. The second defect has been found in the mark 8 and at 4.5 mm depth. The defect number three has been detected between the marks 8 and 9, at the depth of 6.0 mm. The fourth defect was found in the mark 7, at 5.0 mm depth. Through the metallographic analysis, using 10% Nital, only the third defect hasn't been found. The other three defects were located in regions next to the ones provided by the ultrasonic inspection, but in different sizes and depths.

With this review, was possible to conclude that the modes used to emit the beam were satisfactory to detect the defects, but didn't present good results for defects localization and sizing. The welded joint presented defects in its center and in the interface between the heat-affected zone and the base metal. Also, it presented a misalignment between the pipes.

1.0 INTRODUÇÃO

A demanda energética mundial vem sofrendo um aumento significativo, fazendo-se necessária uma melhora na distribuição de fontes energéticas, como o petróleo e seus derivados. No caso destas fontes, os dutos atuais possuem uniões soldadas manualmente, o que requer muita técnica e habilidade do soldador, além de ser um processo relativamente demorado. Estes fatores tornam o processo caro, além de resultar em qualidades de soldas muito variadas. Levando isto em conta, visa-se a automatização destas uniões.

Tendo em vista esta necessidade de automatização, o Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) projetou a MASF 1500, uma máquina para soldagem de tubos por fricção. O projeto tem como base a ideia de soldar gasodutos de forma automática, tornando o processo mais rápido, além de apresentar uma qualidade de solda mais constante e com menos defeitos.

São utilizados ensaios não destrutivos (END) a fim de inspecionar os tubos e avaliar a qualidade das uniões entre eles. O método mais utilizado é a inspeção com ultrassom convencional, porém este processo demanda muito tempo. Sendo assim, técnicas mais avançadas de inspeção estão sendo utilizadas e, entre elas, apresenta-se o *Phased Array*. Esta é uma técnica avançada de ultrassom na qual vários transdutores são ativados em tempos diferentes, podendo produzir diversas configurações, sem necessidade de movimentar o sensor. Considerando estes fatores, o *Phased Array* é uma técnica mais rápida e mais versátil do que o ultrassom convencional.

Sendo assim, o atual trabalho tem, como principal objetivo, o desenvolvimento de um procedimento para inspeção e avaliação da qualidade da solda realizada pela MASF 1500 através da técnica avançada de ultrassom *Phased Array*, além da comparação entre os resultados obtidos por ultrassom com os resultados da análise metalográfica.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tubos para Gasodutos

A produção de linhas de tubulações para o transporte de óleo e gás, por ser a forma mais efetiva de transporte, está em constante crescimento e desenvolvimento com o aumento da população e do consumo de energia. Visando cobrir esta crescente demanda, tubos de alta qualidade são requeridos para sistemas de transporte seguros e econômicos (NARA et al. 1983).

Atualmente estima-se que apenas 40% das tubulações em todo o mundo atingiram seu tempo de vida de projeto – aproximadamente 20 anos – sem falhar. Sendo assim, continuam em crescimento os esforços a fim de aumentar a duração das tubulações sem falhar. Estes acidentes fazem com que ainda ocorra vazamento de um volume muito grande de óleo. Estima-se que, apenas nos Estados Unidos, há vazamento de 2,5 bilhões de galões por ano. Estes acidentes podem ocorrer tanto na produção, quanto no armazenamento e transporte do óleo e do gás (AZEVEDO 2007).

Novas ligas de aço tiveram que ser criadas, levando em conta estes acidentes e sabendo que os tubos para transporte de óleo e gás tendem a ter grandes dimensões, além da necessidade de suportar grandes pressões de operação com a finalidade de aumentar a eficiência de transporte. Assim, o Instituto Americano do Petróleo (API) estendeu suas especificações para aços que suportassem estas pressões e dimensões e, no ano de 1948, surgiu o primeiro aço para estas aplicações. Tal aço foi chamado de API 5LX e, inicialmente, só incluía a classe X42 para diâmetros menores de 30 polegadas (NARA et al. 1983). Como a chave para minimizar estes acidentes é a escolha correta dos materiais de acordo com o material transportado e meio ao qual a tubulação é submetida, posteriormente, novas classes do API 5LX foram desenvolvidas, suportando maiores pressões e dimensões (AZEVEDO 2007).

Entre as ligas utilizadas nas tubulações de gasodutos, apresenta-se a família dos aços API 5LX. Esta família consiste de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), apresentando como principais elementos de liga os seguintes: manganês, carbono, vanádio, nióbio e titânio. As diferentes classes desta família são dadas de acordo com a tensão de escoamento do material e são representadas com o valor desta propriedade em si. Tem-se como exemplos de classes o aço API 5LX 42, apresentando 42 ksi de tensão de escoamento, o aço API 5LX 46, com 46 ksi de tensão de escoamento, ou ainda o API 5LX 70, já apresentando uma tensão de escoamento maior: 70 ksi.

Esta diferença na tensão de escoamento se dá principalmente pela diferença de composição entre as classes. A tabela 2.1 apresenta a composição química de algumas classes de aços API 5LX.

Tabela 2.1 Composição química de diferentes classes de aços da família API 5LX conforme especificação (% em massa).

Classe do Aço API 5LX	Fração em Massa (%)						
	C (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	V (máx.)	Nb (máx.)	Ti (máx.)
X42	0,26	1,30	0,030	0,030	a	a	a
X46	0,26	1,40	0,030	0,030	a	a	a
X52	0,26	1,40	0,030	0,030	a	a	a
X56	0,26	1,40	0,030	0,030	a	a	a
X60	0,26*	1,40*	0,030	0,030	a*	a*	a*
X65	0,26*	1,45*	0,030	0,030	a*	a*	a*
X70	0,26*	1,60*	0,030	0,030	a*	a*	a*

a – A soma das frações de vanádio, nióbio e titânio não devem ultrapassar 0,15%.

* - Exceto quando houver acordo em contrário.

(API Specification, 2014)

As diferentes composições apresentadas na tabela 2.1 são a principal causa para a diferença na tensão de escoamento de cada uma das classes, apresentadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Propriedades mecânicas das diferentes classes de aços da família API 5LX conforme especificação.

Classe do Aço API 5LX	Tensão de Escoamento		Resistência a Tração	
	MPa	psi	MPa	psi
X42	290	42.100	415	60.200
X46	320	46.400	435	63.100
X52	360	52.200	460	66.700
X56	390	56.600	490	71.100
X60	415	60.200	520	75.400
X65	450	65.300	535	77.600
X70	485	70.300	570	82.700

(API Specification, 2014)

Conforme citado acima, a classe do aço é nomeada de acordo com sua tensão de escoamento em ksi, como pode ser visto na tabela 2.2.

O efeito que estes elementos microligantes possuem neste tipo de aço é que a cada passe de deformação, abaixo de uma temperatura, denominada Temperatura de Não-Recristalização (T_{nr}), parte deles precipita na austenita. Estes precipitados ancoram os contornos de recristalização, praticamente paralisando a restauração do material. Assim, como a austenita não recristaliza, ela encrua, formando grãos achatados. Esta austenita retida sofre uma transformação no resfriamento após a laminação, finalizando numa estrutura com grãos extremamente refinados. Este refino no grão leva a uma elevação da resistência mecânica e da tenacidade do material (GORNÍ 2009).

Além da correta escolha do material, é necessária uma solda de alta qualidade entre os tubos a fim de evitar acidentes. Considerando esta necessidade e a escassez de soldadores qualificados para esta tarefa, novos métodos de união estão sendo utilizados. Entre estes métodos, apresenta-se como principal a soldagem dos tubos por fricção (FAES et al. 2009).

2.2 Soldagem por Fricção

A soldagem por fricção é um método de união sem fusão de material, onde as peças a serem soldadas são comprimidas uma contra a outra, junto com movimento relativo – geralmente rotacional- a fim de gerar calor. Este calor é gerado através do atrito presente entre as peças quando se encontram em movimento e aquece o material até a superfície se encontrar em estado plástico. Com esta plastificação das superfícies em contato, há a união entre as peças sem a fusão, possibilitando inclusive a união de pares dissimilares ou metais difíceis de soldar por métodos convencionais (LÓPEZ 2010).

Os principais parâmetros da soldagem por fricção são a velocidade de rotação, a pressão axial e o tempo de solda, sendo estes modificados de acordo com a temperatura necessária para a união. Esta temperatura é a temperatura em que a superfície do material se encontra no estado plástico, necessitando apenas um aumento na pressão entre as peças para que a união se complete. Neste estágio acontece o fenômeno de difusão atômica entre as partes unidas, tornando possível a união metalúrgica (LÓPEZ 2010).

Este processo possui diversas vantagens, como maior segurança para o operador, possibilidade de união entre pares dissimilares, ausência de defeitos relacionados a fusão-solidificação, qualidade das soldas mais uniforme, menor tempo de soldagem e menor custo de mão de obra. Entre as desvantagens pode-se citar a necessidade de plastificação de pelo menos um dos materiais, impossibilidade de geometrias muito complexas, extremo cuidado necessário com alinhamento e alto valor de investimento inicial (LÓPEZ 2010).

Há diversas variações de soldagem por fricção, mas entre elas encontra-se um método promissor, no qual os tubos a serem soldados permanecem fixos e o movimento relativo se dá por um anel posicionado na interface entre os tubos. O anel é rotado em alta velocidade, em contato com os tubos, gerando calor por fricção e plastificando as superfícies de contato. Assim que a temperatura de plastificação é atingida, os tubos são pressionados contra o anel intermediário, causando a união metalúrgica por meio da difusão atômica (FAES et al. 2009).

Um esquema deste método de solda por fricção pode ser visto na Figura 2.1, onde é apresentado o anel intermediário e os tubos posicionados para a solda.

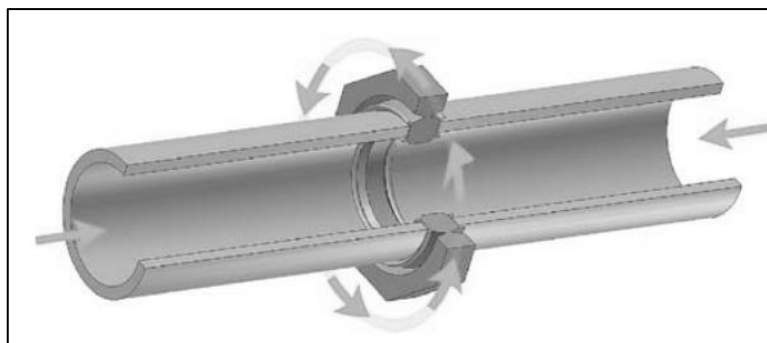


Figura 2.1 Esquema representando a soldagem de tubos por fricção com anel intermediário (FAES et al. 2009).

Como está representado na Figura 2.1, apenas o anel sofre rotação enquanto os tubos sofrem apenas a força de compressão contra o anel em movimento.

Entre os possíveis defeitos presentes neste tipo de soldagem, se encontram o desalinhamento dos tubos, a falta de fusão e falta de penetração. A causa mais comum do desalinhamento dos tubos é ajuste inadequado da máquina. Já para a falta de fusão e de penetração, as principais causas são baixa velocidade de rotação e/ou baixa força de compressão entre os tubos. Estes parâmetros, quando escolhidos erroneamente, podem gerar calor insuficiente através da fricção ou pouca deformação plástica do anel auxiliar para a soldagem (CUI et al. 2014).

Para avaliar a qualidade das soldas, tanto manuais quanto as realizadas por máquinas de fricção, é necessário que se faça uma inspeção. Antigamente, para inspeção de soldas em tubos de diâmetros pequenos, era utilizada a radiografia, a qual apresenta problemas de segurança, de licença, resíduo químico, armazenagem de produtos químicos e baixa detecção de defeitos planares, fazendo com que o ultrassom fosse preferido, mesmo com a dependência das habilidades do inspetor (MOLES 2012).

2.3 Inspeção por Ultrassom

Com baixa eficiência e pouca praticidade, a inspeção por radiografia de tubos soldados passou a ser substituída por inspeção via ultrassom. Esta técnica consiste em emitir no material, através de um transdutor, um feixe de energia acústica de alta frequência, o qual reflete em discontinuidades e retorna a um transdutor (podendo, ou não, ser o mesmo cristal que emitiu o feixe), indicando a presença de defeitos (CAMPBELL 2013).

As reflexões do feixe são detectadas por um sensor e apresentadas em um ecograma, indicando a profundidade do defeito ou da reflexão do feixe no lado da peça oposto ao da inspeção, também conhecida como eco de fundo. Esta profundidade é calculada pelo equipamento, levando em conta a velocidade da onda no material e o tempo o qual a onda leva para percorrer o caminho a partir do transdutor emissor até o defeito (ou fundo) e retornar ao transdutor receptor (CAMPBELL 2013).

O som é a propagação de ondas em um meio produzidas pela vibração de um corpo, podendo se propagar no sólido, no líquido e no gás. Para uma onda ser classificada como ultrassom, deve ter frequência acima de 20 kHz. Nos sólidos, há três principais formas de propagação: ondas longitudinais, transversais e superficiais. Já nos meios líquidos e gasosos, apenas ondas longitudinais podem se propagar (BASSOLI 2001).

As ondas longitudinais, também chamadas de ondas de compressão, percorrem o material em séries alternadas de compressão e rarefação, vibrando na direção de propagação da onda. Estas ondas possuem velocidade de propagação de aproximadamente 5900 m/s no aço, 1500 m/s na água e 330 m/s no ar (CERQUEIRA 2009).

As ondas transversais, ou de cisalhamento, são causadas por uma vibração em direção perpendicular à de propagação. Para que isto ocorra, é necessária uma força de atração entre as partículas, fazendo com que estas ondas se propaguem apenas nos sólidos. A velocidade de propagação de uma onda transversal é aproximadamente a metade da onda longitudinal para o mesmo meio (CERQUEIRA 2009).

A Figura 2.2 apresenta um esquema representando a propagação de uma onda longitudinal e uma transversal.



Onda	Configuração
Longitudinal	
Transversal	

Figura 2.2 Esquema representando a propagação de uma onda longitudinal e uma transversal (BASSOLI 2001).

As ondas superficiais se propagam na interface entre um corpo sólido e um gás, sendo útil na detecção de defeitos superficiais. Esta inspeção detecta defeitos em profundidades medindo no máximo o valor do comprimento de onda. Estas ondas superficiais podem ser classificadas em dois tipos: ondas de *Rayleigh*, as quais são a propagação de ondas transversais na superfície, e ondas de *Creeping*, propagação de ondas longitudinais na superfície (CERQUEIRA 2009).

A fim de determinar o comportamento de uma onda na transição entre dois meios diferentes, é necessário analisar a impedância acústica (Z) dos materiais, propriedade relativa à resistência do meio contra a vibração das partículas quando submetido a uma onda ultrassônica (BASSOLI 2001). Para isto, é necessário conhecer a massa específica do material (ρ) e a velocidade de propagação do som no mesmo (v). A impedância acústica é dada pela Equação 2.1:

$$Z = \rho \times v \quad \text{Equação 2.1}$$

Com a impedância acústica de cada meio calculada, é possível determinar os índices de refração e transmissão, R e T respectivamente, para uma emissão perpendicular à superfície do sólido dados pelas Equações 2.2 e 2.3:

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad \text{Equação 2.2}$$

$$T = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad \text{Equação 2.3}$$

Nestas equações, os índices 1 e 2 representam, respectivamente, os meios de transmissão e recepção (CERQUEIRA 2009).

Para incidências em ângulo, deve-se levar em conta a refração e a conversão de modo da onda incidente. Na Figura 2.3 é representada uma onda longitudinal sendo incidida do meio 1 para o meio 2.

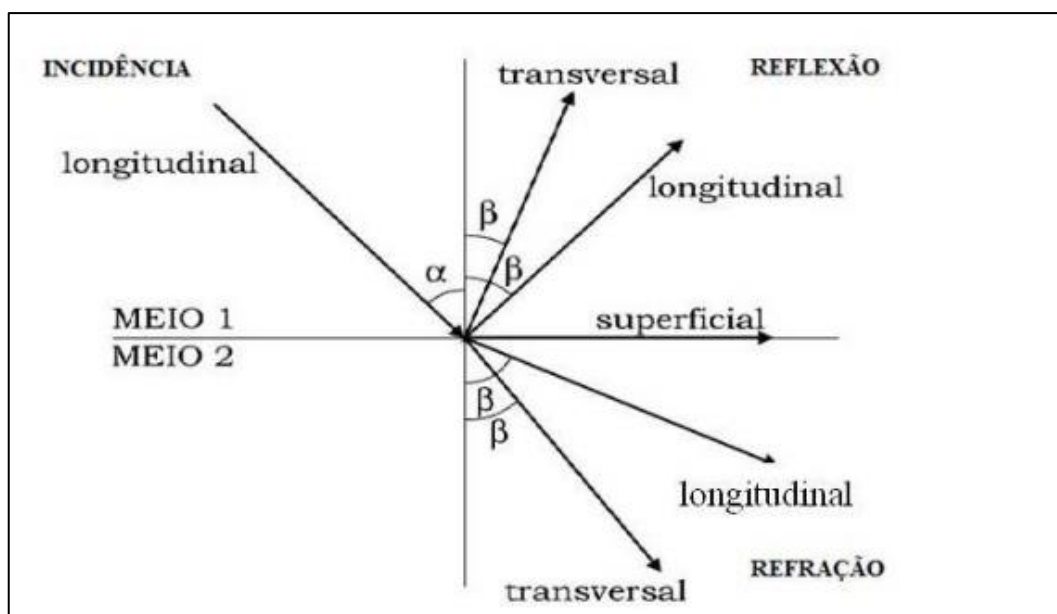


Figura 2.3 Esquema representando a incidência de uma onda longitudinal e suas ondas resultantes (SANTIN 2003).

Pode-se ver que há tanto transmissão quanto reflexão da onda longitudinal e, para cada uma dessas ondas resultantes, há uma onda transversal proveniente da conversão de modo sofrida na mudança de meio. Além destas ondas, há também a possibilidade de uma onda superficial se propagar entre os meios 1 e 2. A relação entre os ângulos de incidência e de refração é dada pela Equação 2.4, conhecida como Lei de *Snell* (SANTIN 2003).

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Equação 2.4}$$

Esta equação relaciona os senos dos ângulos de incidência e de refração ou reflexão com a velocidade de propagação do som nos meios em questão, a qual é definida como a distância percorrida pela onda neste meio por uma unidade de tempo (BASSOLI 2001).

A Lei de *Snell* tem grande importância nos ensaios de ultrassom devido à utilização de sapatas, geralmente de acrílico, para emissão em determinado ângulo. O feixe sônico, ao passar da sapata para o material a ser inspecionado, sofre a refração. Sendo assim, é necessário saber a relação entre as velocidades a fim de determinar o ângulo final do feixe no material em análise. No aço, o ângulo com maior intensidade de sinal é 0° para a onda longitudinal e 30° para a transversal, ambos em relação à normal. Sabe-se, também, que a interface entre a sapata de acrílico e o aço do componente a ser inspecionado apresenta dois ângulos críticos. O primeiro ângulo crítico é 27° , a partir do qual a onda longitudinal refrata tangenciando a superfície, resultando nas chamadas ondas *Creeping*. O segundo ângulo crítico

ocorre quando a onda transversal refrata tangenciando a superfície, sendo percebido em ângulos maiores que 66° e sendo chamadas de ondas *Rayleigh*. Para o caso de não se utilizar sapata de acrílico e sendo a água o único meio entre os sensores e o metal, os ângulos críticos passam a ser 15° para as ondas longitudinais e 28° para as ondas transversais (FONSECA 2005).

Além de considerar os ângulos críticos, é necessário analisar o máximo ângulo com que o feixe pode ser produzido (θ_m), o qual é dado pela Equação 2.5:

$$\sin \theta_m = 0.514 \frac{\lambda}{e} \quad \text{Equação 2.5}$$

Percebe-se que o ângulo limite do feixe depende do comprimento de onda, λ , e do tamanho dos cristais responsáveis pela produção da onda (e) (OLYMPUS, 2014).

Para determinação do comprimento de onda, utiliza-se a Equação 2.6.

$$v = \lambda f \quad \text{Equação 2.6}$$

Nota-se que o comprimento de onda é diretamente proporcional à velocidade de propagação no meio em questão (v) e inversamente proporcional à frequência da onda (f).

A técnica de *Phased Array* apresenta como principal vantagem a possibilidade de controlar o ângulo do feixe e profundidade do foco durante o ensaio, enquanto o ultrassom convencional necessitaria uma mudança de transdutor. Esta versatilidade torna a análise por *Phased Array* muito mais rápida e precisa em relação ao método convencional (KOMURA et al 1984).

2.4 Técnica de *Phased Array*

O princípio da técnica de *Phased Array* é baseado na formação de um feixe sônico através da interferência das ondas produzidas por diferentes elementos que constituem o transdutor. Estes pequenos elementos são fabricados com piezo-compósitos, permitindo um controle eletrônico para orientação do feixe. A Figura 2.4 representa esta formação de feixe pela interferência das ondas de diferentes transdutores.

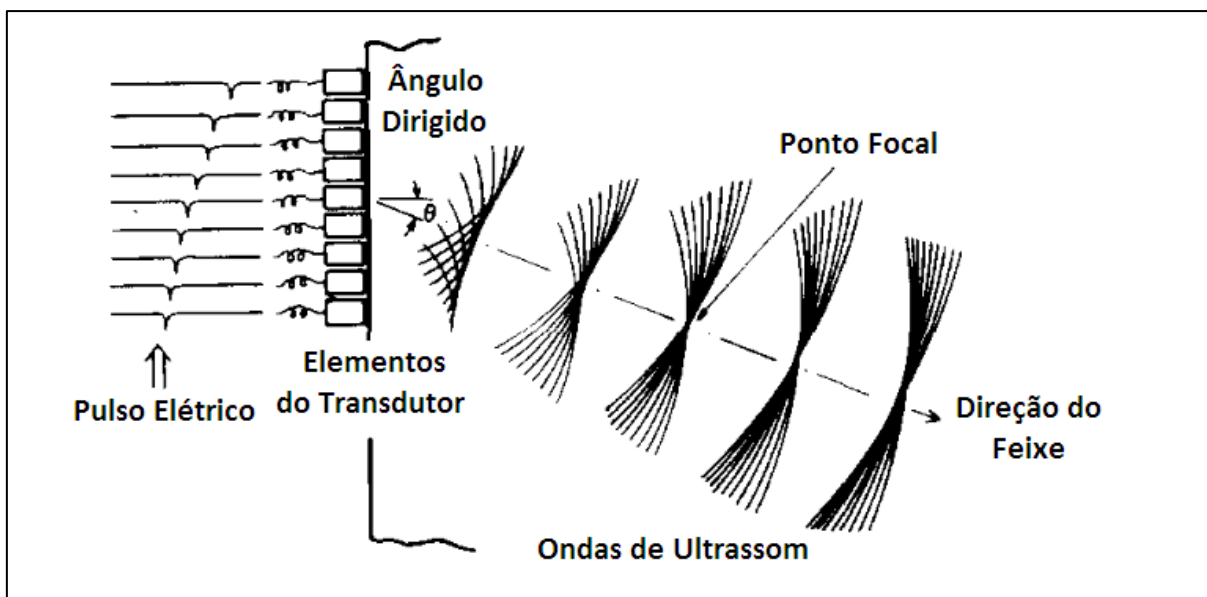


Figura 2.4 Esquema representando a formação do feixe sônico através da interferência das ondas de diferentes elementos do transdutor (KOMURA et al 1984).

A alteração no ângulo do feixe é dada através da defasagem no tempo de excitação de cada um dos elementos constituintes do transdutor. Além de ser um método simples e rápido de alteração do feixe, esta técnica possibilita diversas configurações de emissão das ondas para cada tipo de cabeçote. Entre os utilizados na área de inspeção, encontram-se os seguintes tipos de cabeçotes:

- Anular: Neste tipo de cabeçote, os sensores são dispostos como anéis concêntricos.
- Linear: Consiste de sensores retangulares dispostos em uma única linha. Este é o tipo de cabeçote mais utilizado atualmente por apresentar baixo custo, facilidade de projeto, boa versatilidade e simulação de feixe sônico menos complexo.
- Planar: Neste cabeçote, os sensores se encontram distribuídos em duas direções, formando uma matriz de elementos. Este tipo de sensor apresenta uma vasta possibilidade de configurações (CERQUEIRA 2009).

Por sua grande versatilidade e relativa facilidade de projeto, as configurações apresentadas a seguir são relativas aos sensores lineares, o mesmo tipo utilizado no presente trabalho. Algumas das possíveis configurações dos sensores lineares podem ser vistas na Figura 2.5.

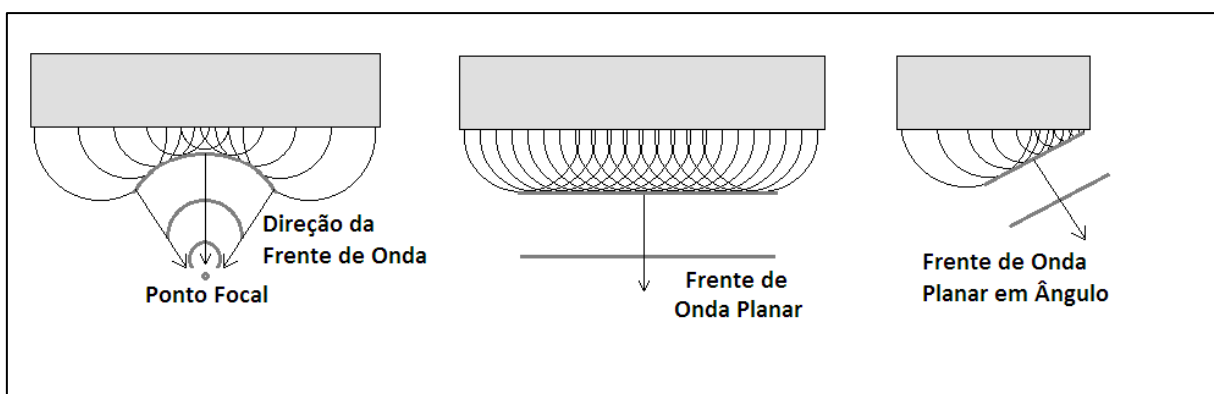


Figura 2.5 Esquema representando algumas das possíveis configurações de emissões de onda por *Phased Array*.

A Figura 2.5 apresenta três configurações possíveis de feixes emitidas por *Phased Array*. À esquerda, temos a configuração para focalizar em uma determinada profundidade da amostra, excitando primeiramente os elementos mais externos e, gradativamente, se aproximando dos centrais. No centro da imagem, temos a emissão com frente de onda planar, excitando todos os elementos do transdutor ao mesmo tempo. À direita, é apresentada a emissão planar em ângulo, excitando primeiramente o elemento de uma das extremidades e, gradativamente, se aproximando da outra extremidade do transdutor.

Além das configurações apresentadas, também é possível emitir o feixe em diversas outras formas. Como exemplos, temos a varredura setorial do corpo de prova com o transdutor fixo, sendo feita através da emissão iniciada em um ângulo e finalizada em outro. Também é bastante utilizada a emissão para foco em ângulo, sendo uma combinação das configurações de ponto focal e frente de onda planar em ângulo, representadas na Figura 2.5.

A defasagem na excitação dos elementos do transdutor é determinada pela Lei de Atrasos, uma relação entre o tempo de excitação de cada elemento e sua posição no transdutor. Esta lei varia de acordo com a configuração e objetivos desejados para a inspeção. Por exemplo, para uma emissão com objetivo de focar em determinada profundidade, a Lei de Atrasos terá um formato parabólico, levando mais tempo para excitar os elementos centrais do que os externos (CERQUEIRA 2009).

O feixe, formado pela interferência dos sinais de diferentes elementos do transdutor, interage com defeitos no interior do material inspecionado e retorna para o transdutor. Esta interação gera um sinal diferente daquele que seria recebido caso o material não possuísse defeitos. Estes sinais geram dados os quais podem ser analisados por diferentes formas de

representação gráfica (CERQUEIRA 2009). Entre estas formas de representação, encontram-se as seguintes:

- *A-scan*;
- *B-scan*;
- *C-scan*;
- *D-scan*;
- *S-scan*.

O *A-scan* apresenta um ecograma com eixo horizontal representando a profundidade e eixo vertical representando a intensidade do sinal. Esta representação é muito conhecida por ser a forma mais comum de apresentação de dados na inspeção por ultrassom convencional. A Figura 2.6 apresenta um exemplo de *A-scan*.

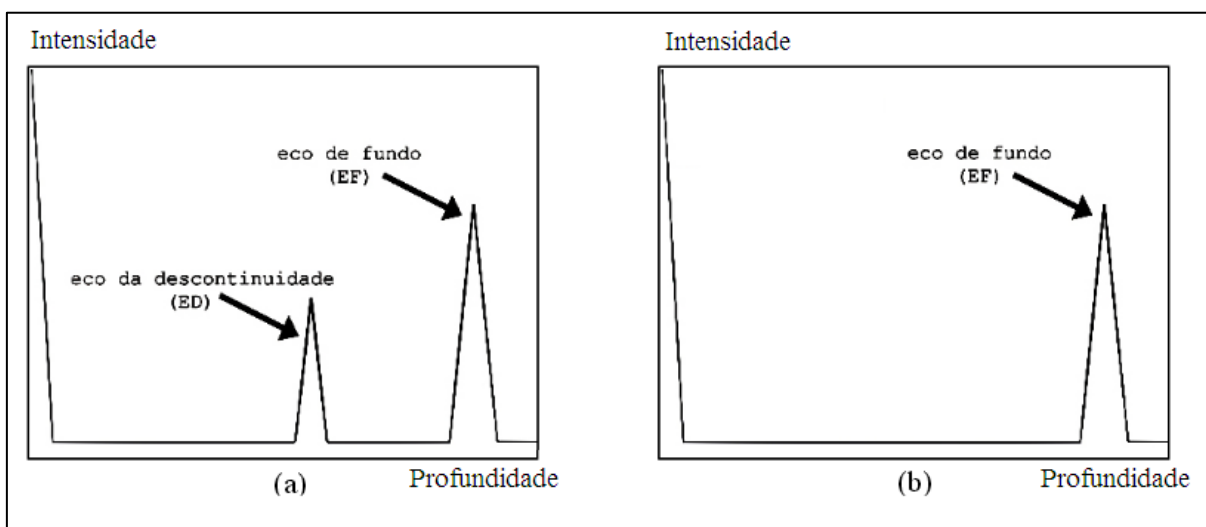


Figura 2.6 Esquema de uma representação em A-scan. a) ecograma de amostra com defeito. b) ecograma de amostra sem defeito (NEPOMUCENO 1980).

A representação em *B-scan* apresenta a seção transversal da peça inspecionada, sendo apresentada em tempo versus distância. A intensidade dos sinais não pode ser medida diretamente, mas é possível que se faça uma comparação entre as intensidades de diferentes sinais. Um exemplo de representação em *B-scan* pode ser visto na Figura 2.7.



Figura 2.7 Exemplo de representação em *B-scan* (KOMURA et al 1984).

Na Figura 2.6 pode-se perceber um cone, indicando a área de inspeção. Também são vistos três defeitos na porção inferior direita, indicados por manchas mais claras.

Para a representação *C-scan*, os dados são plotados como um corte da peça, apresentando posição, comprimento e largura das discontinuidades. A profundidade ainda não pode ser medida neste tipo de representação, embora alguns estudos estejam sendo feitos hoje em dia para determinação da mesma. A Figura 2.8 apresenta um exemplo de representação *C-scan*.

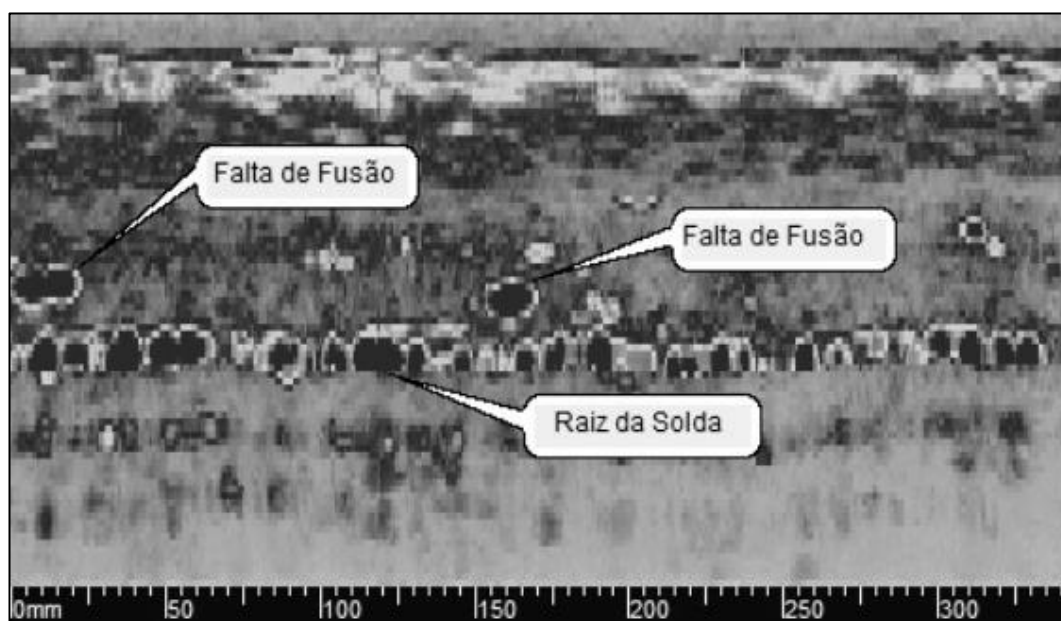


Figura 2.8 Exemplo de representação em *C-scan* de inspeção de uma junta soldada (RD TECH 2004).

O *D-scan* apresenta sinais com dois eixos temporais. Um dos eixos representa o tempo para o sinal ser recebido desde a emissão da onda e o outro eixo representa o tempo decorrido de ensaio. É a principal representação utilizada na técnica de TOFD (do inglês, Time of Flight Diffraction), apresentando sinais muito característicos.

O *S-scan* apresenta uma imagem global da área inspecionada, sendo vastamente conhecidos pela sua aplicação na área médica. Este tipo de representação é apresentado em eixos equivalentes às dimensões da área em análise e os defeitos são destacados de acordo com a intensidade do sinal recebido. Um exemplo desta representação pode ser visto na Figura 2.9.

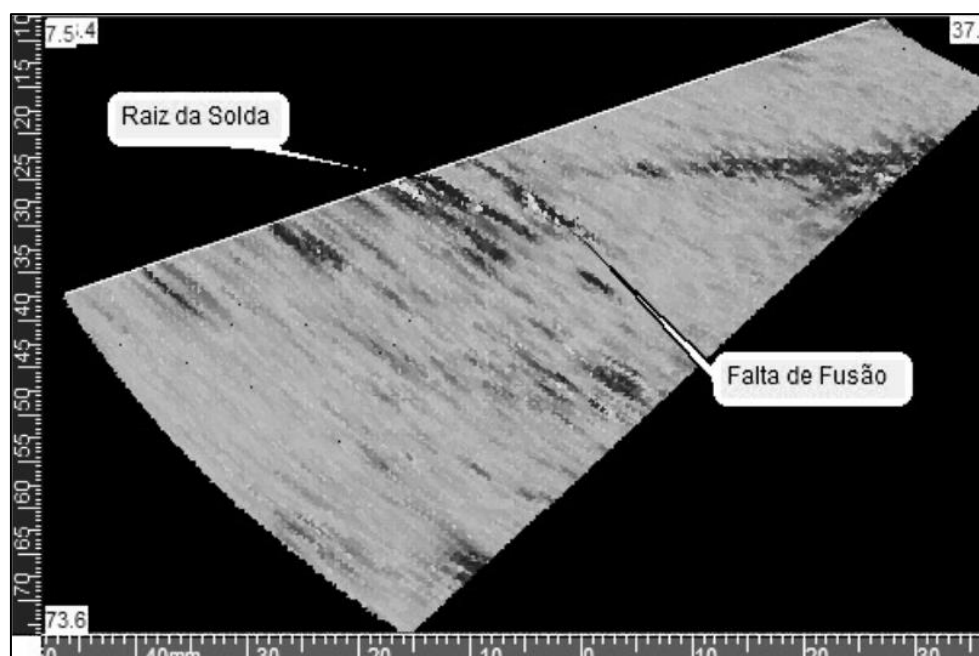


Figura 2.9 Exemplo de representação em *S-scan* de uma varredura setorial de uma junta soldada (RD TECH 2004).

Dependendo do tipo de material a ser inspecionado, do tipo de descontinuidade esperada, da geometria do chanfro na junta soldada e dos critérios de avaliação, diferentes técnicas de inspeção podem ser utilizadas. Entre as técnicas mais utilizadas de *Phased Array*, se encontram: pulso-eco, TANDEM e TOFD (CERQUEIRA 2009).

Na técnica do pulso-eco, um transdutor emite e recebe as ondas. O nome da técnica vem do próprio mecanismo, onde o pulso corresponde à emissão da onda gerada por um pulso elétrico no elemento transdutor e o eco corresponde à reflexão das ondas em

descontinuidades. Esta técnica é bastante utilizada em inspeção de soldas dissimilares de tubulações industriais.

Para componentes com grandes espessuras, onde a reflexão em descontinuidades é dificultada devido à atenuação da onda, utiliza-se a técnica TANDEM. Nesta técnica, um transdutor emite e outro recebe, mantendo os dois transdutores sempre a mesma distância. Esta técnica é muito utilizada na inspeção de juntas soldadas de grandes espessuras (acima de 100 mm), facilitando a detecção de descontinuidades planares.

O TOFD consiste de dois transdutores de alta frequência (acima de 5 MHz) posicionados em lados opostos da junta soldada, podendo também ser realizado com cabeçotes de *Phased Array*. Com este posicionamento, o feixe sônico sofrerá difração ao se encontrar com as extremidades de um defeito e emitirá um sinal característico. Além das difrações, também são utilizados a onda lateral, a qual segue diretamente do transdutor emissor até o receptor, e o eco de fundo, reflexão da superfície da peça oposta aos transdutores. A Figura 2.10 apresenta um exemplo de sinal de TOFD.

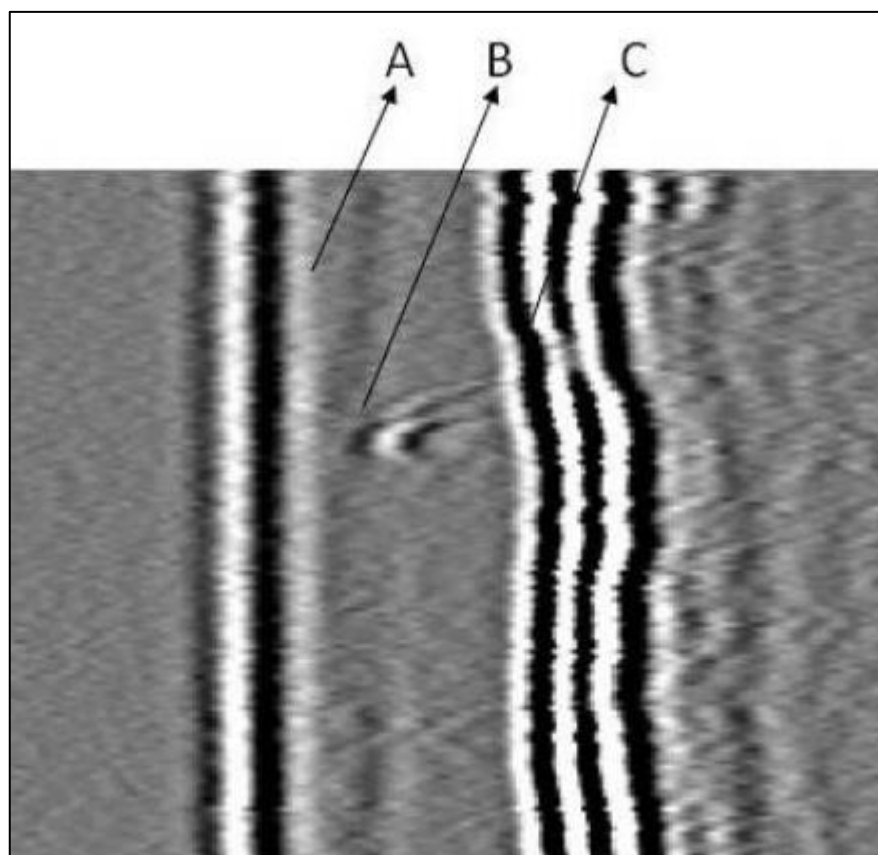


Figura 2.10 Exemplo de sinal de TOFD em *D-scan*. (A) onda lateral, (B) Sinais de Difrações, (C) Eco de Fundo (MOREIRA 2003).

Como pode ser visto na Figura 2.10, o TOFD detecta descontinuidades através da interação do feixe sônico com as pontas das mesmas, sofrendo a difração. O sinal da difração é muito característico e está destacado como B na Figura 2.10. Por sofrer este fenômeno de difração, esta técnica é muito utilizada para detecção de trincas fechadas (CERQUEIRA 2009).

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresentará os materiais e equipamentos utilizados para cada etapa do presente trabalho, incluindo desde o tubo a ser inspecionado, até a etapa de ataque químico sobre suas seções transversais preparadas após detecção dos defeitos. Além disso, será apresentada a metodologia utilizada para a realização de cada ensaio ao longo do trabalho.

3.1 Inspeção Inicial

O atual trabalho consiste na inspeção através da técnica de ultrassom *Phased Array* de um tubo soldado por fricção. Para isto, utilizou-se o aparelho, localizado no próprio LAMEF, de *Phased Array* modelo Multi-X da marca M2M com um transdutor com frequência de 5 MHz e com 128 elementos dispostos num arranjo linear. Este equipamento, apresentado na Figura 3.1, é conectado a um computador, através de cabo USB, e o software para aquisição e análise de dados utilizado foi o Multi2000 versão 6.9. Cada elemento do sensor possui comprimento de 0,5 mm e o espaçamento entre elementos adjacentes é de 0,1 mm.

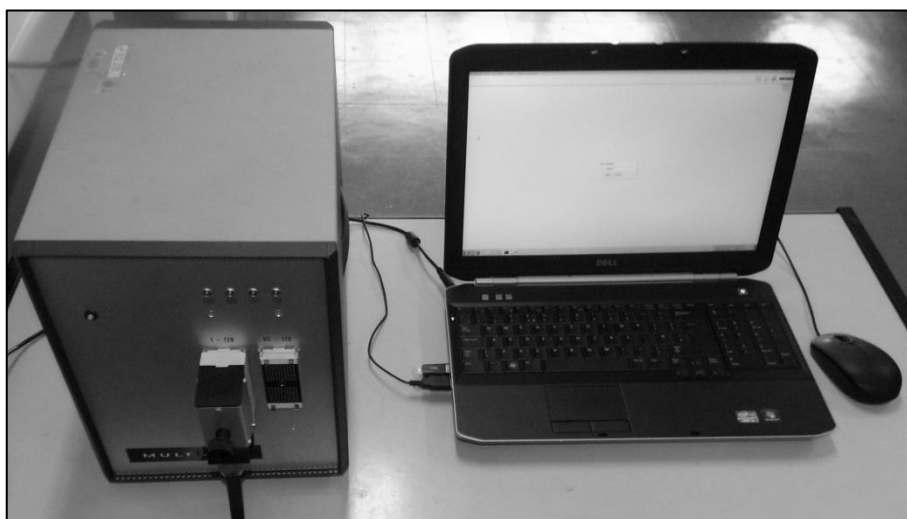


Figura 3.1 Equipamento de *Phased Array* utilizado para aquisição de dados, conectado ao computador via cabo USB.

O tubo inspecionado é de aço API 5L X46 com diâmetro externo de 220 mm, 8,5 mm de espessura e 365 mm de comprimento, com um anel intermediário de aço ASTM A516 com diâmetro de 220 mm e 19,05 mm de espessura. Para realizar sua solda, foi utilizada a máquina de soldagem MASF 1500 projetada pelo próprio laboratório, apresentada na Figura 3.2.

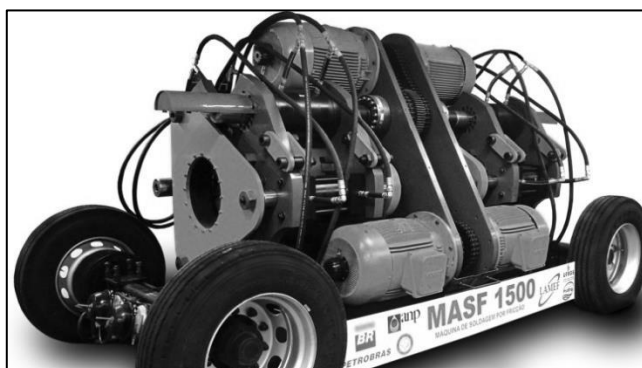


Figura 3.2 Máquina de Soldagem por Fricção (MASF 1500) projetada e desenvolvida pelo LAMEF.

Inicialmente também foi utilizada uma sapata de acrílico Rexolite®, com 35,6 mm de altura e ângulo de $31,3^\circ$ confeccionada pela empresa IMASONIC, apresentada na Figura 3.3. O acrílico utilizado apresenta velocidade da onda sonora longitudinal de 2350 m/s e transversal de 1160 m/s. Esta sapata foi utilizada para que se conseguisse emitir o feixe com maiores ângulos, tendo em vista o problema do ângulo máximo com que os elementos conseguem emitir o feixe. A utilização de um material acoplante entre a sapata e o sensor é necessária para que haja propagação adequada da onda. Para esta função de acoplante, utilizou-se vaselina líquida de marca e fabricação Top Glass.

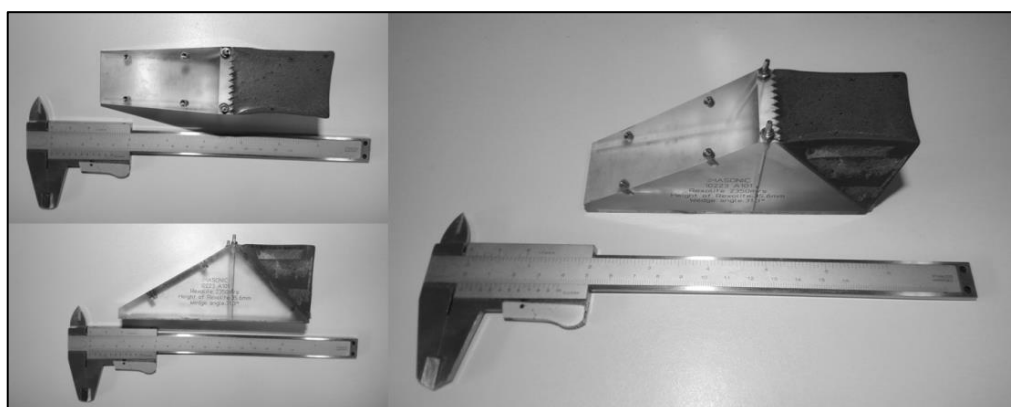


Figura 3.3 Sapata de acrílico Rexolite® utilizada para acoplamento do sensor de *Phased Array*.

Para inspeção via *Phased Array*, o tubo foi imerso horizontalmente em uma cuba apresentando 417 mm de profundidade, 627 mm de largura e 289 mm de altura, com um volume de 65 litros de água. Nesta disposição, a água foi utilizada como acoplante entre a sapata acrílica e o metal a ser inspecionado, sendo este método chamado de inspeção por imersão.

O primeiro teste realizado teve como objetivo a seleção do número ideal de elementos excitados para produção do feixe sônico. Para isto, foi realizado um estudo comparativo entre o número de elementos excitados e a amplitude do sinal recebido devido à reflexão da borda do tubo. Foram realizadas duas medidas para cada quantidade de elementos excitados com ganho inicial de 65 dB a fim de detectar o pico de maior intensidade e, posteriormente, com ganho de 55 dB para comparação entre os sinais que excederam a escala. Este procedimento foi realizado com o sensor acoplado na sapata de acrílico e com o feixe sônico sendo emitido a 60° e focado em duas diferentes profundidades, 4 e 8 mm, com frequência de emissão de 5 MHz.

Esta configuração não apresentou resultados satisfatórios, apresentando dois principais problemas:

- Múltiplas reflexões na película de água entre a sapata e o metal;
- Impossibilidade de emitir o feixe em ângulos adequados para inspeção.

3.2 Confecção de Base para o Sensor

Levando em conta estes problemas, foi necessária a confecção de uma base para emissão do feixe em ângulo adequado. Para isto, foi impressa, em uma impressora 3D modelo PRUSA da marca Movtech, a base necessária, apresentada na Figura 3.4. O material utilizado para impressão da base foi o polímero ABS (Acrilonitrila butadieno estireno).

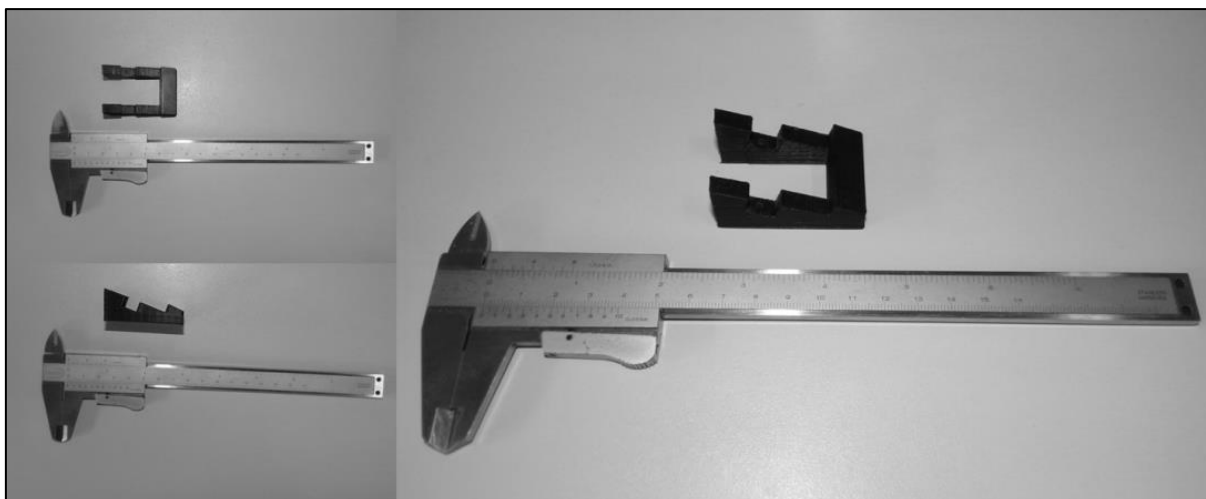


Figura 3.4 Suporte de ABS projetado para acoplamento do sensor e impresso em impressora 3D, utilizado para emissão do feixe em ângulo adequado.

O tubo foi dividido radialmente em 12 intervalos, com comprimento de aproximadamente 50 mm cada, a fim de facilitar a varredura e a localização dos defeitos. Algumas destas divisões podem ser vistas na Figura 3.5.

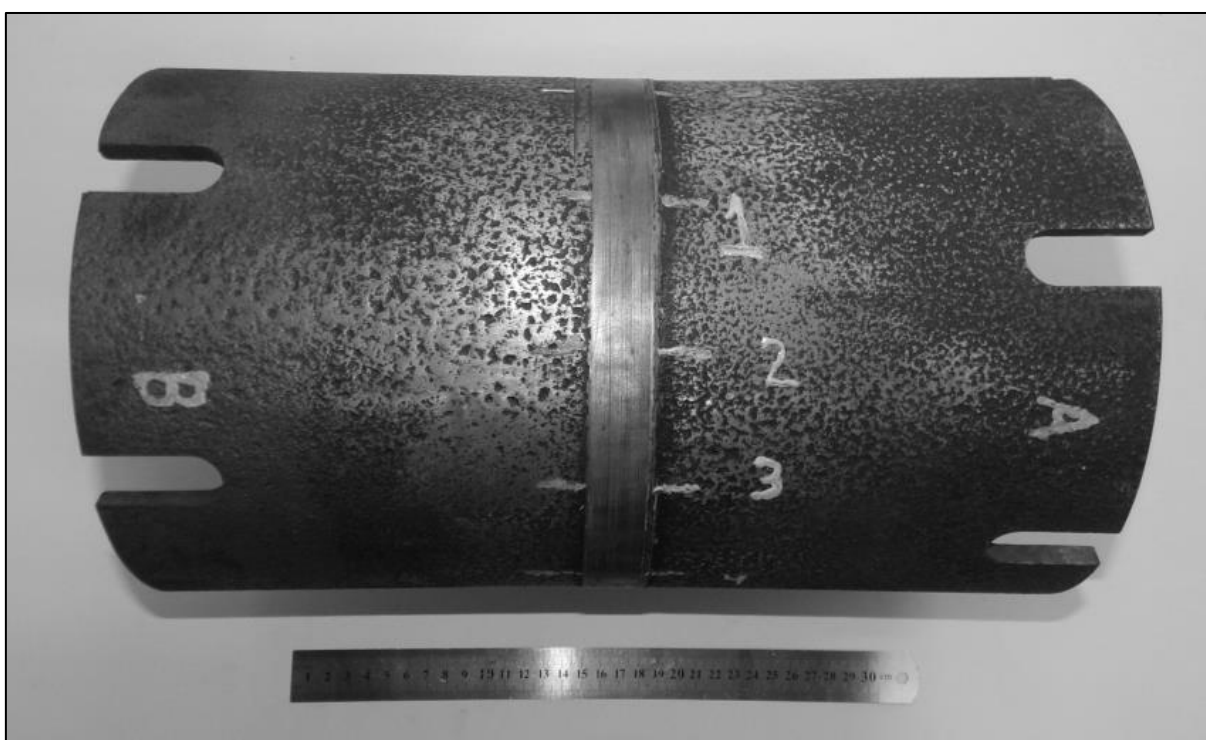


Figura 3.5 Tubo dividido em intervalos a fim de facilitar a varredura e a localização dos defeitos.

3.3 Inspeção da Junta Soldada por *Phased Array*

Com o sensor posicionado sobre a base de ABS, e perpendicularmente à solda na superfície externa do tubo, a inspeção da junta soldada foi realizada utilizando-se, além de uma inspeção visual, três diferentes métodos por *Phased Array*:

1. Escaneamento setorial de 40 a 65°.
2. Emissão em ângulo de 60°.
3. Emissão a 60° com foco a profundidade de 4 mm.

A disposição destes métodos pode ser vista na Figura 3.6, onde é possível ver o sensor acoplado à base de ABS inspecionando o tubo imerso.

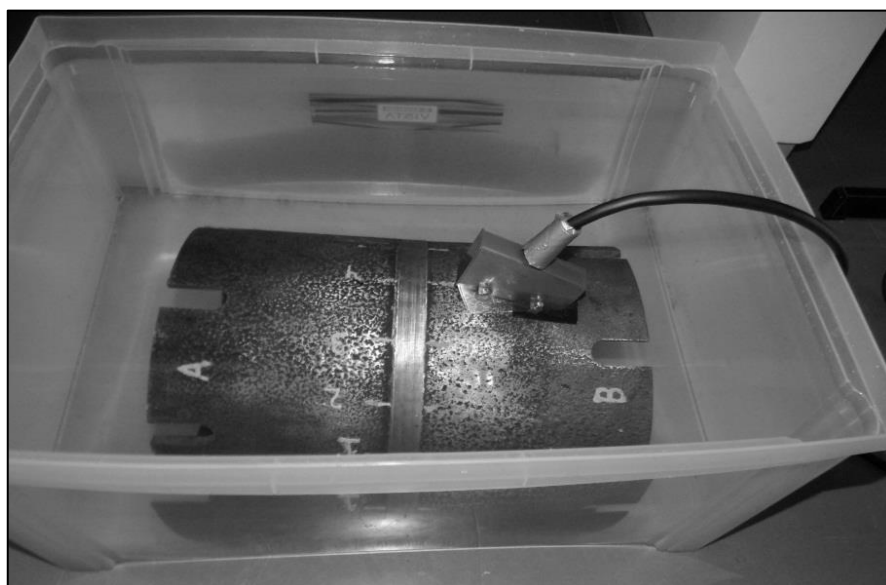


Figura 3.6 Sensor posicionado sobre a base de ABS inspecionando por imersão o tubo a partir do lado B da solda.

Na Figura 3.6 é possível ver o sensor, acoplado ao suporte de ABS, posicionado perpendicularmente à junta soldada, realizando a inspeção da solda a partir do lado B da solda. O tubo e o sensor devem estar imersos na água, como apresentado na figura, para que o acoplamento seja efetivo.

Foram utilizadas 24 etapas para cada um dos três métodos de inspeção realizados. Estas 24 etapas são resultado de duas etapas para cada um dos 12 intervalos radiais do tubo, sendo uma para cada lado da junta soldada. Para o primeiro método de inspeção, o escaneamento setorial, foram utilizadas as seguintes configurações:

- Posição do centro da sapata: 145 mm a partir da borda;

- Ângulo do sensor: 18,9°;
- Ângulos de emissão: de 40 a 65° em 50 passos;
- Número de elementos excitados: 18 elementos;
- Primeiro elemento a ser excitado: elemento número 60;
- Frequência de emissão: 5 MHz;
- Número de pontos adquiridos por vez: 512;
- Ganho: 65 dB;
- Intervalo de análise: de 0 a 50 μ s.

Este método foi utilizado por abranger completamente a região da solda, conforme a norma ASTM E2700-14. Com este arranjo, foi possível determinar regiões da solda que apresentassem alguma alteração no sinal, indicando a possibilidade da presença de defeitos.

Após a primeira inspeção via ultrassom, foi realizada uma inspeção visual. Este tipo de inspeção é importante por ser uma etapa rápida e barata e, caso detecte algum defeito, torna desnecessária a inspeção por métodos mais demorados e caros. Para isto, a inspeção visual foi feita em busca de defeitos superficiais na junta. Como o comprimento do tubo era relativamente pequeno, também foi possível, além da inspeção externa, realizar uma inspeção visual interna.

Como na primeira inspeção por ultrassom as alterações no sinal foram encontradas, na maioria das vezes, em ângulos próximos a 60°, este foi o ângulo escolhido para o próximo método de inspeção. As configurações para emissão do feixe a 60° foram as seguintes:

- Posição do centro da sapata: 145 mm a partir da borda;
- Ângulo do sensor: 18,9°;
- Ângulo de emissão: 60°;
- Número de elementos excitados por vez: 18 elementos;
- Primeiro elemento a ser excitado: elemento número 60;
- Tamanho do passe: 1 elemento;
- Frequência de emissão: 5 MHz;
- Número de pontos adquiridos por vez: 512;
- Ganho: 65 dB;
- Intervalo de análise: de 0 a 50 μ s.

Estas configurações foram utilizadas para inspecionar as regiões da solda que apresentaram, na primeira inspeção, alteração do sinal. A profundidade dos possíveis defeitos variou entre 3 e 6 mm. Com isto, foi escolhida uma profundidade que fosse próxima a dos possíveis defeitos encontrados, sendo 4 mm o valor determinado para a terceira inspeção.

As configurações da terceira inspeção foram as seguintes:

- Posição do centro da sapata: 145 mm a partir da borda;
- Ângulo do sensor: 18,9°;
- Ângulo de emissão: 60°;
- Profundidade de foco: 4 mm;
- Número de elementos excitados por vez: 18 elementos;
- Primeiro elemento a ser excitado: elemento número 60;
- Tamanho do passe: 1 elemento;
- Frequência de emissão: 5 MHz;
- Número de pontos adquiridos por vez: 512;
- Ganho: 65 dB;
- Intervalo de análise: de 0 a 50 μ s.

Com esta configuração, foi possível confirmar a existência dos defeitos nos locais indicados pelas inspeções anteriores, além de aumentar a precisão na localização dos defeitos.

3.4 Inspeção da Junta Soldada com *Encoder*

Após a detecção dos defeitos pelas três inspeções anteriores, foi realizada uma última inspeção com o equipamento de *Phased Array*. Para esta última análise, foi utilizado um acessório do equipamento chamado *encoder*, o qual tem a função de registrar a posição exata do sensor, gerando uma imagem lateral da junta analisada. O encoder utilizado foi o OMNISCAN Mini-Encoder ENC1-2.5-DE da marca Olympus, com 27 mm de diâmetro e resolução de 12 pontos por milímetro. O *encoder* pode ser visto acoplado ao sensor na Figura 3.7.

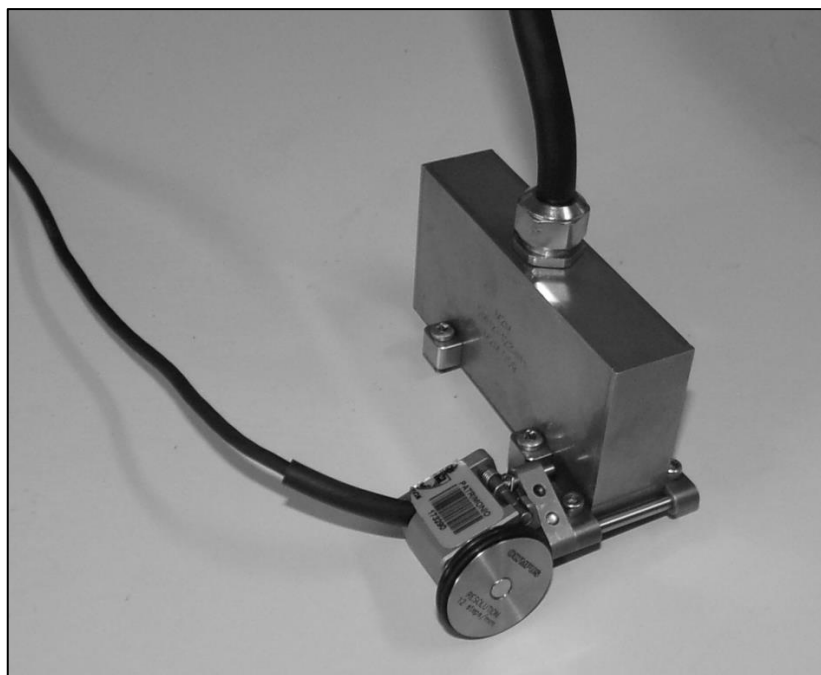


Figura 3.7 *Encoder* acoplado ao sensor de *Phased Array* utilizado na última inspeção da solda.

Os parâmetros utilizados na inspeção com o *encoder* foram os mesmos da terceira inspeção, sendo emitido o feixe a 60° com foco a 4 mm de profundidade. Como o objetivo desta última inspeção era ilustrar a região com defeitos, a mesma foi realizada apenas da região 6 até a região 10 pelo lado A da solda, apresentando, além dos quatro defeitos detectados, parte do degrau interno detectado pela inspeção visual.

3.5 Análise Metalográfica

Após feitas as inspeções com ultrassom, o tubo foi cortado paralelamente à solda dos dois lados, resultando em um comprimento de aproximadamente 15 centímetros. Este corte foi feito através de uma serra fita horizontal FM 500 da marca Franho e teve como objetivo facilitar os cortes posteriores para análise metalográfica. Após a redução do comprimento do tubo, foram feitos cortes transversais à solda, em regiões próximas aos quatro defeitos encontrados. Com estes cortes, obteve-se como resultado quatro segmentos de tubo, com aproximadamente 15 centímetros de comprimento e com largura variando entre três e sete centímetros. Um esquema representando as etapas dos cortes pode ser visto na Figura 3.8.

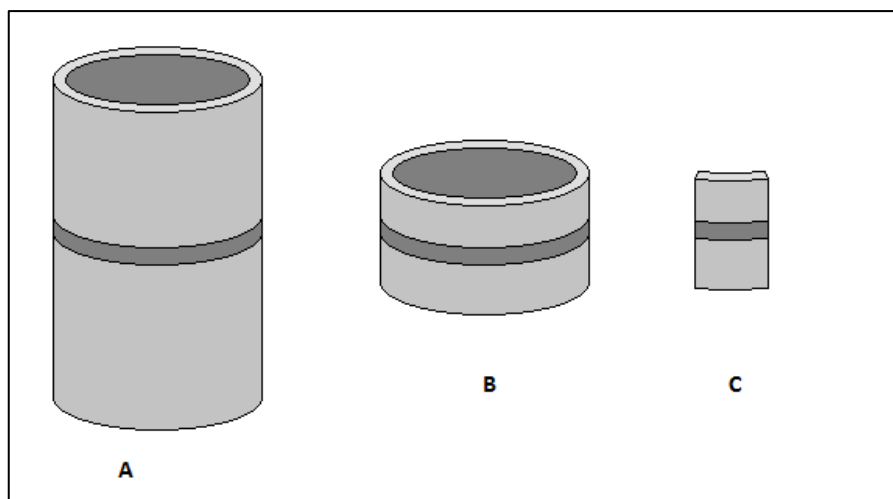


Figura 3.8 Esquema representando os cortes para análise metalográfica. A) Tubo original. B) Tubo após corte paralelo à solda. C) Segmentos de tubo após cortes transversais à solda.

Cada um dos quatro segmentos teve uma de suas faces laterais lixadas, inicialmente em uma lixa rotativa com grana 40 e passando para grana 240, até encontrar algum possível defeito. O preparo posterior da superfície foi feito manualmente, começando em uma lixa de grana 400, seguida por lixa 600 e 1200, respectivamente. Após o lixamento, foi feito o polimento em uma politriz metalográfica da marca Arotec em pano de polimento com suspensão de alumina de 1 μm , até o material apresentar aparência especular.

Com o metal polido, foi realizado o ataque químico com Nital, sendo preparado a uma proporção de 10 partes de álcool para cada parte de ácido nítrico, resultando em uma concentração de 10%. O Nital foi aplicado sobre a superfície especular durante 30 segundos a fim de revelar a zona da solda afetada pelo calor, além de destacar a região entre o anel e os tubos, para análise metalográfica. As superfícies preparadas foram analisadas em lupa com aumento de 10 vezes.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresentará os resultados obtidos em cada etapa do trabalho, descritas no capítulo anterior. Serão apresentados os resultados obtidos pelos testes realizados anteriormente à inspeção, assim como os defeitos detectados pelas inspeções, além dos resultados obtidos através da análise metalográfica.

4.1 Determinação do Número Ideal de Elementos Excitados

O primeiro teste realizado teve como objetivo a seleção do número ideal de elementos excitados para produção do feixe sônico. Este teste foi realizado com foco numa profundidade de 4 mm a partir da superfície externa do tubo e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Relação entre número de elementos excitados para produção do feixe sônico e amplitude do maior pico para um feixe sônico focado em 4 mm de profundidade.

Número de Elementos Excitados	Ganho de 65 dB		Ganho de 55 dB	
	Amplitude (%)	Amplitude (%)	Amplitude (%)	Amplitude (%)
4	74,2	69,7	25,1	25,3
8	93,7	99,6	35,1	37,4
12	100	100	55,8	54,1
15	100	100	61,5	61,4
18	100	99,8	58,7	58,2
21	87,9	100	51,8	51,8

A fim de determinar uma janela que apresentasse resultados satisfatórios para qualquer profundidade de defeito, foi realizado um segundo teste, com foco numa profundidade de 8 mm a partir da superfície externa do tubo. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Relação entre número de elementos excitados para produção do feixe sônico e amplitude do maior pico para um feixe sônico focado em 8 mm de profundidade.

Número de Elementos Excitados	Ganho de 65 dB		Ganho de 55 dB	
	Amplitude (%)	Amplitude (%)	Amplitude (%)	Amplitude (%)
12	91,2	78,5	47,9	48,0
15	100	90,3	53,0	53,1
18	100	87,4	53,6	54,1
21	100	100	56,6	54,7
24	97,5	82,3	49,8	49,9
27	95,5	93,0	44,5	44,6
30	98,7	96,7	31,8	31,6
33	96,1	96,3	40,8	40,7
36	88,2	96	41,4	41,3
39	84,3	84,4	42,0	41,9
42	82,6	82,7	41,7	41,7
60	44,9	57,5	20,2	21,6
80	45,4	49,2	16,6	15,4

Como pode ser visto nas Tabelas 4.1 e 4.2, a quantidade ideal de elementos excitados é próxima a 20 para ambos os casos, sendo 18 o número escolhido para todos os experimentos realizados na sequência. Ele foi escolhido por apresentar bons resultados nos dois testes.

Com o tamanho da janela de elementos determinado, a inspeção da solda foi iniciada, utilizando-se a sapata de acrílico. Para esta configuração, o feixe sônico sofreu múltiplas reflexões na película de água entre a sapata e o metal, não sendo possível analisar os resultados obtidos por *Phased Array*. A fim de evitar estas múltiplas reflexões, a sapata de acrílico foi removida. A fim de determinar a necessidade de utilizar outra sapata, foi calculado o ângulo máximo com que os elementos conseguiriam emitir o feixe.

4.2 Determinação do Ângulo Máximo

Para isto, foi necessário calcular o comprimento de onda, substituindo-se a velocidade do som na água por 1483 m/s e a frequência por 5 MHz na Equação 2.6, resultando num comprimento de onda de 296,6 μm . Substituindo-se na Equação 2.5 o comprimento do elemento por 0,5 mm e o comprimento de onda pelo valor calculado de 296,6 μm , obtém-se que o seno do ângulo máximo é 0,304905, resultando num ângulo máximo, θ_m , de aproximadamente 17,75°.

Com o ângulo máximo determinado em 17,75°, concluiu-se que o sensor precisaria ser posicionado muito próximo à solda para que a mesma pudesse ser inspecionada. Este posicionamento, porém, foi inviável devido à presença de material plasticamente deformado em torno do anel, conhecido como *flash*. Feita esta constatação, concluiu-se que, a fim de que a inspeção fosse viável, o sensor precisaria estar inclinado na água. Assim, o ângulo necessário para o feixe incidente atingir a solda seria alcançado, além de evitar a fina película de água que causava múltiplas reflexões.

4.3 Confecção de Suporte para o Sensor

Para manter constante a inclinação do sensor, foi projetada uma base a qual posteriormente foi produzida em material polimérico ABS através de uma impressora 3D. O projeto da base foi realizado no software Solid Works e resultou em uma base com ângulo de 18,95°. Este ângulo foi escolhido para que, ao sofrer a refração, o feixe entrasse no metal a 45°. O projeto do suporte teve sucesso e esta base foi utilizada para as inspeções realizadas na sequência.

4.4 Inspeção da Junta Soldada

Com a base de ABS impressa e o sensor posicionado sobre a mesma, foi realizado o primeiro método de inspeção, o escaneamento setorial de 45 a 60°. Este método foi utilizado com a finalidade de mapear regiões que apresentassem alteração no sinal recebido, o que caracterizaria uma provável região com defeitos.

Esta inspeção apresentou, quando realizada pelo lado A do tubo, 11 possíveis defeitos em nove regiões diferentes. Quando realizada pelo lado B, porém, a mesma inspeção apresentou apenas seis possíveis defeitos em cinco diferentes regiões. Esta diferença entre a quantidade de possíveis defeitos se deve possivelmente à geometria do refletor. Com isto, apenas alguns dos refletores podem ser detectados por ambos os lados da solda. A Tabela 4.3 apresenta uma relação dos defeitos encontrados na primeira inspeção.

Tabela 4.3 Relação de defeitos encontrados na primeira inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção.

Intervalo do Tubo	Quantidade de Defeitos	
	Lado A	Lado B
0 – 1	1	1
1 – 2	1	0
2 – 3	1	0
3 – 4	0	0
4 – 5	0	0
5 – 6	1	0
6 – 7	2	1
7 – 8	2	1
8 – 9	1	2
9 – 10	0	0
10 – 11	1	1
11 - 0	1	0

Como pode ser visto na Tabela 4.3, apenas três intervalos não apresentaram defeitos na inspeção por ambos os lados. Em compensação, três regiões apresentaram dois defeitos com a inspeção sendo realizada do mesmo lado da solda, sugerindo que a região 6 – 9 é a mais crítica. Também foi constatado, através desta inspeção, que muitos dos defeitos estavam presentes na superfície interna do tubo, sendo sugerida uma inspeção visual.

Através da inspeção visual externa, constatou-se apenas o desalinhamento entre os dois lados do tubo em relação à região soldada, causando um pequeno desnível. Como este desnível está presente no lado exterior do tubo, não é considerado um problema. Nenhum outro tipo de defeito foi constatado na inspeção visual externa.

Na inspeção visual interna ocorreu o mesmo. Foi possível notar o desalinhamento, causando desnível entre os tubos e a região soldada, apresentado na Figura 4.1. Neste caso, o desnível é considerado defeito por causar alteração no fluxo do fluido o qual será transportado pelas tubulações. Não foram constatados outros defeitos internos além do desnível.

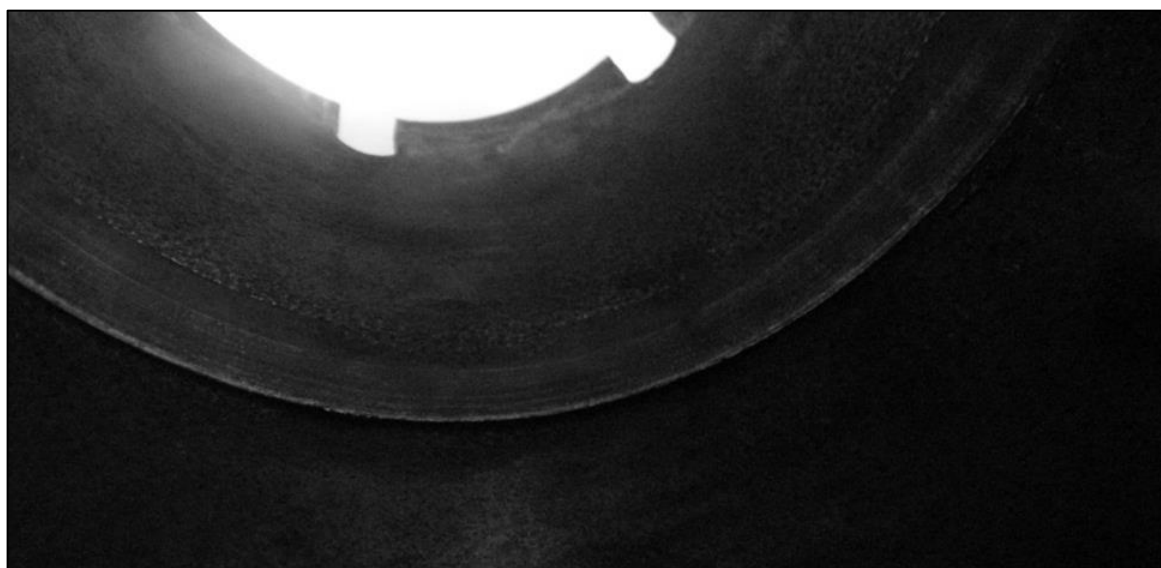


Figura 4.1 Desnível interno entre o anel utilizado para a solda e os tubos detectado por inspeção visual.

Como o desnível já havia sido detectado visualmente, conforme apresentado na Figura 4.1, os métodos seguintes de inspeção foram utilizados para detectar apenas defeitos no interior do metal, descartando qualquer defeito superficial – tanto externo, quanto interno.

Na segunda inspeção por ultrassom, emitindo o feixe a 60°, tanto para a inspeção pelo lado A, quanto pelo lado B, foram encontrados três defeitos em três intervalos do tubo. A relação dos defeitos indicados por esta inspeção está apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Relação de defeitos encontrados na segunda inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção.

Intervalo do Tubo	Quantidade de Defeitos	
	Lado A	Lado B
0 – 1	0	0
1 – 2	0	0
2 – 3	0	0
3 – 4	0	0
4 – 5	0	0
5 – 6	0	0
6 – 7	1	1
7 – 8	1	1
8 – 9	1	1
9 – 10	0	0
10 – 11	0	0
11 - 0	0	0

Nota-se que a região sinalizada como a mais crítica na primeira inspeção foi a única que apresentou defeitos na segunda inspeção, conforme a Tabela 4.4, ao desconsiderar os sinais do desnível interno entre os tubos.

A Tabela 4.5 apresenta o posicionamento dos defeitos detectados na segunda inspeção. A localização na solda apresenta a distância desde o defeito encontrado até a interface entre o anel e o tubo do lado B da solda. O valor da profundidade equivale à distância entre o defeito e a superfície externa do tubo.

Tabela 4.5 Relação da posição dos defeitos encontrados na segunda inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção.

Número do Defeito	Intervalo do Tubo	Lado A		Lado B	
		Localização na Solda (mm)	Profundidade (mm)	Localização na Solda (mm)	Profundidade (mm)
1	6 – 7	12,9	5,4	13,2	5,2
2	7 – 8	13	4,3	11,2	3,8
3	8 – 9	12,6	5,6	12,3	4,2

Nota-se pela Tabela 4.5 que os defeitos se encontram a profundidades entre 3,8 e 5,6 mm e a distâncias entre 11,2 e 13,2 mm a partir da interface entre o anel e o tubo posicionado no lado B da solda. Tendo estes valores, a terceira inspeção foi feita emitindo o feixe a 60°, focando o mesmo em uma profundidade de 4 mm a partir da superfície externa do tubo. Esta configuração foi escolhida para atingir maior precisão na localização dos defeitos.

O defeito 1 foi encontrado no intervalo 6 – 7, muito próximo da marcação 7. O segundo defeito foi encontrado aproximadamente no centro do intervalo 7 – 8. Já o terceiro defeito foi encontrado no intervalo entre as marcações 8 e 9, mais próximo da marcação 9.

Na terceira inspeção por *Phased Array*, quatro defeitos foram detectados em três diferentes regiões quando o sensor estava presente no lado A da solda. O mesmo número de defeitos foi encontrado nas mesmas regiões para a sonda presente no lado B da solda. A relação destes defeitos está apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Relação de defeitos encontrados na terceira inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção.

Intervalo do Tubo	Quantidade de Defeitos	
	Lado A	Lado B
0 – 1	0	0
1 – 2	0	0
2 – 3	0	0
3 – 4	0	0
4 – 5	0	0
5 – 6	0	0
6 – 7	2	2
7 – 8	1	1
8 – 9	1	1
9 – 10	0	0
10 – 11	0	0
11 – 0	0	0

Comparando os resultados da terceira inspeção com os apresentados anteriormente, nota-se que, na região 6 – 7, há um número maior de defeitos. Esta diferença deve-se ao melhor foco na profundidade dos defeitos. O mesmo não acontecia nas inspeções anteriores, provavelmente resultando numa interferência entre os sinais dos dois defeitos, resultando em apenas um sinal.

A Tabela 4.7 apresenta o posicionamento dos defeitos detectados na terceira inspeção. A localização na solda apresenta a distância, desde o defeito encontrado, até a interface entre o anel e o tubo do lado B da solda. O valor da profundidade equivale à distância entre o defeito e a superfície externa do tubo.

Tabela 4.7 Relação da posição dos defeitos encontrados na terceira inspeção de acordo com suas posições no tubo e lado da junta soldada pelo qual foi realizada a inspeção.

Número do Defeito	Intervalo do Tubo	Lado A		Lado B	
		Localização na Solda (mm)	Profundidade (mm)	Localização na Solda (mm)	Profundidade (mm)
1	6 – 7	12,2	3,5	12,6	3,0
2	7 – 8	12,8	4,7	11	4,1
3	8 – 9	12,4	6	12,6	5,6
4	6 – 7	12	4,6	13,1	5,1

Os três primeiros defeitos detectados na terceira inspeção também foram detectados pela segunda inspeção. Nota-se, porém, que o quarto defeito detectado na terceira inspeção não foi encontrado na segunda inspeção. Isto ocorreu devido à proximidade entre os dois defeitos, causando interferência entre os sinais de reflexão. Somando-se este fato ao foco estar longe da região dos defeitos, temos como resultado apenas um sinal sendo detectado pelo sensor.

A posição em relação às marcações dos intervalos foi a mesma para as duas últimas inspeções. Os defeitos 1 e 3 continuaram sendo detectados próximos às marcações 7 e 9, respectivamente, enquanto o defeito 2 foi detectado no centro do intervalo 7 – 8. Por sua vez, o defeito 4, o qual não foi detectado na segunda inspeção, foi encontrado na marcação de número 7.

Os sinais de cada defeito, obtidos através do *software* Multi2000, podem ser vistos respectivamente nas Figuras 4.2 a 4.5.

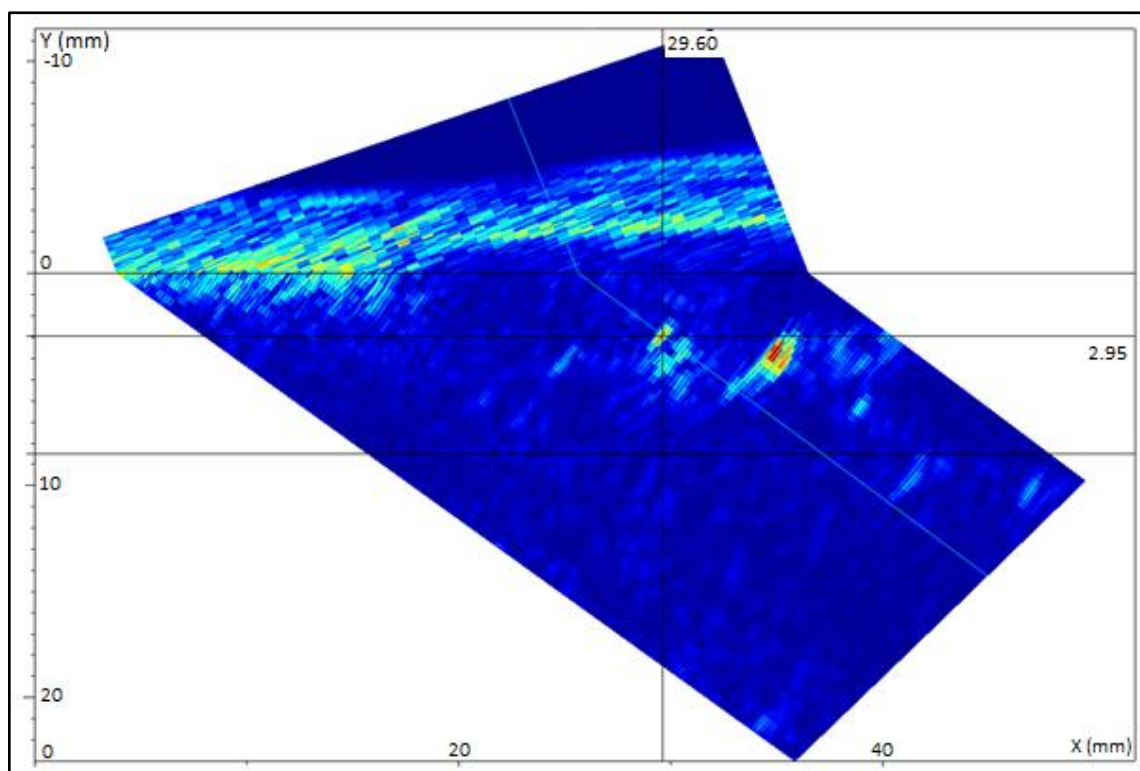


Figura 4.2 Sinal resultante da reflexão do defeito número 1, obtido através do *software* Multi2000 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda.

A Figura 4.2 apresenta o sinal gerado pela reflexão das ondas sonoras no defeito 1 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda. As linhas horizontais apresentadas nos valores de 0 mm e 8,5 mm representam, respectivamente, as superfícies externa e interna do tubo. A linha horizontal central indica a profundidade do defeito. É possível ver uma série de reflexões na superfície externa do tubo, causados pela reflexão de parte das ondas ao entrarem em contato com o metal. É possível notar a profundidade do defeito de acordo com o cursor, indicando uma distância de 2,95 mm a partir da superfície externa do tubo. Também é possível notar uma segunda região com reflexões, podendo representar outro defeito em uma região muito próxima ao defeito indicado.

Além disso, é possível notar o desnível superficial, detectado anteriormente pela inspeção visual externa. Este desnível está representado pela alteração da altura nos sinais da reflexão da superfície externa, sendo evidente a partir da distância de 20 mm no eixo X.

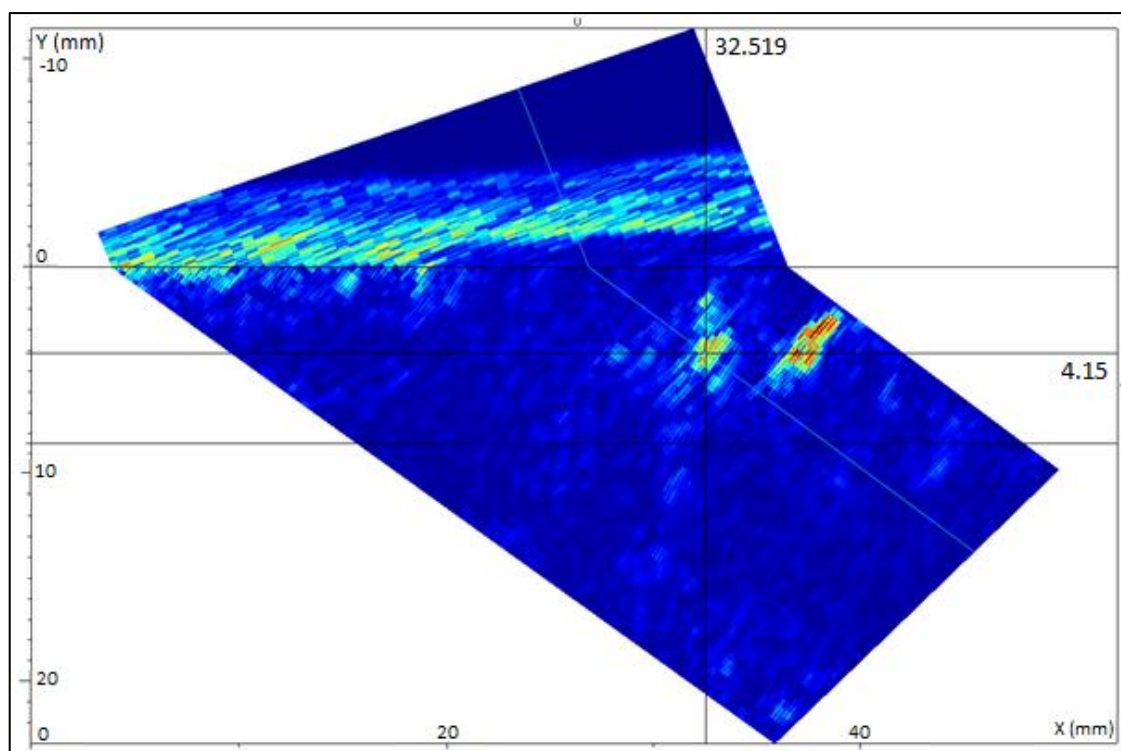


Figura 4.3 Sinal resultante da reflexão do defeito número 2, obtido através do *software* Multi2000 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda.

A Figura 4.3 apresenta o sinal gerado pela reflexão das ondas sonoras no defeito 2 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda. É possível ver a profundidade do defeito de acordo com o cursor, indicando uma distância de 4,15 mm a partir da superfície externa do tubo. Também é possível notar uma segunda região com reflexões, podendo representar outro defeito em uma região muito próxima ao defeito indicado.

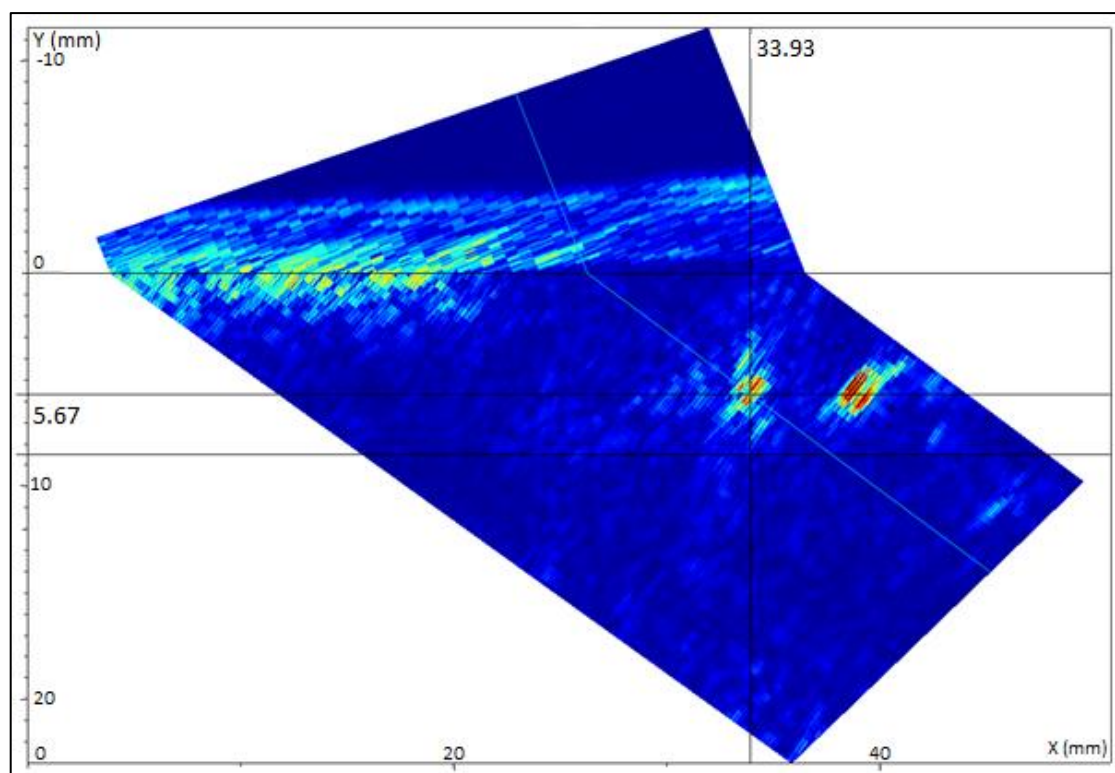


Figura 4.4 Sinal resultante da reflexão do defeito número 3, obtido através do *software* Multi2000 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda.

A Figura 4.4 apresenta o sinal gerado pela reflexão das ondas sonoras no defeito 3 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda. É possível ver a profundidade do defeito de acordo com o cursor, indicando uma distância de 5,67 mm a partir da superfície externa do tubo. Também é possível notar uma segunda região com reflexões, podendo representar outro defeito em uma região muito próxima ao defeito indicado.

Além disso, é possível notar uma reflexão de baixa amplitude para uma distância de aproximadamente 42 mm no eixo X e profundidade entre 7 e 8 mm. Esta reflexão pode ser proveniente do desnível interno detectado anteriormente pela inspeção visual.

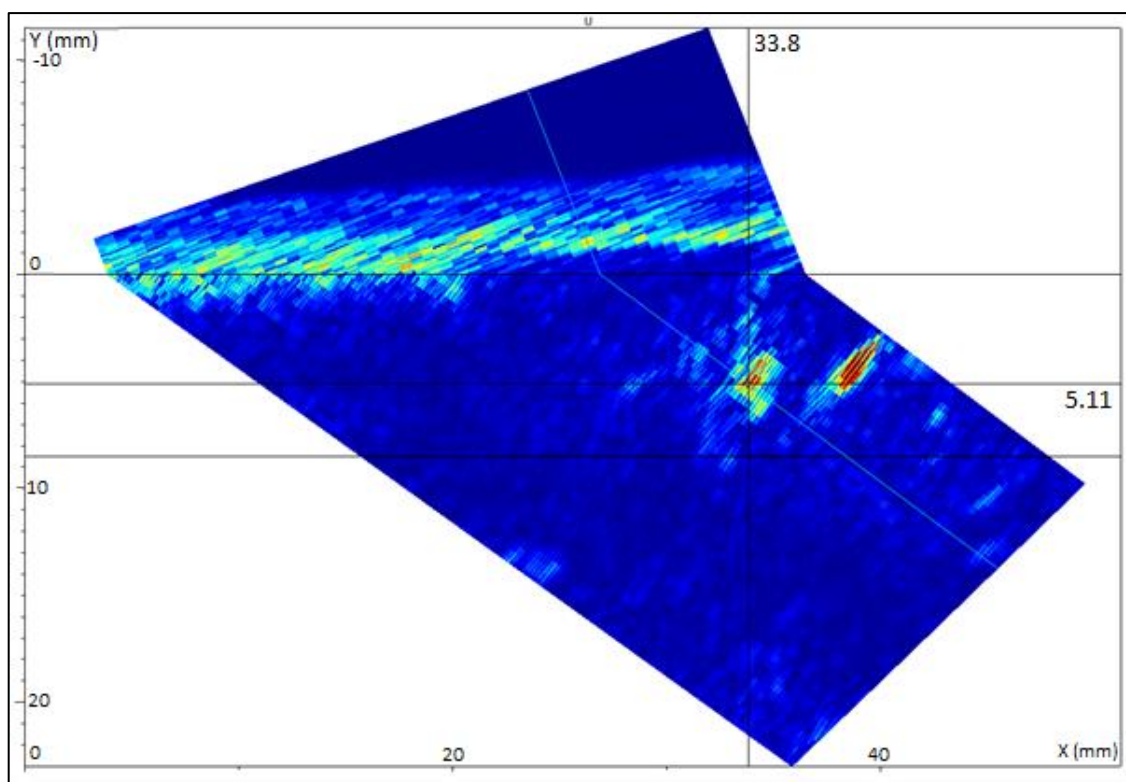


Figura 4.5 Sinal resultante da reflexão do defeito número 4, obtido através do *software* Multi2000 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda.

A Figura 4.5 apresenta o sinal gerado pela reflexão das ondas sonoras no defeito 4 durante a terceira inspeção pelo lado B da solda. É possível ver a profundidade do defeito de acordo com o cursor, indicando uma distância de 5,11 mm a partir da superfície externa do tubo. Também é possível notar uma segunda região com reflexões, podendo representar outro defeito em uma região muito próxima ao defeito indicado.

4.5 Inspeção com *Encoder*

Na última inspeção realizada com o equipamento de *Phased Array*, utilizando-se o *encoder*, os defeitos também foram detectados, sendo possível a detecção dos mesmos em posições e profundidades muito similares às da terceira inspeção. A imagem resultante da última inspeção pode ser vista na Figura 4.6.

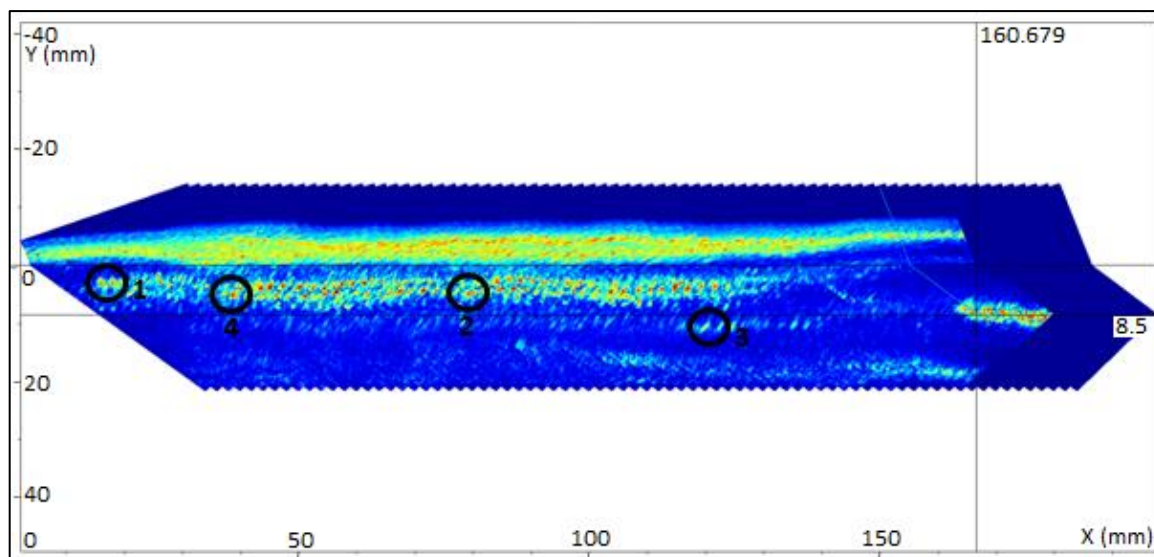


Figura 4.6 Sinal resultante da última inspeção por *Phased Array*, utilizando o *encoder*, abrangendo a área entre as regiões 6 e 10. Os defeitos estão destacados e representados pelos respectivos números.

Na Figura 4.6 é possível ver o resultado da última inspeção com *Phased Array*, utilizando o *encoder*. As linhas horizontais indicam a espessura da parede do tubo, sendo a linha superior a representação da superfície externa, e a linha inferior a representação da superfície interna do tubo. Esta inspeção foi realizada entre as regiões 6 e 10 por apresentar os defeitos encontrados anteriormente. É possível ver na Figura 4.6 que existe uma grande quantidade de reflexões nessa região, sendo a região mais crítica entre as regiões 7 e 9, representadas nas marcações de 50 e 150 mm no eixo X, respectivamente.

A profundidade dos defeitos indicadas pela inspeção com o *encoder* é semelhante às profundidades encontradas nas inspeções anteriores, apresentando os seguintes valores:

- Defeito 1: 3,17 mm;
- Defeito 2: 4,70 mm;
- Defeito 3: 6,53 mm;
- Defeito 4: 4,90 mm.

Os resultados das inspeções por *Phased Array* se mostraram coerentes quando comparados entre si, apresentando os defeitos em localizações muito próximas para todas as configurações utilizadas.

4.6 Análise Metalográfica

O resultado obtido pela análise metalográfica da região do defeito número 1 foi coerente com os resultados obtidos anteriormente, conforme apresentado na Figura 4.7

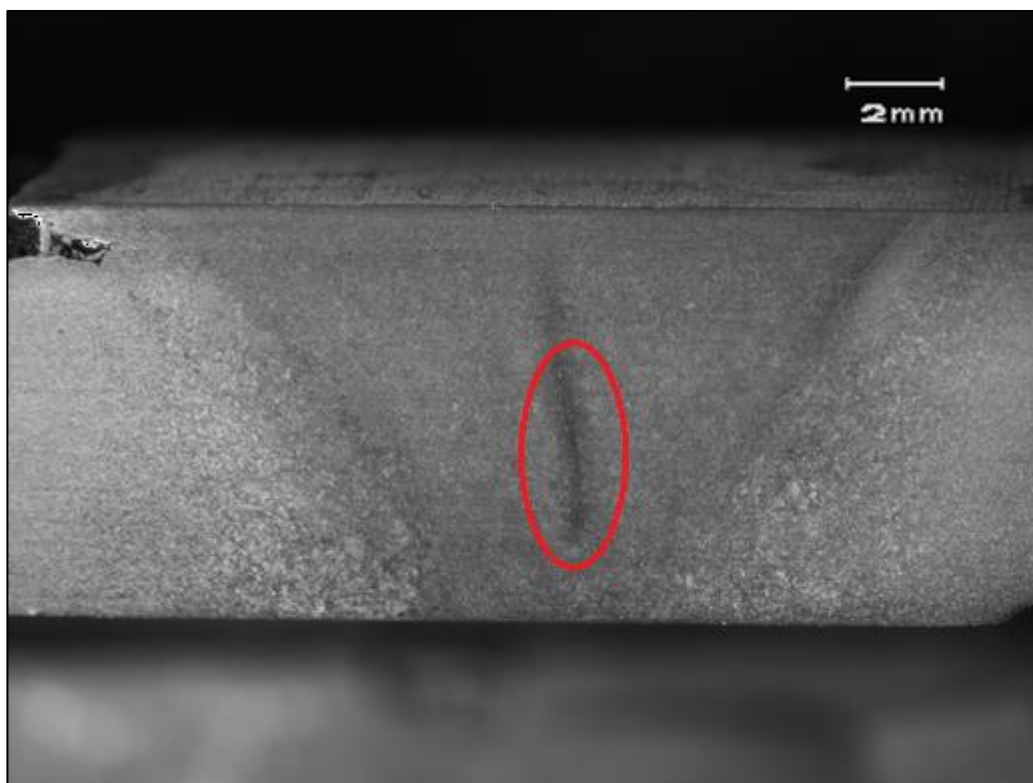


Figura 4.7 Macrografia da região do defeito número 1. Metal atacado com Nital 10%. O defeito foi encontrado na região em destaque.

É possível notar, na Figura 4.7, o desnível superficial detectado anteriormente por inspeção visual. Este desnível externo, através da análise metalográfica, apresenta geometria favorável a crescimento de trincas, podendo ser observado no canto superior esquerdo da imagem. Além deste desnível externo, é possível observar o desnível interno, sendo este mais suave do que o externo. O desalinhamento interno é visível no canto inferior direito da imagem.

Além do desalinhamento entre os tubos, também é possível notar uma trinca central, destacada na Figura 4.7. Esta trinca provavelmente é o defeito número 1 detectado nas inspeções anteriores.

A região do defeito número 2, com a análise metalográfica, apresentou o resultado visto na Figura 4.8, também coerente com as análises anteriores.

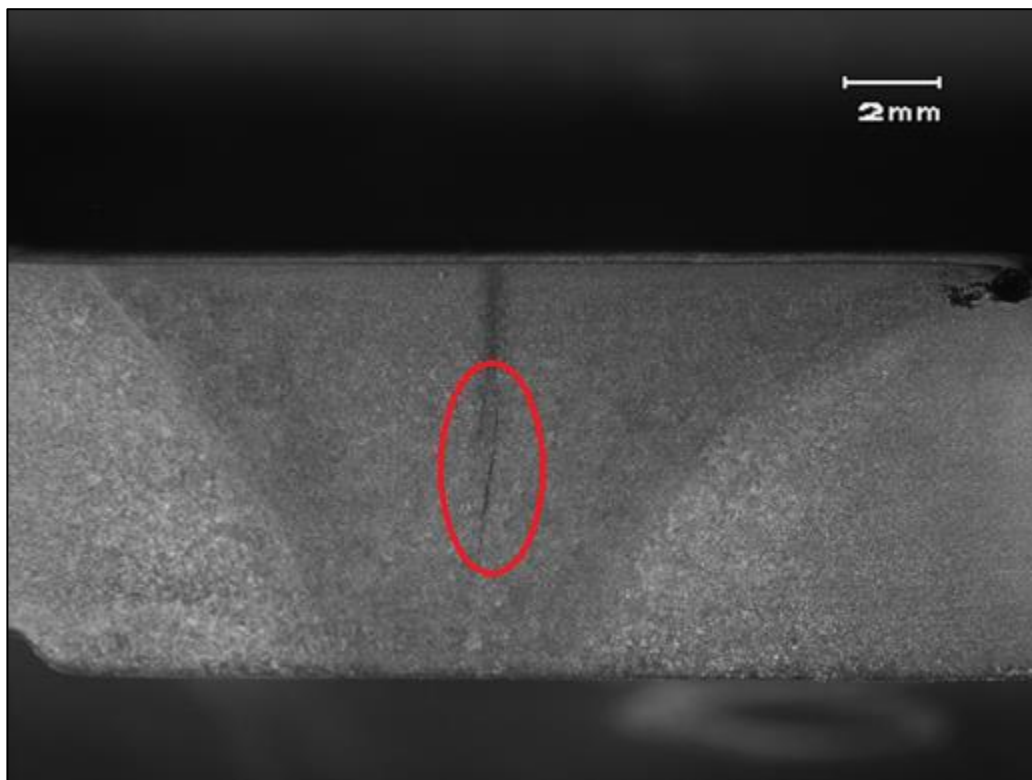


Figura 4.8 Macrografia da região do defeito número 2. Metal atacado com Nital 10%. O defeito foi encontrado na região em destaque.

É possível notar, também na Figura 4.8, o desnível superficial detectado anteriormente por inspeção visual. Este desnível externo, como na região do defeito número 1, também apresenta geometria favorável a crescimento de trincas, podendo ser observado no canto superior direito da imagem. Além deste desnível externo, é possível observar o desnível interno, também mais suave que o externo nesta região. O desalinhamento interno é visível no canto inferior esquerdo da imagem.

Além do desalinhamento entre os tubos, também é possível notar uma trinca central, destacada na Figura 4.8. Esta trinca provavelmente é o defeito número 2 detectado nas inspeções anteriores.

O resultado obtido pela análise metalográfica da região do defeito número 3 não apresentou resultados esperados, conforme as inspeções anteriores. O resultado da análise metalográfica desta região é apresentado na Figura 4.9

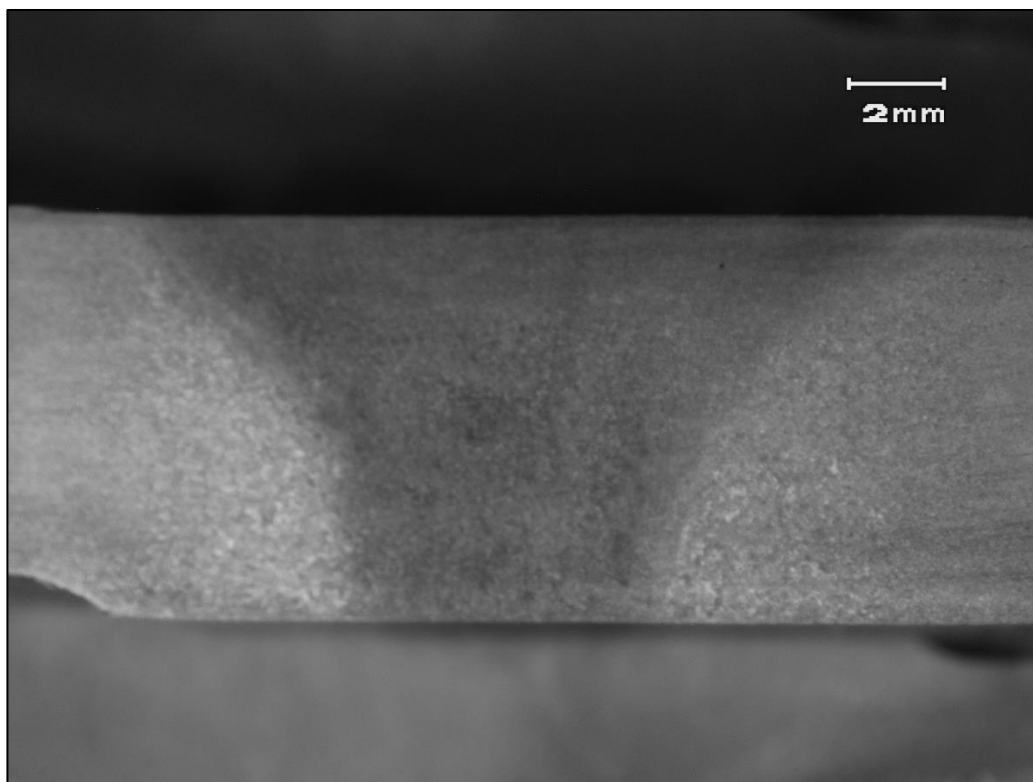


Figura 4.9 Macrografia da região do defeito número 3. Metal atacado com Nital 10%.

É possível notar, na Figura 4.9, um pequeno desnível superficial, já detectado anteriormente por inspeção visual. Este desnível externo, diferente das duas regiões analisadas anteriormente, apresenta uma transição suave, podendo ser observado no canto superior esquerdo da imagem. Além deste desnível externo, é possível observar o desnível interno, também suave nesta região. O desalinhamento interno é visível no canto inferior esquerdo da imagem.

O defeito número 3, detectado pelas inspeções anteriores via *Phased Array*, não foi visualizado na análise metalográfica da região correspondente. Uma possível explicação para isto ter ocorrido, é a eliminação do defeito na etapa de preparo da superfície.

O resultado obtido pela análise metalográfica da região do defeito número 4 está apresentado na Figura 4.10

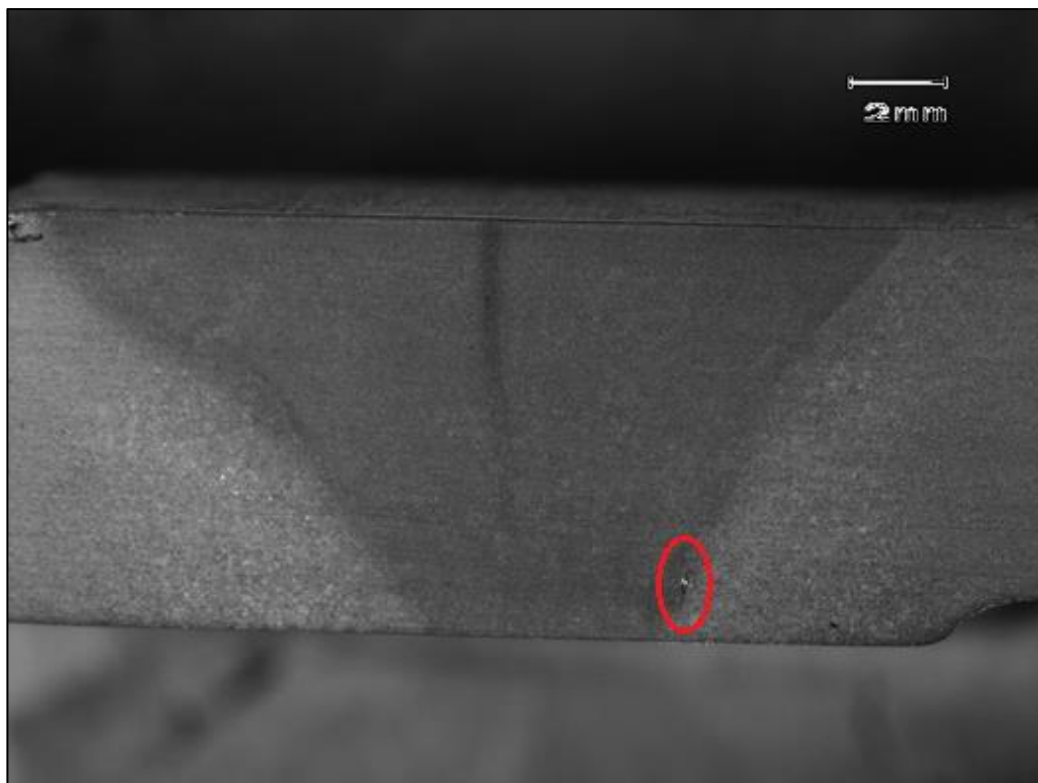


Figura 4.10 Macrografia da região do defeito número 4. Metal atacado com Nital 10%. O defeito foi encontrado na região em destaque.

É possível notar na Figura 4.10 o desnível superficial detectado anteriormente por inspeção visual. Este desnível externo, como nas regiões dos defeitos números 1 e 2, também apresenta geometria favorável a crescimento de trincas, podendo ser observado no canto superior esquerdo da imagem. Além deste desnível externo, é possível observar o desnível interno, também mais suave que o externo nesta região. O desalinhamento interno é visível no canto inferior direito da imagem.

Além do desalinhamento entre os tubos, também é possível notar uma trinca na interface entre a ZAC e o metal base, destacada na Figura 4.10. Esta trinca provavelmente é o defeito número 4 detectado nas inspeções anteriores. Também pode se vista uma região mais escura no centro da solda, podendo representar uma região suscetível ao surgimento de trinca, conforme visto nas regiões dos defeitos de números 1 e 2. Esta região central mais escura pode ser a causa da segunda reflexão apresentada na inspeção via *Phased Array* para esta região.

5.0 CONCLUSÕES

Após realizada a inspeção da junta soldada, constatou-se que, embora seja possível detectar defeitos com o transdutor utilizado, seu tamanho não é o ideal para esta aplicação.

A sapata de acrílico inicialmente utilizada também foi descartada. A alternativa para este problema foi projetar uma base para o transdutor, a qual apresentou resultados satisfatórios.

Através da inspeção visual externa, constatou-se apenas o desalinhamento dos tubos, não sendo problema por estar presente no lado exterior do tubo. Pela inspeção visual interna também avistou-se o desalinhamento dos tubos, sendo este um defeito.

Para a inspeção via *Phased Array*, diversas configurações foram utilizadas até se obter sucesso na detecção de defeitos. Com esta configuração, quatro defeitos foram encontrados, além do desnível interno já encontrado por inspeção visual. A região mais crítica do tubo se encontra no intervalo entre as marcações 6 e 9.

Através da análise metalográfica, os defeitos de números 1, 2 e 4 possivelmente foram encontrados, enquanto o defeito número 3 não foi detectado.

O procedimento utilizado por *Phased Array* foi satisfatório na detecção de defeitos, porém não apresentou bom desempenho na localização e no dimensionamento dos mesmos.

Tendo em vista a quantidade de defeitos detectados – tanto superficiais, quanto internos ao metal – sugere-se que sejam ajustados os parâmetros de soldagem a fim de minimizar a quantidade de defeitos.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja utilizado um sensor com menos elementos, a fim de que possibilite aproximar o mesmo da solda.

Outra sugestão é a análise metalográfica com maior magnificação a fim de determinar as causas dos defeitos encontrados.

Também sugere-se utilizar outras configurações de onda para melhor dimensionamento e localização dos defeitos, sendo uma opção a técnica TANDEM devido à pequena espessura do tubo.

Por fim, aconselha-se a análise de uma maior quantidade de tubos para que haja representatividade dos resultados obtidos.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2700 - 14: Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Welds Using Phased Array**. Estados Unidos, 2014.
- [2] **API Specification**. American Petroleum Institute Specification. <<http://www.apispecification.com/psl1.html>> Acesso em 19 Set. 2014
- [3] AZEVEDO, C. **Failure analysis of a crude oil pipeline**. Engineering Failure Analysis 14, p.978-994, 2007.
- [4] BASSOLI, D. **Avaliação dos Efeitos do Ultra-som Pulsado de Baixa Intensidade na Regeneração de Músculos Esqueléticos com Vistas à Aplicabilidade em Clínica Fisioterapêutica**. Dissertação. PPGI:USP, 2001.
- [5] CAMPBELL, F. **Inspection of Metals – Understanding the Basics**. ASM International, 2013.
- [6] CERQUEIRA, A. **Avaliação da técnica de ultrassom phased array na inspeção de juntas soldadas dissimilares e cladeada com diferentes espessuras de amanteigamento**. Dissertação. PPGEM:UFRGS, 2009.
- [7] CUI, L. et al. **Experimental study of friction taper plug welding for low alloy structure steel: Welding process, defects, microstructures and mechanical properties**. Materials and Design 62, p.271-281, 2014.
- [8] FAES, K. **New friction welding process for pipeline girth welds – welding time optimization**. Int J Adv Manuf Technol 43, p.982-992, 2009.

- [9] FONSECA, E. **Determinação indireta das propriedades mecânicas de um aço ASTM A36 laminado com o uso de ultra-som.** Tese. PGEM:UFRGS, 2005.
- [10] GORNI, A. **Aços microligados na fabricação de tubos soldados com grande diâmetro.** Tube & Companhia, 5:26, p.52-63, 2009.
- [11] KOMURA, I. et al. **Improved ultrasonic testing by Phased Array technique and its application.** Nuclear Engineering and Design 87, p.185-191, 1985.
- [12] LÓPEZ, F. **Montagem e avaliação de uma máquina de solda por fricção.** Dissertação. PPGEM:UFRGS, 2010.
- [13] MOLES, M. **Phased Array for Small Diameter, Thin-Walled Piping Inspections.** 18th World Conference on Nondestructive Testing, South Africa, 2012.
- [14] MOREIRA, F. et al. **Linear scanning ultrasonic inspection developments with TOFD in Brazil, for the replacement of radiography and manual ultrasonic inspection.** 3° PANNDT. Rio de Janeiro, 2003.
- [15] NARA, Y. **Production of line pipe in Japan.** Metals Technology Vol. 10, p.322-329, 1983.
- [16] NEPOMUCENO, L. **Tecnologia Ultra-sônica.** Editora Edgard Blücher Ltda, 1980.
- [17] **Olympus Phased Array Tutorial.** Olympus. <<http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/pa-beam/steering/>> Acesso em 27 Out 2014
- [18] SANTIN, J. **Ultrassom: Técnicas e Aplicação.** Pró END Consultoria Ltda. Curitiba, 2003.
- [19] TECH, R. **Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications.** RD Tech Guideline. Canadá, 2004.