

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL MATTOS STEIN

**ESTUDO DA TÉCNICA DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO ULTRASSOM
PHASED ARRAY**

VITÓRIA

2017

RAFAEL MATTOS STEIN

**ESTUDO DA TÉCNICA DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO ULTRASSOM
PHASED ARRAY**

Projeto de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Temístocles de Sousa Luz

VITÓRIA

2017

RAFAEL MATTOS STEIN

ANÁLISE E AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO ULTRASSOM PHASED ARRAY

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Apresentado em 27 de Julho de 2017

COMISSÃO EXAMINADORA

Professor Dr. Temístocles de Sousa Luz
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Professor Dr. Osvaldo Guilherme Comineli
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Professora Dra. Olga Liskevych
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

RESUMO

A técnica de ensaio não destrutivo por ultrassom é fortemente utilizada na indústria devido a sua alta confiabilidade, praticidade, baixo custo e também riscos desprezíveis para o operador. No entanto, para que se obtenha resultados coerentes acerca do ensaio, estes instrumentos exigem que o operador seja demasiadamente treinado e qualificado, com conhecimento acerca dos limites técnicos especiais de teste e, seleção do equipamento adequado. Devido a sua grande importância como técnica não destrutiva para ensaio de materiais, este estudo visa conhecer e aplicar a técnica através do ultrassom *Phased Array*. Utilizando um equipamento GE Phasor XS, com cabeçote de 4 MHz, e 16 elementos transdutores, testes foram realizados para identificar a existência de descontinuidades no corpo de prova de aço carbono A36 com cordão de solda. Por fim, as descontinuidades foram identificadas e, caracterizadas, intensificando o conhecimento a respeito da técnica *Phased Array*.

Palavras chave: Ultrassom, Ensaio não destrutivo, *Phased Array*.

ABSTRACT

The non-destructive ultrasonic testing technique is strongly used in the industry due to its high reliability, praticity, low cost and negligible risks for the operator. However, in order to obtain consistent results on the test, these instruments require the operator to be over trained and skilled, with knowledge of the special technical test limits and selection of suitable equipment. Due to its importance as a non-destructive material testing technique, this study aims to know and apply the technique through the Phased Array ultrasound. Using a GE Phasor XS equipment with a 4 MHz head and 16 transducer elements, a sample of Carbon A-36 Steel with MIG weld bead and coated electrode, tests were performed to identify the existence of discontinuities of the sample piece. Finally, the discontinuities were identified and, characterized, intensifying the knowledge about Phased Array technique.

Keywords: Ultrasonic, Nondestructive testing, *Phasor Array*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Propagação de ondas na superfície d'água.....	4
Figura 2: Elementos de uma onda	5
Figura 3: Espectro de frequência sonora	6
Figura 4: Efeito da interface de materiais diferentes	9
Figura 5: Ondas geradas a partir da incidência oblíqua de uma onda longitudinal na interface de dois sólidos	10
Figura 6: Primeiro ângulo crítico θ_1 , e segundo ângulo crítico θ_2	11
Figura 7: Ângulos de incidência de uma onda longitudinal em acrílico para os quais há apenas onda transversal refratada no aço	122
Figura 8: Conversões de modo geradas nas sucessivas reflexões em uma peça. O modo longitudinal está representado na cor verde e o transversal na cor azul.....	13
Figura 9 Distribuição de tensão paletas e discos.	18
Figura 10 Sondas de raio de matriz e cunha angular I	19
Figura 11: Croqui efeito do transdutor Phased Array	20
Figura 12: Varredura faseada.....	21
Figura 13: S-scan "Sectorial Scan.....	22
Figura 14: Amostra de aço A-36 com junta de solda (parte superior)	27
Figura 15: Amostra de aço A-36 com junta de solda (parte inferior).....	28
Figura 16: Vista lateral da amostra com junta de solda.....	28
Figura 17: Phasor XS GE	29
Figura 18: Sonda.....	30
Figura 19: Cabeçote ou Cunha	30
Figura 20: Cabeçote acoplado a sonda.....	31
Figura 21: Sentido da inspeção do cordão de solda	32
Figura 22: Cursor e indicação na tela sobre o Ganho (Gain)	33
Figura 23: Indicação na tela e cursor do ângulo da varredura (Beam)	34
Figura 24: Indicações demarcadas na peça.....	35
Figura 25: Descontinuidade identificada e pico no sinal ondulatório	36
Figura 26: Posição e dimensão das descontinuidades	37
Figura 27: Indicação na tela do PA da profundidade da descontinuidade A	38
Figura 28: Indicação da falha B.....	38
Figura 29: Inspeção da descontinuidade C	39
Figura 30: Acoplamento da sonda e alavanca de travamento.	42

Figura 31: Parte traseira do Phasor Array	43
Figura 32 Sonda e suas características	44
Figura 33: Funções	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Impedância acústica para alguns tipos de materiais.	8
Tabela 2 Valores de atenuação sônica em materiais de aço Cr-Ni obtidos em três diferentes processos de fabricação.	14
Tabela 3. Principais diferenças entre as técnicas de ultrassom convencional e PA automatizado.	23
Tabela 4 Comparação entre 3 ensaios não destrutivos	26
Tabela 5: Medições feitas a partir do equipamento para cada descontinuidade	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1.MOTIVAÇÃO	2
1.2.OBJETIVO GERAL E OBJETIVO ESPECÍFICO	2
1.3.ESTRUTURA E ABORDAGEM METODOLÓGICA	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.OBJETIVO DO ENSAIO POR ULTRASSOM PHASED ARRAY	3
2.2.PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	3
2.2.1. CLASSIFICAÇÕES BÁSICAS E PROPRIEDADES DAS ONDAS.....	3
2.2.2.INTERFACE DE INCIDÊNCIA.....	7
2.2.3.PROPAGAÇÃO DA ONDA	12
2.2.4.PROPRIEDADES	13
2.3.HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DO ULTRASSOM	14
2.4.O POTENCIAL DA TÉCNICA NA INDÚSTRIA.....	17
2.5.CARACTERÍSTICAS DO PHASED ARRAY	19
2.6.COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS.....	23
2.7.VANTAGENS DO PHASED ARRAY	24
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	27
3.1.MATERIAL.....	27
3.2.PROCEDIMENTO	31
4. RESULTADOS OBTIDOS.....	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
APÊNDICE A	42

1 INTRODUÇÃO

Os métodos de inspeção por ensaios não destrutivos são utilizados nos diversos ramos da indústria, tais como siderúrgica, automobilística, naval, nuclear, petrolífera, têxtil, aeroespacial, de geração de energia. Os Ensaios Não Destrutivos (END) são empregados em diversas etapas de produção, na manutenção, inspeção de equipamentos, e apresentam como objetivo garantir o controle de qualidade e a segurança. Os métodos de END mais comuns são: inspeção visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, raio-X, termografia, correntes parasitas, análise de vibração, estanqueidade e ultrassom.

Dentre os métodos supracitados, o ultrassom permite analisar amostras ou equipamentos sem gerar dano. Faz-se necessário, para uma análise segura e confiável, um operador treinado e qualificado com conhecimento acerca dos limites técnicos especiais de teste e seleção do equipamento adequado. Além disso é importante ressaltar que os equipamentos sejam calibrados periodicamente para garantia de resultados satisfatórios.

No Brasil, na década de 1990, a inspeção por ultrassom na indústria era realizada principalmente manualmente, utilizando aparelhos de ultrassom portáteis (SANTIN, 2003). Segundo TROMBINI (2015), as inspeções eram realizadas através de equipamentos portáteis de ultrassom analógicos, que embora sejam cada vez menos utilizados e ainda existam, não fornecem um grau de confiabilidade de inspeção eficaz e dependem essencialmente do técnico para a interpretação de resultados. Atualmente a exigência do mercado fez crescer a necessidade de inspeções de alta confiabilidade, deste modo cresceu a demanda por aparelhos digitais de inspeção por ultrassom. Tal fato deve-se aos resultados superiores em comparação aos do sinal analógico (TROMBINI, 2015).

A constante busca por melhorias para atender as exigências da indústria atrai significativos investimentos em pesquisas na tecnologia em equipamentos de inspeção. Dentre as tecnologias de equipamentos de inspeções por ultrassom, a mais recente é *Phased Array*, que apresenta disponibilidade tanto em equipamentos portáteis como automatizados (TROMBINI, 2015).

1.1 MOTIVAÇÃO

A partir da demanda industrial acima citada, justifica-se o estudo proposto com o intuito de aprofundar as pesquisas acerca da técnica de inspeção por Ensaio Não Destrutivo por ultrassom *Phased Array*. Busca-se, a partir da monografia transmitir o conhecimento no meio acadêmico e técnico, pois endente-se, que a tecnologia permite uma melhor detecção das discontinuidades nos materiais, elevando a qualidade dos produtos gerados nas indústrias.

1.2 OBJETIVO GERAL E OBJETIVO ESPECÍFICO

O objetivo geral deste trabalho é conhecer, promover e transmitir a técnica de inspeção por meio de Ensaio Não Destrutivo, através do ultrassom *Phased Array*.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar o teste em amostra padrão fornecida pelo fabricante.

1.3 ESTRUTURA E ABORDAGEM METODOLÓGICA

Os procedimentos empregados para desenvolvimento da pesquisa acerca do ultrassom *Phased Array* são baseados no método de inspeção por ensaio não destrutivo ultrassom. O trabalho apresenta uma abordagem histórica, conceitual e empírica, de âmbito qualitativo e quantitativo com o intuito de conhecer, compreender e representar a tecnologia.

Utiliza-se, para a construção da investigação e desenvolvimento da análise e avaliação 3 etapas de procedimentos:

- Primeira etapa: Pesquisa e revisão bibliográfica relativa a técnica de ultrassom *Phased Array*. A pesquisa tem seu cerne nos estudos de Mauricio Trombini, assim como manuais técnicos das marcas *GE Sensing & Inspection Technologies* e *Olympus IMS*. As referências bibliográficas abrangem: artigos, dissertações, manuais e livros que abordem o assunto.
- Segunda etapa: Aproximação do objeto conteúdo empírico do trabalho. Realização de teste utilizando a técnica de ultrassom *Phased Array* em amostra de aço carbono.
- Terceira etapa: Análise e avaliação do resultado encontrado no teste anterior.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.OBJETIVO DO ENSAIO POR ULTRASSOM PHASED ARRAY

O ensaio de ultrassom *Phased Array* tem como objetivo principal na indústria, detectar descontinuidades internas existentes nos materiais em diferentes tipos ou formas.

No processo de fabricação do material essas descontinuidades são geradas, como por exemplo, por porosidade, escória, inclusões, dobras de laminação e micro trincas em materiais laminados. Então, o ensaio por ultrassom, assim como qualquer ensaio não destrutivo tem o objetivo de garantir a qualidade e diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais para aplicações industriais (SANTIN, 2003). Ultimamente o ensaio de ultrassom tem sido bastante utilizado na área industrial a vários tipos de materiais, como por exemplo no aço, alumínio, madeira, concreto, entre outros.

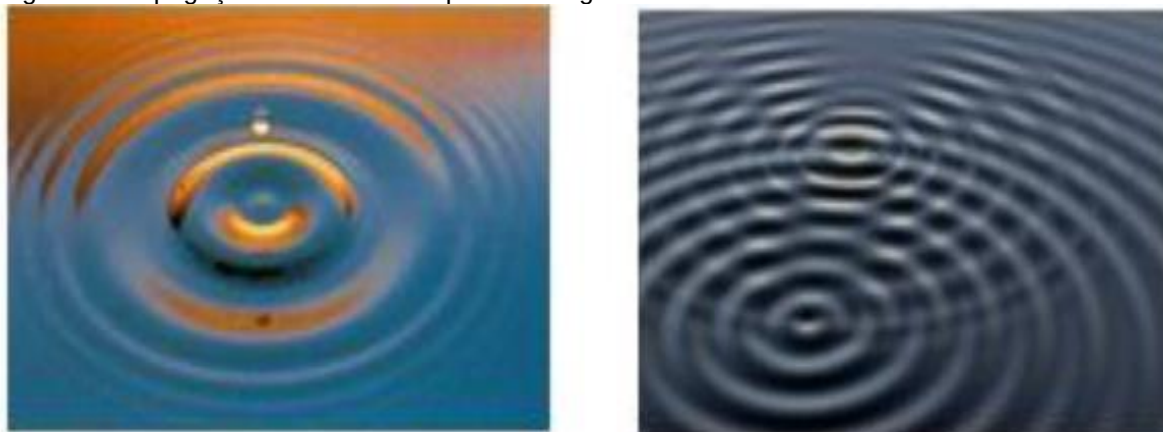
Segundo Trombini (2015), uma descontinuidade também pode ser descrita pelo nome de indicação, que é uma interrupção na estrutura do material, ou seja, a falta de homogeneidade nas suas características metalúrgicas e não necessariamente é um defeito. Um defeito é uma falha ou conjunto de imperfeições, que torna o material ou parte dele, incapaz de atender aos requisitos mínimos de aceitação de sua norma de fabricação, denotando rejeição.

2.2.PRINCÍPIOS FÍSICOS

2.2.1 CLASSIFICAÇÕES BÁSICAS E PROPRIEDADES DAS ONDAS

Para melhor entendimento do ensaio não destrutivo por ultrassom é necessário saber o que é uma onda e como ocorre seu funcionamento. As ondas são perturbações periódicas que se propagam no espaço ou em meios transportando energia. Um exemplo prático é mostrado na Figura 1, quando uma pedra é jogada em um local com água calma gerando movimentação oscilatória da mesma em todas as direções da superfície.

Figura 1: Propagação de ondas na superfície d'água



Fonte: Trombini (2015).

As ondas podem ser classificadas quanto a sua natureza e sentido de propagação. Quanto a natureza elas podem ser mecânicas ou eletromagnéticas, e quanto ao sentido podem ser transversais, longitudinais ou de superfície.

As ondas mecânicas são compostas de oscilações de partículas no meio em que se propaga, ou seja, dependem de um meio material para se propagar, seja ele sólido, líquido ou gasoso. Exemplos desse tipo de onda são as ondas marítimas, ondas sonoras, ondas sísmicas.

As ondas eletromagnéticas são resultado da combinação de campo elétrico com campo magnético e sua principal característica é que não necessitam de um meio material para se propagarem. São exemplos desse tipo de onda a luz, raio X, micro-ondas, ondas de transmissão de sinais.

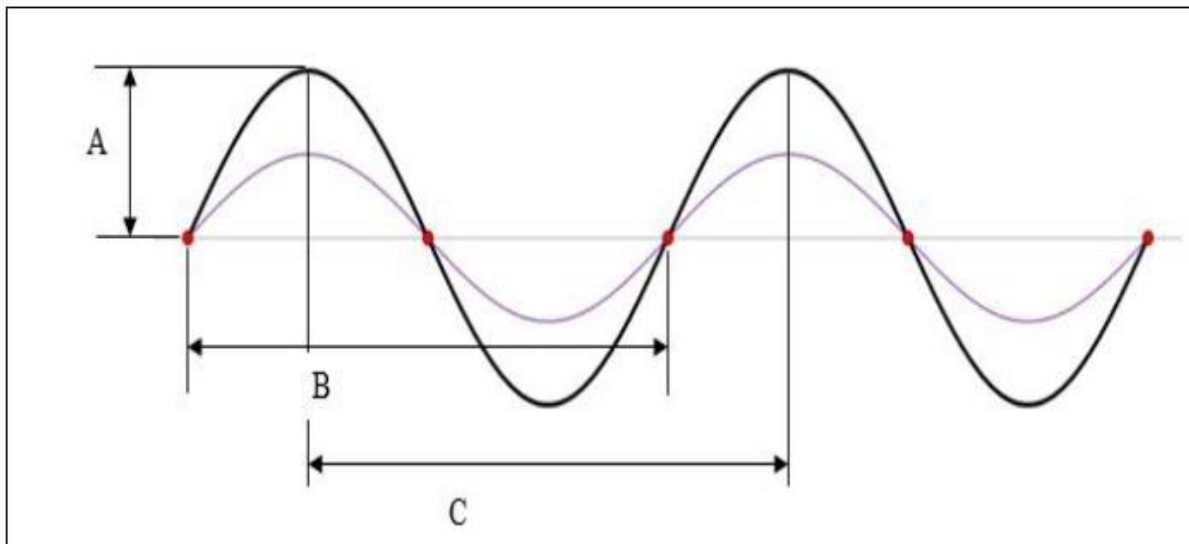
Na classificação quanto ao sentido, as ondas longitudinais ou de compressão, são ondas cujas partículas vibram na mesma direção da propagação da onda no meio, podendo ser transmitidas através de meios sólidos, líquidos e gasosos, como é o caso das ondas sonoras.

As ondas transversais, também chamadas ondas de corte ou cisalhamento, são aquelas cujo sentido de propagação é perpendicular ao sentido o qual as partículas do meio vibram. Nessas os planos das partículas movem-se apenas verticalmente, podendo ser transmitidas somente a sólidos.

Essas ondas transversais não se propagam nos meios líquidos ou gasosos, pela característica das ligações entre as partículas destes meios. Por último temos as ondas superficiais ou de Rayleigh que se propagam na superfície dos meios sólidos.

Para a geração de ondas é importante conhecermos os elementos básicos de uma onda que podem ser observados conforme a Figura 2.

Figura 2: Elementos de uma onda



Fonte: Halliday et al, (2012).

- A - Amplitude: é a altura da crista da onda, medida a partir da superfície.
- B - Ciclo: movimento completo da onda, partindo de sua posição original e voltando a ela.
- C - Comprimento de onda: é a distância de uma crista à outra.
- Frequência: é o número de ciclos pela unidade de tempo e é dada em Hertz [Hz]

Dentro os parâmetros que caracterizam uma onda, a velocidade varia conforme o modo como elas se propagam e dos parâmetros constitutivos do material. A velocidade de propagação de uma onda é relacionada com o meio que ela é propagada, ou seja, varia conforme o material. Em cada modo de propagação a velocidade de fase relaciona-se com a frequência e o comprimento de onda conforme mostrado na equação 1.

$$v = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Onde:

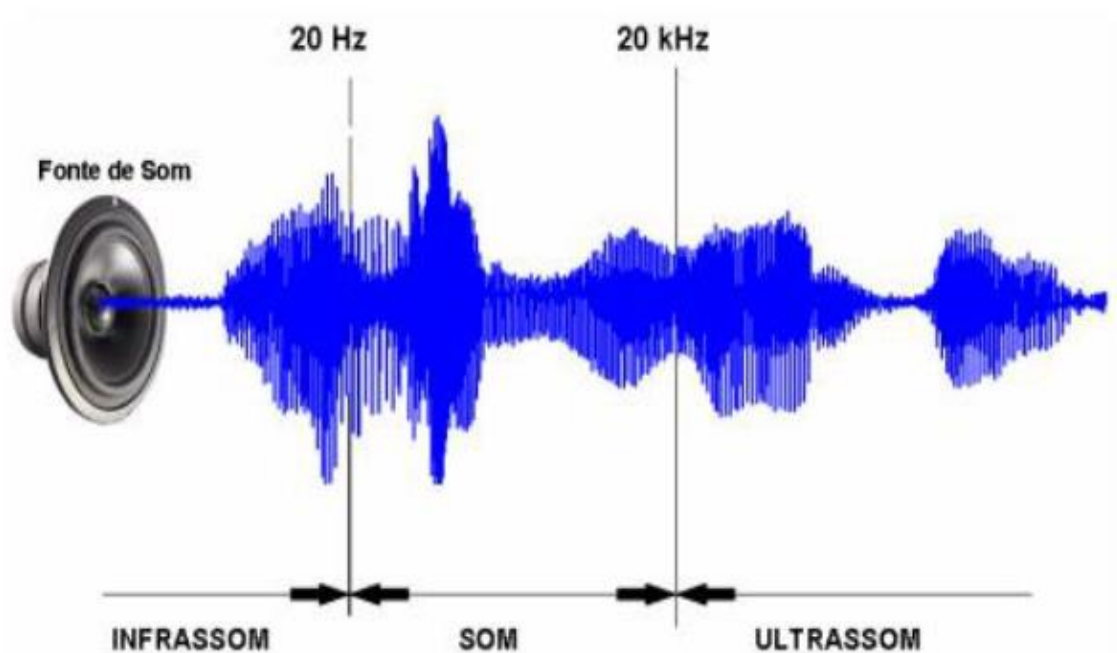
v = velocidade de fase da onda [m/s];

λ = comprimento de onda [m];

f = frequência da onda [Hz].

O termo ultrassom aplica-se as ondas mecânicas cuja frequência excede ao valor máximo perceptível pelo ouvido humano. A frequência do ultrassom possui valores acima de 20 kHz, onde são mais usuais em ensaios não destrutivos os valores de 0,5 a 20 MHz (Figura 3). A velocidade de fase das ondas ultrassônicas varia em função do modo de propagação que se encontra, pois está relacionada aos parâmetros constitutivos da matéria.

Figura 3: Espectro de frequência sonora



Fonte: ANDREUCCI, (2014).

A velocidade do som no ar é de aproximadamente 300 metros por segundo. No caso da propagação do som em um meio sólido ou líquido a velocidade é maior, pois a estrutura que forma estes materiais é mais compacta, facilitando a propagação do som. No aço, a velocidade de propagação do som de uma onda longitudinal é de 5.920 metros por segundo. No caso da propagação de ondas transversais no aço a velocidade é de 3.230 metros por segundo. A velocidade de propagação do som via ondas longitudinais na água é de 1.480 metros por segundo.

Existe influência da temperatura em relação à velocidade do som, aonde a relação é inversa, isto é, como o aumento da temperatura do meio em que o som se propaga, há a diminuição da velocidade de propagação.

A velocidade das ondas varia conforme o modo como elas se propagam e dos parâmetros constitutivos do material. As equações 2, 3 e 4 abaixo se referem a velocidade dos três modos de propagação das ondas.

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1+\mu)}} \cdot v_L \quad (3)$$

$$v_S = \left(\frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \right) \cdot v_T \quad (4)$$

Onde:

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

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

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

E = modulo de elasticidade [N/m²];

μ = coeficiente de Poisson;

G = modulo de rigidez [N/m²];

ρ = massa especifica [Kg/m³].

2.2.2 INTERFACE DE INCIDÊNCIA

As ondas sônicas percorrem meios diferentes até penetrar no material a ser inspecionado e durante esse caminho somente parte dessa onda é absorvida pelo material a ser inspecionado. A impedância acústica está associada a razão entre a pressão sônica e a velocidade da partícula, como mostrado na equação 5 a seguir. A tabela 1 cita os valores de impedância acústica de alguns materiais.

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

Onde:

Z = impedância acústica característica do meio [Kg/m².s];

ρ = massa específica [Kg/m³];

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

Essas propriedades acústicas dos metais e ligas são influenciadas por variações na estrutura e condições metalúrgicas. Consequentemente, para uma determinada peça, as propriedades podem ser diferentes dos valores conhecidos na bibliografia (SANTIN, 2003).

Tabela 1: Impedância acústica para alguns tipos de materiais.

Material	Impedância Acustica x 10 ⁶ (Kg/m²s)
Alumínio	17064
Aço Carbono	46472
Aço inoxidável austenítico	44556
Água	1480
Acrílico	3221
Ferro Fundido	3657
Níquel	49544
Óleo automotivo	1514

Fonte: SANTIN (2003).

Também cabe ressaltar que para o caso de incidência normal, os coeficientes de reflexão (R) e transmissão (T) para as pressões são expressos pelas equações 6 e 7.

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (7)$$

Onde:

R = coeficiente de reflexão para pressão;

T = coeficiente de transmissão para pressão;

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

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

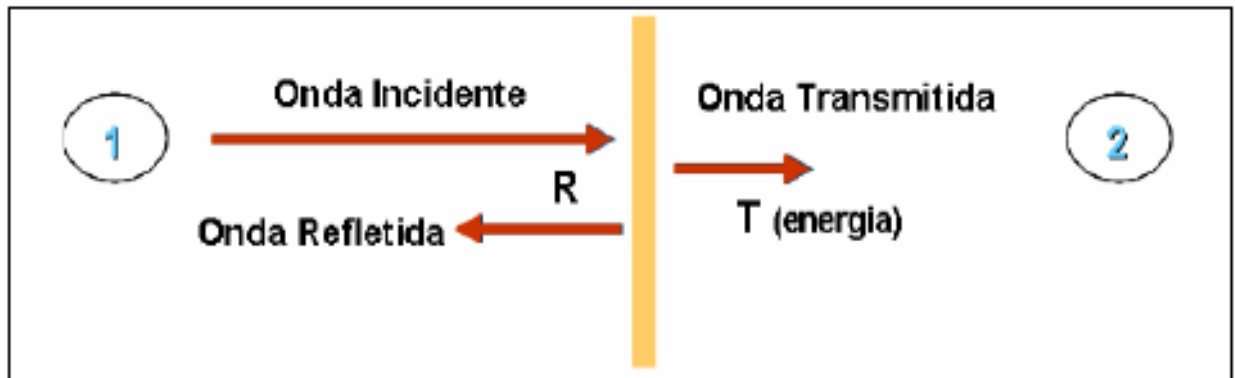
P_t = amplitude da onda de pressão do feixe transmitido [Pa];

Z_2 = impedancia acústica característica do meio 1 [Kg/(m².s)];

Z_2 = impedância acústica característica do meio 2 [Kg/(m².s)].

A onda incidente que ao percorrer do transdutor do primeiro meio (Z1) ao segundo meio (Z2), onde parte dessa onda é absorvida pelo segundo meio e parte refletida para o primeiro, como mostrado na Figura 4 (SANTIN,2003)

Figura 4: Efeito da interface de materiais diferentes



Fonte: ABENDI, (2011).

A onda incidente penetra no material através de um ângulo incidente onde se formam ângulos de reflexão e refração. Os ângulos das direções de propagação das ondas (Figura 5) são medidos em relação a direção normal a superfície de incidência, e seus valores são dados pela lei de Snell, que os relaciona com a velocidade de cada onda em seu meio, representada pela equação 8.

$$\frac{\text{Sen}(\alpha)}{v_i} = \frac{\text{Sen}(\beta)}{v_r} \quad (8)$$

Onde:

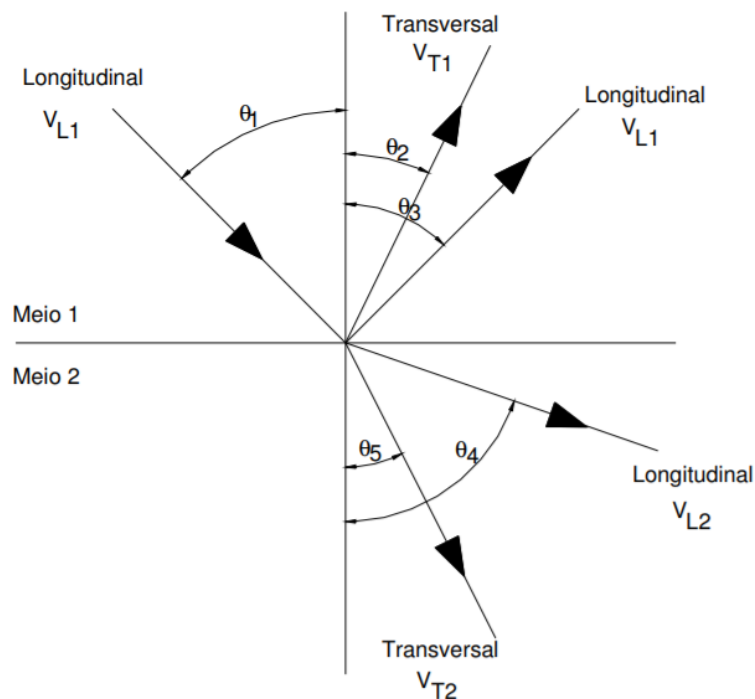
α = ângulo do feixe incidente [rad];

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

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

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

Figura 5: Conversões de modo, reflexão e refração de uma onda longitudinal incidindo obliquamente em uma interface.



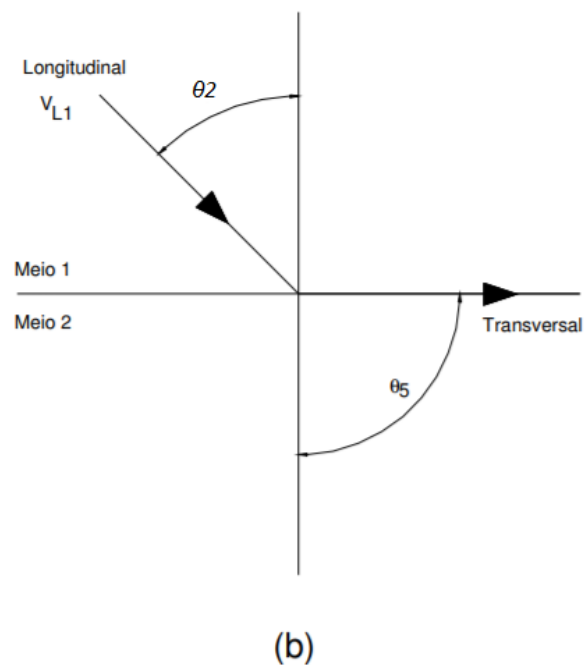
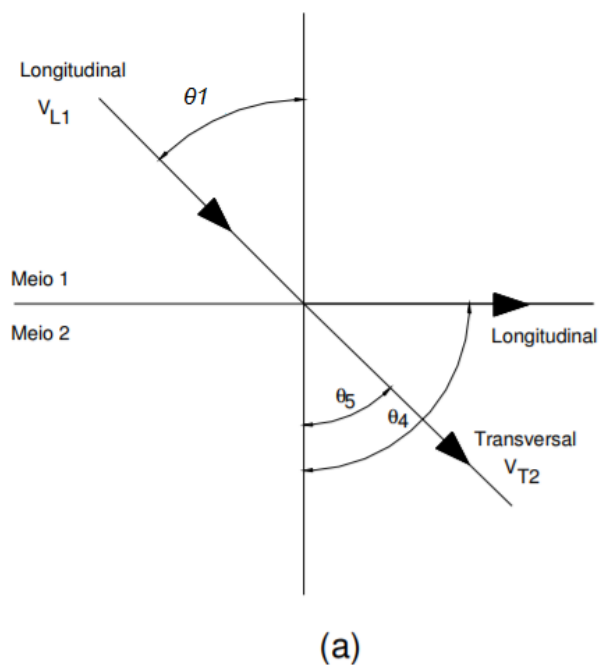
Fonte: SANTIN, (2003).

Na Figura 5, dependendo do ângulo de incidência da onda longitudinal com a normal, pode haver dois tipos de onda no segundo meio. À medida que o ângulo de incidência aumenta, a onda longitudinal refratada aproxima-se cada vez mais da interface, até que, para um determinado ângulo de incidência, a onda longitudinal refratada fará um ângulo de 90° com a normal. Neste momento, somente a onda transversal refratada estará presente. Este ângulo de incidência é denominado primeiro ângulo crítico. Aumentando-se o ângulo de incidência além do primeiro ângulo crítico, em um determinado momento a onda transversal refratada fará, por sua vez, um ângulo de 90° com a normal. Este novo valor do ângulo de incidência para o qual a onda transversal refratada é paralela à interface de incidência é denominado segundo ângulo crítico. As duas situações podem ser observadas na Figura 6 (a) e (b).

Os ângulos denominados primeiro e segundo ângulos críticos, respectivamente, servem de referência na construção de transdutores angulares quando se deseja

apenas um modo de propagação no interior do material, a fim de facilitar a interpretação dos sinais gerados (PIRES, 2009).

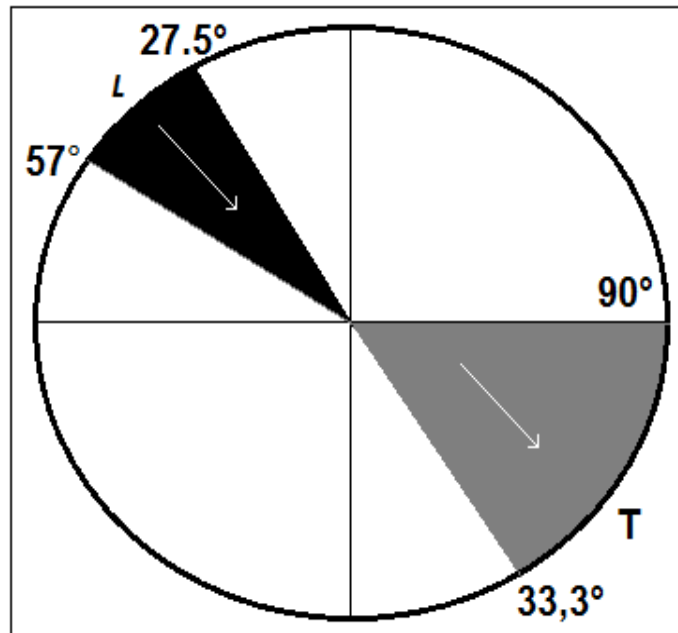
Figura 6: Primeiro ângulo crítico θ_1 , e segundo ângulo crítico θ_2 .



Fonte: SANTIN, (2003).

Na Figura 7 é mostrado uma faixa de ângulos de incidência de uma onda longitudinal na cunha de acrílico para os quais a refração no aço ocorre apenas com a onda transversal.

Figura 7: Ângulos de incidência de uma onda longitudinal em acrílico para os quais há apenas onda transversal refratada no aço



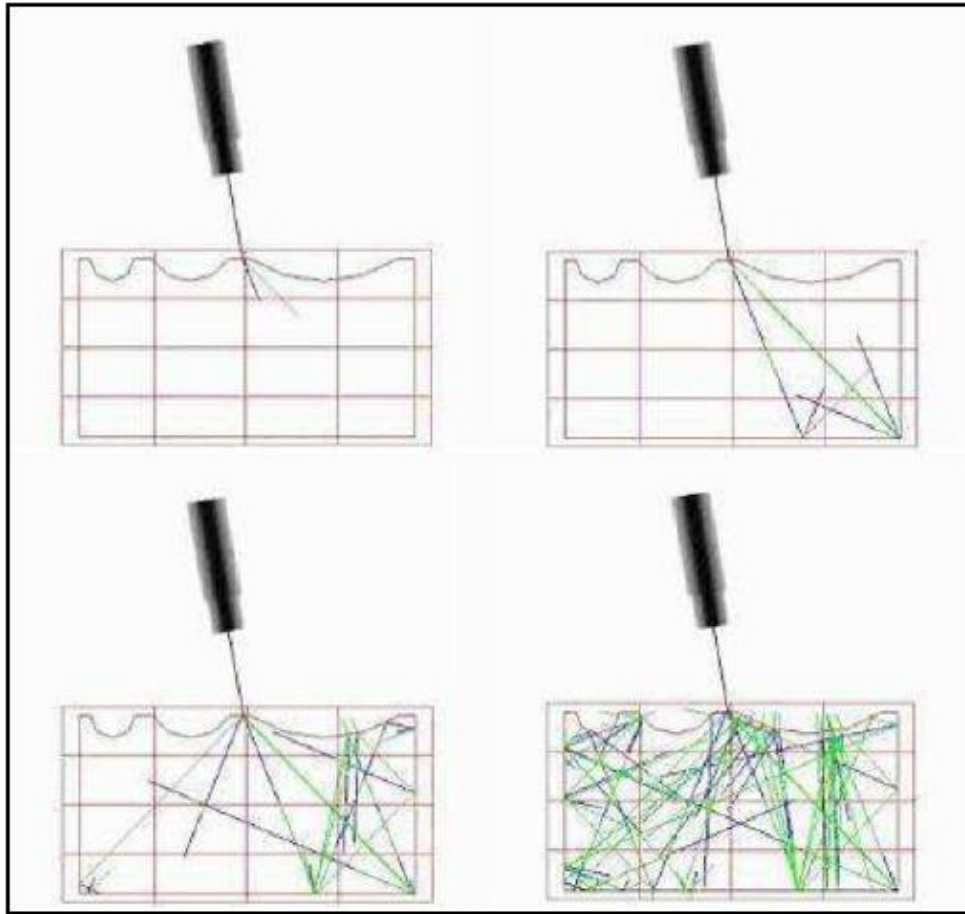
Fonte: NDT, (2012).

2.2.3 PROPAGAÇÃO DA ONDA

A onda resultante através do ângulo de incidência refratada no interior do material, onde podem tomar um destino diferente ao teórico (através da lei de Snell), que a partir de obstáculos como a geometria irregular, problemas no acoplamento, e também as propriedades acústicas e micro estruturais do material, geram o efeito chamado conversão de modo.

No comportamento dos ângulos, mesmo quando a incidência for oblíqua, os fenômenos de conversão de modo (mudança do tipo de oscilação ou tipo de onda) e refração (mudança na direção de propagação da onda transmitida) devem ser considerados, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8: Conversões de modo geradas nas sucessivas reflexões em uma peça. O modo longitudinal está representado na cor verde e o transversal na cor azul.



Fonte: NDT, (2012).

2.2.4 PROPRIEDADES

É possível determinar as propriedades mecânicas e metalúrgicas de um material com o uso do ultrassom, mas para isso é necessário conhecer as características que podem influenciar o comportamento da onda sônica no material a ser inspecionado.

A velocidade e a atenuação sônica são os parâmetros da onda que são modificados e podem, portanto, ser utilizados para estimar as propriedades do material. Uma vez que são conhecidas informações de microestrutura e propriedades mecânicas de um material, por exemplo, também é possível ajustar os parâmetros de inspeção para uma melhor detecção e dimensionamento.

O fator predominante na medição da atenuação é a relação entre o comprimento de onda do ultrassom e o tamanho do grão do material. O fenômeno da absorção ocorre

sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. E a energia cedida pela onda para que cada partícula do meio execute um movimento de oscilação, transmitindo a vibração as outras partículas do próprio meio. A dispersão deve-se ao fato da matéria não ser totalmente homogênea, contendo interfaces naturais de sua própria estrutura ou processo de fabricação. Portanto, o resultado dos efeitos de dispersão e absorção quando somadas resultam na atenuação sônica. Esse fenômeno pode ser visualizado no ultrassom quando, na tela do aparelho, aparecem vários ecos de reflexão de fundo provenientes de uma peça com superfícies paralelas. As alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda. O espalhamento da onda sônica causado pelos contornos de grão e fortemente dependente da relação entre o tamanho de grão e o comprimento de onda do ultrassom (FONSECA, 2005). A atenuação é importante na inspeção, pois pode inviabilizar o ensaio.

Tabela 2: Valores de atenuação sônica em materiais de aço Cr-Ni obtidos em três diferentes processos de fabricação.

Material de aço Cr-Ni	Atenuação sônica (dB/mm)
Forjados	0,009 a 0,01
Laminados	0,018
Fundidos	0,04 a 0,08

Fonte: ANDREUCCI (2014).

2.3.HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DO ULTRASSOM

Os aparelhos de teste por ultrassom tiveram seu uso iniciado na indústria por volta da década de 60. No entanto, desde os anos 30, estudos a respeito dos fenômenos ondulatórios, em materiais sólidos, tem sido aprofundado para a detecção de fissuras, lacunas, porosidade, descontinuidades internas, medição de espessura e análise das propriedades do material. A evolução da tecnologia ultrassônica como ensaio não destrutivo acompanha em grande parte o desenvolvimento da eletrônica e posteriormente dos computadores. Os primeiros trabalhos com ultrassom foram desenvolvidos em países europeus e nos Estados Unidos.

Segundo CHARLES (2013), o primeiro cientista a sugerir o uso de ondas ultrassônicas para detectar descontinuidades nos metais, foi S. Y. Sokolov, na Rússia, em 1929. Sokolov desenvolveu estudos os quais geraram ondas ultrassônicas em metais,

incluindo amostras de ferro fundido e aço. Em 1935, descreveu seu projeto para transdutores piezoelétricos para geração e detecção de ondas ultrassônicas. Foi demonstrado que as ondas sonoras de alta frequência refletem de modo previsível em defeitos ocultos ou extremidade de materiais, produzindo padrões de ecos distintos que podem ser exibidos na tela de um osciloscópio.

No fim dos anos 1940, pesquisadores japoneses foram os pioneiros em testes por ultrassom para diagnósticos médicos utilizando um aparelho primitivo de B-scan que fornecia uma imagem de perfil bidimensional das camadas dos tecidos. O desenvolvimento do sonar durante a Segunda Guerra Mundial deu um impulso nas pesquisas sobre ultrassom. Em 1945, o norte-americano Floyd Firestone patenteou um instrumento chamado Refletoscópio Supersônico, que é considerado o primeiro detector de defeito por ultrassom comercial que usava a técnica de pulso/eco comumente empregada atualmente. Ele favoreceria a introdução de muitos aparelhos comerciais nos anos que se seguiram (<http://www.olympus-ims.com>).

Nos anos 1960, as primeiras versões de escâneres médicos foram utilizados para a detecção e descrição de tumores, cálculo biliar e condições semelhantes, juntamente, começaram a desenvolver sistemas de ultrassom *Phased Array* que utilizavam vários transdutores de fontes pontuais que foram estimuladas de maneira a direcionar os feixes sonoros por meio destes padrões de interferência controlada. No início dos anos 1970, começaram a aparecer os primeiros sistemas de *Phased Array* comerciais para diagnóstico médico, usando feixes direcionais para criar imagens transversais do corpo humano.

Por volta de 1977, Maurice Silk, usou pela primeira vez a técnica de difração de tempo de voo (TOFD - Time of Flight Diffraction), para exibir as bordas superior e inferior das descontinuidades, de forma a permitir uma maior precisão na medição da espessura da passagem. Esta evolução conduziu os testes por ultrassom à uma ampla variedade de operações de fabricação que exigiam a medição de espessura de peças em situações que não se tinha acesso fácil. O método emprega transdutores angulares de onda, localizados na mesma superfície, para transmitir e receber som (CHARLES, 2013).

Os avanços mais recentes dos aparelhos ultrassônicos foram baseados em técnicas de processamento de sinal digital e microprocessadores de baixo custo que ficaram

disponíveis a partir da década de 1980. Isto gerou a mais recente geração de aparelhos portáteis miniaturizados e confiáveis para sistemas de inspeção em linha de detecção de defeitos, medição de espessuras e imagem acústica.

Inicialmente, o uso de sistemas de ultrassom *Phased Array* era limitado ao campo da medicina devido a estrutura e composição previsível do corpo humano, facilitando, deste modo, a criação e interpretação da imagem. As aplicações industriais, por outro lado, representam um desafio muito maior devido as variadas propriedades acústicas dos metais, compósitos, cerâmicas, plásticos e fibra de vidro, assim como a enorme variedade de geometria e de espessura encontradas no âmbito dos ensaios industriais.

O primeiro sistema de *Phased Array* industrial, introduzido nos anos 1980, era extremamente grande e precisava que os dados fossem transferidos para um computador para o processamento e apresentação da imagem. Nos anos 90 surgiram os aparelhos de *Phased Array* portáteis alimentados por bateria. Projetos análogos exigiam espaço e energia para criar configurações multicanais necessárias para direcionar o feixe, mas a transição para a área digital e o rápido desenvolvimento de microprocessadores embutidos de baixo custo permitiram um rápido desenvolvimento de uma nova geração de aparelhos de *Phased Array*.

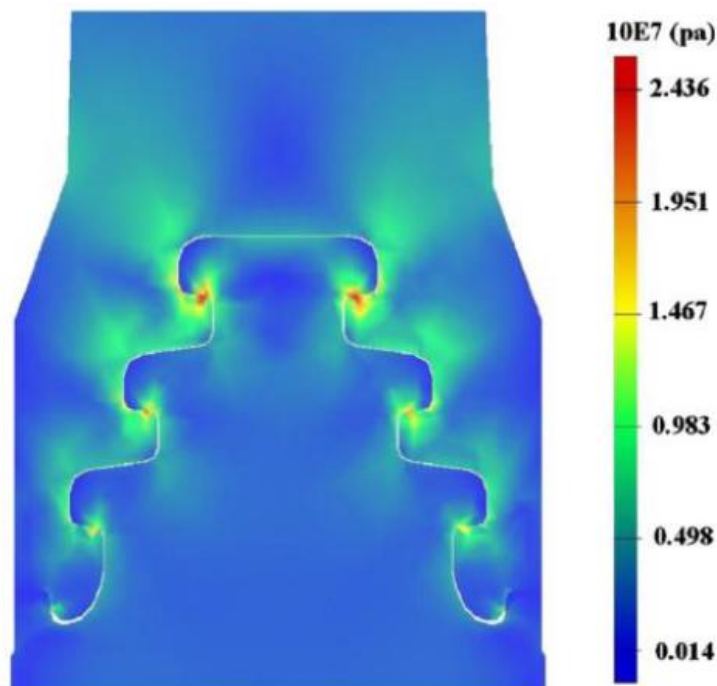
Por fim, a disponibilidade de componentes com baixo consumo de energia e a ampla utilização da indústria conduziram à miniaturização desta tecnologia. Isto resultou em aparelhos *Phased Array* que permitiram a configuração eletrônica, o processamento de dados, a visualização e análise total dentro de um dispositivo portátil, e, deste modo, as portas estavam abertas para a utilização generalizada em todo setor industrial. Isto, por sua vez, possibilitou a especificação de sondas *Phased Array* para aplicações comuns.

2.4 O POTENCIAL DA TÉCNICA NA INDÚSTRIA

O ultrassom na indústria tem o objetivo de controlar a qualidade dos produtos, constatar se os mesmos estão de acordo com as normas aplicáveis, prevenir acidentes, reduzir custos, aumentar o rendimento da linha de fabricação, preservar a vida e o meio ambiente .

Atualmente, as inspeções realizadas pelo método do ensaio não destrutivo por ultrassom têm sido cada vez mais exigentes. Há uma necessidade de migração de inspeções por ensaio destrutivos, inspeções visuais, manuais, entre outras, por ultrassom, como contato direto ou convencional, ou até mesmo inspeção por ultrassom *Phased Array* automatizada. A eficácia da técnica por *Phased Array* fica evidenciada, nos estudos de Zhiliang Bai et al (2016). Segundo Zhiliang Bai et al (2016), desde 1972 quando turbinas de baixa pressão começaram a ser produzidas, a preocupação com fragilização por corrosão sob tensão em equipamentos desse tipo cresceu significativamente. Nessas turbinas, a região de fixação da paleta está sujeita a desgaste dependente do tempo, mais comumente na forma de CST (corrosão sob tensão), levando a grandes perdas econômicas e até mesmo acidentes graves. Consequentemente, a detecção de rotina deve ser realizada para identificar os riscos potenciais, e o teste não destrutivo ultrassônico é considerado um método eficaz para detectar fissuras de fadiga em estágio. Porém, a estrutura complexa torna a posição do transdutor muito limitada, o que não pode ser detectado por técnicas ultrassônicas tradicionais. As concentrações de tensão ocorrem nas arestas onde o disco e a paleta estão ligados (Figura 9).

Figura 9: Distribuição de tensão paletas e discos.



Fonte: Zhiliang Bai et al (2016).

Zhiliang Bai et al (2016), cita que, o aumento dramático no uso de matrizes ultrassônicas *Phased Array* para avaliação não-destrutiva na indústria, ocorre devido ao seu grande potencial para aumentar a qualidade da inspeção e reduzir o tempo de inspeção. As principais vantagens da técnica são a sua maior flexibilidade, velocidade de detecção mais rápida e maior sensibilidade ao método ultrassom de um único elemento convencional.

Habermehl e Lamarre (2008) também realizaram pesquisas fazendo uso do potencial da técnica *PA*. Seus estudos concernem na inspeção, utilizando *Phased Array*, durante a manufatura e manutenção de compósitos utilizados na indústria aeronáutica. Segundo Habermehl e Lamarre (2008), as fábricas de aeronaves, as provedoras de manutenção e as companhias aéreas tem utilizado cada vez mais da técnica, que permite inspecionar largas estruturas rapidamente e com confiabilidade, diferentemente do UT convencional. Em termos de velocidade de varredura de uma linha, uma configuração típica pode inspecionar uma faixa de aproximadamente 100mm por segundo.

Tipicamente estruturas poliméricas reforçadas com fibra de carbono são constituídas de vértices que necessitam de inspeção, assim como as partes planas. Para este fim, o *PA* é equipado de um cabeçote adequado para a forma a ser inspecionada (Figura 10). Essas formas intrínsecas que são comumente encontradas no meio aeronáutico, permitem uma velocidade de inspeção inferior, e a forte dependência de um operador experiente são suas desvantagens.

Figura 10: Sondas de raio de matriz e cunha angular I



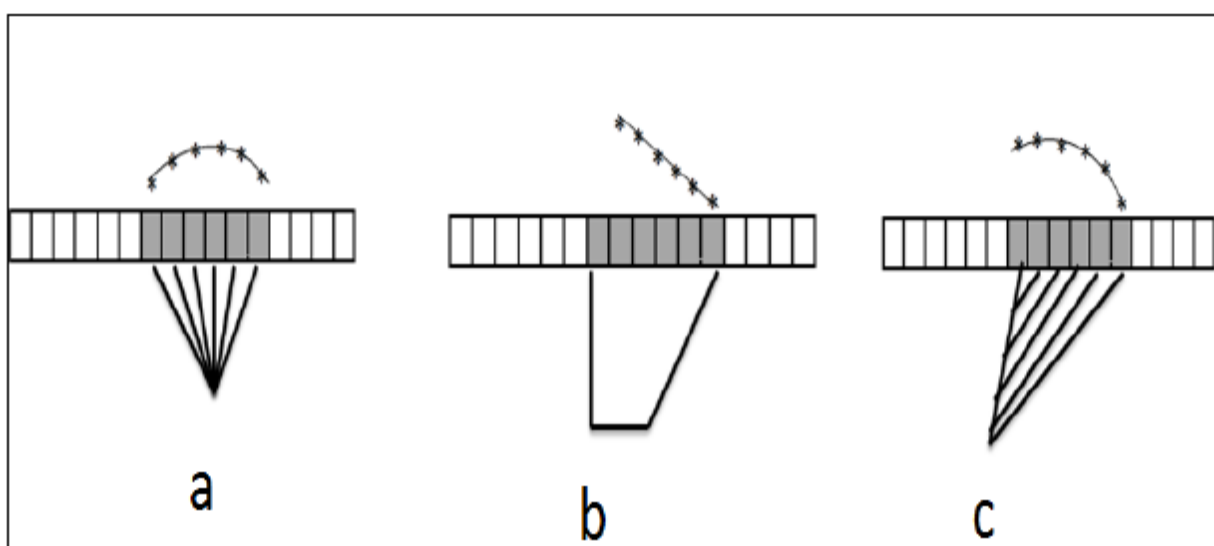
Fonte: Habermehl e Lamarre, 2008.

Segundo Habermehl e Lamarre (2008), as imagens aprimoradas com melhor resolução, reproduzidas pelo *Phased Array*, reduzem o fator erro humano, garantem cobertura total da peça inspecionada, e aumentam a confiabilidade da inspeção.

2.5.CARACTERÍSTICAS DO PHASED ARRAY

Os princípios físicos que regem o funcionamento do ultrassom *Phased Array* são os mesmos que os do ultrassom convencional, ou seja, ondas ultrassônicas geradas e recebidas pelos transdutores são as que definem o ensaio, no entanto, as técnicas de inspeção são distintas. Na técnica *Phased Array* o transdutor possui múltiplos elementos cristais que vão de 8 a 256 elementos que podem ser excitados isoladamente em tempos diferentes (pulsos); o *Phased* se refere ao modo como estes elementos são pulsados sequencialmente permitindo que a inspeção por esta técnica seja realizada por uma grande variedade de ângulos, trajetórias ou profundidades (Figura 11). Em adição, é possível o ajuste do ponto focal do feixe sônico do transdutor em um material e consequentemente podendo aumentar a energia do feixe em uma determinada região do material em ensaio o que consequentemente aumenta confiabilidade de inspeções e detecções de indicações com orientações diversas (TROMBINI, 2015). Estes transdutores podem ser utilizados com vários tipos de calços, no modo de contato ou em teste por imersão. Seu formato pode ser quadrado, retangular ou redondo, e as frequências de teste estão geralmente entre 1 e 10 MHz.

Figura 11: Croqui efeito do transdutor Phased Array



Fonte: Trombini (2015).

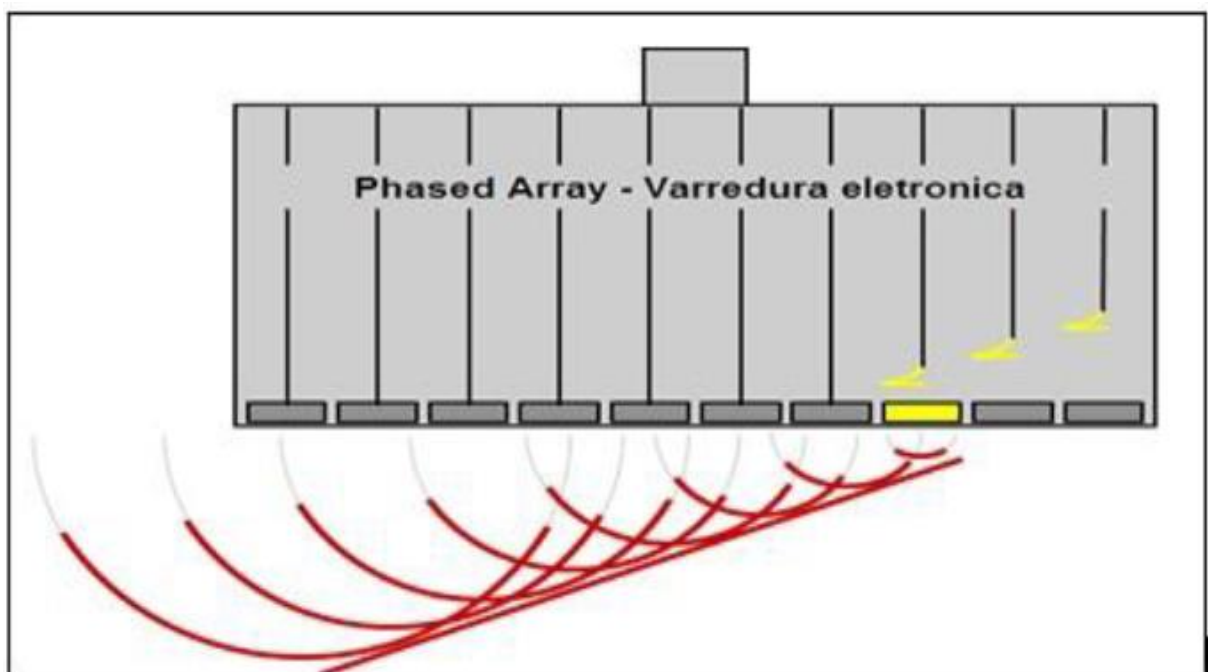
a - Inspeção com feixe sônico focado a uma determinada profundidade.

b - Inspeção com feixe sônico em ângulo.

c - Inspeção com angulação e focalização do feixe sônico.

Ao conjunto de cristais que formam o arranjo de cristais em um encapsulamento de um transdutor *Phased Array* atribui-se o nome de leis focais (<http://www.olympus-ims.com>). Na técnica de inspeção por *Phased Array*, ocorre a modificação do comportamento do feixe sônico emitido pelo conjunto de cristais ou pela lei focal do transdutor, ou seja, o aparelho de ultrassom executa a excitação das leis focais em tempo defasado entre elas, e o resultado é uma onda perpendicular transmitida para a peça em ensaio ao plano da superfície. A Figura 12 mostra que o aparelho de ultrassom executa a excitação dos cristais de forma defasada, isto é, o tempo em que cada cristal é excitado é retardado no tempo, e o resultado é uma frente de onda angular à superfície.

Figura 12: Varredura faseada



Fonte: Bolten (2014)

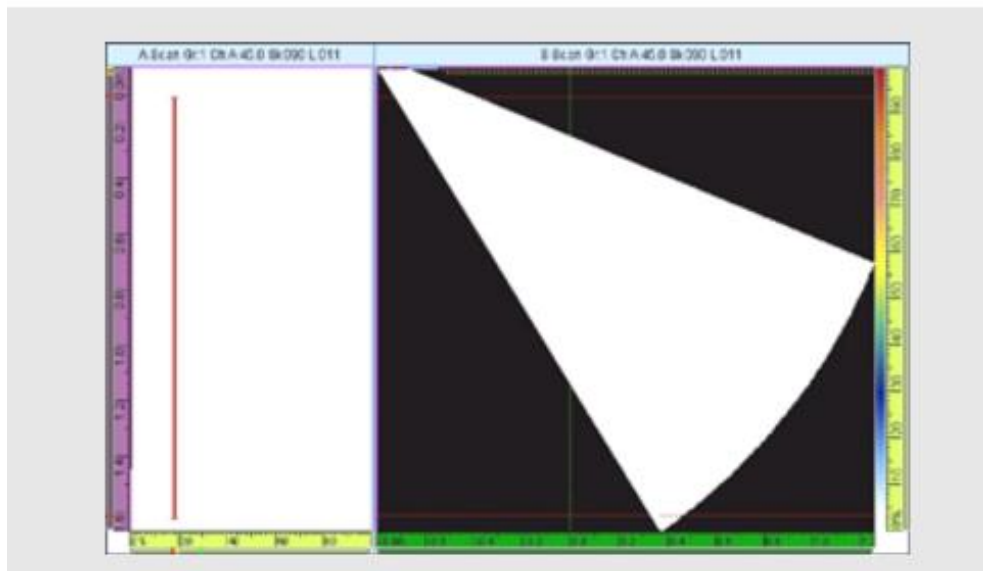
O sistema *Phased Array* tem a capacidade de varrer um feixe sonoro de uma sonda através de um intervalo de ângulos refratados, ao longo de uma trajetória linear ou foco dinâmico de uma quantidade de profundidades diferentes. Assim este aumenta a flexibilidade e capacidade de configurações para inspeção, além disso, possui recurso de visualização de inspeção através da criação de uma imagem da área de inspeção. A imagem de *Phased Array* oferece ao usuário o recurso de ver o ponto

relativo para a resposta de defeitos multiangulares e alteração de pontos, que podem auxiliar na identificação de defeitos e dimensionamento. Embora isto possa parecer particularmente complexo, pode-se realmente simplificar a expansão da cobertura da inspeção com o aumento da detecção eliminando instalações complexas e transdutores múltiplos que muitas vezes são exigidos por certos métodos de inspeção por ultrassom convencional.

Um ultrassom convencional, assim como o *Phased Array*, pode representar de diversas formas uma inspeção, sendo elas do tipo A-scan, B-scan e C-scan. Porém a vista S-scan ou Sectorial Scan, pode ser gerada somente da inspeção via ultrassom *Phased Array*. Na representação *S-scan* o feixe sônico é setorial produzido em ângulo pelo transdutor mostrando na tela a posição das indicações a partir do centro do transdutor. Em adição, a forma de apresentação *S-scan* para varredura setorial angular (Figura 13) por *Phased Array* também não é comum, e somente aparelhos que possuem funções especiais *Phased Array* são capazes de mostrar esta forma de representação de sinais.

Figura 13: S-scan "Sectorial Scan"

+35° to +70° Sectorial Scan



Fonte: Olympus-IMS

2.6. COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS

O transdutor convencional de ultrassom possui um único cristal piezelétrico ou no máximo dois enquanto o *Phased Array*, possui múltiplos elementos cristais que vão de 8 a 256 elementos. Outra característica da técnica *PA* em relação a uma inspeção por UT convencional automatizada ou manual é a possibilidade de aumento de velocidade de inspeção e a detecção de indicações localizadas na superfície e sub superfície de um determinado material com orientações diversas. E conforme a especificação de inspeção, a inspeção automatizada *Phased Array* pode substituir a aplicação de outro ensaio não destrutivo complementar utilizado para verificar a superfície de um determinado material, por exemplo, o ensaio por partículas magnéticas, líquido penetrante ou correntes parasitas [Olympus NDT, 2012]. A seguir estão listadas características comparando os dois modos de inspeção ultrassônica.

Tabela 3. Principais diferenças entre as técnicas de ultrassom convencional e PA automatizado.

Tipo do equipamento de Ultrassom	Convencional Manual	Phased Array Automatizado
Marca	GE inspection	Olympus NDT
Modelo	USN 60	Quick Scan
Quantidade de equipamentos	1	6
Nº de elementos transdutores	1	128
Área ativa do transdutor	24mm	160x18mm
Formato do cristal do transdutor	reto	côncavo
Técnica de inspeção	Pulso eco via contato direto convencional	Pulso eco via imersão Phased array
Velocidade de inspeção	150mm/s máx.	250mm/s
Sobreposição	manual	encoder
Varredura	manual	automatizada
Custo	R\$60.000,00	R\$ 3.000.000,00
Confiabilidade	75%	100%

Fonte: Trombini (2015).

2.7.VANTAGENS DO PHASED ARRAY

As vantagens principais da tecnologia *Phased Array* em relação ao ultrassom convencional são provenientes da capacidade de usar uma variedade de elementos para direcionar, focar, analisar feixes, com um único conjunto transdutor. A diversidade de ângulos de incidência para um mesmo transdutor, pode ser utilizada para mapeamento de componentes com ângulos apropriados podendo simplificar muito a inspeção de componentes com geometrias complexas.

A pequena superfície do transdutor e o recurso de varrer o feixe sem a necessidade de se mover a sonda também auxilia na inspeção de tais componentes em situações onde o acesso para verificação mecânica é limitado. O rastreamento setorial é muito utilizado para inspecionar soldas, pois permite que as mesmas sejam avaliadas em vários ângulos com apenas uma sonda, aumentando muito a probabilidade de detecção de anomalias. O foco eletrônico permite otimizar o tamanho e a forma do feixe no local esperado do defeito, assim como um aumento na probabilidade de detecção.

A capacidade de focar várias profundidades também melhora a capacidade de dimensionamento de defeitos críticos em inspeções volumétricas. O foco pode aumentar significativamente a relação de sinal-ruído em aplicações exigentes, e o rastreamento eletrônico “multi-grupo” de elementos permite a criação rápida de imagens de C-scan.

O ensaio ultrassônico é limpo, ou seja, não utiliza de produtos químicos perigosos para a sua realização, o que é favorável no sentido ambiental (Moore, 2007). O único produto químico utilizado é o acoplante que tem sua composição química à base de água. Em outras situações, o ensaio por ultrassom utiliza óleo como acoplante, que pode ser reaproveitado por várias vezes.

As principais desvantagens do sistema *Phased Array* são os custos um pouco mais elevados e a necessidade de treinar os operadores, pois o ultrassom envolve física aplicada a relação entre a teoria e a prática do ensaio, que é fundamental para a interpretação de resultados de inspeção. Porém, estes custos, com frequência, são compensados por uma maior flexibilidade e a redução do tempo necessário para realizar uma determinada inspeção.

Vantagens em relação a outros ensaios:

- O método ultrassônico *PA* possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas, por exemplo, trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia);
- Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção;
- No caso de radiografia ou gamagrafia, existe a necessidade do processo de revelação do filme, que via de regra demanda tempo do informe de resultados;
- Ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, o ensaio ultrassônico não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação;
- A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultrassônico, enquanto que outros exames não definem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho, mas não sua profundidade e em muitos casos este é um fator importante para proceder um reparo.

Vale ressaltar que, nenhum ensaio não destrutivo deve ser considerado o mais sensível ou o mais completo, pois as limitações e as vantagens fazem com que aplicação de cada ensaio seja objeto de análise e estudo da viabilidade de sua utilização, em conjunto com os Códigos e Normas de fabricação.

Tabela 4: Comparação entre 3 ensaios não destrutivos

Ultrassom	Radiografia	Líquido penetrante
Sensível	Sensível	Sensível
Não prejudica a saúde do operador	Prejudica a saúde do operador	Não prejudica a saúde do operador
Inspeção rápida	Inspeção Lenta	Inspeção Lenta
Permite a localização precisa de indicações	Não permite a localização precisa de indicações	Não permite a localização precisa de indicações
Limpo (Favorável ao meio ambiente)	Não favorável ao meio ambiente)	Não favorável ao meio ambiente)

Fonte: Trombini (2015).

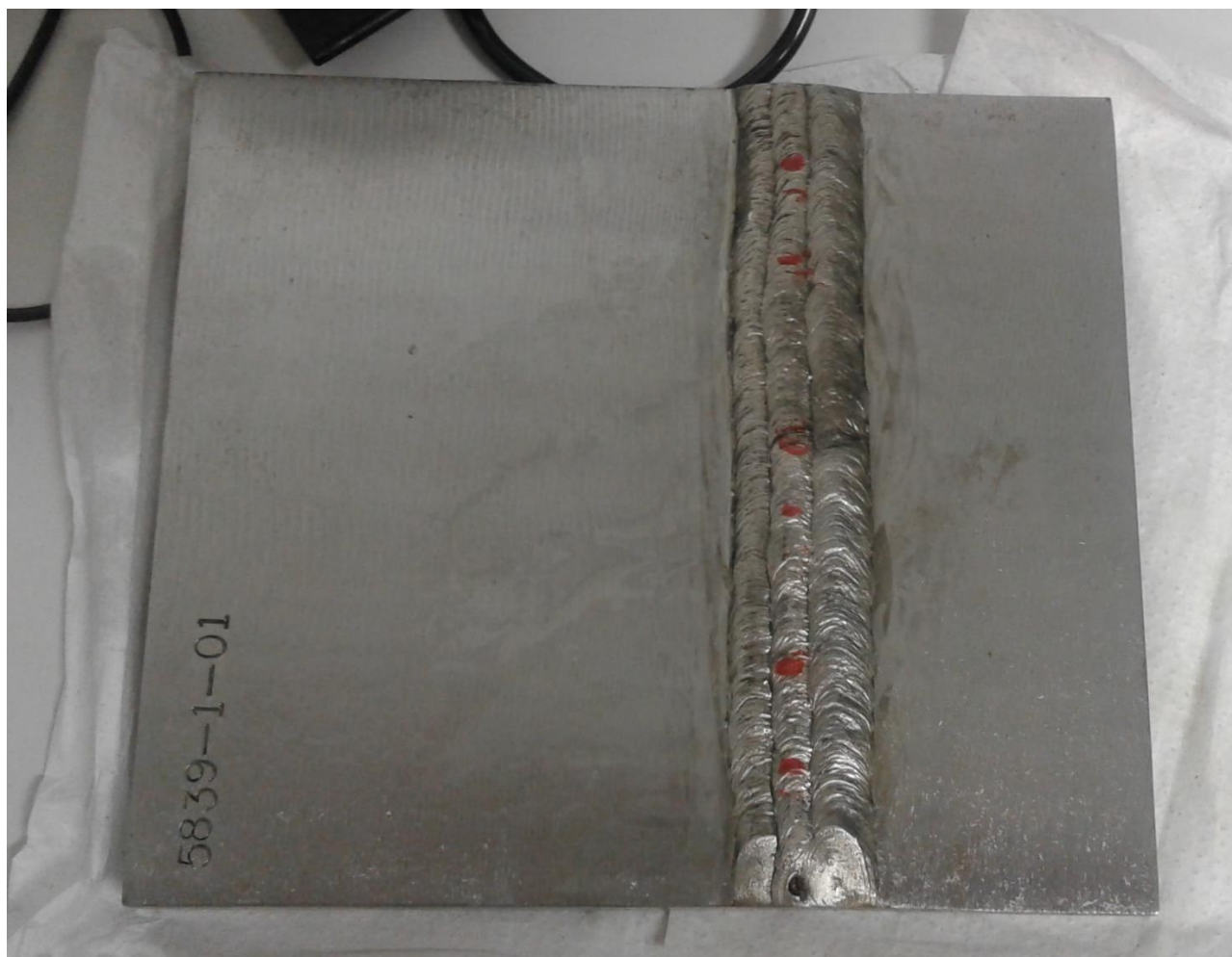
3.0. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para efeitos de análise qualitativa como quantitativa, e também para validar a eficácia da técnica de avaliação por ensaio não destrutivo *Phased Array*, foram utilizados; uma peça de aço carbono com junta soldada, equipamento portátil de ultrassom *Phased Array*, um cabeçote ou cunha, uma sonda específica para testes por *PA*, e fluido acoplante. Todos os itens utilizados e o procedimento de análise está detalhado a seguir.

3.1. MATERIAL

O material utilizado para inspeção consiste de uma amostra de aço A-36, com cordão de solda (FIGURA 14, 15, 16). As dimensões da amostra são 17,15 cm de largura; 14,75 cm de comprimento e 19,05 mm de espessura. A junta de solda tem sua raiz feita por Eletrodo Revestido E7024 e seu enchimento feito por MIG ER70S-6.

Figura 14: Amostra de aço A-36 com junta de solda (parte superior)



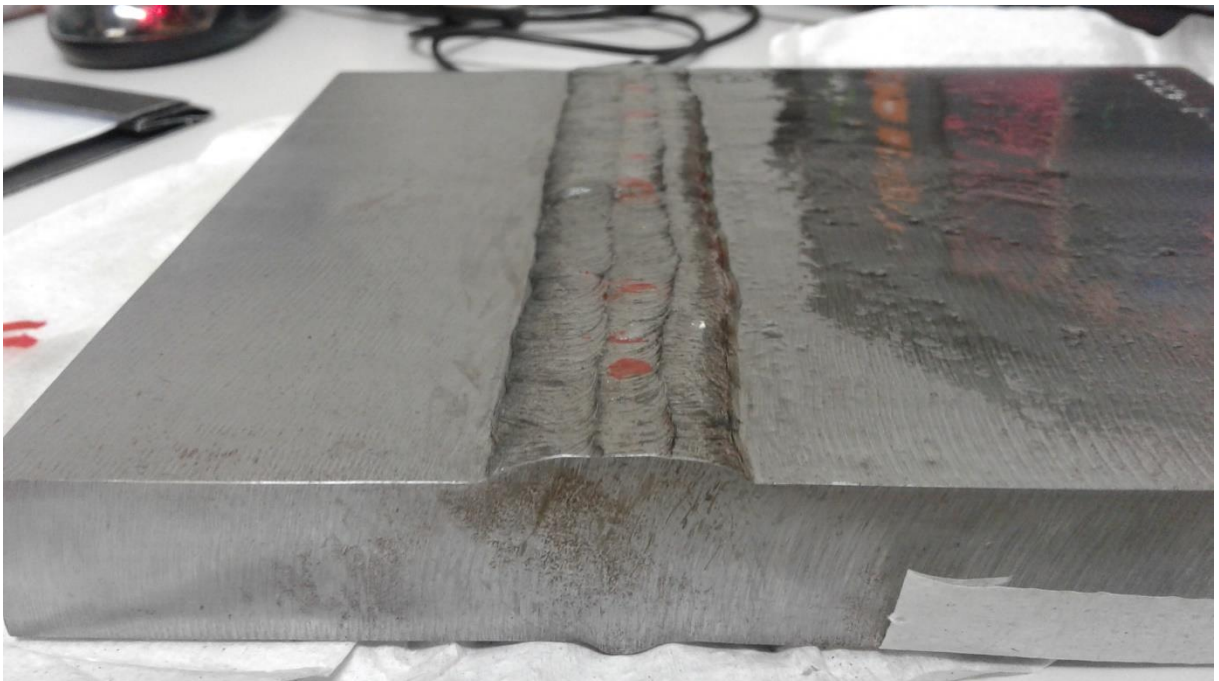
Fonte: Autor

Figura 15: Amostra de aço A-36 com junta de solda (parte inferior)



Fonte: Autor

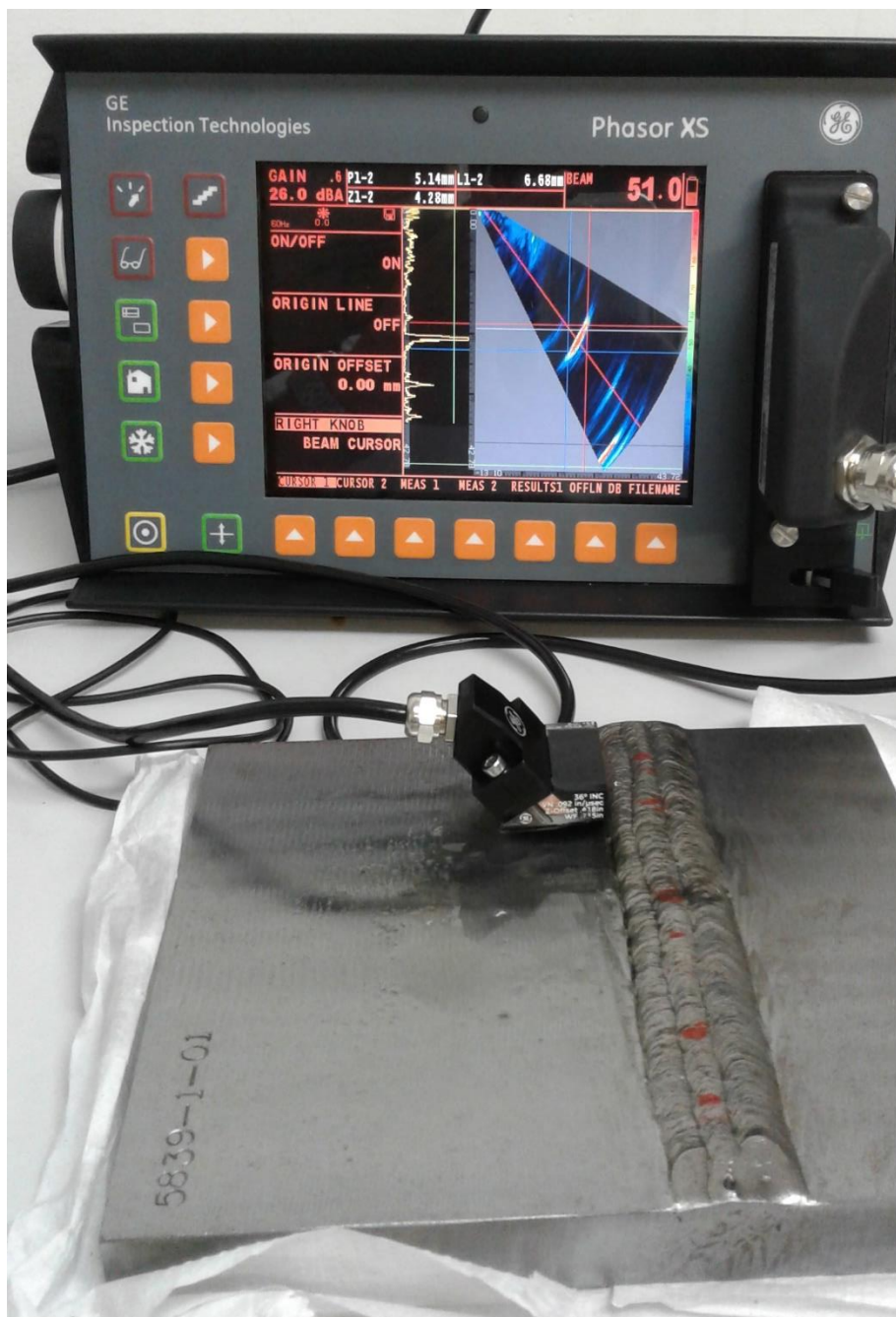
Figura 16: Vista lateral da amostra com junta de solda



Fonte: Autor

O ultrassom empregado neste trabalho é um *Phasor Array XS 16/64* (Figura 17), da marca *GE* (*General Electrics Sensing and Inspection Technologies*).

Figura 17: Phasor XS GE



Fonte: Autor

A sonda de inspeção utilizada, também proveniente do fabricante *GE* (Figura 18), possui as seguintes características: 16 elementos transdutores, distância entre os centros dos elementos (PITCH) 0,5 mm, frequência de 4 MHz.

Figura 18: Sonda



Fonte: Autor

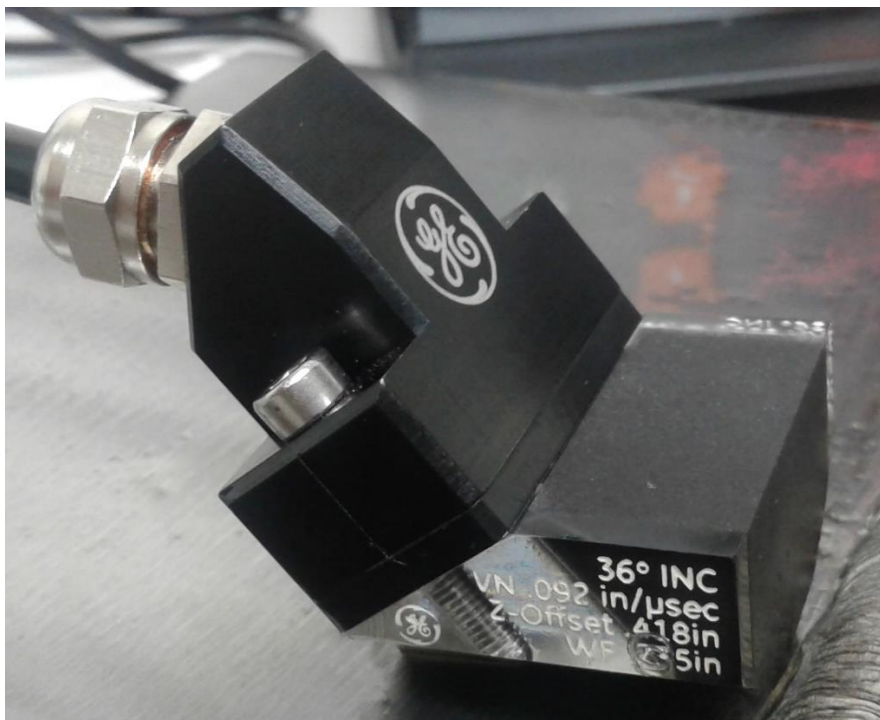
O cabeçote também da marca *GE*, possui ângulo de inclinação de 36° e superfície para inspeção plana (Figura 19).

Figura 19: Cabeçote ou Cunha



Fonte: Autor

Figura 20: Cabeçote acoplado a sonda



Fonte: Autor

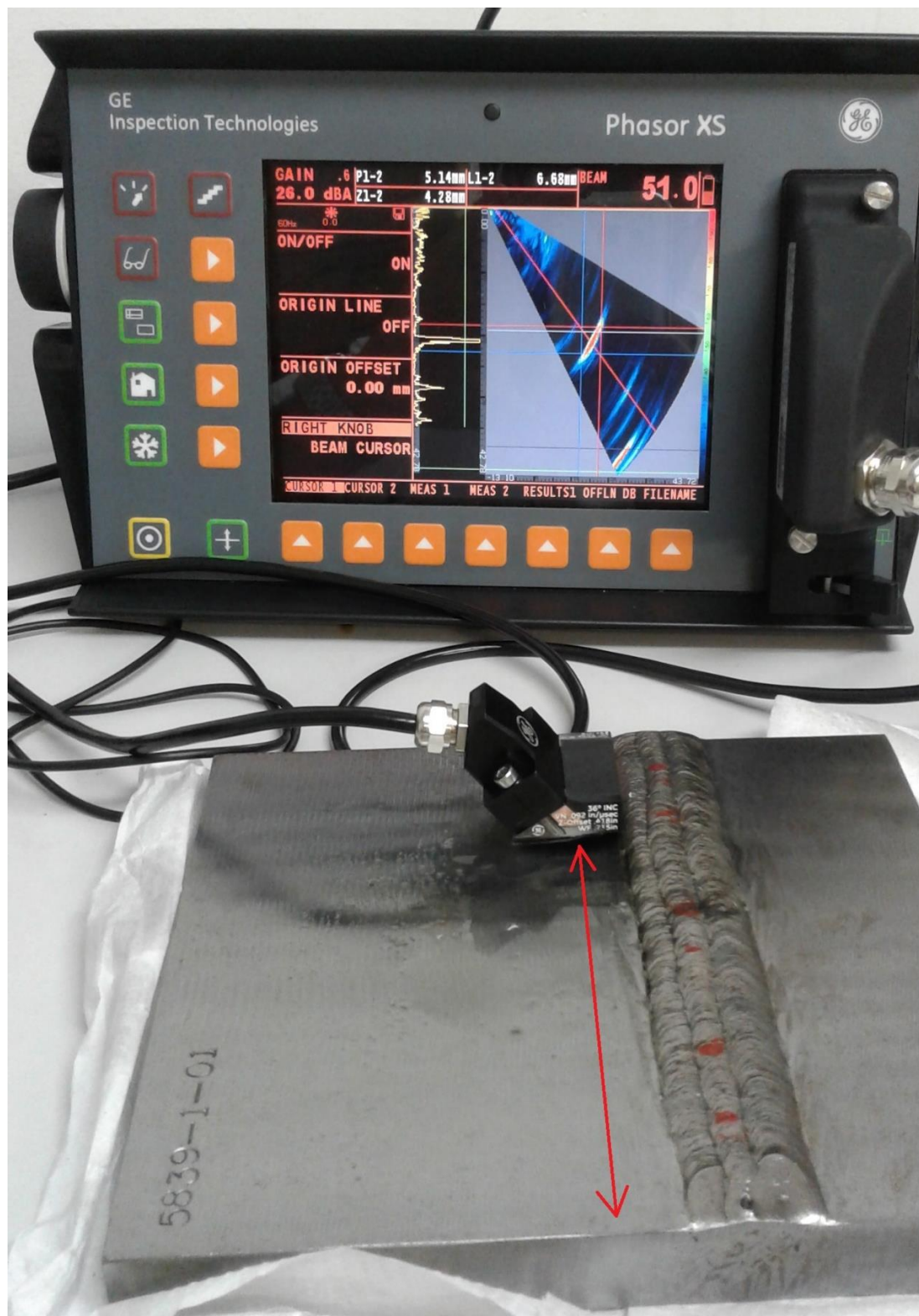
Óleo SAE 15W40 foi aplicado aos testes como fluido acoplante.

3.2.PROCEDIMENTO

O procedimento para análise e avaliação por ensaio não destrutivo utilizando o equipamento de ultrassom *Phasor Array*, é definido primeiramente por uma calibração do aparelho em conformidade com o elemento a ser inspecionado (placa de aço A-36 com junta soldada), com as características da cunha e também da sonda utilizada. Um passo a passo detalhado para a configuração do dispositivo pode ser encontrado no Apêndice A.

Após realizar a configuração do equipamento, este está apto para ser usado na inspeção da junta soldada da placa de aço A-36. A inspeção deve ser iniciada deslizando o conjunto sonda/cunha longitudinalmente ao cordão de solda (Figura 21), não deixando de fazer uso do fluido acoplante. Na primeira passagem, é possível identificar a ocorrência de descontinuidades.

Figura 21: Sentido da inspeção do cordão de solda



Fonte: Autor

Em passagens posteriores deve ser ajustado o ganho (Gain) do feixe de ondas(Figura 22), com o cursor do lado esquerdo em decibéis (dB), para uma melhor análise das indicações.

Figura 22: Cursor e indicação na tela sobre o Ganho (Gain)



Fonte: Manual Phasor Array GE Inspection Technologies

Com o cursor rotativo do lado direito (Figura 23) é feito a varredura angular da seção inspecionada. O ângulo de abertura para varredura pode ser determinado pelo operador, este é mostrado na parte superior direita da tela conforme a Figura 23. Para este teste foi delimitado uma faixa angular de 40° a 70°.

Figura 23: Indicação na tela e cursor do ângulo da varredura (Beam)

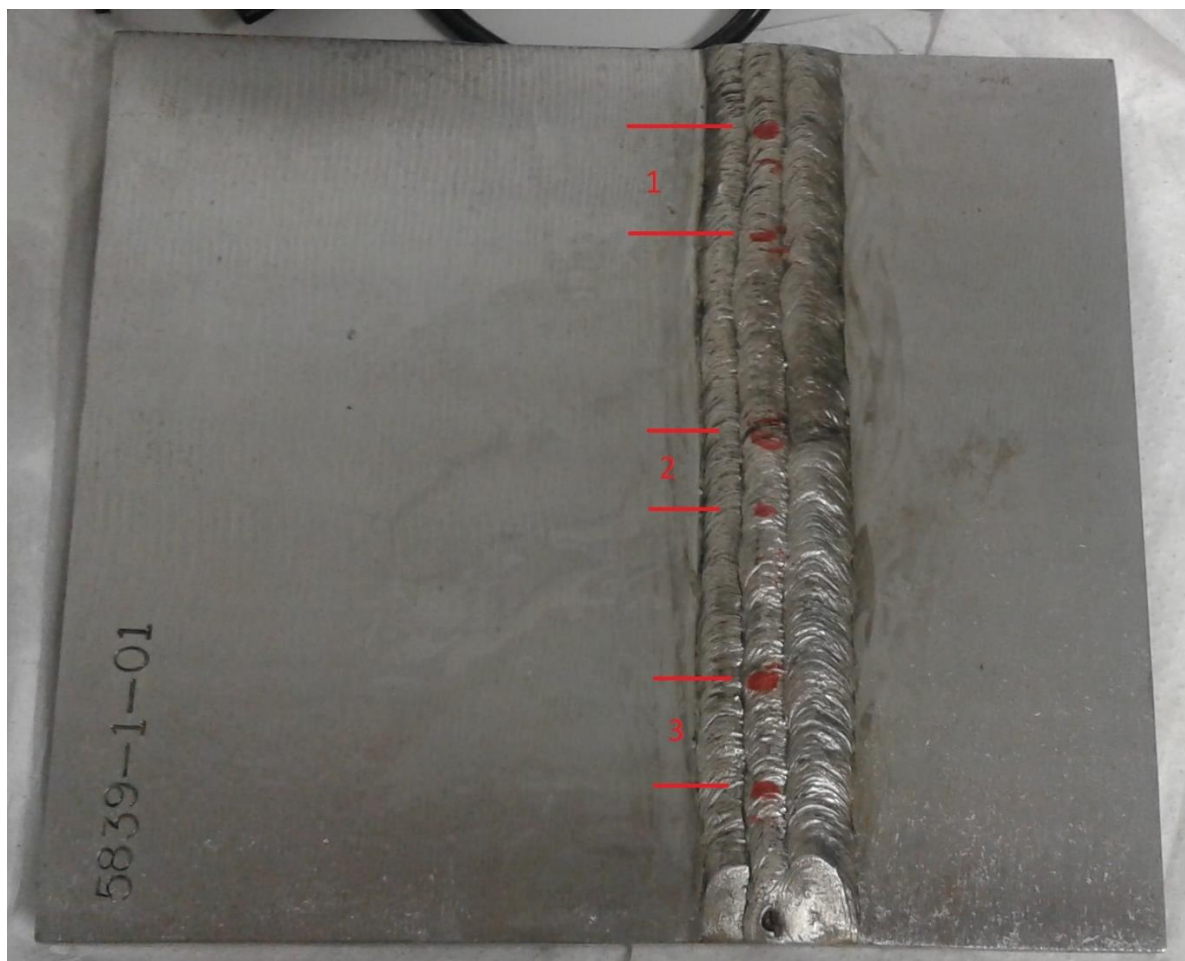


Fonte: Manual Phasor Array GE Inspection Technologies

Após realizar a inspeção longitudinalmente ao cordão de solda da peça e identificar a ocorrência de indicações, outras passagens são realizadas, procurando variar a distância ao cordão de solda. Sendo assim, possível assinalar os pontos onde as falhas se iniciam e onde estas se finalizam.

Já com todas as falhas previamente identificadas, demarcadas na peça inspecionada conforme mostra a Figura 24, estas falhas podem ser analisadas mais criteriosamente.

Figura 24: Indicações demarcadas na peça



Fonte: Autor

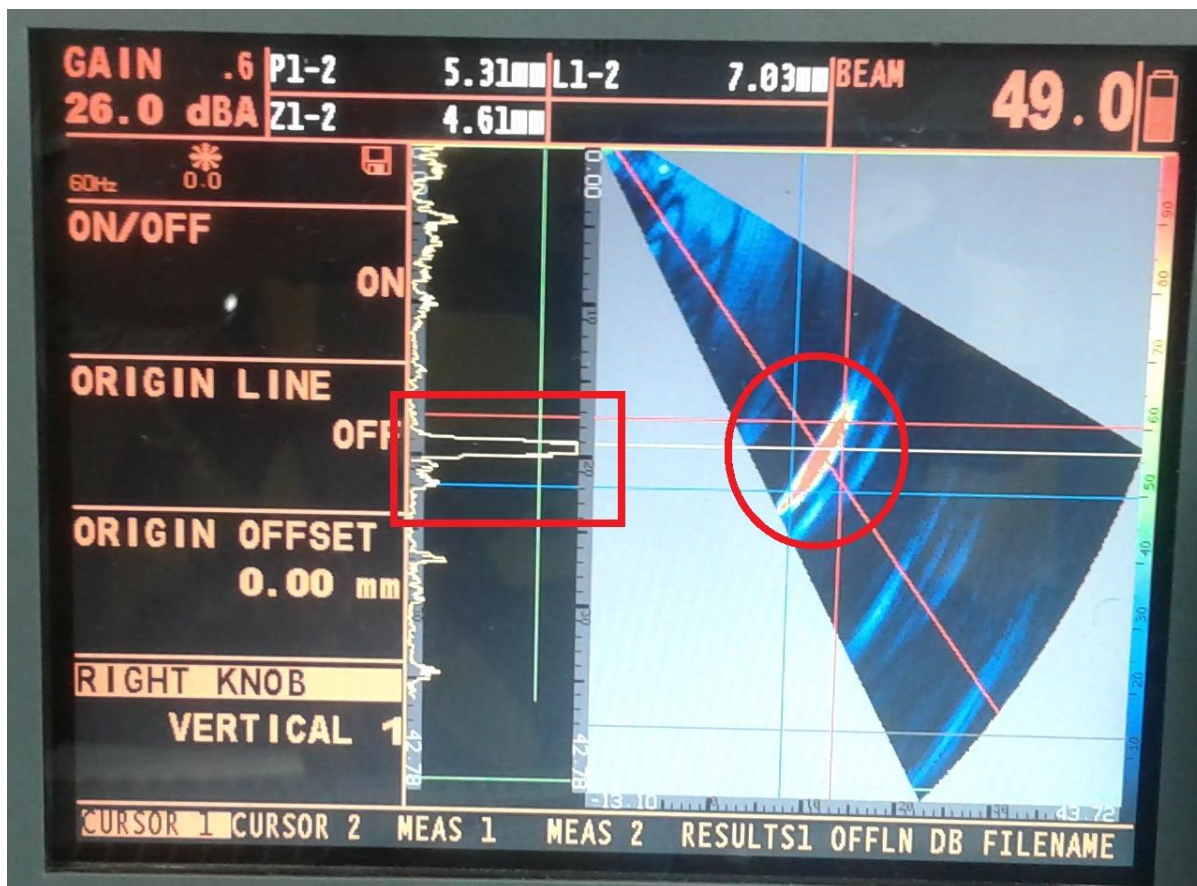
Nesta etapa, já com os limites das falhas demarcadas, é preciso ser cauteloso para verificar dentro das extremidades das indicações, onde estas apresentam as maiores variações em toda sua extensão, à medida que esta é visualizada na tela do equipamento.

Em sequência, já com as discontinuidades demarcadas e apontados seus pontos onde ocorrem as máximas dimensões, é possível realizar o congelamento da tela do aparelho, para que seja possível investigar as características da discontinuidade e também uma varredura da seção.

Na Figura 25, é mostrado a identificação de uma das discontinuidades presentes na peça, no ponto onde esta indicação apresenta sua maior dimensão. Nesta mesma figura, o modo de visualização da tela permite obter, a partir da varredura setorial da na área inspecionada, uma leitura do comportamento das ondas na direção apontada

pelo cursor de varredura da seção, podendo ser verificado um pico destacando-se, onde ocorre a descontinuidade.

Figura 25: Descontinuidade identificada e pico no sinal ondulatório



Fonte: Autor

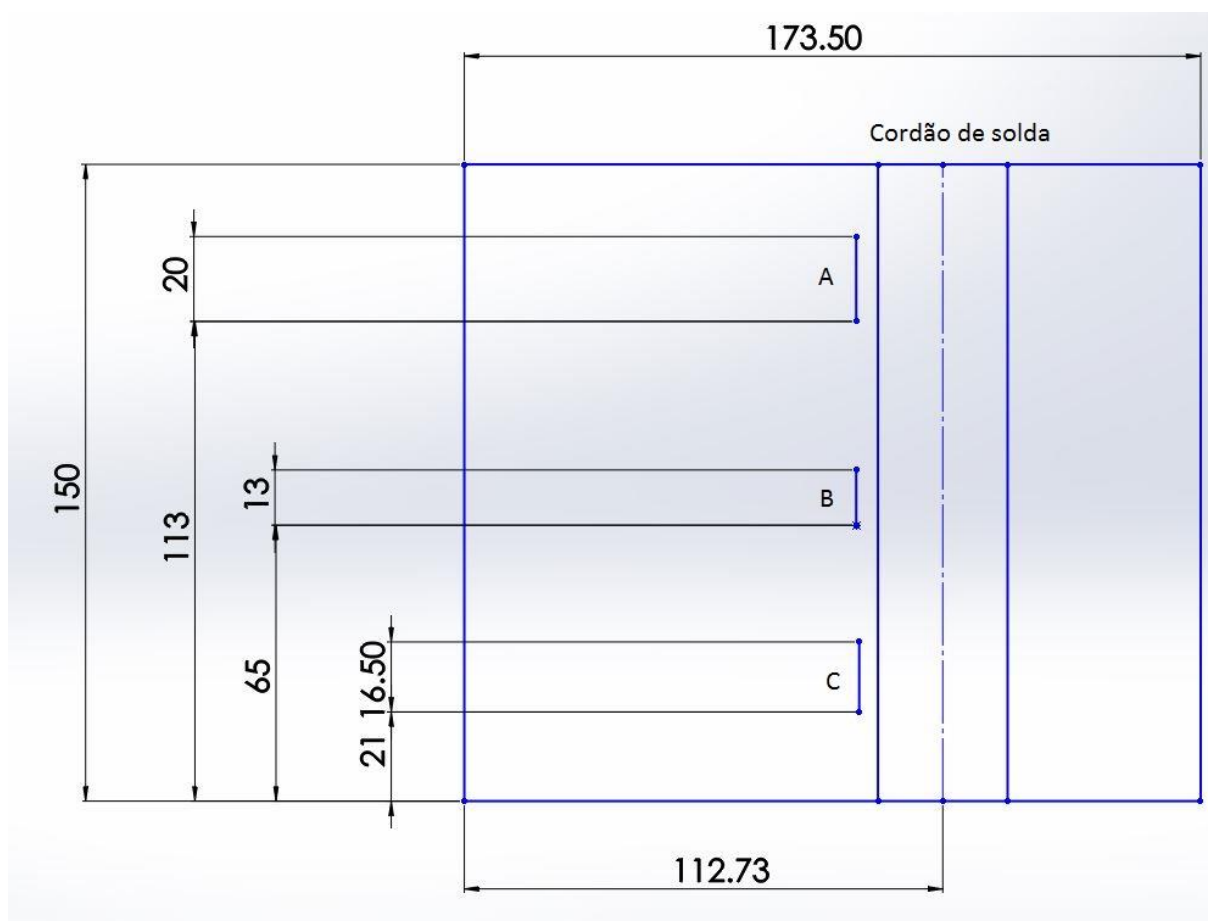
Continuando o procedimento de análise da amostra e, utilizando os recursos do equipamento, a profundidade de cada descontinuidade da amostra pôde ser aferida. Com o artifício do instrumento, que permite delimitar uma região a qual a descontinuidade se manifesta, também foi possível mensurar as distâncias entre os cursores horizontais e verticais, possibilitando limitar a falha a uma determinada área. Os resultados obtidos para as falhas da amostra de aço A-36 especificada anteriormente podem ser conferidos a seguir.

3.3 RESULTADOS OBTIDOS

Após realizar aferição na amostra descrita anteriormente utilizando o equipamento de ultrassom *Phasor Array*, foi conferida a existência de 3 descontinuidades relevantes (Figura 24). A primeira descontinuidade (A), tem uma de suas extremidades posicionadas a 113 mm da lateral da peça (Figura 26). Esta tem uma extensão de 20mm, e se encontra localizada a 6,68mm de profundidade da porção superior da peça. A profundidade da descontinuidade é indicada na tela do equipamento por L1-2 como pode ser visto na Figura 27.

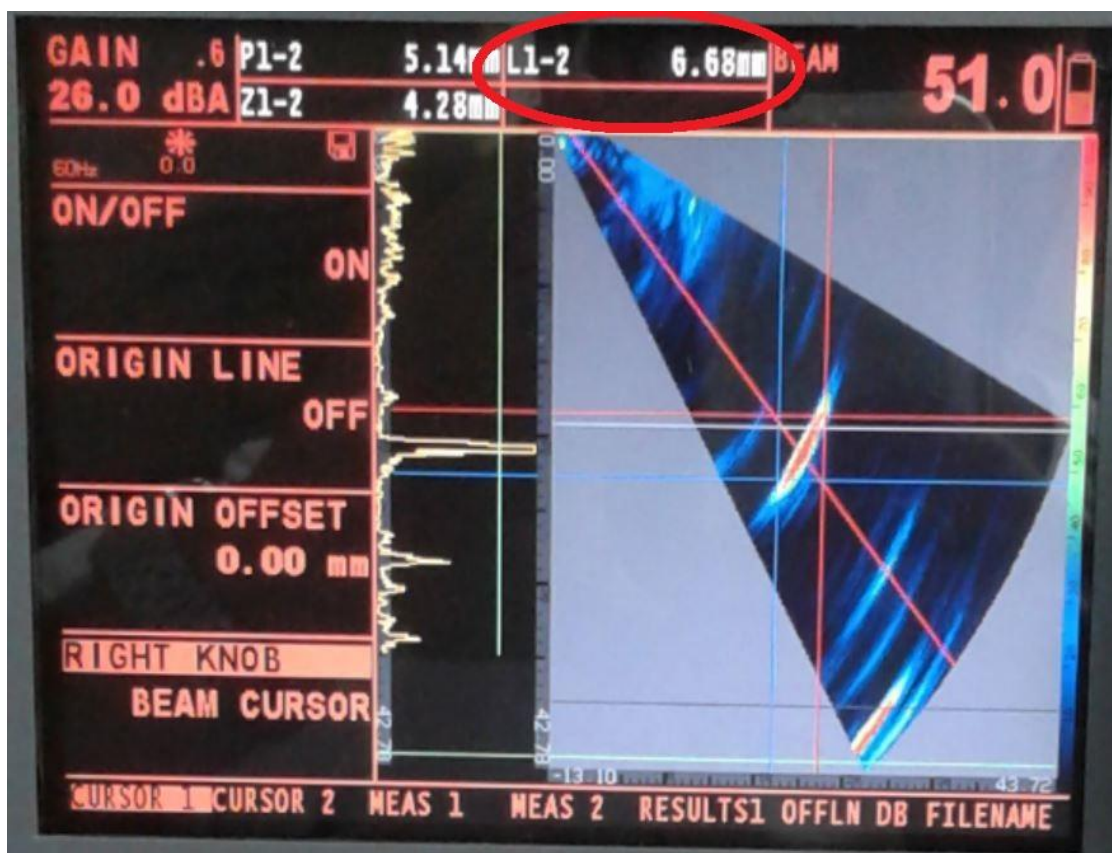
A segunda descontinuidade, denominada no esquema por B, se encontra a 65mm da porção inferior da peça e se estende por 13mm longitudinalmente ao cordão de solda, sua profundidade medida foi de 4,18mm como mostra a Figura 28.

Figura 26: Posição e dimensão das descontinuidades



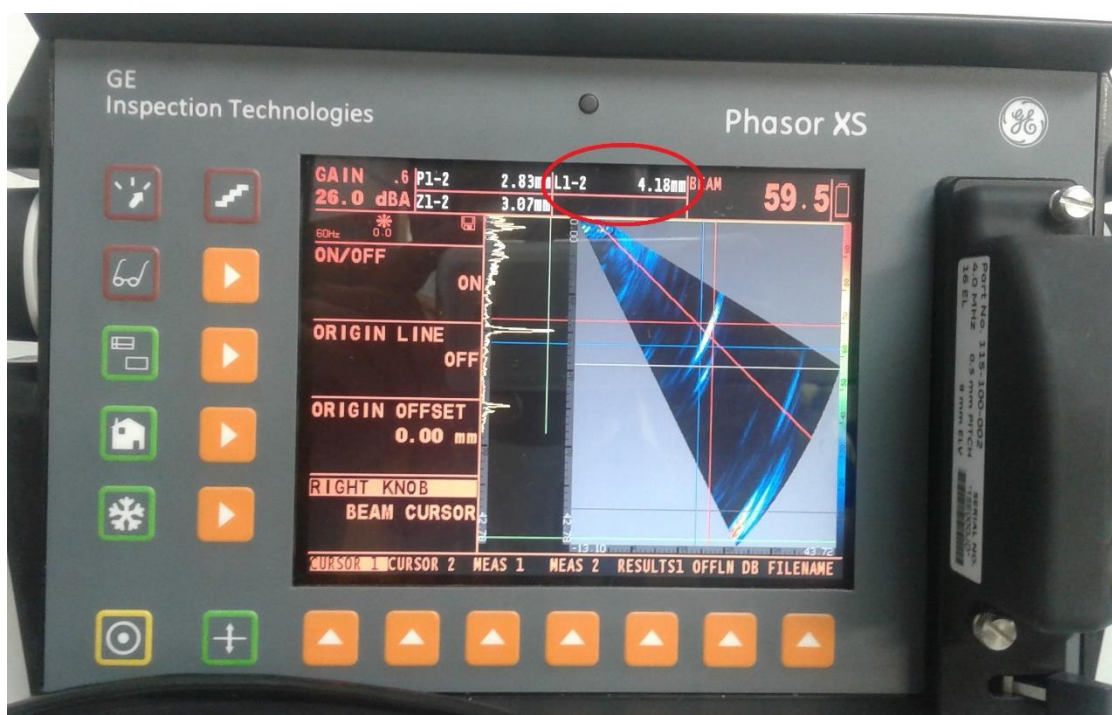
Fonte: Autor

Figura 27: Indicação na tela do PA da profundidade da descontinuidade A



Fonte: Autor

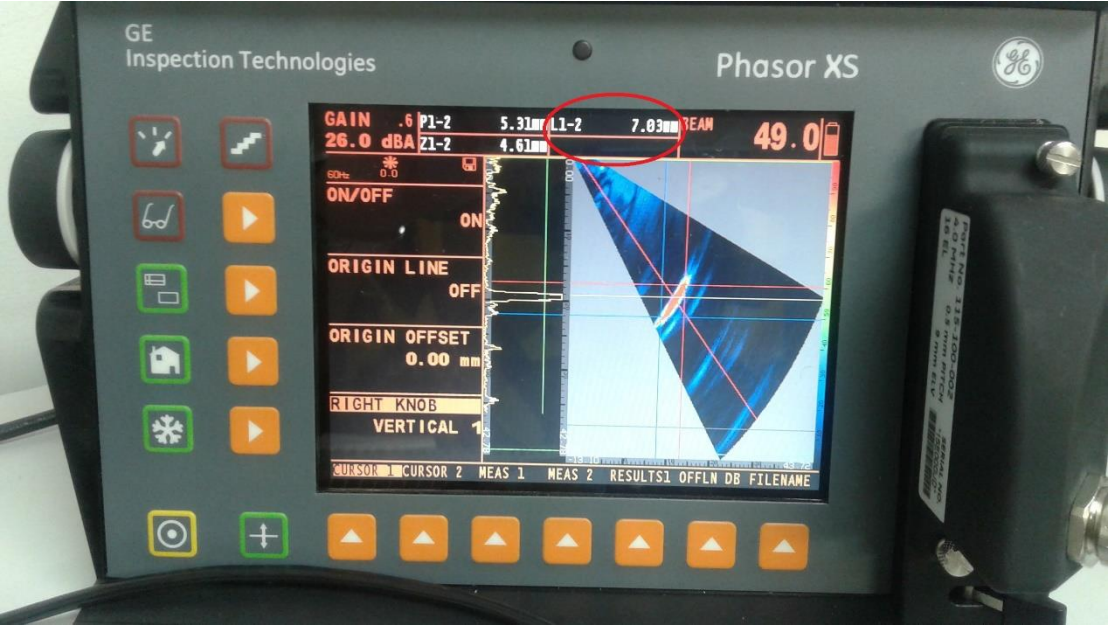
Figura 28: Indicação da falha B



Fonte: Autor

A descontinuidade C, como mostrada na Figura 26, se encontra 21mm distante da lateral da peça e possui uma largura de 16.5mm, sua profundidade medida foi de 7,03mm (Figura 29).

Figura 29: Inspeção da descontinuidade C



Fonte: Autor

As medições que aparecem na tela do equipamento classificadas como P1-2 e Z1-2, referem-se respectivamente a distância entre os cursores verticais e distância entre os cursores horizontais. Estes cursores são posicionados de forma a delimitar uma área de formato quadrado da indicação. Uma tabela exemplificando os dados obtidos referente a cada descontinuidade é mostrado a seguir.

Tabela 5: Medições feitas a partir do equipamento para cada descontinuidade

Descontinuidade	Distância da extremidade inferior da peça (mm)	L1-2 (mm)	P1-2 (mm)	Z1-2 (mm)	Comprimento da descontinuidade (mm)
A	113	6.68	5.14	4.28	20
B	65	4.18	2.83	3.07	13
C	21	7.03	5.31	4.61	16.5

Fonte: Autor

4.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As descontinuidades presentes na amostra eram esperadas, por se tratar de um bloco catalogado fornecido pelo fabricante para treinar, investigar e explorar as funções, características e diferentes técnicas proporcionadas por um equipamento de Ultrassom. Essas indicações advêm da falta de fusão do metal de adição durante o processo de soldagem, possivelmente tais falhas foram criadas propositalmente, e também por se tratar de um cordão de solda bastante espesso ($\pm 19\text{mm}$).

Em vista que a técnica de inspeção por ensaio não destrutivo com ultrassom já é algo bastante difundido na indústria, os altos custos para especialização, treinamento e também dos equipamentos para execução da técnica de inspeção inviabilizam expandir o conhecimento com facilidade. Uma vez que é feito o contato com a técnica, pode-se despertar maior interesse e consequentemente disseminar cada vez mais o conhecimento sobre este tipo de ensaio.

Ademais, verifica-se a eficiência da técnica por *Phasor Array*, propiciando a identificação de anomalias de forma consideravelmente rápida, por se tratar de uma inspeção feita por operadores que não obtiveram treinamento especializado a respeito do assunto.

6.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMINFAR, E.; MOHAMILÍMETROSADZADEH, S; FARAHPOUR, H. **Materials Evaluation**, *Ultrasonic Phased array technique in Rail for crack-line discontinuity detection*. 2015.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultrassom**, aplicação industrial, 2014.
- BOLTEN J., **Basics Phased array**, GE inspection technologies, 2014.
- CHARLES J. Hellier: **Handbook of Nondestructive Evaluation**, Second Edition. HISTORY, Chapter (McGraw-Hill Professional, 2013), AccessEngineering
- CONKLIN, B. **Ultrasonic testing lecture guide**, 2009.
- DAVIS M., **General procedure for ultrasonic examination using *phased array***, 2006.
- Evaluation**, *Ultrasonic Phased array technique in Rail for crack-line discontinuity detection*, v.73 n.3, 2015.
- GE Inspection Technologies, **Manual técnico do equipamento de ultrassom USN 60**, 2013.
- HABERMEHL J., LAMARRE A., ***Ultrasonic Phased Array tools for composite inspection during maintenance and manufacturing***. World Conference on Nondestructive Testing, 2008. Shangai, China
- HALLIDAY D., RESNICK R., WALTER J., Fundamentos da Física, 9º edição, 2012.
- HELLIER – Ultrasonic phased array level I and II , 2013.
- INDÚSTRIA SIDERÚRGICA - **Procedimento interno nº F 99.215** - Ensaio por ultrassom *phased array* em barras forjadas e laminadas. Revisão 2, 2014.
- MIRANDA, J., **Apostila - Conceitos básicos do ensaio por ultrassom**, p. 4-8, 2010
- MOORE H., ASNT **Continuing education in nondestructive testing**, Materials and processes for NDT technology, 2007.
- SANTIN, J., Ultrassom, Técnica e aplicação, pg 5-7, 93, 2003.
- Trombini, Mauricio -**Avaliação da técnica de ultrassom phased array para a otimização do controle de qualidade em aços laminados e forjados** / Mauricio Trombini. – Campinas, SP : [s.n.],2015.

NDT. Nondestructive Testing. NDT Research Center. <http://www.ndt-ed.org>

ZHILIANG BAI, SHILI CHEN, LECHENG JIA and ZHOUMO ZENG, ***Phased array ultrasonic signal compressive detection in Low-Pressure Turbine Disc***, *NDT and E International*, 2016.

Sites utilizados

www.olympus-ims.com

www.abendi.org.br

Apêndice A

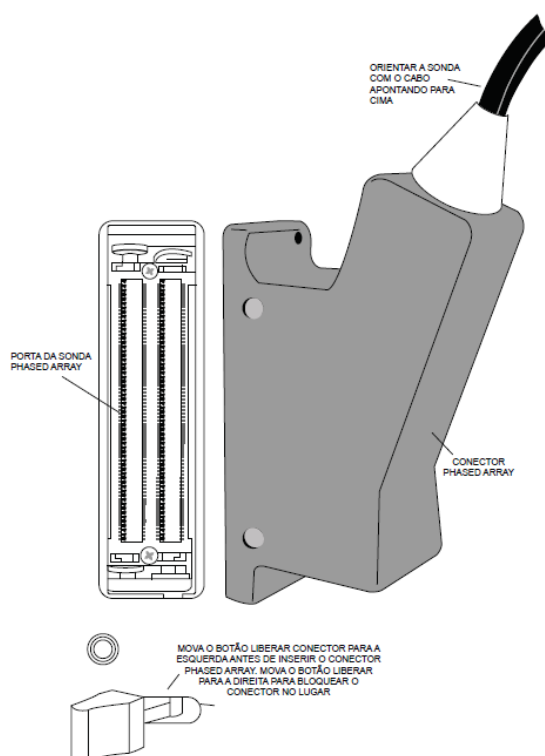
Plano de operação do Phasor Array XS GE 16/16

Este é um passo a passo básico simplificado para aprendizagem da configuração e operação do ultrassom *Phasor Array*.

1º passo: *Instalação de sonda e cunha, características da bateria.*

Com o equipamento desligado, deve ser feita a instalação da sonda *Phased Array*. Conecte a sonda à parte da frente do instrumento, certificando-se que a instale com o cabo da sonda apontando para cima, sem seguida mova a alavanca de liberação da sonda conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30: Acoplamento da sonda e alavanca de travamento.



Fonte: Manual GE Phasor Array XS

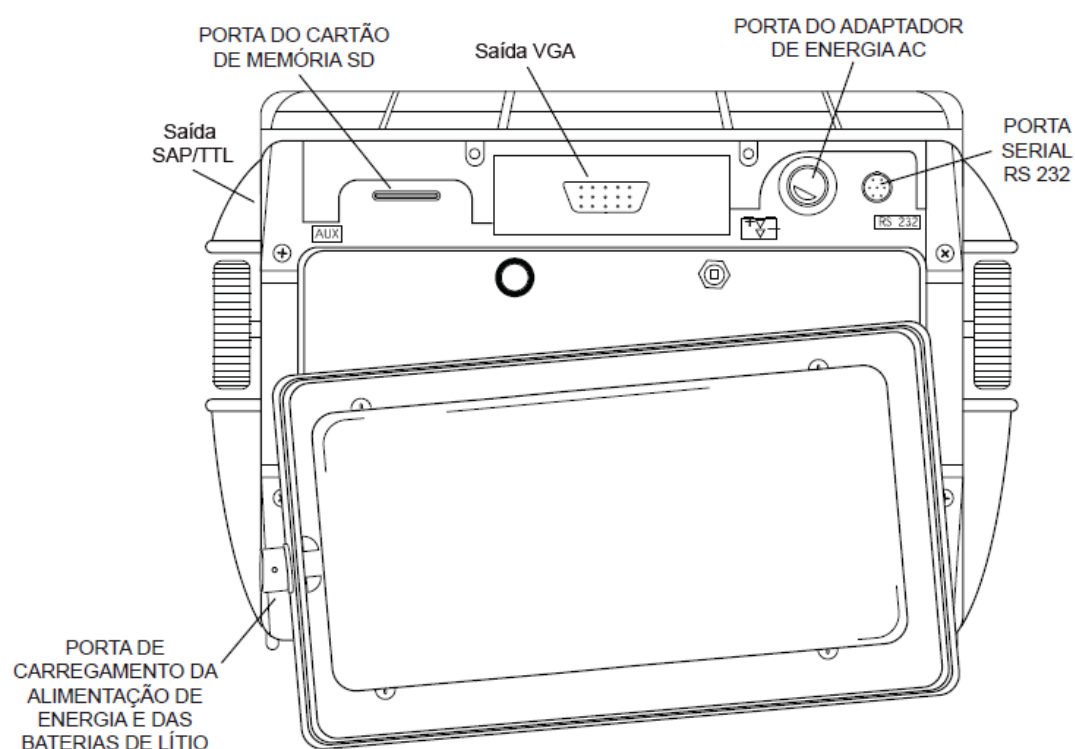
Caso a sonda *Phased Array* seja equipada como uma cunha, esta deve ser acoplada a extremidade da sonda, parafusando a cunha a sonda.

Após a instalação da sonda e, caso convenha ao operador, dependendo do tipo de inspeção, realizar o acoplamento também de uma cunha. Então o equipamento pode ser ligado, ressaltando que, o equipamento é portátil e equipado com uma bateria de Lítio (Figura 31), com durabilidade em torno de 4 h. Caso a bateria esteja baixa este deve ser ligado para recarga. E também, caso o equipamento desligar durante a

operação, por falta de bateria, quando ligado novamente, suas configurações são restauradas.

A figura a seguir mostra a parte traseira do equipamento demonstrando suas

Figura 31: Parte traseira do *Phasor Array*



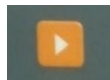
Fonte: Manual GE Phasor Array XS

2° Passo: *Ligando e desligando o equipamento*

Após instalação da sonda e cunha, pressionar o botão amarelo por 2s . Para desligar o mesmo botão é usado.

3° Passo: *Escolher o modo de operação Phasor Array*

Quando ligado, o equipamento permite escolher o modo de operação, neste caso

escolher o modo *Phasor Array*, pressionando a seta laranja  ao lado da opção.

4° Passo: Inserindo as configurações da sonda

As configurações da sonda devem ser inseridas para fazer a correspondência entre a sonda e o equipamento, e também, entre a cunha conectada (se equipada com uma). Os dados relacionados a uma sonda estão impressos em seu corpo e no conector (Figura 32). As funções relacionadas à sonda são acessadas via função PRB DATA e PRB GEO (Figura 33). Essas configurações devem ser ajustadas sempre que uma sonda *Phased Array* diferente for instalada. Todas as configurações relacionadas à sonda podem ser armazenadas em arquivo de conjunto de dados.

Figura 32: Sonda e suas características



Fonte: Autor

Figura 33: Funções



Fonte: Autor

Para inserir o código e número de série da sonda, primeiro ative o Submenu PROBE DATA, em seguida pressione ao lado de uma das seleções (CODE ou SERIAL NUMBER). Para alterar os dígitos conforme constam na sonda, gire o Botão de função (cursor rotativo do lado direito). Para que o próximo dígito fique ativo, gire o Botão de

ganho (cursor rotativo do lado esquerdo). Para uma sonda que se comunica com o equipamento essa configuração se faz automaticamente.

Para definir a geometria da sonda (PRB GEO, PRB FREQ, NUM ELEMENTS, PITCH) ative o Submenu PRB GEO (localizado no Menu PROBE). As seleções aparecerão ao longo do lado esquerdo do display. Pressione ao lado de uma das seleções (FREQUENCY, NUM ELEMENT, PITCH). Para alterar o valor exibido gire o botão de função. As seguintes configurações ficarão disponíveis:

(Para a sonda disponível no Labsolda-UFES)

FREQUENCY - 4 MHz

NUMBER OF ELEMENTS - 16.

PITCH (distância entre os centros de dois elementos adjacentes – 9 mm.

5° Passo: *Inserindo código e número de série da cunha*

Se a sonda *Phased Array* conectada estiver equipada com uma cunha, as configurações relacionadas à cunha deverão ser inseridas acessando o Menu PROBE. Essas configurações devem ser ajustadas sempre que uma cunha diferente for conectada. A maior parte dos dados relacionados à cunha está impressa na sua superfície.

Para inserção do código e número de série da cunha (PROBE-WDGE DAT-PART ou SERIAL NUMBER) ative o Submenu WDGE DAT (localizado no Menu PROBE) pressionando abaixo dele. Em seguida pressione ao lado de uma das seleções (PART NUMBER ou SERIAL NUMBER) duas vezes. O cursor se acende no espaço do primeiro dígito. Para alterar o valor do dígito ativo do código ou número de série (para coincidir com o valor impresso na lateral do conector da sonda), gire o Botão de função. Para que o próximo dígito fique ativo, gire o Botão de ganho. Para concluir o processo de inserção de PART ou SERIAL NUMBER pressione novamente o botão



6° Passo: *Definindo a geometria da cunha (PROBE-WDGE, GEO-VELOCITY, OFFSET Z, ANGLE)*

Ative o Submenu WDGE GEO (localizado no Menu PROBE). As opções irão aparecer ao longo do lado esquerdo do display. Em seguida pressione ao lado de uma das

seleções (VELOCITY, OFFSET Z, ANGLE). Para alterar o valor exibido (para coincidir com o impresso na cunha), gire o botão de função. Você irá observar que as seguintes configurações ficarão disponíveis

VELOCITY – Insira em microssegundos para coincidir com a velocidade sônica através do material da cunha.

OFFSET Z – Insira em pol. / mm (deve ser definido como 0 quando não existir cunha instalada) para ser igual a dimensão medida pelo usuário desde a superfície da cunha em contato com a peça em teste até o Ponto de Índice da sonda.

ANGLE – de 0,0 a 90 graus para coincidir com o ângulo da cunha medido pelo usuário.

7° Passo: *Inserção das propriedades da peça em teste*

Para determinar corretamente a localização física em que um refletor ocorre, o tipo de material e a espessura da peça em teste (indicando as velocidades de cisalhamento e longitudinal sônicas na peça em teste) devem ser inseridos. Esses parâmetros afetam diretamente a faixa exibida e os valores de acionamento calculados.

Para inserção da espessura da peça (PART-PLAN-MAT THICKNESS). Primeiro ative o Submenu PLAN (localizado no Menu PART) pressionando abaixo dele. Pressione ao lado da seleção MAT THICKNESS. Gire o Botão de função para alterar a espessura para coincidir com a peça em teste.

Para especificar o tipo de material da peça (PART-PLAN-MATERIAL) primeiro ative o Submenu PLAN (localizado no Menu PART) pressionando abaixo dele. Em seguida pressione ao lado da seleção MATERIAL. Gire o Botão de função ou continue a pressionar até que o tipo de material listado coincida com a peça em teste. As velocidades acústicas longitudinal e de cisalhamento irão definir o valor médio do tipo de material exibido.

8° Passo: *Definição dos parâmetros de varredura*

OBSERVAÇÃO: Quando for modificado determinadas configurações relacionadas à sonda, à peça inspecionada, à varredura será necessário recalcular as leis de atraso. Quando é feita uma alteração como essa, a função modificada ficará vermelha, indicando que o efeito dessa alteração não entrará em vigor até que o novo cálculo da lei de atraso seja feito. Para comandar um cálculo, pressione e mantenha

pressionada a tecla Home, durante três segundos ou acesse o SCAN PATT submenu, e pressione o botão ao lado da função CALC.

Configuração do atraso da sonda - A configuração do atraso da sonda representa o atraso de tempo causado pelo caminho da onda sonora através da placa de desgaste, da membrana, da linha de atraso ou da cunha de uma sonda. A configuração do valor do atraso da sonda é parte do processo de calibração.

Na operação no modo Phased Array, a sequência e o padrão em que os elementos da sonda disparam são definidos pelos parâmetros de varredura (Menu SCAN). Esta seção descreve o processo de configuração desses parâmetros e o efeito dessas configurações na função do instrumento. Os seguintes parâmetros de varredura estão descritos mais detalhadamente abaixo:

TIPO VARR LINEAR – Disparo controlado de vários elementos a um ângulo constante

TIPO VARR SETOR – Grupos de elementos de tamanho constante (referidos como representando uma “abertura” constante) são disparados em ângulos variados

PONTO FOCAL – Profundidade na peça na qual o *Phased Array* focaliza. Essa profundidade representa uma área de interesse. Pode ser ajustado para NÃO FOCADO (mantendo pressionada durante aproximadamente três segundos) para aplicações *Phased Array* típicas

9º Passo: *Configurações do pulsador e do receptor para a operação Phased Array*

Configuração do nível de tensão do pulsador (UT-PULSER-VOLTAGE) - A energia relativa com a qual o pulsador dispara é ajustada alterando a configuração VOLTAGE. Para ajustar o nível de tensão do pulsador primeiro ative o Submenu PULSER (localizado no menu UT) pressionando abaixo dele. As funções aparecerão do lado esquerdo da tela do display. Em seguida pressione ao lado da função VOLTAGE, observe que o nível de tensão do pulsador pode ser configurado para ficar entre 50 e 150 volts girando o botão de função. A tensão do pulsador será ajustada para o valor requerido.

Seleção da largura do pulsador (UT-PULSER-WIDTH): A largura do pulsador (PULSE WIDTH) normalmente varia de 40 a 1000 nanossegundos. Um ponto de início recomendado a partir do qual a configuração da largura pode ser ajustada é encontrado usando a seguinte equação:

$$PULSE\ WIDTH = \frac{1000\ ns}{2f} \text{ (com } f \text{ em MHz)}$$

Por exemplo, para o caso da sonda que acompanha o Phasor presente no Labsolda-UFES (4 MHz) teremos:

$$PULSE\ WIDTH = \frac{1000\ ns}{2 \times 4} = 125\ ns$$

Especificação da frequência do receptor (UT-RECEIVER-FREQUENCY) - Selecionar conforme necessário: 2/ 3/ 4/ 5 MHz, de acordo com a sonda.

10° Passo: *Configurações dos Gates para operação Phased Array*

Os sinais que atravessam um gate são avaliados para fins de detecção de defeitos e de espessura do material. Quando o sinal atravessa o gate A ou B, é usado para fins de avaliação o ponto de cruzamento do gate (flanco) ou o ponto máximo (pico) do sinal (no gate específico).

A posição do gate tem os seguintes efeitos no desempenho do instrumento:

- O gate IF fornece um ponto de referência a partir do qual os outros gates são posicionados, e fornece uma referência a partir da qual os dados exibidos podem ser posicionados. Nenhum dado é coletado do triggering do gate IF. A faixa de valores que pode ser inserida para o ponto de início e para a largura do gate IF é influenciada pelo parâmetro Z acessado pelo Submenu PROBE GEO, encontrado no Menu PROBE.
- O A-scan exibe as amplitudes do eco como função da distância para todas as ondas sonoras refletidas. Quando o gate é movido para baixo, a área com gate representa uma região mais profunda no material de teste.
- Um gate mais largo irá simplesmente cobrir o equivalente a mais de profundidade do material de teste.
- Aumentar o limite de um gate significa que somente sinais refletidos com amplitude suficientemente grande irão atravessar o gate.

Configuração de um ponto de início de gate (UT-GATE POS-GATE START): Primeiro ative o Submenu POS GATE (localizado no Menu UT). Selecione o gate a ser posicionado usando a função SELEC GATE. A cor dos valores do bloco de funções coincide com a cor do gate correspondente. Selecione a função INÍCIO GATE e ajuste

o ponto de início girando o Botão de função. Aumentar e diminuir o valor do ponto de início move o gate (na visualização A-scan) para a direita e esquerda, respectivamente. O ponto de início do gate permanecerá como configurado, mesmo quando forem feitos ajustes de largura.

Ajuste da largura de um gate (UT-GATE POS-GATE WIDTH): Primeiro ative o Submenu POS GATE (localizado no Menu UT). Em seguida selecione o gate a ser posicionado usando a função SELEC GATE. Na sequência selecione a função LARG GATE e ajuste girando o Botão de função.

11° Passo: *Configurações do ganho*

Os ganhos analógico e digital, que aumentam e diminuem a amplitude dos sinais do A-scan, são ajustados com o Botão rotativo de ganho (lado esquerdo do instrumento).

O ganho digital pode ser adicionado a até 40 dB de ganho analógico. Esse ganho é acessado por uma ação de pressionar e manter pressionada a tecla de passo do ganho. O ganho digital permite que o usuário avalie sinais em uma amplitude mais alta ou mais baixa no modo congelar.

Alteração do incremento do ajuste do ganho (PASSO dB): Para ajustar o, cada clique do botão de ganho aumenta ou diminui o nível do ganho em um incremento de dB igual ao PASSO dB. Diversos valores podem ser especificados para PASSO dB, inclusive um BLOQ do Botão de ganho, que impede qualquer ajuste do ganho.

Para selecionar um dos valores existentes de PASSO dB:

Passo 1: Pressione a tecla a seguir



.Passo 2: Observe que o valor do PASSO dB (incremento do ajuste do ganho) altera à medida que você continua a pressionar . Os incrementos disponíveis incluem:

0,1dB, 0,2 dB, 0,5 dB, 1,0 dB, 2,0 dB, 6 dB e BLOQ.

Passo 3: Depois do valor de PASSO dB ser selecionado, cada clique do Botão de ganho irá aumentar ou diminuir o ganho do instrumento do incremento de PASSO dB.

12° Passo: *Operação no modo congelar*

Durante a operação no modo Phased Array, o display pode ser congelado pressionando temporariamente a tecla  (mantendo pressionado o botão durante

três segundos irá armazenar automaticamente um conjunto de dados ou gerar um relatório conforme chamado pela AÇÃO selecionada no Submenu FILE NAME.

Os recursos do Menu Congelar incluem:

CURSOR 1—Opera um cursor horizontal com o Botão de ganho e um cursor vertical ou de feixe com o Botão de função. Ele também permite que o usuário exiba uma LINHA ORIG (ORIGIN LINE) correspondente às distâncias WEDGE FRONT mais ORIGIN OFFSET (se houver) para representar local-alvo definido pelo usuário.

CURSOR 2—Opera um segundo cursor horizontal (com código de cor) com o Botão de ganho e um cursor vertical ou de feixe com o Botão de função. Esse menu também permite que o usuário exiba uma ORIGIN LINE correspondente às distâncias WEDGE FRONT mais OFFSET ORIGIN (se houver) para representar o local-alvo definido pelo usuário.

MEDIÇ 1 e MEDIÇ 2—Selecionar até quatro opções de READING (cada) que correspondem ao ponto definido pela interseção dos componentes horizontais e verticais do CURSOR 1 e do CURSOR 2.

- SBM1—Medição do caminho sônico a partir do FEIXE selecionado no ponto de cruzamento com o cursor 1 horizontal.

- Z1—profundidade vertical não corrigida do cursor horizontal.

- L1-2—Distância em linha reta desde a interseção do cursor 1 até a interseção do cursor 2.

- P1—Distância horizontal projetada desde a linha de origem até a interseção do cursor 1.

- AMP1—Amplitude do ponto de imagem na interseção

- P1-2—Distância horizontal projetada absoluta desde o cursor 1 vertical até o cursor 2 vertical.

- Z1-2—Distância não corrigida desde o cursor 1 horizontal até o cursor 2 horizontal.

- Z2—Profundidade vertical não corrigida até o cursor 2.

- P2—Distância horizontal projetada desde a linha de origem até o cursor 2 Vertical na interseção do cursor 2.
- SBM2—Medição do caminho sônico do feixe selecionado na interseção do cursor 2 horizontal.
- RESULTS1—Exibir as quatro LEITURAS que estavam em operação antes do congelamento do display.
- DB OFFLN—Altera o ganho que é aplicado ao display congelado. O valor do ganho off-line (em dB) que é aplicado à imagem congelada fica indicado na barra de ícones, logo abaixo do ícone congelar. O ganho off-line é removido quando o display é descongelado.
- NOME ARQ—Iniciar o processo de nomeação de conjunto de dados (ou de geração de relatório).

Após essas configurações, o equipamento estará apto a ser operado no modo *Phased Array*.