

Aplicação Industrial

ENSAIO POR ULTRASSOM

Ed. Jul./2022

AUTOR: Ricardo Andreucci

apoio



US

Prefácio

“Este trabalho representa um guia básico para programas de estudos e treinamento de pessoal em Ensaio por Ultrassom, contendo assuntos voltados para as aplicações mais comuns e importantes deste método de Ensaio Não Destrutivo. Trata-se, portanto, de um material didático de interesse e consulta, para os profissionais e estudantes que se iniciam ou estejam envolvidos com a inspeção de materiais por este método de ensaio.”

O Autor



Copyright ©

*Esta publicação poderá ser obtida gratuitamente através de
downloading nos seguintes web sites:*

www.abendi.org.br
biblioteca@abendi.org.br

Edição:

Jul./ 2022

Ricardo Andreucci

- Professor da Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC/ SP, nas disciplinas de Controle da Qualidade do Curso de Soldagem.
 - Qualificado e Certificado pelo IBQN como Nível III nos métodos de ensaio radiográfico, partículas magnéticas ultrassom e líquidos penetrantes, conforme norma CNEN-NN 7.01
 - Qualificado e Certificado pelo IBQN como profissional Nível III em END nos métodos de ultrassom, partículas magnéticas, líquidos penetrantes e radiografia.
 - Qualificado e Certificado pelo SNQC como Nível III no ensaio Visual e Radiografia – Nr. 0154
 - Membro da Comissão de Segurança e Radioproteção da Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos - ABENDI.
 - Diretor Técnico da ANDREUCCI Assessoria e Serv. Técnicos Ltda.
 - Consultor Técnico como Nível III de END para importantes empresas brasileiras e do exterior
 - Participante como Autor do livro "Soldagem" editado pelo SENAI / SP
 - Autor do Livro "Curso Básico de Proteção Radiológica" - ABENDI / SP
 - Autor do livro "Radiologia industrial"- ABENDI / SP
 - Autor do livro "Ensaio por Partículas Magnéticas"- ABENDI /SP
 - Autor do livro "Ensaio por Líquidos Penetrantes"; ABENDI/SP
-

Sumário

Assunto	Pág.
Princípios básicos do método.....	04
Limitações em comparação com outros ensaios.....	06
Vibrações mecânicas	08
Definições de Bell, e Decibel, Ganho.....	13
Propagação das ondas acústicas no material.....	14
Geração das ondas ultrassônicas, Transdutores industriais.....	19
Impedância Acústica Interface, Acoplantes.....	25
Diagramas AVG ou DGS	27
Técnicas de Inspeção.....	31
O aparelho de ultrassom	35
Formas de Representação na Tela dos Aparelhos	51
Entendendo a tecnologia TOFD	58
Procedimentos específicos de Inspeção	64
Avaliação e critérios de aceitação.....	82
Inspeção por Ultrassom em Alturas usando Drones.....	85
Questões para Estudo	88
Gabarito das Questões	106
Obras consultadas.....	107

P rincipios Básicos do Método

Introdução:

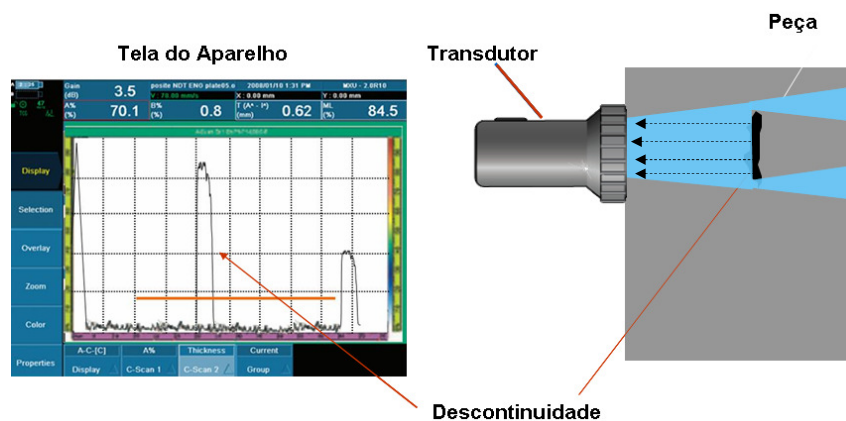
Sons extremamente graves ou agudos, podem passar despercebidos pelo aparelho auditivo humano, não por deficiência deste, mas por caracterizarem vibrações com frequências muito baixas, até 20Hz (infrassom) ou com frequências muito altas acima de 20 kHz (ultrassom), ambas inaudíveis.

Como sabemos, os sons produzidos em um ambiente qualquer, refletem-se ou reverberam nas paredes que consistem no mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes.

Fenômenos como este apesar de simples e serem freqüentes em nossa vida cotidiana, constituem os fundamentos do ensaio ultrassônico de materiais.

No passado, testes de eixos ferroviários, ou mesmos sinos, eram executados através de testes com martelo, em que o som produzido pela peça, denunciava a presença de rachaduras ou trincas grosseiras pelo som característico.

Assim como uma onda sonora, reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultrassônica ao percorrer um meio elástico, que pode ser um metal, plástico, concreto, etc... refletirá da mesma forma, ao incidir numa descontinuidade ou falha interna neste meio considerado. Através de aparelhos especiais, detectamos as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades. No exemplo abaixo, o feixe sônico do transdutor, incidiu na falha ocorrendo uma reflexão captada pelo mesmo transdutor, enviando o sinal ao aparelho, mostrado na tela em forma de um pulso ou eco.



Princípio Básico da Inspeção de Materiais por ultrassom

Finalidade do Ensaio

O ensaio por ultrassom, caracteriza-se num método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou discontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos.

Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinada como por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro-trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros.

Portanto, o exame ultrassônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades.



Inspeção por ultrassom da chapa de um tubo

Campo de Aplicação

Em 1929 o cientista Sokolov, fazia as primeiras aplicações da energia sônica para atravessar materiais metálicos, enquanto 1942 Firestone, utilizaria o princípio da ecosonda ou ecobatímetro, para exames de materiais. Somente em 1945 o ensaio ultrassônico iniciou sua caminhada em escala industrial, impulsionado pelas necessidades e responsabilidades cada vez maiores. Hoje, na moderna indústria, principalmente nas áreas de caldeiraria e estruturas marítimas, o exame ultrassônico, constitui uma ferramenta indispensável para garantia da qualidade de peças de grandes espessuras, geometria complexa de juntas soldadas, chapas. Na maioria dos casos, os ensaios são aplicados em aços-carbonos, em menor porcentagem em aços inoxidáveis. Materiais não ferrosos são difíceis de serem examinados, e requerem procedimentos especiais.

Limitações em Comparação com outros Ensaios

Assim como todo ensaio não-destrutivo, o ensaio ultrassônico, possui vantagens e limitações nas aplicações, como segue:

Vantagens em relação a outros ensaios:

- O método ultrassônico possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas especialmente trincas, muitas vezes de difícil detecção por radiografia;
- Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção;
- 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 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.
- Em certas aplicações, o método por ultrassom pode ser mecanizado, o que garante a reprodutibilidade dos resultados do ensaio.

Limitações em relação a outros ensaios.

- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor.
- O registro permanente do ensaio não é facilmente obtido, apenas em sistemas computadorizados;
- Faixas de espessuras muito finas, constituem uma dificuldade para aplicação do método;
- Requer o preparo da superfície para sua aplicação;
- Nos ensaios convencionais, é frequente a insegurança do inspetor quanto à identificação da indicação detectada na tela do aparelho (ver exemplo adiante)

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.

O ensaio ultrassônico concorre diretamente com o ensaio radiográfico em razão de ambos detectarem descontinuidades internas nos materiais. Entretanto, a imagem radiográfica das descontinuidades apresentadas no material é sempre mais confiável e fácil de ser interpretada quanto comparada à indicação mostrada na tela do aparelho de ultrassom, que nem sempre é possível afirmar com certeza o tipo da descontinuidade detectada, e por esta razão que alguns Códigos de construção prioriza o ensaio radiográfico em detrimento do ultrassom. Como exemplo podemos citar o Código ASME², que desde o projeto do equipamento a ser fabricado já determina o seu grau de ensaio radiográfico requerido. Com o desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas digitais de ultrassom o referido Código permite a substituição do ensaio radiográfico pelo ultrassom, desde que este seja totalmente mecanizado, e com registro digital.

A partir deste exemplo abaixo, podemos visualizar facilmente a descontinuidade da solda na imagem radiográfica, no entanto esta se torna mais complicada de ser visualizada na tela do aparelho de ultrassom.

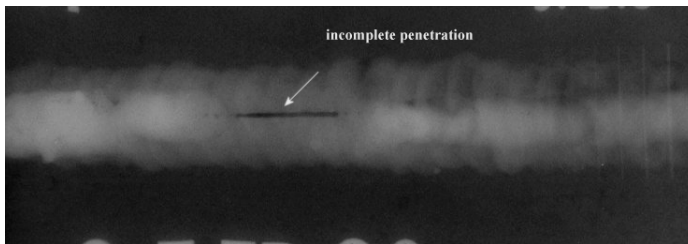
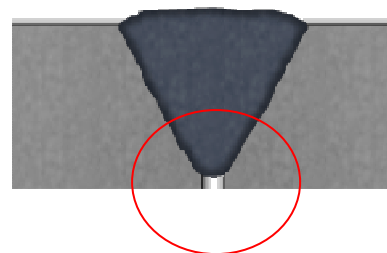
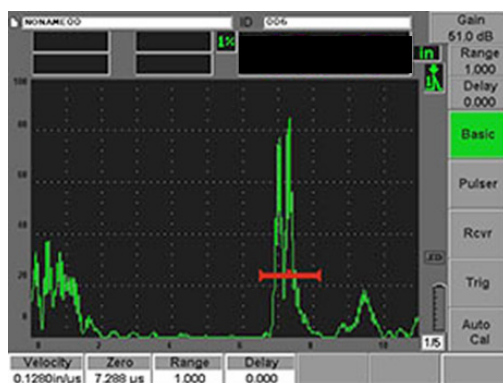


Imagem radiográfica da falta de penetração da solda abaixo.



Indicação típica de ultrassom convencional na tela do aparelho resultante da falta de penetração da solda

²O Código de fabricação de vasos de pressão, ASME-American Society of Mechanical Engineers, desde 1915 é um dos mais importantes no mundo, dada sua confiabilidade e segurança de operação de equipamentos industriais pressurizados. Veja em www.asme.org

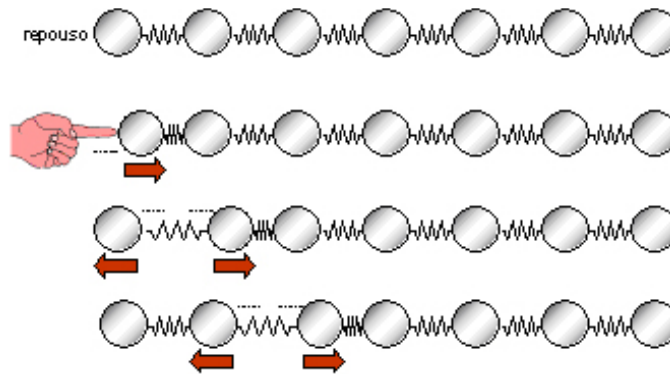
Vibrações Mecânicas

Tipos de Ondas:

Como já vimos, o teste ultrassônico de materiais é feito com o uso de ondas mecânicas ou acústicas propagadas no meio em inspeção, ao contrário da técnica radiográfica, que usa ondas eletromagnéticas ou radiação ionizante. Qualquer onda mecânica é composta de oscilações de partículas discretas no meio em que se propaga. A passagem de energia acústica no meio faz com que as partículas que compõem o mesmo, execute o movimento de oscilação em torno na posição de equilíbrio, cuja amplitude do movimento será diminuída com o tempo em decorrência da perda de energia adquirida pela onda. Se assumirmos que o meio em estudo é elástico, ou seja que as partículas que o compõem rigidamente ligadas, mas que podem oscilar em qualquer direção, então podemos classificar as ondas acústicas em quatro tipos:

Ondas longitudinais (Ondas de compressão):

São ondas cujas partículas oscilam na direção de propagação da onda, podendo ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases.



Onda longitudinal

No desenho acima nota-se que o primeiro plano de partículas vibra e transfere sua energia cinética para os próximos planos de partículas, e passam a oscilar. Desta maneira, todo o meio elástico vibra na mesma direção de propagação da onda (longitudinal), e aparecerá “zonas de compressão” e “zonas diluídas”. As distâncias entre duas zonas de compressão determinam o comprimento de onda (λ).

Em decorrência do processo de propagação, este tipo de onda possui uma alta velocidade de propagação que é característica do meio.

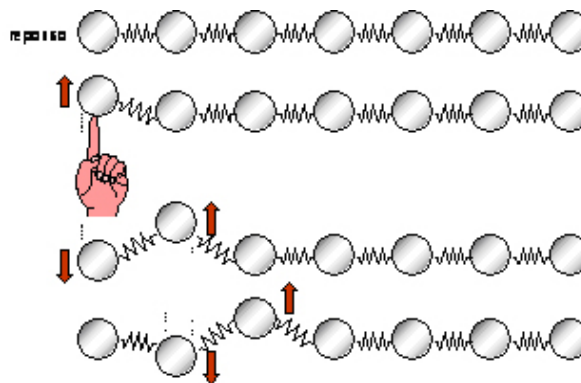
Velocidades de Propagação das Ondas Longitudinais

Material	Velocidade m/s
Ar	330
Alumínio	6300
Cobre	4700
Ouro	3200
Aço	5900
Aço inoxidável	5800
Nylon	2600
Óleo (SAE30)	1700
Água	1480
Prata	3600
Titânio	6100
Níquel	5600
Tungstênio	5200
Magnésio	5.800
Acrílico	2.700
Aço Inoxidável	5.800
Aço Fundido	4.800

Fonte: Ultrasonic Testing, Krautkramer

Ondas transversais (ou ondas de cisalhamento):

Uma onda transversal é definida, quando as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação. Neste caso, observamos que os planos de partículas, mantêm-se na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente.



Onda transversal

As partículas oscilam na direção transversal a direção de propagação, podendo ser transmitidas somente a sólidos. As ondas transversais são praticamente incapazes de se propagarem nos líquidos e gases, pelas características das ligações entre partículas, destes meios. O comprimento de onda é a distância entre dois “vales” ou dois “picos”.

Velocidades de Propagação das Ondas Transversais

Material	Velocidade m/s
Ar	-
Alumínio	3100
Cobre	2300
Acrílico	1100
Alumínio	3100
Ouro	1200
Aço	3200
Aço Inoxidável	3100
Aço Fundido	2400
Nylon	1100
Óleo (SAE30)	-
Água	-
Prata	1600
Titânio	3100
Níquel	3000
Magnésio	3000

Fonte: Ultrasonic Testing, Krautkramer

Ondas superficiais ou Ondas de Rayleigh.

São assim chamadas, pelas características de se propagar na superfície dos sólidos. Devido ao complexo movimento oscilatório das partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial entre duas fases diferentes é de aproximadamente 10% inferior que a de uma onda transversal.

Para o tipo de onda superficial que não possui a componente normal, portanto se propaga em movimento paralelo a superfície e transversal em relação a direção de propagação recebe a denominação de ondas de “Love”.

Sua aplicação se restringe ao exame de finas camadas de material que recobrem outros materiais.

Para ondas superficiais que se propagam com comprimento de onda próxima a espessura da chapa ensaiada, neste caso a inspeção não se restringe somente a superfície, mas todo o material e para esta particularidade denominamos as ondas de “Lamb”.

As ondas de “Lamb” podem ser geradas a partir das ondas longitudinais incidindo segundo um ângulo de inclinação em relação a chapa. A relação entre o ângulo e velocidade é feita pela relação:

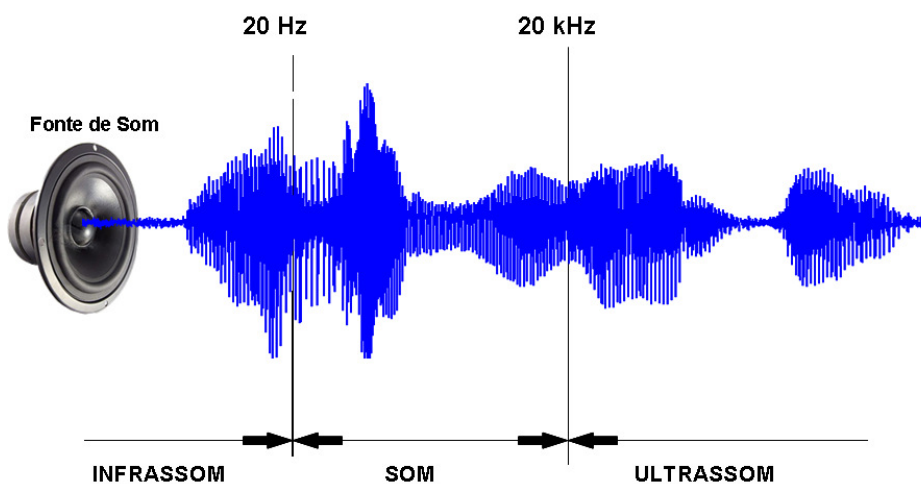
O ensaio ultrassônico de materiais com ondas superficiais, são aplicados com severas restrições, pois somente são observados defeitos de superfícies e nestes casos, existem processos mais simples para a detecção destes tipos de discontinuidades, dentro dos ensaios não destrutivos como por exemplo de Líquidos penetrantes e Partículas magnéticas, que em geral são de custo e complexidade inferior ao ensaio ultrassônico.

Frequência, Velocidade e Comprimento de Onda

Frequência:

As ondas acústicas ou som propriamente dito, são classificados de acordo com suas frequências e medidos em ciclos por segundo, ou seja, o número de ondas que passam por segundo pelo nossos ouvidos. A unidade “*ciclos por segundos*” é normalmente conhecida por “Hertz”, abreviatura “Hz”.

Assim sendo se tivermos um som com 280 Hz, significa que por segundo passam 280 ciclos ou ondas por nossos ouvidos. Note que frequências acima de 20.000 Hz são **inaudíveis** denominadas frequência ultrassônica.



Campo de Audibilidade das Vibrações Mecânicas

Considera-se 20 kHz o limite superior audível e denomina-se a partir desta, a denominada frequência *ultrassônica*.

Velocidade de propagação.

Existem várias maneiras de uma onda sônica se propagar, e cada uma com características particulares de vibrações diferentes.

Definimos “*Velocidade de propagação*” como sendo a distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo. É importante lembrar que a velocidade de propagação é uma característica do meio, sendo uma constante, independente da frequência.

Comprimento de onda.

Quando atiramos uma pedra num lago de águas calmas, imediatamente criamos uma perturbação no ponto atingido e formando assim, ondas superficiais circulares que se propagam sobre a água. Neste simples exemplo, podemos imaginar o que definimos anteriormente de frequência como sendo o número de ondas que passam por um observador fixo, também podemos imaginar a velocidade de propagação pela simples observação e ainda podemos estabelecer o comprimento entre dois picos de ondas consecutivos. A esta medida denominamos *comprimento de onda*, e representaremos pela letra grega Lambda “λ”.

Relações entre velocidade, comprimento de onda e frequência.

Considerando uma onda sônica se propagando num determinado material com velocidade “V”, frequência “f”, e comprimento de onda “λ”, podemos relacionar estes três parâmetros como segue:

$$V = \lambda \cdot f$$

A relação acima, permite calcular o comprimento de onda pois a velocidade é em geral conhecida e depende somente do modo de vibração e o material, por outro lado a frequência depende somente da fonte emissora, que também é conhecida.

Exemplo de aplicação:

Uma onda longitudinal ultrassônica, com frequência 2 MHz é utilizada para examinar uma peça de aço. Qual o comprimento de onda gerado no material?

Solução:

Como vimos anteriormente, a faixa de frequência normal utilizada para aplicações industriais, compreende entre 1 MHz até 5 MHz. No exemplo acima a frequência de 2 MHz corresponde a 2 milhões de ciclos por segundos ou seja 2×10^6 Hz.

Teremos:

$$V = \lambda \cdot f \text{ ou } \lambda = \frac{V}{f}$$

sendo $V = 5900$ m/s vem que:

$$\lambda = \frac{5900 \text{ m/s}}{2 \times 10^6 \text{ Hz}} \text{ metros}$$

$$\lambda = 2950 \times 10^6 \text{ m ou } \boxed{\lambda = 2,95 \text{ mm}}$$

O conhecimento do comprimento de onda é de significativa importância, pois relaciona-se diretamente com o tamanho do defeito a ser detectado. Em geral, o menor diâmetro de uma descontinuidade a ser detectada no material deve ser da ordem de $\lambda/2$. Assim se inspecionarmos um material de velocidade de propagação de 5900 m/s com uma frequência de 1 MHz, a mínima descontinuidade que poderemos detectar será de aproximadamente 2,95 mm de diâmetro.

Definições de Bell, Decibell e Ganho

Nível de Intensidade Sonora:

O “Bell” abreviado “B” é uma grandeza que define o nível de intensidade sonora (NIS) que compara as intensidades de dois sons quaisquer, como segue:

$$\text{N.I.S.} = \log \frac{I}{I_0} \text{ B}$$

Onde I e I₀ são duas intensidades sonoras medidas em Watts por centímetros quadrados (W/cm²).

Por outro lado, o decibell equivale a 1/10 do Bell e em geral é normalmente utilizado para medidas de N.I.S., e portanto a equação será:

$$\text{N.I.S.} = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

Entretanto, a teoria dos movimentos harmônicos na propagação ondulatória nos ensina que a intensidade de vibração é proporcional ao quadrado da amplitude sonora, $I = (A)^2$, e portanto devemos rescrever na forma de N.A.S (nível de amplitude sonora):

$$\text{N.A.S.} = 10 \cdot \log \frac{(A)^2}{(A_0)^2} \text{ dB} \text{ (Nível de amplitude sonora).}$$

$\text{N.A.S.} = 20 \log \frac{A}{A_0} \text{ dB}$
--

Esta relação pode ser entendida como sendo a comparação efetuada por um sistema eletrônico de duas amplitudes de sinais, emitida e recebida pelo transdutor ultrassônico, ou simplesmente conhecido por “Ganho”.

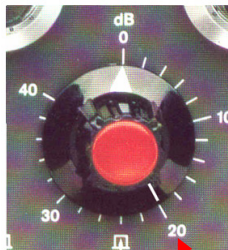
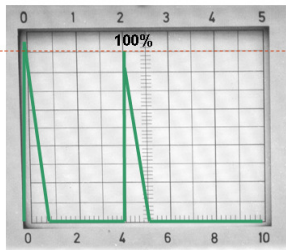
A título de curiosidade, fazendo um comparativo com nosso sentido auditivo, aqui vão alguns sons comuns e seus índices em decibéis:

- Próximo ao silêncio total = 0 dB (padrão comparativo)
- Um sussurro - 15dB
- Conversa normal - 60 dB
- Uma máquina de cortar grama -90 dB
- Uma buzina de automóvel - 110 dB
- Um show de rock ou um motor a jato - 120 dB
- Um tiro ou um rojão – 140 dB

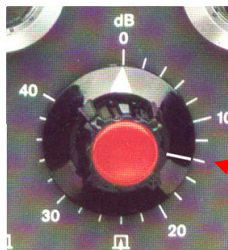
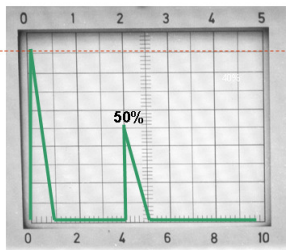
Qualquer som acima de 85 dB pode causar perda de audição, e a perda depende tanto da potência do som como do período de exposição.

Exemplo de aplicação:

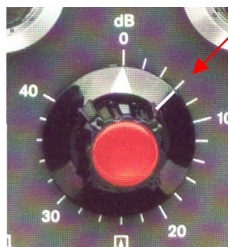
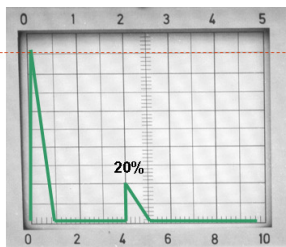
Os ganhos correspondentes a uma queda de 50% e 20% nas amplitudes de sinais na tela do aparelho de ultrassom, são mostrados na figura abaixo.



Observe a altura do eco na tela do aparelho em 100%, ajustado no controle de ganho em 20 dB.



Reduzindo o eco para 50% da altura da tela, ou seja metade, será necessário retirar 6 dB no controle de ganho e portanto o novo ajuste será em 14 dB



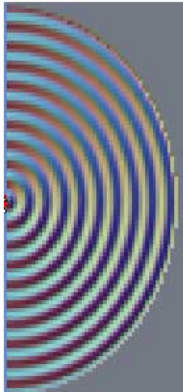
Reduzindo o eco para 20% da altura da tela, será necessário retirar 14 dB no controle de ganho e portanto novo ajuste para 6 dB.

Propagação das Ondas Acústicas no Material

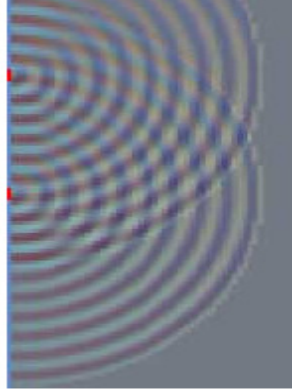
Campo Próximo ou Zona de Fresnel

Para o entendimento dos fenômenos que iremos descrever a seguir, imaginemos que o cristal piezelétrico gerador de ondas ultrassônicas, seja formado por infinitos pontos oscilantes de forma que cada ponto produz ondas que se propagam no meio.

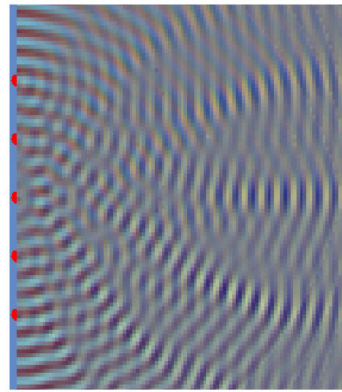
Tal qual uma pedra que caindo num lago de águas calmas produzirá ondas circulares na superfície, cada ponto do cristal também se comportará da mesma forma, ou seja, produzirá ondas esféricas no meio de propagação, como mostra a figura seguinte.



Propagação de ondas devido à perturbação em um ponto. Não existe interferência ondulatória



Propagação de duas frentes de ondas devido à perturbação em 2 pontos. Note uma pequena interferência ondulatória na zona próxima da perturbação



Propagação de 5 frentes de ondas devido à perturbação em 5 pontos. Note a forte interferência ondulatória na zona próxima da perturbação

O campo sônico nas proximidades do cristal

Note que nas proximidades do cristal existe uma interferência ondulatória muito grande entre as ondas. À medida que nos afastamos do cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, tornando-se uma só frente de onda. À região próxima do cristal onde os fenômenos acima se manifestam denomina-se **Campo Próximo** com uma extensão **N** que depende do diâmetro do cristal, e do comprimento de onda λ da vibração, podendo ser calculado pela fórmula:

$$N = D_{ef}^2 / 4 \cdot \lambda \text{ ou } N = D_{ef}^2 \cdot f / 4 \cdot v$$

onde:

D_{ef} = diâmetro efetivo do cristal. É a área acusticamente efetiva do cristal, que depende da sua forma geométrica.

Para cristais circulares, $D_{ef} = 0,97 \times$ diâmetro do cristal.

Para cristais retangulares, $D_{ef} = 0,97 \times$ metade do comprimento do lado maior do cristal.

f = frequência ultrassônica

λ = comprimento de onda

v = velocidade de propagação do som = $\lambda \times f$

Exemplo de aplicação:

Calcule o campo próximo de um transdutor normal com diâmetro 10 mm e frequência de 4 MHz, quando inspecionando aço.

Solução: **Para o cálculo é necessário que as unidades estejam coerentes, ou seja: "D" em mm, "f" em Hz, "λ" em mm e "v" em mm/s**

Sendo: $v = 5900 \text{ m/s}$ ou 5900.000 mm/s , para o aço

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \text{ ou } N = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot v} = \frac{10^2 \times 4.000.000}{4 \times 5900.000} \text{ mm}$$

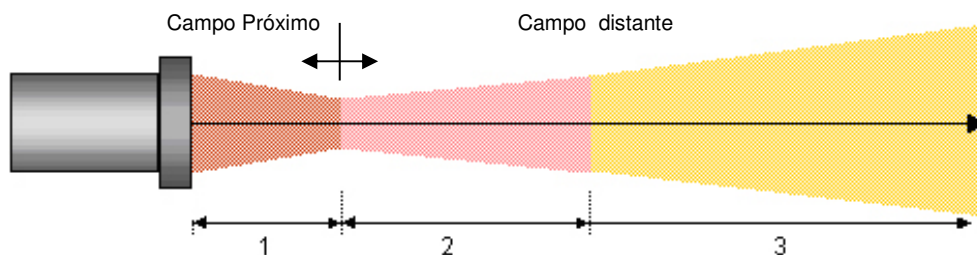
$$\mathbf{N = 16 \text{ mm}}$$

O campo próximo representa para efeitos práticos, uma dificuldade na avaliação ou detecção de pequenas descontinuidades, isto é, menores que o diâmetro do transdutor, situadas nesta região próximas do transdutor. Portanto o inspetor de ultrassom deve ficar atento a este problema.

Campo Longínquo ou Distante ou Zona de Fraunhofer

A região que vem a seguir do campo próximo é o campo longínquo também denominado pela literatura especializada de **Campo Distante**. Nesta região a onda sônica se diverge igual ao fecho de luz de uma lanterna em relação ao eixo central e ainda diminui de intensidade quase que com o inverso do quadrado da distância.

Em razão da existência do campo próximo, do campo distante, e do fenômeno da divergência, na literatura o campo sônico tem a forma geral visualizada conforme o desenho abaixo.



Classificação teórica das zonas do campo sônico

Campo sônico de um transdutor, representado pela região (1) onde pequenas descontinuidades são difíceis de serem detectadas (**campo próximo**), a região (2) descontinuidades maiores podem ser detectadas e na região (3) onde qualquer descontinuidade compatível com o comprimento de onda pode ser detectada. As linhas limítrofes do campo no desenho são didáticas, e não significa que não existe nenhuma vibração sônica nestas regiões.

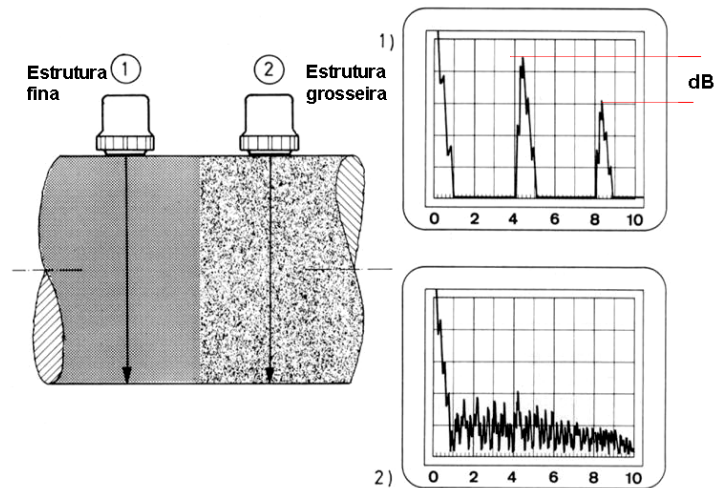
Atenuação Sônica:

A onda sônica ao percorrer um material qualquer sofre, em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia ao percorrer um material qualquer.

A dispersão deve-se ao fato da matéria não ser totalmente homogênea, contendo interfaces naturais de sua própria estrutura ou processo de fabricação. Por exemplo fundidos, que apresentam grãos de grafite e ferrita com propriedades elásticas distintas. Para esta mudança das características elásticas de ponto num mesmo material denominamos anisotropia, que é mais significativo quando o tamanho de grão for 1/10 do comprimento de onda.

O fenômeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. É a energia cedida pela onda para que cada partícula do meio execute um movimento de oscilação, transmitindo a vibração às outras partículas do próprio meio.

Portanto, o resultado dos efeitos de dispersão e absorção quando somados resultam na atenuação sônica. Na prática, este fenômeno poderá ser visualizado, quando observamos na tela do aparelho de ultrassom, vários ecos de reflexão de fundo provenientes de uma peça com superfícies paralelas. As alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda.



A tabela abaixo, apresenta alguns valores de atenuação.

Material aço Cr-Ni	Atenuação Sônica típica (dB/mm)
Forjados	0,009 a 0,010
Laminados	0,018
Fundidos	0,040 a 0,080

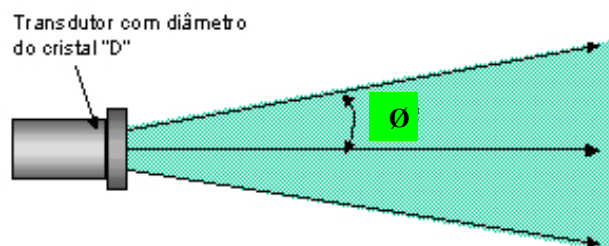
O fenômeno da atenuação é importante quando inspecionamos peças em que este fator pode inviabilizar o ensaio. É o caso de soldas em aços inoxidáveis austeníticos, peças forjadas em aços inoxidáveis, que são exemplos clássicos desta dificuldade. O controle e avaliação da atenuação nestes casos é razão para justificar procedimentos de ensaio especiais.

A avaliação correta da atenuação do material na prática pode ser feita através do uso dos diagramas especiais mostrados adiante no Capítulo Diagrama AVG/DGS.

Divergência do Feixe Sônico:

Outro fenômeno físico que é responsável pela perda de parte da intensidade ou energia da onda sônica é a divergência que se pronuncia à medida que afastamos da fonte emissora das vibrações acústicas.

Tal fenômeno pode ser observado detectamos um defeito pequeno com o feixe ultrassônico central do transdutor, em que nestas condições a amplitude do eco na tela do aparelho é máxima. Porém quando afastamos o transdutor lateralmente ao defeito, a amplitude diminui, indicando uma queda da sensibilidade de detecção do mesmo defeito. Este fenômeno é medido pelo fator "k" na fórmula da divergência, e assume valores mostrados na tabela abaixo. Quanto mais a borda do feixe sônico incide na descontinuidade, menor será a amplitude do eco e que está relacionado ao fator "k".

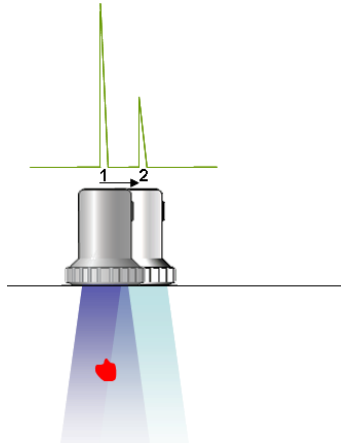


$$\text{Sen } \varnothing = k \cdot \text{Velocidade} / \text{frequência} \times \text{diâmetro}$$

Valores de k em função da redução da intensidade sônica

k	%	dB
0,37	71	-3,0
0,51	50	-6,0
0,70	25	-12,0
0,87	10	-20,0
0,93	6	-24,0
1,09	1	-40,0
1,22	0	0

A figura abaixo mostra a diferença de sensibilidade (altura do eco de reflexão) quando detectamos o defeito com o feixe ultrassônico central (1) e quando detectamos o mesmo defeito com a borda do feixe ultrassônico (2).



Variação da sensibilidade de detecção em função da divergência

Geração das Ondas ultrassônicas

Efeito Piezelétrico:

As ondas ultrassônicas são geradas ou introduzidas no material através de um elemento emissor com uma determinada dimensão e que vibra com uma certa frequência. Este emissor pode se apresentar com determinadas formas (circular, retangular). Tanto o elemento emissor e receptor, são denominados transdutores, também designados por cabeçotes.

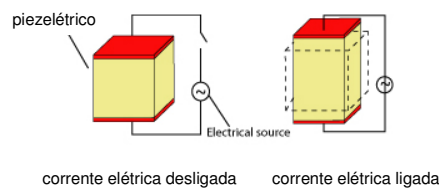
Diversos materiais (cristais) apresentam o efeito piezelétrico. Se tomarmos uma lâmina de certo formato (placa) e aplicarmos uma pressão sobre o mesmo, surgem em sua superfície cargas elétricas. O efeito inverso também é verdadeiro: se aplicarmos dois eletrodos sobre as faces opostas de uma placa de cristal piezelétrico, de maneira que possamos carregar as faces eletricamente, a placa comporta-se como se estivesse sobre pressão e diminui de espessura.

O cristal piezelétrico pode transformar a energia elétrica alternada em oscilação mecânica e transformar a energia mecânica em elétrica.



Figura mostrando a contração e expansão do cristal quando submetido a uma alta tensão alternada na mesma frequência ultrassônica emitida pelo cristal. É um processo de transformação da energia elétrica em energia mecânica e vice-versa

Tal fenômeno é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezelétrico com tensão elétrica alternada da ordem de centenas de Volts, de maneira que o mesmo se contrai e se estende ciclicamente. Se tentarmos impedir esse movimento a placa transmite esforços de compressão as zonas adjacentes, emitindo uma onda longitudinal, cuja forma depende da freqüência de excitação e das dimensões do cristal.



Tipos de Cristais:

Materiais piezelétricos são: o quartzo, o sulfato de lítio, o titanato de bário, o metaniobato de chumbo e o zirconato-titanato de chumbo (PTZ).

Quartzo é um material piezelétrico mais antigo, translúcido e duro como o vidro sendo cortado a partir de cristais originários no Brasil. Sulfato de Lítio é um cristal sensível a temperatura e pouco resistente. Titanato de Bário e zirconato-titanato de chumbo são materiais cerâmicos que recebem o efeito piezelétrico através de polarização. Esses dois cristais são os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia, se comparadas com aquelas produzidas por cristais de quartzo. Para a inspeção ultrassônica, interessa não só a potência de emissão, mas também a sensibilidade da recepção (resolução). A freqüência ultrassônica gerada pelo cristal dependerá da sua espessura, cerca de 1 mm para 4 MHz e 2 mm para 2 MHz.

Os cristais acima mencionados são montados sobre uma base de suporte (bloco amortecedor) e junto com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor ou cabeçote propriamente dito. Existem três tipos usuais de transdutores: Reto ou Normal, o angular, o duplo – cristal, e os especiais como phased-array

Transdutores Normais ou Retos:

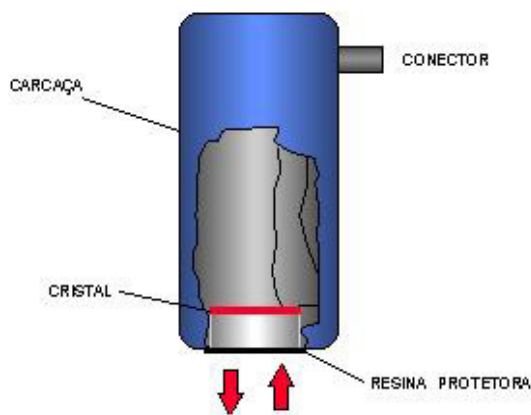
São assim chamados os cabeçotes monocristal geradores de ondas longitudinais normal a superfície de acoplamento.

Os transdutores normais são construídos a partir de um cristal piezelétrico colado num bloco rígido denominado de amortecedor e sua parte livre protegida ou uma membrana de borracha ou uma resina especial. O bloco amortecedor tem função de servir de apoio para o cristal e absorver as ondas emitidas pela face colada a ele.

O transdutor emite um impulso ultrassônico que atravessa o material a inspecionar e reflete nas interfaces, originando o que chamamos ecos. Estes ecos retornam ao transdutor e gera, no mesmo, o sinal elétrico correspondente.

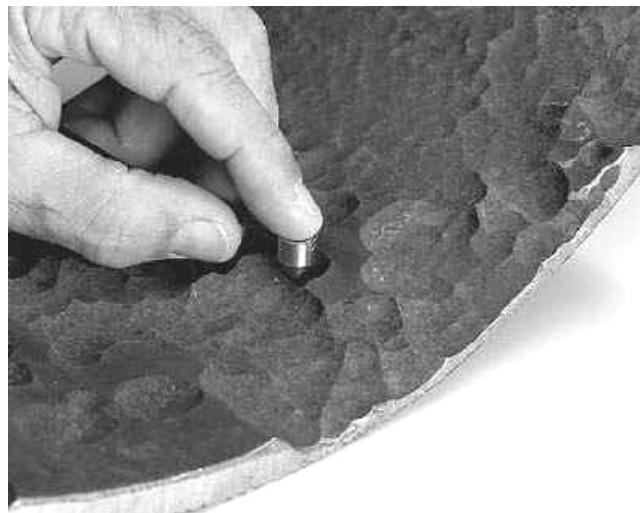
A face de contato do transdutor com a peça deve ser protegida contra desgastes mecânico podendo utilizar membranas de borracha finas e resistentes ou camadas fixas de epoxi enriquecido com óxido de alumínio.

Em geral os transdutores normais são circulares, com diâmetros de 5 a 24 mm, com frequência de 0,5 ; 1 ; 2 ; 2,5 ; 5 e 6 MHz. Outros diâmetros e frequências existem, porém para aplicações especiais.



O transdutor normal tem sua maior utilização na inspeção de peças com superfícies paralelas ou quando se deseja detectar descontinuidade na direção perpendicular à superfície da peça. É o exemplo de chapas, fundidos e forjados.

Transdutor Normal ou Reto



Transdutor normal miniatura
(foto extraída do catálogo Krautkramer)

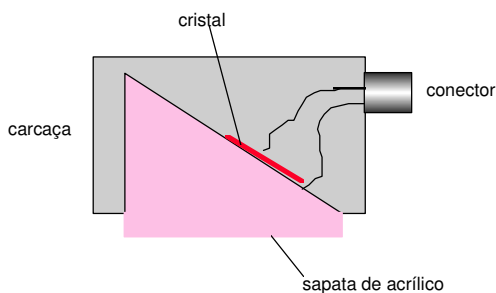
O diâmetro do transdutor pode variar dependendo da aplicação. A figura acima utiliza-se um transdutor miniatura com 5 mm de diâmetro para estudo de pontos de corrosão de uma peça.

Transdutores Angulares:

A rigor, diferem dos transdutores retos ou normais pelo fato do cristal formar um determinado ângulo com a superfície do material. O ângulo é obtido, inserindo uma cunha de plástico entre o cristal piezelétrico e a superfície. A cunha pode ser fixa, sendo então englobada pela carcaça ou intercambiável. Neste último caso temos um transdutor normal que é preso com parafusos que fixam a cunha à carcaça. Como na prática operamos normalmente com diversos ângulos (35, 45, 60, 70 e 80 graus) esta solução é mais econômica já que um único transdutor com várias cunhas é de custo inferior, porém necessitam de maiores cuidados no manuseio.

O ângulo nominal, sob o qual o feixe ultrassônico penetra no material vale somente para inspeção de peças em aço; se o material for outro, deve-se calcular o ângulo real de penetração utilizando a Lei de Snell. A mudança do ângulo deve-se à mudança de velocidade no meio.

O cristal piezelétrico com dimensões que podem variar entre 8 x 9 mm até 15 x 20 mm, somente recebe ondas ou impulsos ultrassônicos que penetram na cunha em uma direção paralela à de emissão, em sentido contrário. A cunha de plástico funciona como amortecedor para o cristal piezelétrico, após a emissão dos impulsos.



O transdutor angular é muito utilizado na inspeção de soldas e quando a descontinuidade está orientada perpendicularmente à superfície da peça.

Transdutor angular

Transdutores Duplo-Cristal ou SE

Existem problemas de inspeção que não podem ser resolvidos nem com transdutores retos nem com angulares.

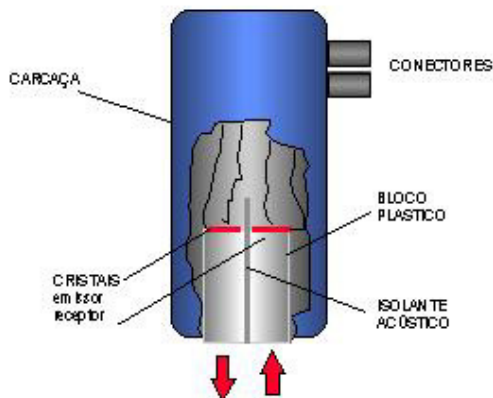
Quando se trata de inspecionar ou medir materiais de reduzida espessura, ou quando se deseja detectar descontinuidades logo abaixo da superfície do material, a “zona morta” existente na tela do aparelho impede uma resposta clara.

O cristal piezelétrico recebe uma “resposta” num espaço de tempo curto após a emissão, não tendo suas vibrações sido amortecidas suficientemente.

Neste caso, somente um transdutor que separa a emissão da recepção pode ajudar. Para tanto, desenvolveu-se o transdutor de duplo-cristal, no qual dois cristais são incorporados na mesma carcaça, separados por um material acústico isolante e levemente inclinados em relação à superfície de contato. Cada um deles funciona somente como emissor ou somente como receptor, sendo indiferente qual deles exerce qual função. São conectados ao aparelho de ultrassom por um cabo duplo; o aparelho deve ser ajustado para trabalhar agora com 2 cristais.

Os cristais são montados sobre blocos de plástico especial de baixa atenuação. Devido a esta inclinação, os transdutores duplos não podem ser usados para qualquer distância (profundidade). Possuem sempre uma faixa de inspeção ótima, que deve ser observada. Fora desta zona a sensibilidade se reduz. Em certos casos estes transdutores duplos são utilizados com “focalização”, isto é, feixe é concentrado em uma determinada zona do material para a qual se deseja máxima sensibilidade.

O transdutor duplo-cristal é o mais indicado e largamente utilizado nos procedimentos de medição de espessura por ultrassom.



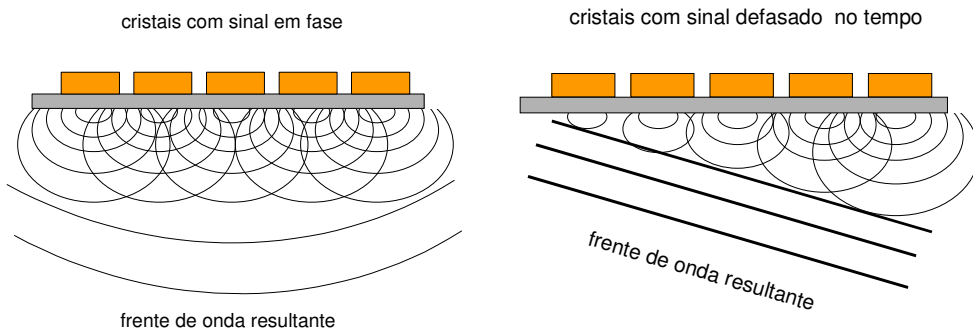
O transdutor duplo-cristal tem sua utilização maior, na detecção de descontinuidades próximas da superfície, acima de 3 mm de profundidade e em medição de espessura, em razão do seu feixe sônico ser focalizado. Em geral, por ocasião da aquisição deste transdutor, deve se verificar qual a faixa de espessura que se pretende medir, e qual o modelo ideal para esta aplicação.

Transdutor Duplo-Cristal ou SE

O Transdutor "Phased Array"

Os transdutores convencionais descritos acima, dispõem de um único cristal ou no máximo dois, em que o tempo de excitação do cristal é determinado pelo aparelho de ultrassom, sempre realizado de uma mesma forma. Com o avanço da tecnologia dos computadores, com processadores e circuitos mais rápidos, e principalmente de materiais piezocompostos para fabricação de novos cristais, desde os anos 90 foi possível o desenvolvimento de uma tecnologia especial em que num mesmo transdutor operam dezenas (de 10 a 256 elementos) de pequenos cristais, cada um ligado a circuitos independentes capazes de controlar o tempo de excitação independentemente um dos outros cristais. O resultado é a modificação do comportamento do feixe sônico emitido pelo conjunto de cristais ou pelo transdutor. Veja a figura abaixo do lado esquerdo, o conjunto de cristais estão

operando em fase, isto é, o aparelho de ultrassom executa a excitação dos cristais todos no mesmo tempo, e o resultado é uma onda perpendicular ao plano da superfície. A figura do lado direito, 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.



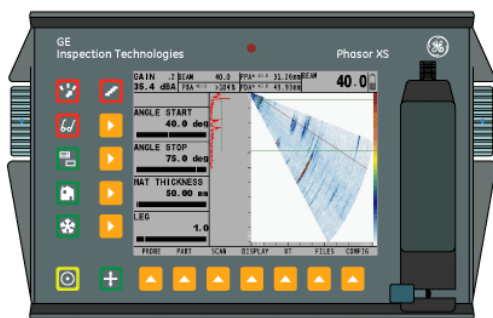
Transdutor Olympus com 60 elementos (cristais) , 5 MHz



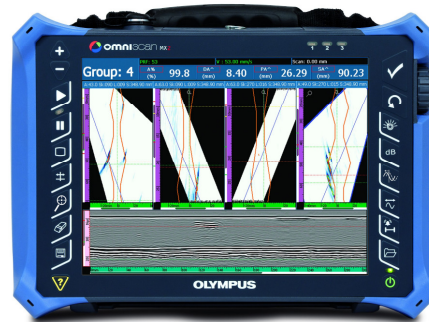
Transdutor com sapata intercambiável angular 60 graus 64 elementos, Sonatest

Transdutores típicos "Phased Array"

Devido às particularidades dos transdutores phased-array, é possível numa única varredura deste, inspecionar o material com vários ângulos de refração diferentes de uma só vez, já que a mudança do ângulo é feita eletronicamente. Isso significa uma maior velocidade de inspeção, principalmente em soldas, onde no mínimo é recomendado dois ângulos diferentes.



Aparelho Phased Array da GE -Phasor XS



Aparelho OmniScan MX-2 –Cortesia da Olympus

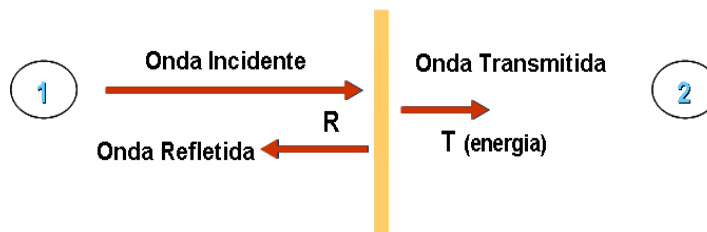
As vantagens principais dos transdutores Phased Array são:

- Variedade de pontos focais para um mesmo transdutor
- Variedade de ângulos de incidência para um mesmo transdutor
- Varredura do material de forma eletrônica do feixe sônico
- Variedade dos modos de inspeção
- Maior flexibilidade para inspeção de juntas complexas

Impedância Acústica, Interface, Acoplantes

Ao acoplarmos o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente estabelece uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propague para a peça em razão das características **acústicas (impedância acústica)** muito diferente do material a inspecionar.

A impedância acústica "Z" é definida como sendo o produto da densidade do meio (ρ) pela velocidade de propagação neste meio (V), ($Z = \rho \times V$) e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio.



Em geral podemos calcular as frações de energia sônica que é transmitida e refletida pela interface entre dois materiais diferentes usando as seguintes fórmulas:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \text{ (Energia refletida) , } T = 1 - R \text{ (Energia Transmitida)}$$

Onde: Z_1 e Z_2 são as impedâncias dos dois meios que formam a interface.

Como exemplo podemos citar que a interface água e aço, apenas transmite 12% e reflete 88% da energia ultrassônica.

Por esta razão, deve-se usar um líquido que estabeleça uma redução desta diferença, e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos, denominados líquido acoplante são escolhidos em função do acabamento superficial da peça, condições técnicas, tipo da peça. A tabela abaixo descreve alguns acoplantes mais utilizados.

Os acoplantes devem ser selecionados em função da rugosidade da superfície da área de varredura, o tipo de material, forma da peça, dimensões da área de varredura e posição para inspeção.

Impedância Acústica de Alguns Materiais e Acoplantes

Acoplante	Densidade (g/cm ³)	Velocidade da onda long. (m/s)	Impedância Acústica (g/cm ² .s)
Óleo (SAE 30)	0,9	1700	1,5 x 10 ⁵
Água	1,0	1480	1,48 x 10 ⁵
Glicerina	1,26	1920	2,4 x 10 ⁵
Carbox Metil Celulose (15g/l)	1,20	2300	2,76 x 10 ⁵
Aço	7,8	5.900	46 x 10 ⁵
Ar ou gas	0,0013	330	0,00043 x 10 ⁵
Aço inoxidável	7,8	5.800	45,4 x 10 ⁵
Alumínio	2,7	6.300	17,1 x 10 ⁵
Acrílico	1,18	2.700	3,1 x 10 ⁵
Cobre	8,9	4.700	41,6 x 10 ⁵
Borracha	1,1	1.800	2 x 10 ⁵
Titanio	4,5	6.100	27,3 x 10 ⁵
Magnésio	1,74	5.800	10 x 10 ⁵
Vidro	2,5	5.700	14,2 x 10 ⁵

Fonte: SONIC Instruments – catálogo de fórmulas e dados

Diagramas AVG ou DGS

Os diagramas AVG ou DGS foram preparados para facilitar a avaliação de uma série de parâmetros do ensaio ultrassônico relacionados ao material, o feixe sônico, o tamanho mínimo da descontinuidade detectável por um determinado transdutor, e outros. A figura a seguir, ilustra um diagrama específico para o transdutor do tipo normal de ondas longitudinais, com 2 MHz de frequência, fornecido pelo fabricante GE.

O diagrama abaixo foi elaborado mediante o estudo da resposta do transdutor em termos de ganho, dos ecos provenientes de vários furos de fundo chato usinados numa peça de aço a diversas profundidades, resultando assim as curvas mostradas no diagrama para cada furo.

A título de exemplo de aplicação e uso do diagrama podemos observar que o comprimento do campo próximo do transdutor B 2 S é aproximadamente 50 mm pois a partir da profundidade de 50 mm no diagrama o comportamento das curvas tem a forma linear.

Outra característica que podemos observar no diagrama é que só é possível a detecção de um refletor com 1 mm de diâmetro equivalente até 600 mm de profundidade para este transdutor.

Uma aplicação interessante do diagrama AVG é a determinação da atenuação sônica do material.

Frequentemente é requerido a determinação da atenuação sônica de um material para comparar com o critério da qualidade requerido, principalmente em forjados, fundidos nas mais variadas aplicações. A título de exemplo vamos supor uma peça de aço com 100 mm de espessura onde foi acoplado um transdutor normal B2 S na superfície.

A atenuação sônica será a soma da absorção acústica do aço, mais a dispersão do som no meio, descontando o efeito da divergência que é a abertura do feixe sônico ao se distanciar do transdutor. No diagrama AVG/DGS estes valores podem ser levantados conforme segue.

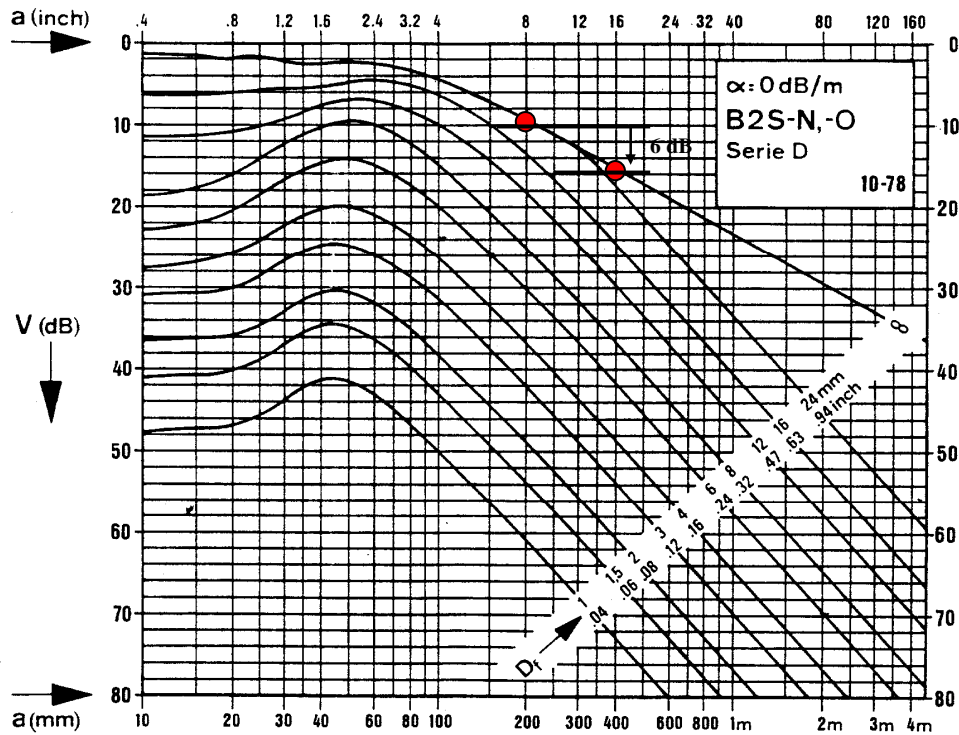
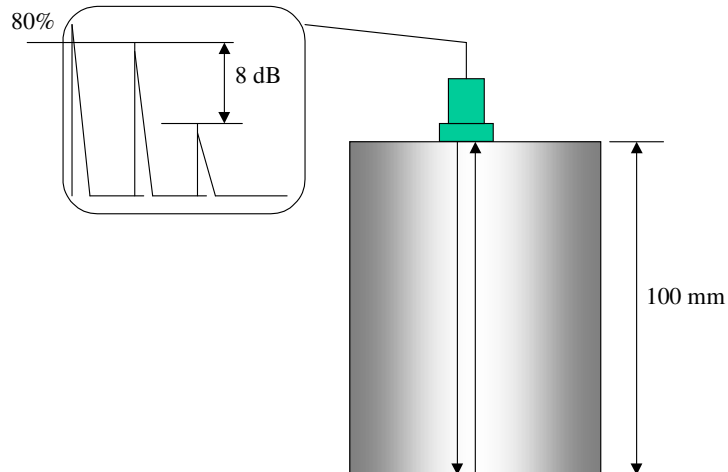


Diagrama AVG ou DGS extraído do "data-sheet" publicado pela Krautkramer, hoje GE, para o transdutor normal B 2 S

O percurso sônico no interior da peça será igual a duas vezes a espessura desta equivalente a 200 mm. O 1º eco de fundo deve ser ajustado para uma altura de 80% da tela. Sem alterar o controle de ganho do aparelho de ultrassom, é feita a leitura da diferença de altura entre o 1º eco de fundo e o 2º eco de fundo. No nosso exemplo a diferença foi de 8 dB.

No diagrama AVG é feita a leitura correspondente a queda da intensidade sônica com a distância percorrida devido à divergência, no diagrama é lido sobre a curva do eco de fundo para 200 mm e 400 mm resultando em -6dB. Portanto a atenuação será igual a 8 dB - 6dB / 200 mm, ou seja 0,01 dB/mm para frequência de 2 MHz.

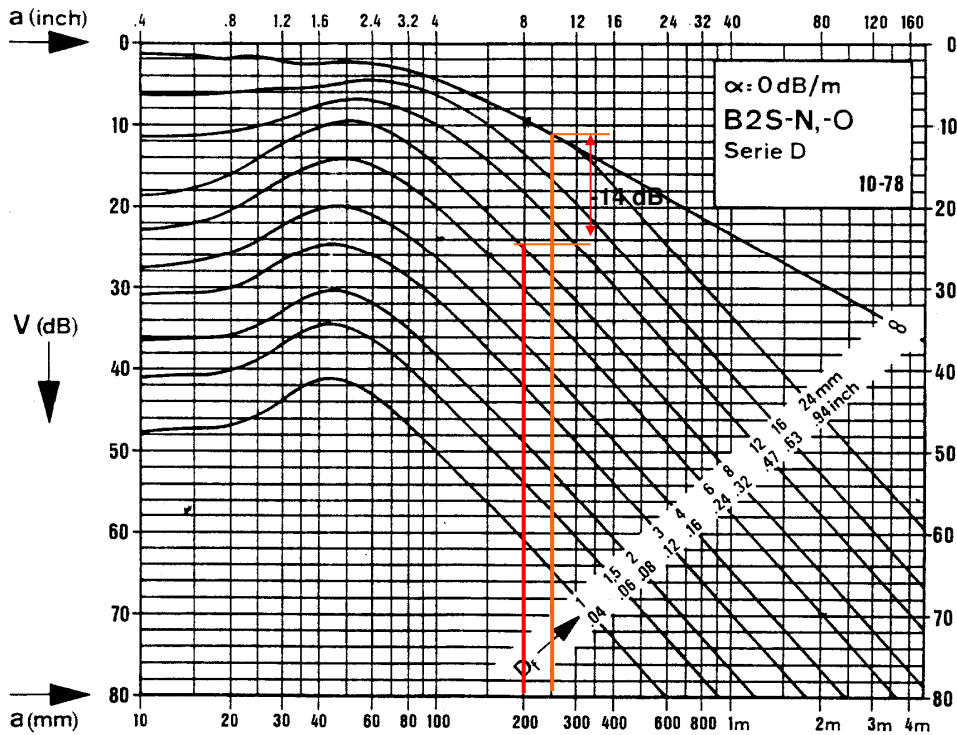


Determinação do Tamanho do Refletor Equivalente no Diagrama DGS

A determinação do tamanho de descontinuidades pelo método AVG ou DGS somente é aplicável a descontinuidades menores que o diâmetro do transdutor. A determinação do tamanho da descontinuidade é feita por comparação ao refletor equivalente no diagrama AVG ou DGS, seguindo as seguintes etapas:

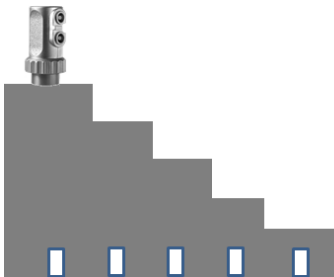
A título de exemplo, vamos considerar um transdutor normal B2S e uma peça forjada com superfícies paralelas de espessura 250 mm contendo um pequeno refletor a uma profundidade de 200 mm a ser determinado.

- O eco de fundo deve ser ajustado de forma que sua altura esteja a 80% da altura da tela, numa região da peça isenta de descontinuidades;
- O transdutor deve ser posicionado sobre a descontinuidade, e o eco correspondente deve ser maximizado;
- Com auxílio do controle de ganho, deve ser feita a leitura em "dB" da diferença entre o eco da descontinuidade e o de fundo a 80% da tela. Vamos considerar a título de exemplo +14 dB;
- No diagrama AVG do transdutor B2S levanta-se uma perpendicular na profundidade de 250 mm até encontrar a curva do eco de fundo no diagrama;
- A partir deste ponto, na mesma perpendicular, reduzir 14 dB, e seguir paralelamente ao eixo da profundidade (eixo x) até cruzar com a perpendicular referente à profundidade da descontinuidade (200 mm);

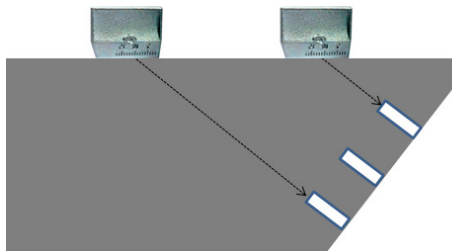


f) A partir do ponto de cruzamento, fazer a leitura da curva do refletor que estiver mais próxima, que no caso será 8 mm. Este deve ser considerado o tamanho do refletor equivalente encontrado.

Outra aplicação é a possibilidade de ser utilizada o diagrama AVG / DGS para inspeção de forjados, fundidos e soldas, quando é requerido um refletor de referência (furo de fundo plano) estabelecido pela norma ou Código, para calibração da sensibilidade do ensaio. Alguns aparelhos de ultrassom digitais já possuem essas curvas AVG na memória, a vantagem é a não necessidade de fabricação de blocos de referência com furos de fundo plano, e conseqüente redução de custos e produtividade. No entanto, é possível fabricar blocos específicos para transdutores normais e angulares, como sugerido pelos croquis abaixo, permitindo assim traçar uma curva para um diâmetro de furo especificado:



Bloco para transdutores normais e SE contendo furos de fundo plano a diferentes distancias do transdutor



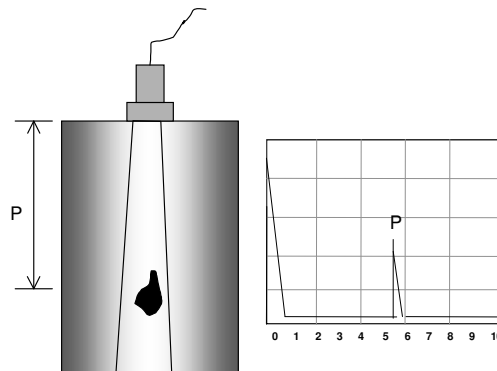
Bloco para transdutores angulares contendo furos de fundo plano a diferentes distancias do transdutor

Técnicas de Inspeção

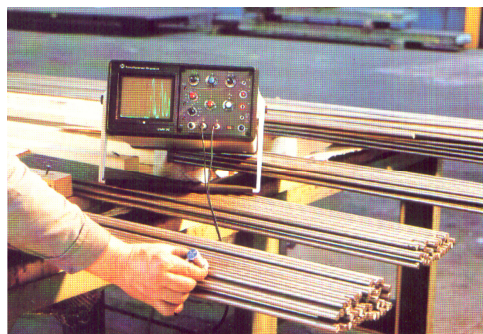
A inspeção de materiais por ultrassom pode ser efetuada através de dois métodos ou técnicas como segue.

Técnica de Impulso-Eco ou Pulso-Eco

É a técnica onde somente um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material. Portanto, o transdutor é acoplado em somente um lado do material, podendo ser verificada a profundidade da descontinuidade, suas dimensões, e localização na peça.



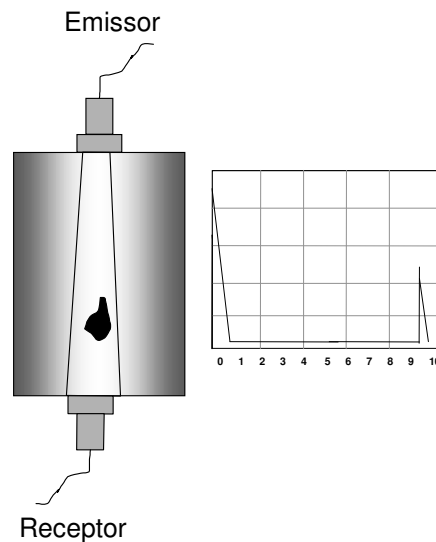
Técnica Impulso-Eco ou pulso-eco



Inspeção de barras pela técnica pulso-eco por contato direto, usando transdutor normal de 12 mm de diâmetro.

Técnica de Transparência

É uma técnica onde é utilizado dois transdutores separados, um transmitindo e outro recebendo as ondas ultrassônicas. Neste caso é necessário acoplar os transdutores nos dois lados da peça, de forma que estes estejam perfeitamente alinhados. Este tipo de inspeção, não se pode determinar a posição da descontinuidade, sua extensão, ou localização na peça, é somente um ensaio do tipo passa-não passa.



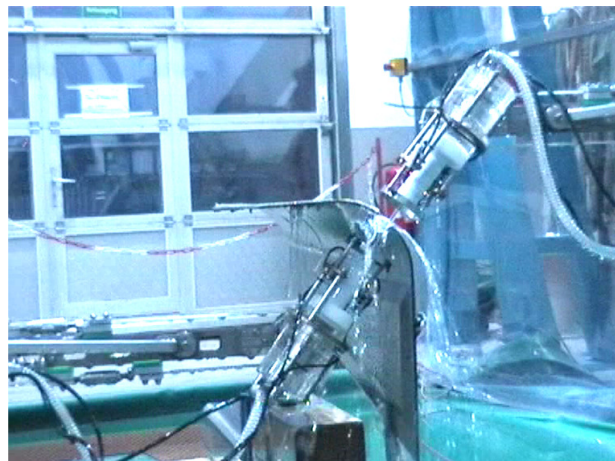
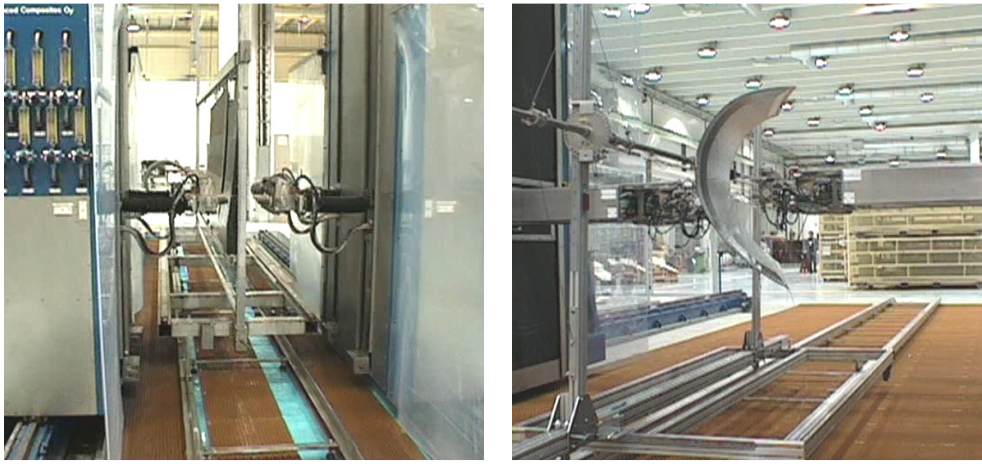
Técnica de Transparência

A técnica de transparência pode ser aplicada para chapas, juntas soldadas, barras e o intuito destes ensaios é estabelecer um critério comparativo de avaliação do sinal recebido, ou seja, da altura do eco na tela.

A altura do sinal recebido na técnica de transparência varia em função da quantidade e tamanho das descontinuidades presentes no percurso das vibrações ultrassônicas. Sendo assim o inspetor não sabe analisar as características das indicações porém compara a queda do eco com uma peça sem descontinuidades podendo assim estabelecer critérios de aceitação do material fabricado.

Este método pode ser aplicado a chapas fabricadas em usinas, barras forjadas ou fundidas, e em alguns casos em soldas.

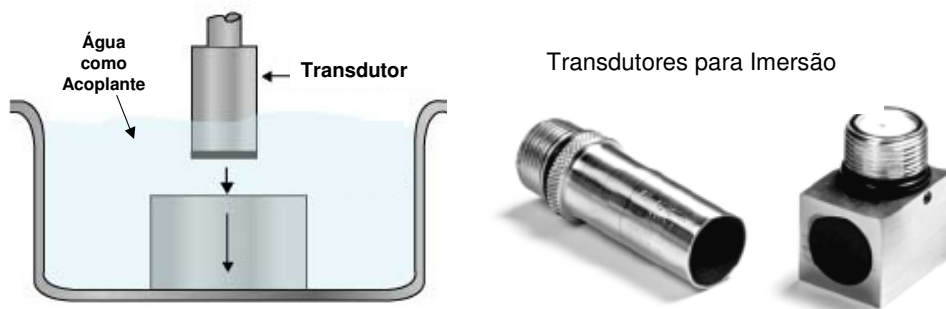
Com o desenvolvimento da robótica e sistemas digitais de ultrassom, é possível implementar sistemas automáticos de inspeção de peças simples ou com geometrias complexas, usando a técnica por transparência, como mostrado nas fotos abaixo.



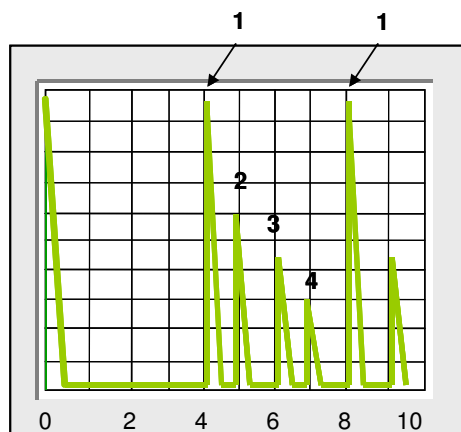
Sistemas automáticos robotizados de inspeção por transparência usando transdutores com acoplamento por jato de água (water-jet)
(gentileza da GE Industrial Technologies)

Técnica de Imersão:

Nesta técnica é empregado um transdutor de imersão à prova d'água, preso a um dispositivo. O transdutor pode se movimentar, tanto na distância até a peça quanto na inclinação do feixe de entrada na superfície da peça. Na técnica de imersão a peça é colocada dentro de um tanque com água, propiciando um acoplamento sempre homogêneo.



Mas como ocorre as indicações na tela do aparelho na técnica de imersão? Vejamos o ecograma a seguir:



No ponto "0" da escala calibrada para o aço, temos o pulso inicial do transdutor. A primeira reflexão proveniente da superfície do material (1) aparece na marca 4 da escala. Como a água possui velocidade sônica cerca de 4 vezes menor que a do aço, esse pulso parecerá na marca de 4 vezes a espessura da coluna d'água. O segundo eco de entrada na superfície do material aparece na marca 8 da escala. Após à primeira reflexão na tela, temos uma seqüência de ecos (2), (3) e (4) correspondendo ao eco de fundo da peça.

O aparelho de Ultrassom

Basicamente, o aparelho de ultrassom contém circuitos eletrônicos especiais, que permitem transmitir ao cristal piezelétrico, através do cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados, transformados pelo mesmo em ondas ultrassônicas. Os sinais captados no cristal são mostrados na tela em forma de pulsos luminosos denominados “ecos”, que podem ser regulados tanto na amplitude, como posição na tela graduada e se constituem no registro das descontinuidades encontradas no interior do material.

O aparelho de ultrassom é basicamente um osciloscópio projetado para medir o tempo de percurso do som na peça ensaiada através da relação: $S = V \times T$ onde o espaço percorrido (S) é proporcional do tempo (T) e a velocidade de propagação (V), no material.

Descrição dos Aparelhos Medidores de Espessura por ultrassom e sua utilização:

Os medidores de espessura por ultrassom podem se apresentar com circuitos digitais ou analógicos, e são aparelhos simples que medem o tempo do percurso sônico no interior do material , através da espessura, registrando no display o espaço percorrido ou seja a própria espessura. Operam com transdutores duplo-cristal, e possuem exatidão de décimos ou até centésimos dependendo do modelo.

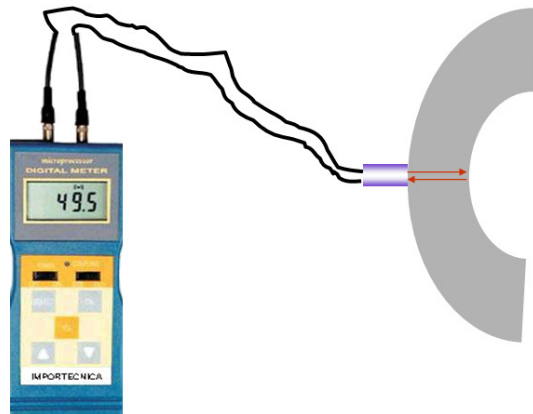


Medidor de Espessura Digital Ultrassônico GE Modelo DM4E
<http://www.geinspectiontechnologies.com>

São aparelhos bastante úteis para medição de espessuras de chapas, tubos, taxas de corrosão em equipamentos industriais, porém para a obtenção de bons resultados, é necessária sua calibração antes do uso, usando blocos com espessuras calibradas e de mesmo material a ser medido, com o ajuste correto da velocidade de propagação do som do aparelho.

O instrumento deve ser ajustado para a faixa de espessura a ser medida usando os blocos padrão graduado e calibrado conforme sugerido na figura da página a seguir, construído com material de mesma velocidade e atenuação sônica do material a ser medido.

A calibração do instrumento para uso, deve ser feita usando no mínimo duas espessuras no bloco, conforme a faixa de espessura a ser medida. O instrumento deve ser ajustado para indicar a espessura correta das duas graduações selecionadas.



Os ajustes devem ser feitos de acordo com as instruções do fabricante. Se ambos os valores indicados estiverem corretos, o instrumento estará apto para uso. Se o instrumento estiver corretamente calibrado a leitura de duas diferentes espessuras não devem variar mais que 0,2 mm. Se não for possível atingir um ou ambos os valores, verificar se o instrumento / transdutor está sendo aplicado na faixa especificada pelo fabricante, assim como se o ajuste da velocidade de propagação sônica no instrumento está corretamente calibrada ou ajustado.

A norma ASTM E-797 padroniza os métodos de medição de espessuras. Para medições a altas temperaturas, e maior exatidão das medidas, recomenda-se correções devido à temperatura da peça dos valores lidos no aparelho medidor de espessura. Valor da espessura real aproximada é determinada através da aplicação direta da fórmula indicada abaixo:

$$E_r = \frac{E_m \times (V_{sa} - K \cdot \Delta T)}{V_{sa}}$$

onde:

E_r = espessura real (mm);

E_m = espessura da medida a quente (mm);

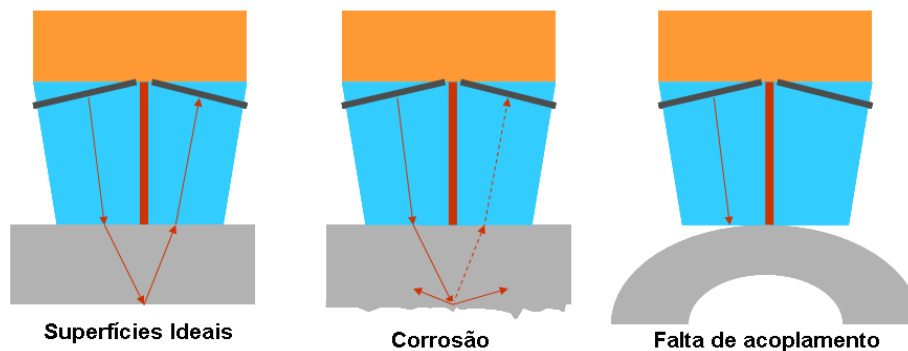
V_{sa} = velocidade do som no bloco à temperatura ambiente;

ΔT = diferença entre a temperatura da superfície do bloco e do material inspecionado ($^{\circ}C$).

K = constante de redução da velocidade em função do aumento da temperatura, igual a 1 m/s / $^{\circ}C$

Para uma melhor precisão nas medidas sobre superfícies com alta temperatura é recomendado calibrar o aparelho num bloco separado com características iguais ao material que será medido, na mesma temperatura da peça. É importante saber que o cristal no transdutor não suporta altas temperaturas, e, portanto, a medição deve ser feita de forma rápida com resfriamento subsequente em água.

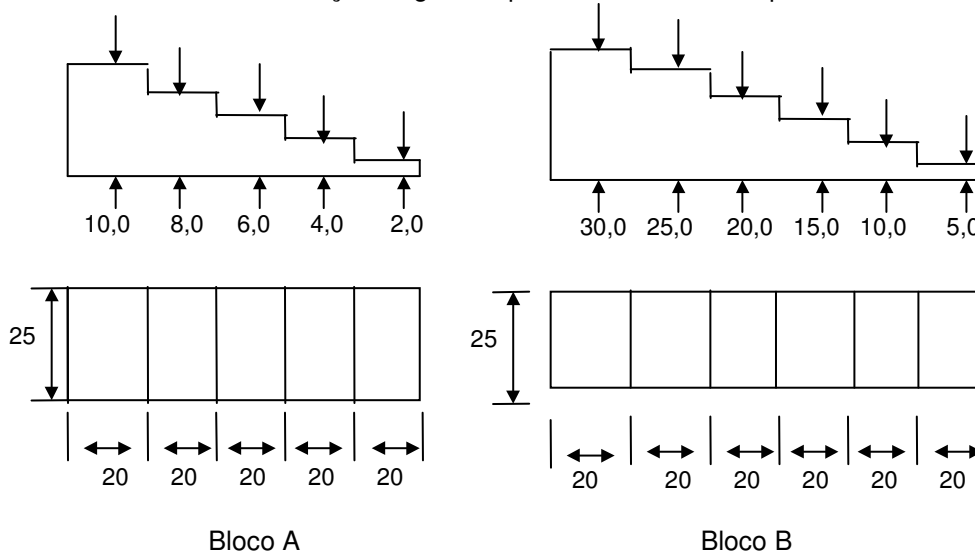
Outros fatores podem gerar erros ou impossibilidade de medições como a dificuldade de acoplamento sobre a superfície e corrosão.



Os aparelhos medidores modernos de espessura digitais, são dotados de circuitos de memória que podem armazenar centenas de dados referente a espessuras medidas e após, conectando na impressora, pode-se obter um relatório completo das medidas efetuadas e as condições usadas.

A calibração do aparelho medidor de espessura deve ser feita usando blocos escalonados com faixas de espessuras próximas da peça a ser medida. Em geral os blocos apresentados a seguir, podem servir de guia para o leitor.

Blocos de Calibração Sugeridos para Medidores de Espessuras



Tolerâncias:

- Dimensões: $\pm 0,5$ mm
- Espessuras: $\pm 0,02$ mm
- Acabamento superficial: faces Ra = 0,8 μ m max.

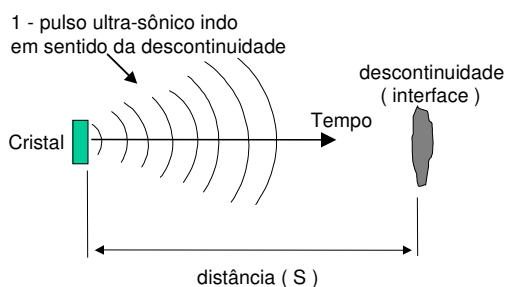
Faixa de aplicação dos blocos de calibração A e B

Espessuras Seleccionadas do Bloco A (mm)	Faixa de Espessura Aplicável ou a ser medida (mm)
2,0 e 4,0	1,80 até 4,20
4,0 e 6,0	3,80 até 6,20
6,0 e 8,0	5,80 até 8,20
8,0 e 10,0	7,80 até 10,20

Espessuras Seleccionadas do Bloco B (mm)	Faixa de Espessura Aplicável ou a ser medida (mm)
5,0 e 10,0	4,8 até 10,2
10,0 e 15,0	9,8 até 15,2
15,0 e 20,0	14,8 até 20,2
20,0 e 25,0	19,8 até 25,2
25,0 e 30,0	24,8 até 30,2

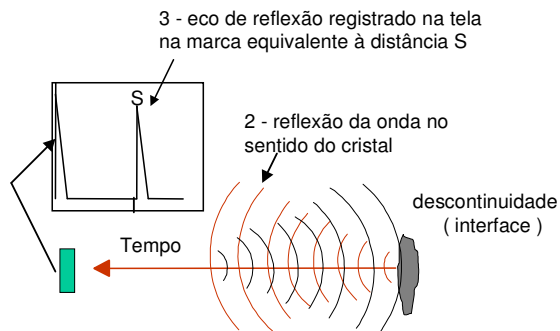
Geração e recepção do pulso no aparelho de ultrassom

Na figura o aparelho de ultrassom produz um pulso (1) através do cristal. Este se propaga pela peça, e neste instante os circuitos do aparelho iniciam a contagem do tempo.



O aparelho de ultrassom produz um pulso por meio do cristal. Este se propaga pela peça. \rightarrow inicia-se a contagem do tempo de percurso.

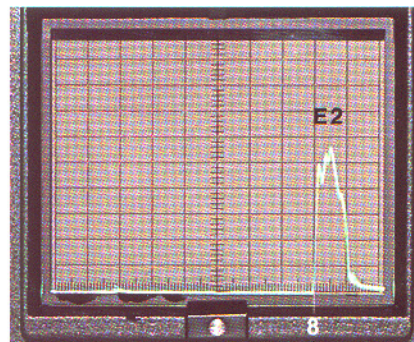
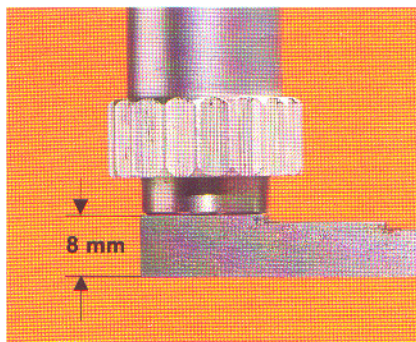
Ao incidir numa **interface**, ou seja na descontinuidade na distância "S", ocorre a reflexão da onda (2) que é detectada pelo cristal, originando um sinal elétrico que é interpretado e amplificado pelo aparelho e representado pelo eco de reflexão (3) na tela do aparelho de ultrassom. A posição do eco na tela é proporcional ao **tempo** medido de retorno do sinal como também ao **caminho percorrido pelo som (S)** até a descontinuidade na peça.



Ao incidir numa **interface** , ou seja na descontinuidade que está na distância "S" , ocorre a reflexão da onda , detectada pelo cristal.
 → origina um sinal elétrico que é interpretado, amplificado, representado pelo eco de reflexão na tela do aparelho de ultrassom.

Descrição do Aparelho Básico de ultrassom

Observe a figura abaixo, mostrando um transdutor ultrassônico acoplado numa peça com espessura de 8 mm, e a tela ao lado do aparelho mostrando o eco "E2", proveniente da espessura da peça.



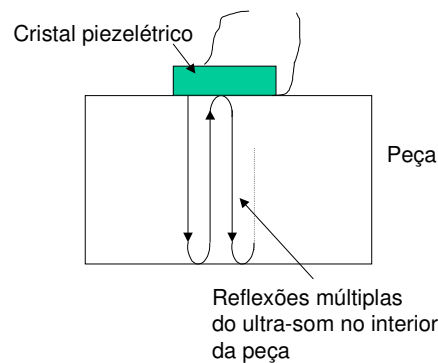
Eco de Fundo

Vamos analisar o que está ocorrendo:

- 1 -O cristal piezelétrico do transdutor transmite à peça uma onda ultrassônica perpendicularmente à superfície que percorre a espessura total de 8 mm do metal;
- 2 - A onda incide na interface no fundo da peça, retorna ao cristal e este produz um sinal elétrico que será amplificado e registrado na tela do aparelho na forma do pulso ou eco, identificado na figura como "E2";
- 3 - O caminho do som percorreu a espessura de 8 mm de ida e mais 8 mm na volta - isto sempre ocorre na inspeção por ultrassom os circuitos do aparelho compensam este fenômeno dividindo por 2 os registros na tela.

Assim portanto, o eco na tela do aparelho representa o caminho percorrido pelo som, em apenas uma vez a espessura, denominado de **"Eco de Fundo"**, que no caso da figura foi de 8 mm.

É importante mencionar que o som que percorre a espessura do metal se reflete nas interfaces formadas pela fundo da peça e a superfície da peça, de forma contínua, isto é, o ultrassom emitido pelo cristal do transdutor realiza no interior da peça um movimento de zig-zag de ida e volta, se **refletindo no fundo da peça e superfície**, continuamente.



Para cada incidência do ultrassom na superfície oposta de acoplamento do cristal, um sinal será transmitido ao aparelho e um eco correspondente a este sinal será visualizado na tela. Portanto será possível observar vários ecos de reflexão de fundo correspondente à mesma espessura.

Basicamente, o aparelho de ultrassom contém circuitos eletrônicos especiais, que permitem transmitir ao cristal piezoeletrico, através do cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados, transformados pelo mesmo em ondas ultrassônicas.



Aparelho de ultrassom marca GE modelo USM GO

Da mesma forma, sinais captados no cristal são mostrados na tela do tubo de raios catódicos em forma de pulsos luminosos denominados “ecos”, que podem ser regulados tanto na amplitude, como posição na tela graduada e se constituem no registro das descontinuidades encontradas no interior do material



Aparelho de ultrassom digital marca Olympus modelo EPOCH 600.

Em geral, os fabricantes oferecem vários modelos de aparelhos com maiores ou menores recursos técnicos, que possibilitam sua utilização nas mais variadas aplicações industriais, entretanto, alguns controles e funções básicas devem ser conhecidas para ser possível sua utilização, que veremos a seguir.

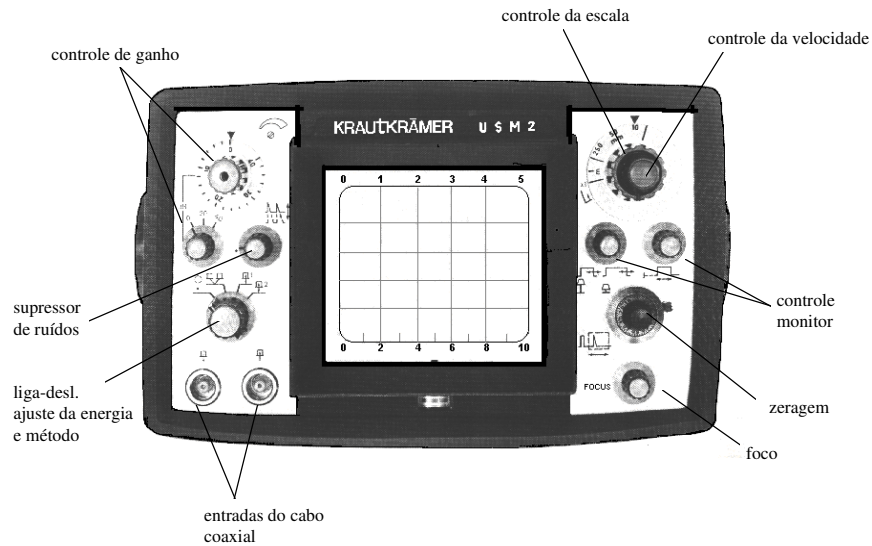
Quer seja analógico ou digital, todos os aparelhos apresentam os controles básicos mínimos que permitem utilizar o aparelho para qualquer aplicação prática, como seguem:

- Escolha da função:

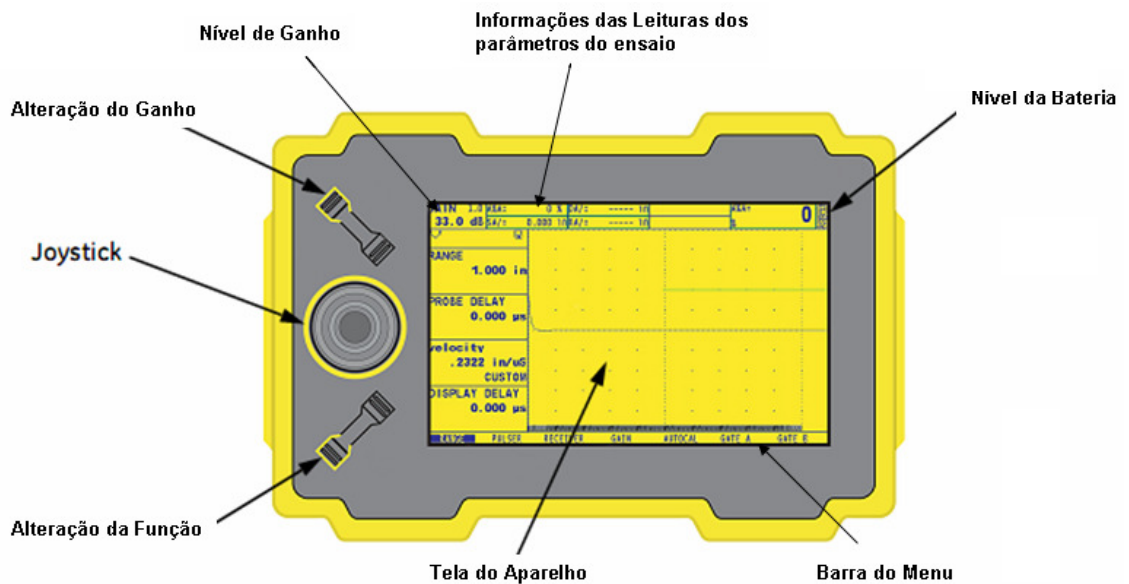
Todo aparelho possui entradas de conectores dos tipos BNC (aparelhos de procedência norte-americana) ou Lemo (aparelhos de procedência alemã), para permitir de transdutores monocristal de duplo-cristal.

- Potência de emissão:

Está diretamente relacionado com a amplitude de oscilação do cristal ou tamanho do sinal transmitido. Em geral os aparelhos apresentam níveis de potência através de uma chave seletora em número de 2 até 5 posições.



Aparelho Antigo Analógico Básico de ultrassom, marca Krautkramer mod. USM-2 (Um dos aparelhos mais antigos , mas de maior sucesso na época dos anos 60)



Aparelho Digital marca GE Mod. USM GO

- Ganho:

Está relacionado com a amplitude do sinal na tela ou amplificação do sinal recebido pelo cristal. Os aparelhos apresentam um ajuste fino e grosseiro, calibrado em “dB”, num mesmo controle ou separados. Nos aparelhos digitais, pode-se ajustar o controle fino em avanços de até 0,5 dB, impossíveis nos aparelhos analógicos.

- Escala:

As graduações na tela do aparelho podem ser modificadas conforme a necessidade, para tanto a chave vem calibrada em faixas fixas (ex: 10, 50, 250 ou 1000mm). Para os aparelhos digitais, a escala é automática, isto é uma vez, calibrada uma escala qualquer, as outras mantém a proporcionalidade.

- Velocidade de propagação:

A velocidade de propagação ao ser alterada no aparelho nota-se claramente que o eco de reflexão produzido por uma interface, muda de posição na tela do osciloscópio, permanecendo o eco original em sua posição inicial.

O aparelho de ultrassom é basicamente ajustado para medir o tempo de percurso do som na peça ensaiada através da relação: $S = v \times t$ onde o espaço percorrido (S) é proporcional do tempo (t) e a velocidade de propagação (v), no material, ajusta-se a leitura para unidade de medida (cm, m, etc.).

Nos aparelhos, dependendo do modelo e fabricante, poderá existir um controle da velocidade ou simplesmente um controle que trabalha junto com o da escala do aparelho. No primeiro caso, existe uma graduação de velocidade (m/s) em relação aos diferentes materiais de ensaio ultrassônico. Nos aparelhos digitais o ajuste de velocidade é separado e deve ser ajustado corretamente para uma perfeita calibração da escala.

Cuidados Referentes à Calibração:

No capítulo a seguir será discutido em detalhes, o significado e importância da calibração do aparelho de ultrassom. No entanto, o operador deverá proceder uma recalibração dos instrumentos e acessórios sempre que:

- Houver trocas de transdutores no decorrer de inspeção
- O aparelho for desligado
- Transcorrer 90 minutos com o aparelho ligado
- Houver troca de operadores

Os aparelhos de ultrassom devem ter o ganho e escala calibrados conforme a norma BSI 4331 Part.1 ou ASME* Sec. V, conforme aplicável, como segue;

Na verificação da calibração da linearidade vertical do aparelho de ultrassom, executando no controle de ganho as variações conforme o recomendado pela tabela abaixo, e verificando na tela do aparelho, as amplitudes dos ecos provenientes do furo de diâmetro 1,5 mm do bloco de calibração Tipo 1. Caso a amplitude dos ecos não correspondam ao esperado, deve-se concluir que o aparelho necessita de manutenção, e deve ser enviado à assistência técnica especializada.

Verificação da linearidade vertical do aparelho de ultrassom
Conforme da norma BS-4331 Part.1

GANHO (dB)	Altura esperada do eco em relação à altura da tela (%)	Limites aceitáveis da Altura do eco
+2	100	não menor que 90%
0	80	-
-6	40	35% a 45%
-18	10	8% a 12%
-24	5	deve ser visível acima da linha de base

Uma outra forma de verificar a linearidade vertical do aparelho de ultrassom é através do Código ASME* Sec. V Art.4 ou 5 que difere da tabela anterior. Um transdutor angular deve ser utilizado num bloco contendo dois furos que produzirão na tela do aparelho os ecos de referência para aplicação das tabelas a seguir.

Verificação da linearidade em amplitude da tela do aparelho de ultrassom
Conforme Código ASME Sec. V Art. 4 e 5

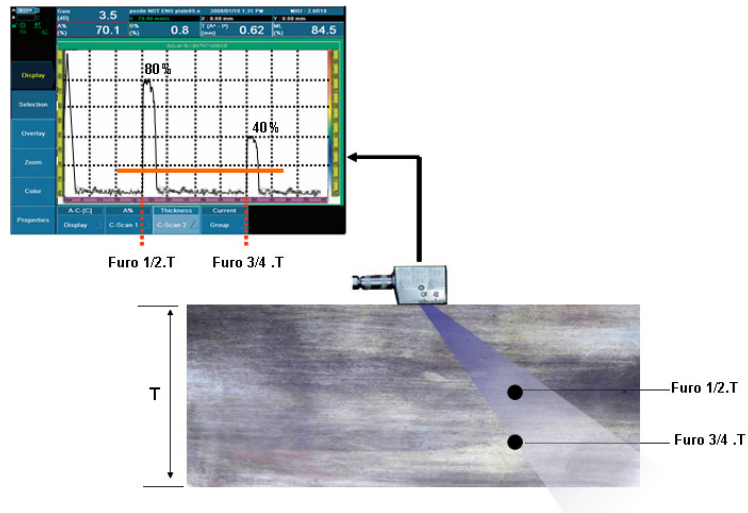
Ajuste da Indicação na Altura Total da Tela (%)	Ajuste do Controle de Ganho (dB)	Limites Aceitáveis da Altura da menor Indicação (%)
80	-6	32 a 48
80	-12	16 a 24
40	+6	64 a 96
20	+12	64 a 96

Outra verificação que deve ser feita é a linearidade em altura da tela, onde o transdutor angular deve ser posicionado sobre o bloco básico de calibração com o ponto de saída do feixe angular dirigido para ambos os refletores cilíndricos do bloco, ajustando a escala do aparelho de modo a obter ecos bem definidos provenientes dos furos $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$.T.

Ajuste o controle de ganho e ao mesmo tempo o posicionamento do transdutor de modo a obter na tela do aparelho os dois ecos numa relação de 2:1 em termos de amplitude, sendo o maior com amplitude de 80% da tela.

Sem alterar a posição do transdutor, reduza sucessivamente o controle de ganho, em incrementos de 10% ou "steps" de 2 até que o maior eco esteja a 20% de altura da tela, efetuando a cada decréscimo uma leitura da altura da menor indicação.

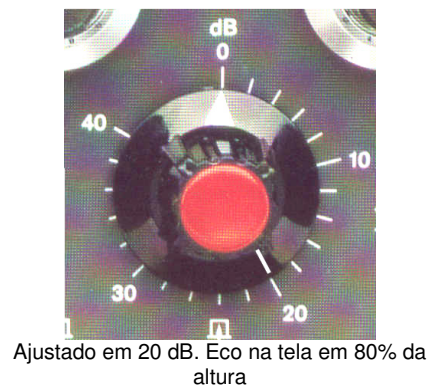
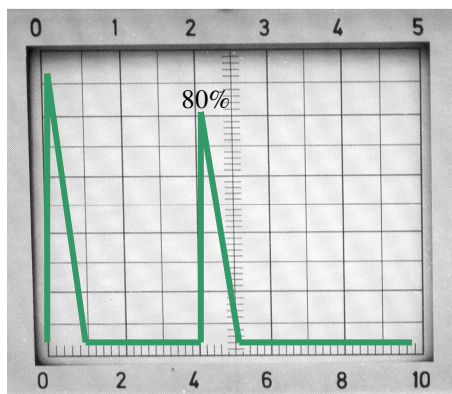
A leitura da menor indicação deve sempre estar a 50% de altura da maior indicação.



Bloco de Verificação da Linearidade em altura da tela do aparelho de Ultrassom conforme Código ASME Sec. V Art.4 e 5

Exemplo de Verificação do controle de Ganho do Aparelho de Ultrassom

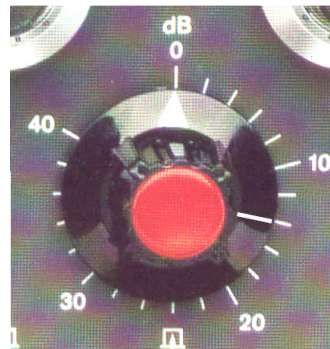
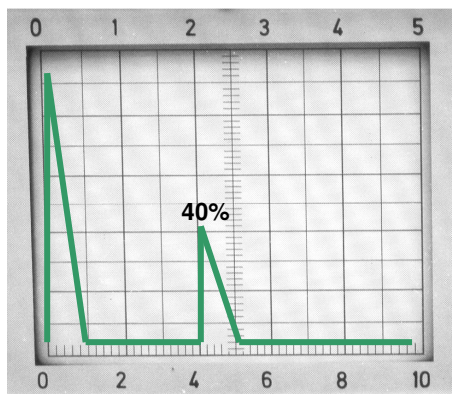
Obtenha um eco na tela do aparelho acoplando o transdutor em qualquer peça ou bloco de calibração. Ajuste o controle de ganho para obter o eco a 80% da altura da tela , conforme mostra os exemplos das figuras abaixo.



* BS = norma Inglesa , British Standard

* ASME = código de fabricação de vasos de pressão , American Society of Mechanical Engineer

Mantenha o transdutor fixo sem variações, e em seguida reduza o controle de ganho em 6 dB, como mostra as figuras dos exemplos abaixo



Reduzido para 14 dB (-6dB). Eco na tela reduzido para 40% da altura.

Você poderá avaliar o resultado deste teste, verificando se o eco reduziu para 40% \pm 2 % da altura da tela, ou seja, pela metade dos 80% inicialmente ajustado. Caso isto não tenha ocorrido, o aparelho não está com o controle de ganho devidamente calibrado.

Cuidados no Uso de Transdutores Angulares:

Como vimos, as sapatas de acrílico dos transdutores angulares são fabricadas para proporcionar ângulos de transmissão bem definidos. Entretanto o uso contínuo, e o conseqüente desgaste das sapatas, poderão alterar a performance do transdutor.

Tal problema poderá ser agravado quando a pressão do dedo do operador sobre o transdutor incidir nas bordas dos mesmos, fazendo com que o desgaste ocorra de modo irregular, alterando significativamente o ângulo nominal.

Cuidados no Manuseio dos Controles do Aparelho:

Os potenciômetros dos controles do aparelho analógico, de um modo geral, são dotados de um sistema de trava que tem a finalidade de não variar a calibração do aparelho durante seu uso. Portanto, quando se quer modificar a calibração do aparelho deve-se destravar o potenciômetro, pois caso contrário o mesmo será danificado. O mesmo não acontece nos aparelhos modernos digitais, em que os controles e ajustes são por teclas.

Cuidados com as Baterias:

Em geral os aparelhos são dotados de baterias recarregáveis, que necessitam carga após o uso. Como regra prática, o tempo de carga deverá ser o dobro do período de trabalho do aparelho.

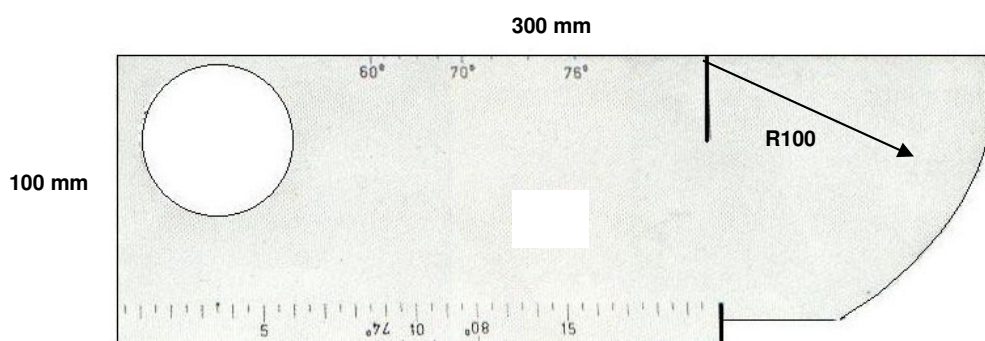
Calibração e Blocos Padrão:

O termo calibração deve ser analisado no seu sentido mais amplo entendendo o leitor como sendo o perfeito ajuste de todos os controles do aparelho de ultrassom, para uma inspeção específica segundo um procedimento escrito e aprovado pelo cliente / fabricante.

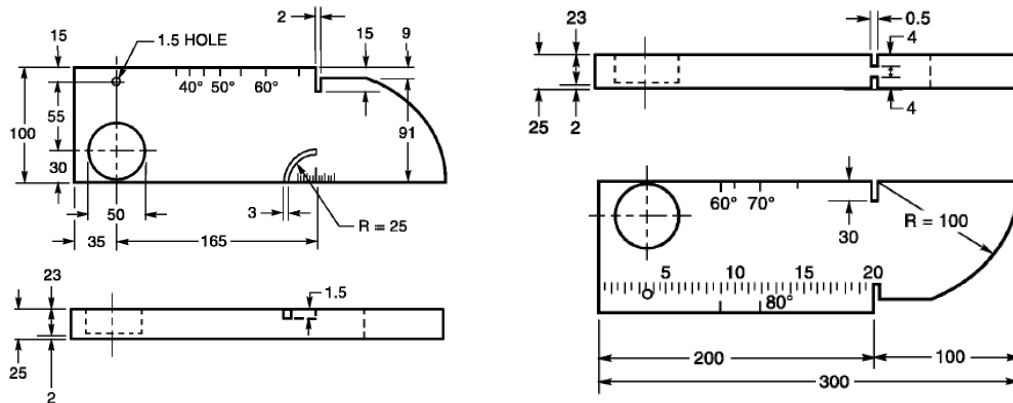
Os ajustes do ganho, energia, supressor de ruídos, normalmente são efetuados baseado em procedimentos específicos, entretanto a calibração da escala pode ser feita, previamente independente de outros fatores. Calibrar a escala, significa mediante a utilização de blocos especiais denominados Blocos Padrões, onde todas as dimensões e formas são conhecidas e calibradas, permitindo ajustar os controles de velocidade e zeragem, concomitantemente até que os ecos de reflexão permaneçam em posições definidas na tela do aparelho, correspondentes ao caminho do som no bloco padrão.

Tais blocos são construídos segundo normas **EN-12223** e **EN-27963**, de materiais que permitem o exame ultrassônico em aço carbono não ligado ou de baixa liga, com velocidade sônica de 5920 ± 30 m/s para ondas longitudinais e 3255 ± 15 m/s para ondas transversais.

O leitor deve ficar atento pois os blocos aqui mencionados não devem ser confundidos com os antigos blocos V1 da norma extinta *DIN 54109*. A norma AWS -American Welding Society, D1.1 requer um bloco de calibração construído conforme os requisitos do IIW -International Institute of Welding , Tipo 1, que se assemelha ao antigo bloco V1.



Bloco de Calibração Tipo 1 - Norma EN-12223
(veja as dimensões a seguir)

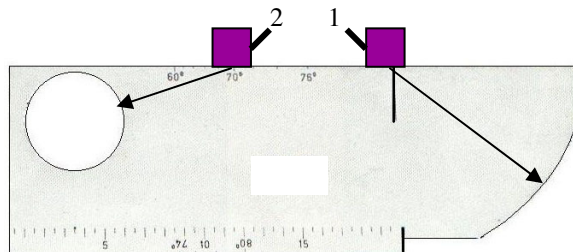


Bloco de Calibração conforme IIW -International Institute of Welding

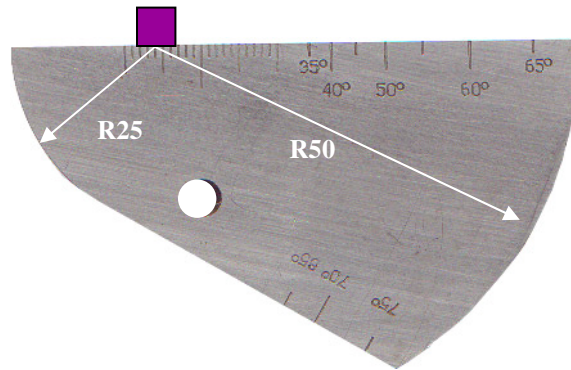
Tipo 1 (à esquerda) e Tipo 2 (à direita). A diferença deste bloco com o da norma EN-12223 está no diâmetro do pequeno furo que na norma IIW é de 1,5 mm e na EN-12223 é de 2,4 mm.

Os blocos de calibração devem ser apropriadamente calibrados quanto às suas dimensões, furos, entalhes e quanto à velocidade sônica do material que constitui o bloco, de preferência em laboratórios credenciados pela RBC ou que tenha certificação ISO 17025.

O Bloco Tipo 1 deve ser utilizado para calibrar as escalas na tela do aparelho usando as dimensões padronizadas, mas também verificar a condição do transdutor angular, com respeito ao ponto de saída do feixe sônico (posição 1 da figura) e a verificação do ângulo de refração do transdutor (posição 2 da figura). Em geral ± 2 graus é tolerável.

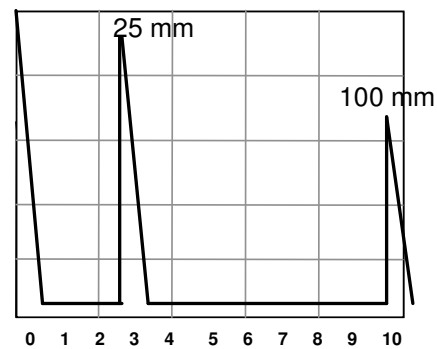
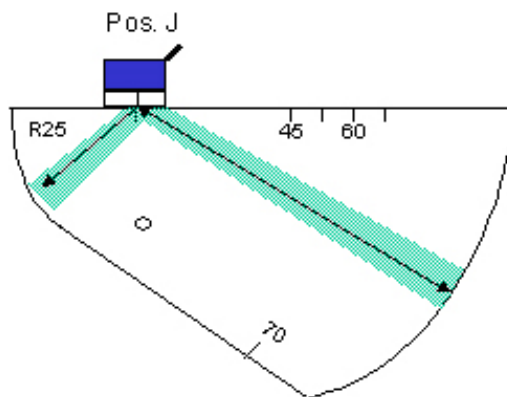


Verificação do ponto de saída do feixe sônico e ângulo do transdutor.



Bloco de calibração Tipo 2 (Norma EN-27963). Espessura do bloco 12,5 mm

Uma das características do Bloco de calibração Tipo 2 é a sequência de repetição dos ecos de reflexão nos raios de curvatura de 25 mm e 50 mm, conforme mostrado na figura. Posicionando o transdutor angular em "J" sobre o bloco Tipo 2, como mostrado na figura abaixo, deverão ser obtidos na tela do aparelho de ultrassom ecos múltiplos de reflexão dos raios de 25 mm e 50 mm, ajustados nas distâncias de 25 mm , 100 mm e 175 mm, com auxílio do controle de velocidades.

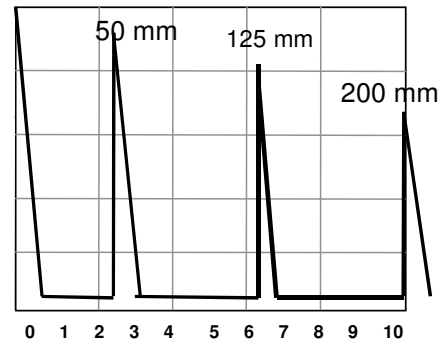
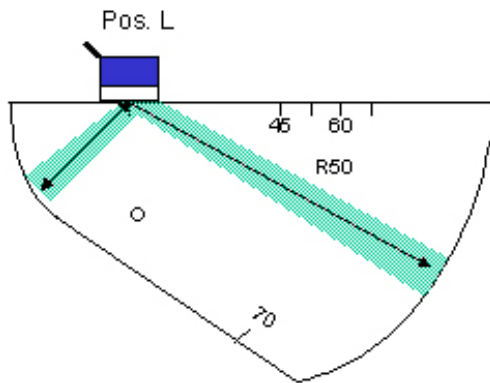


Escala de 100 mm

O eco correspondente à 100 mm na verdade representa o caminho do som no raio de 25 mm + o raio de 50 mm + o raio de 25 mm novamente

Isto ocorre pois o feixe sônico que atinge o transdutor na direção contrária ao de saída do feixe não é captado pelo cristal.

O leitor deve ficar atento pois os blocos aqui mencionados não devem ser confundidos com os antigos blocos V2 da norma extinta *DIN 54122*.

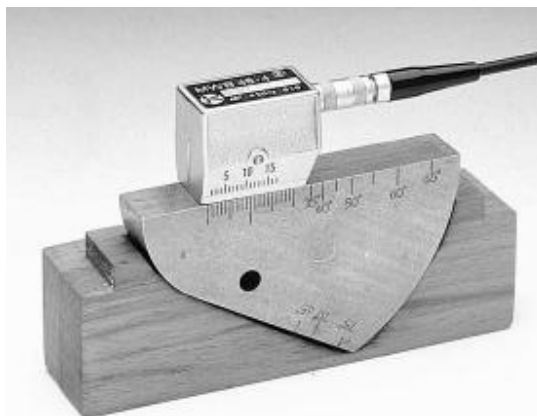


Escala de 200 mm

O eco correspondente à 200 mm na verdade representa o caminho do som no raio de 50 mm + o raio de 25 mm + o raio de 50 mm + o raio de 25 mm + o raio de 50 mm novamente

Isto ocorre pois o feixe sônico que atinge o transdutor na direção contrária ao de saída do feixe não é captado pelo cristal.

Posicionando o transdutor angular em "L" sobre o bloco Tipo 2 , como mostrado na figura anterior, deverão ser obtidos na tela do aparelho de ultrassom ecos múltiplos de reflexão dos raios de 50 mm e 25 mm, ajustados nas distâncias de 50 mm , 125 mm e 200 mm, com auxílio do controle de velocidades.



Formas de Representação na Tela dos Aparelhos

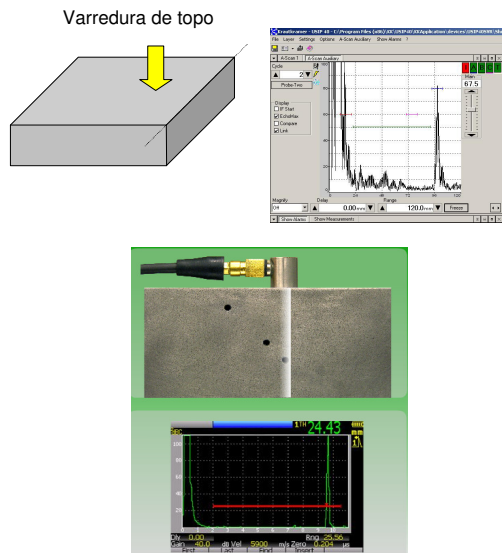
A tela do aparelho de ultrassom pode apresentar de três formas básicas a secção da peça inspecionada, que são:

- A-scan
- B-scan
- C-scan

O aparelho de ultrassom deve incorporar circuitos eletrônicos especiais para cada forma de apresentação. Assim, o inspetor deve identificar no aparelho quais as formas de apresentação disponíveis para uso.

- Forma de apresentação **A-Scan**

Neste tipo de apresentação a tela do aparelho mostra a forma tradicional de visualização da tela, ou seja, na forma de ecos de reflexão.

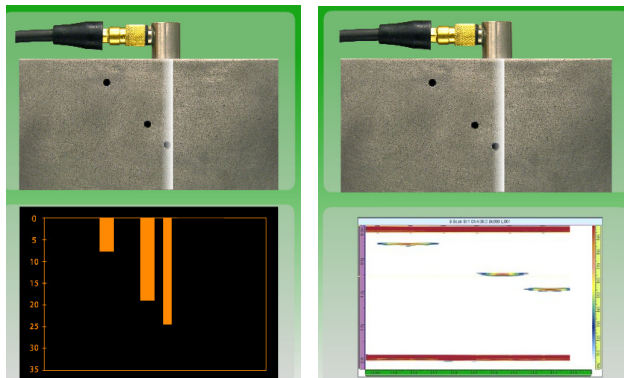


Na representação A-Scan, os ecos na tela indicam a reflexão do som nas interfaces

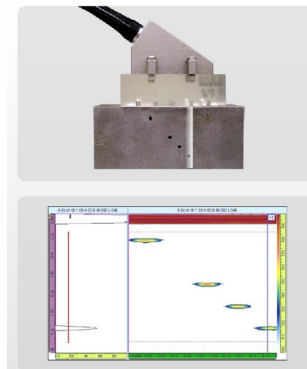
Figuras Cortesia da Olympus
www.olympus-ims.com

- Forma de apresentação **B-Scan**

Neste tipo de apresentação, a tela do aparelho mostra a seção transversal da peça, e, portanto, a visualização da peça é feita em corte. Este tipo de apresentação não é convencional, e somente aparelhos dotados de funções especiais são capazes de mostrar esta forma de apresentação.



→ B-Scan - É muito útil para análise de corrosão em peças e tubos e chapas pois o perfil da espessura é visto diretamente na tela.

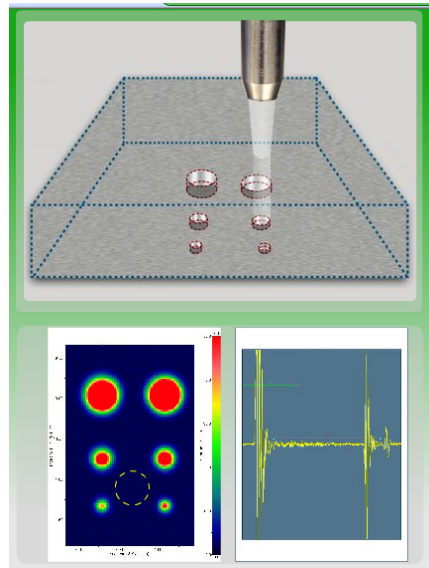


→ A representação B - Scan também pode ser realizada com o transdutor Phased Array. No exemplo da figura ao lado, o transdutor não é movimentado, a sequência de ecos é realizada eletronicamente com os vários cristais do transdutor.

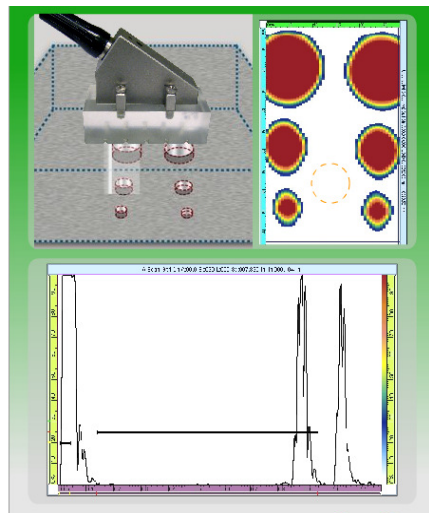
Figuras Cortesia da Olympus
www.olympus-ims.com

- Forma de apresentação **C-Scan**

Este tipo de apresentação não é convencional, e somente aparelhos dotados de funções especiais são capazes de mostrar esta forma de apresentação. Nesta representação a peça é mostrada em planta na tela do aparelho, indicando as regiões onde discontinuidades internas estão presentes, assim como suas dimensões.

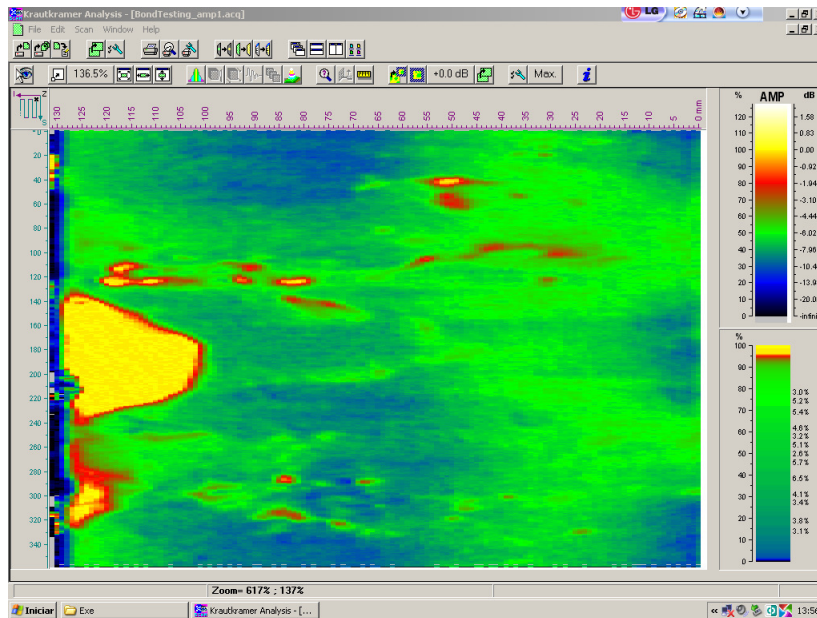


C-Scan - neste tipo de apresentação a tela do aparelho mostra a peça no sentido "planta" ou seja a vista de cima da peça. A varredura do transdutor, geralmente mecanizada, mostra as indicações na tela do aparelho visualizadas por cima, no entanto o software permite que seja obtido mais informações sobre cada uma das indicações, tal como profundidade, amplitude, etc....



Varredura C-Scan com método Phased Array. Mais rápido em razão dos inúmeros cristais no transdutor.

Figuras Cortesia da Olympus
www.olympus-ims.com



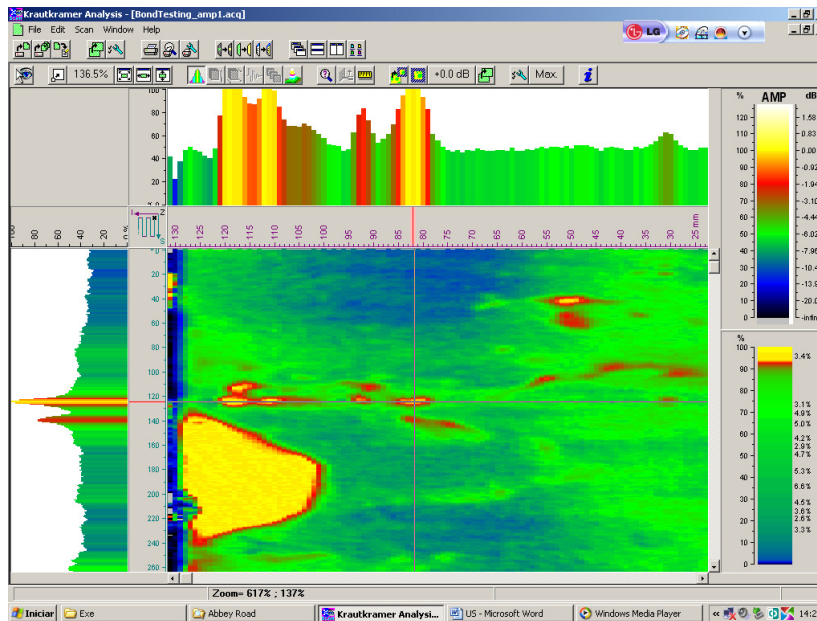
Palheta de cores para identificar as amplitudes dos sinais

Tela do aparelho GE modelo USIP-40 em C-Scan de uma peça com revestimento metálico (clad). As áreas amarelas mostram falta de aderência do revestimento no metal base. (gentileza da GE Industrial Technologies)

Neste tipo de apresentação a tela do aparelho mostra a peça no sentido "planta" ou seja a vista de cima da peça. A representação C-Scan acima foi obtida a partir da varredura automática da superfície de uma peça com revestimento, usando o aparelho de ultrassom USIP-40, onde pode ser vista as áreas amarelas (mais claras) indicando a total falta de aderência do material de revestimento.

Na figura abaixo, a palheta colorida do lado direito mostra a variação da amplitude do eco da interface entre revestimento e metal base sobre toda a superfície da peça.

A varredura é efetuada conectando um sistema eletrônico de coordenadas X,Y denominado "encoder" fixado na peça, que emite um sinal ao aparelho de ultrassom sempre que um ciclo do ensaio for completado (por exemplo varredura no sentido da largura ou do comprimento da peça) e uma mudança da região de varredura é requerida.



Palheta de cores para identificar as amplitudes dos sinais

Tela do aparelho USIP-40 em C-Scan (ao centro) e P-Scan (gentileza da GE Industrial Technologies)

O mesmo equipamento de ultrassom também pode fornecer na tela outras representações, como a acima mostrada. Podemos ver a representação C-Scan no centro, e acima a representação P-Scan mostrando a altura do eco de interface no ponto de cruzamento das coordenadas x,y do plano da peça.

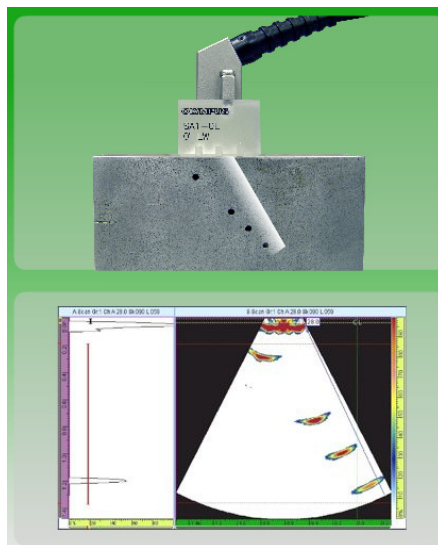
A varredura automática e captação de dados pelo aparelho de ultrassom, representa hoje um avanço significativo no processo de inspeção industrial, pois uma série de informações sobre as indicações detectadas são coletadas e armazenadas somente pelo aparelho, dispensando a participação do inspetor. O mapeamento obtido é gerado pelo software que impossibilita adulterações.

- Forma de apresentação para Varredura Setorial Angular por Phased Array (S-Scan)

Este tipo de apresentação não é convencional, e somente aparelhos dotados de funções especiais phased array, são capazes de mostrar esta forma.

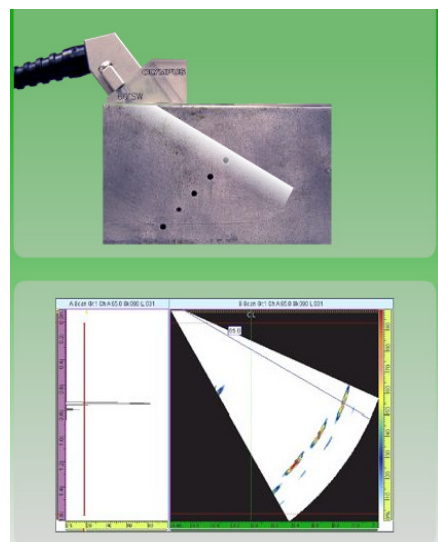
A varredura do feixe angular de ultrassom emitido pelo transdutor phased array, pode ser alterar automaticamente o ângulo de entrada na peça, segundo a necessidade.

Varredura angular usando um transdutor phased array, também conhecido por S-Scan



A varredura é efetuada sem movimento do transdutor.

O feixe sônico é setorial produzido angularmente pelo transdutor mostrando na tela a posição das indicações a partir do centro do transdutor.



Figuras Cortesia da Olympus
www.olympus-ims.com



Inspeção típica de uma solda usando a técnica Phased-Array.
Aparelho de ultrassom OmniScan MX2 – Cortesia da Olympus

A técnica Phased-Array permite inspecionar soldas e peças em geral com velocidade de ensaio maior que a técnica convencional, em razão da possibilidade de ajustar no aparelho para que numa única varredura possa inspecionar a região das peças com ângulos variando em intervalos pré-determinados, por exemplo de 45° a 70° e ainda mostrando na tela a imagem característica desta técnica o que facilita a visualização das indicações pelo inspetor.



Foto mostrando a detecção de uma trinca e a imagem Phased Array correspondente (Cortesia da Olympus)

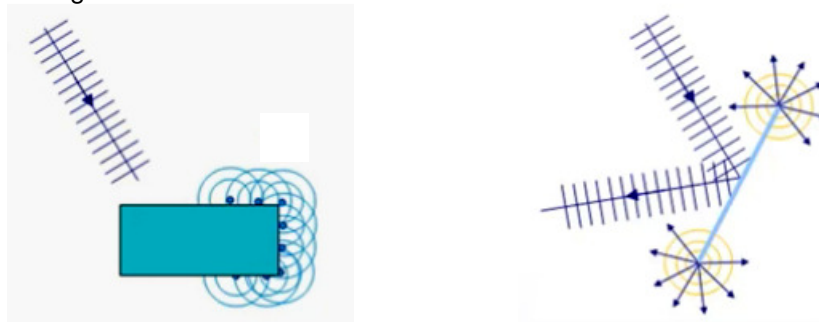
Entendendo a Tecnologia e Forma de Representação TOFD – Time of Flight Diffraction¹

Este tipo de apresentação não é convencional, e somente aparelhos dotados de funções especiais TOFD são capazes de mostrar esta forma na tela.

Para melhor entendimento do processo, dividiremos o assunto em partes: conceituação e entendimento do princípio básico; a técnica ; apresentação na tela

Conceituação e Princípio Básico ¹:

Uma onda ou vibração ultrassônica, quando incide num objeto, faz com este vibre da mesma forma que a onda incidente, inclusive todos os pontos que formam o objeto. Se considerarmos uma descontinuidade interna no material, como objeto, a onda ultrassônica incidente provocará uma vibração da falha, criando em suas bordas a geração de ondas longitudinais que se propagam através do material. Vejam na figura abaixo.



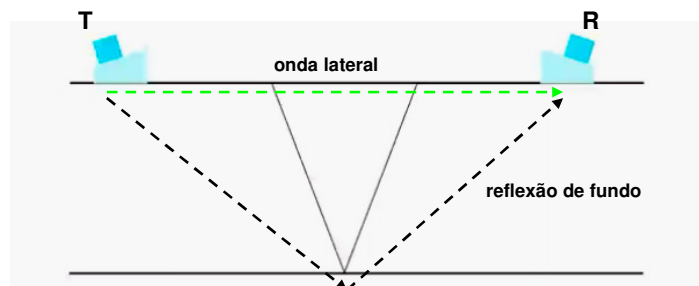
Objeto vibra ao impactar uma onda ultrassônica

As bordas de uma descontinuidade vibra como um sino ao impactar uma onda ultrassônica, gerando ondas longitudinais esféricas a partir das bordas.

Figuras Cortesia da Olympus - www.olympus-ims.com

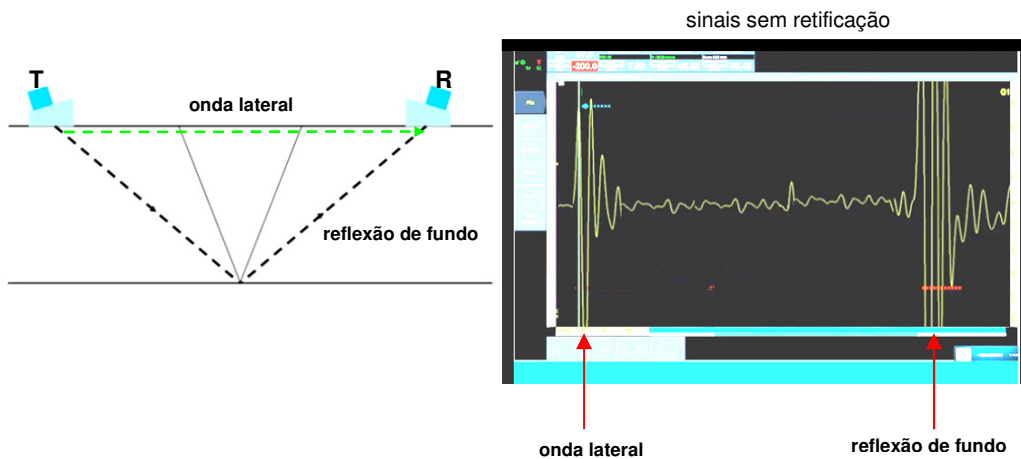
A Técnica

Consisti na utilização de dois transdutores angulares geradores de ondas longitudinais com frequência maior que 2,25 MHz, posicionados como na técnica de transparência. Um transdutor (T) transmite as ondas sônicas e outro (R) as recebe. No exemplo abaixo, uma solda será objeto de inspeção por TOFD.



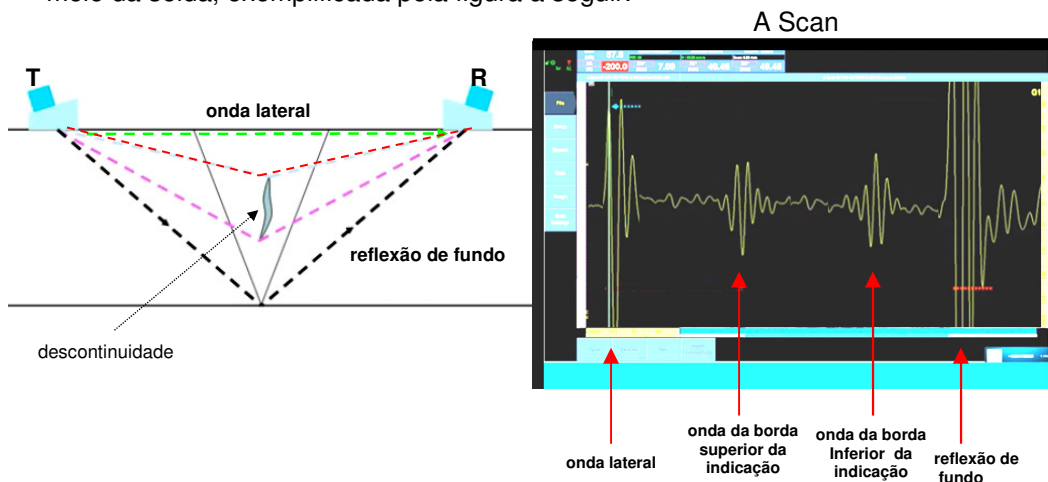
¹ A bibliografia adotada neste texto é Cortesia da Olympus - www.olympus-ims.com

Observe que uma onda ultrassônica lateral é também produzida pelo transdutor “T” e esta é captada pelo transdutor “R”. Portanto os sinais obtidos correspondentes serão como mostrados no ecograma abaixo, na forma A-Scan:



Observe que nas indicações na tela do aparelho, sem retificação, o sinal da onda lateral ocorre primeiro, pois a distância é menor que a indicação de fundo, devido à reflexão do feixe sônico na parede oposta da peça. Portanto qualquer indicação que aparecer entre o sinal da onda lateral e a reflexão de fundo, deve ser analisada pois provavelmente pode se tratar de uma descontinuidade.

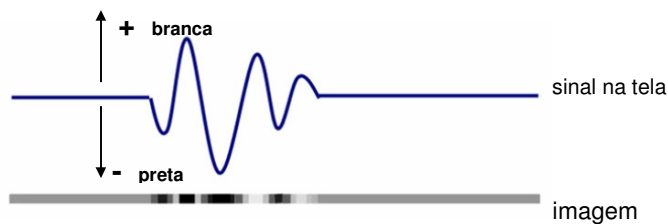
Vamos examinar um caso de ocorrência de uma descontinuidade localizada no meio da solda, exemplificada pela figura a seguir.



Conforme já explicado acima, nas bordas da descontinuidade ocorrerá uma difração da onda incidente emitido pelo transdutor “T”. Na borda superior da descontinuidade se propaga uma onda longitudinal que é recebida pelo transdutor “R” representada pelo sinal na tela próximo ao sinal da onda lateral. Na borda inferior ocorrerá o mesmo fenômeno, porém o sinal será mais distante, pois o caminho do som é maior, sendo recebido pelo transdutor “R” representado pelo sinal mais próximo da reflexão de fundo.

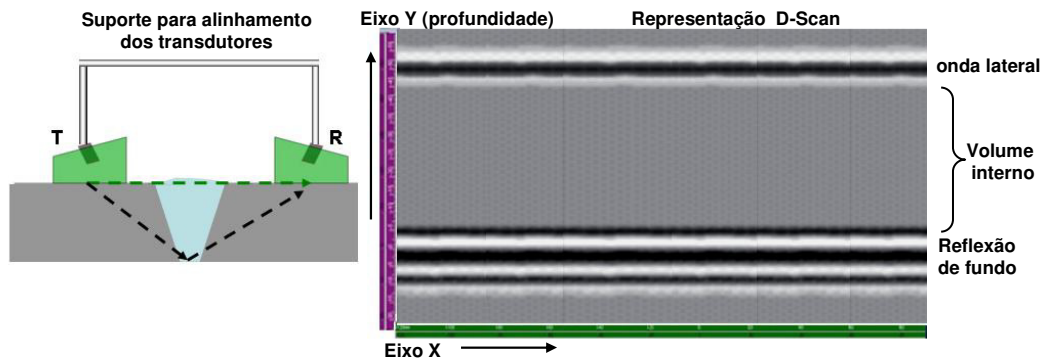
A apresentação na Tela - Formação da Imagem TOFD (D-Scan)

O aparelho de ultrassom contém circuitos especiais que armazena um programa (software) que transforma o sinal na tela numa imagem, que se assemelha ao B-Scan já estudado anteriormente. O sinal na tela do aparelho é convertido numa imagem ou figura em tons de cinza seguindo o seguinte critério:



Quando a oscilação ou fase do sinal for para baixo (negativo), a imagem interpretada pelo software e marcado na tela é escura ou preta, e quando o sinal é para cima (positivo) o sinal é marcado na tela é claro ou branco. Quanto maior for a amplitude do sinal, maior será a intensidade com que a imagem é plotada na tela.

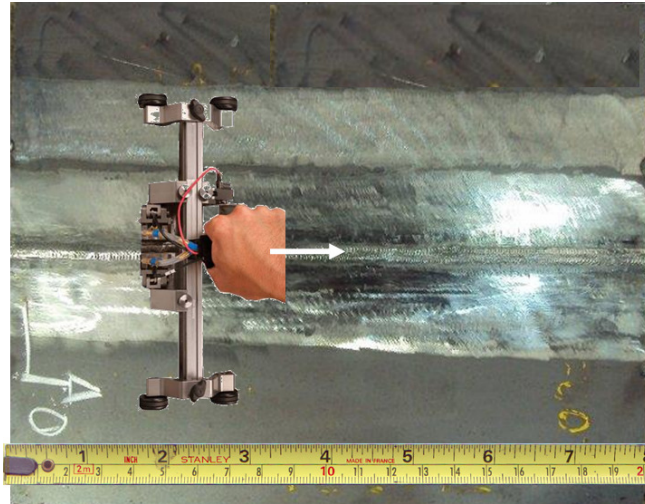
Portanto a imagem **TOFD** padrão na tela, também chamada de **D-Scan**, devido somente aos sinais da onda lateral e a reflexão de fundo, isento de imperfeições, será conforme segue:



A imagem na tela é obtida com o escaneamento (deslizamento) paralelo dos transdutores sobre a superfície de toda a área de interesse e para tanto é necessário um dispositivo de suporte para manter alinhado os transdutores. Para a perfeita localização na tela de cada ponto ao longo dos eixos X,Y, é utilizado um *encoder* (codificador de posicionamento) que é deslocado em conjunto com os transdutores fixado no mesmo suporte. O encoder é interligado eletronicamente com software do aparelho de ultrassom, assim, à medida que a roda gira sobre a superfície da peça, é registrada a distância do “zero” até o final do escaneamento.

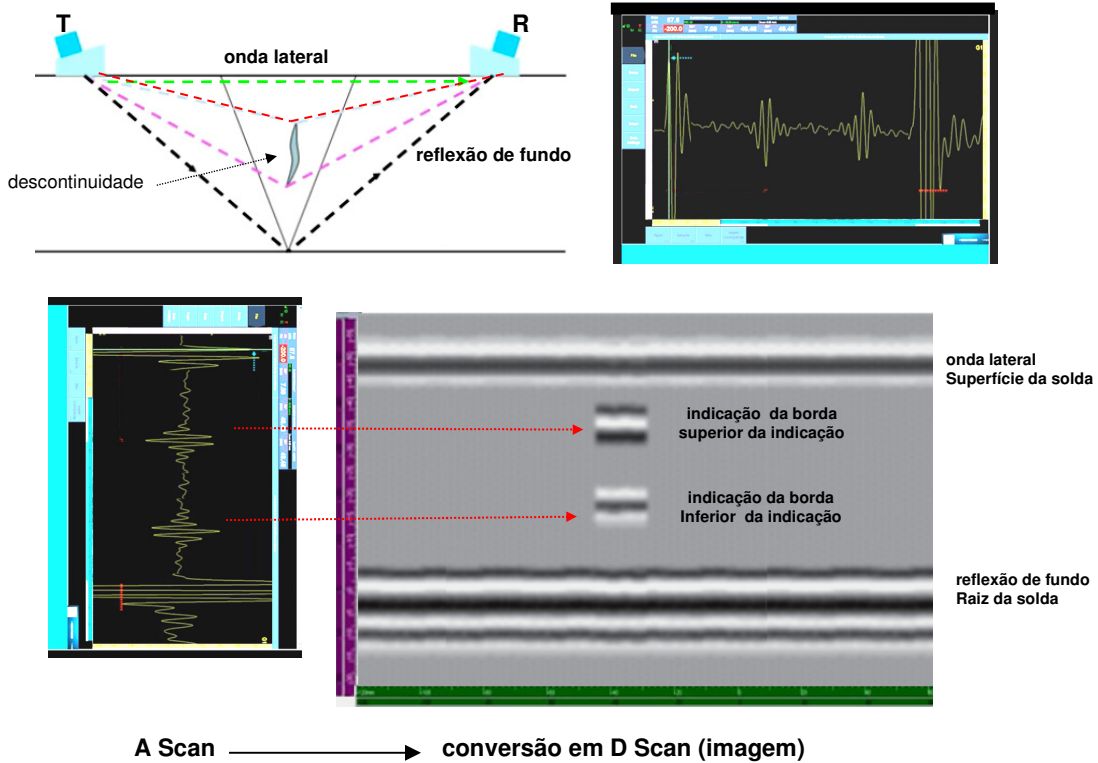


Encoder Olympus modelo Mini-Wheel usado para posicionamento e dimensionamento de indicações no eixo de varredura. Isto sincroniza a aquisição dos dados com o movimento do transdutor.

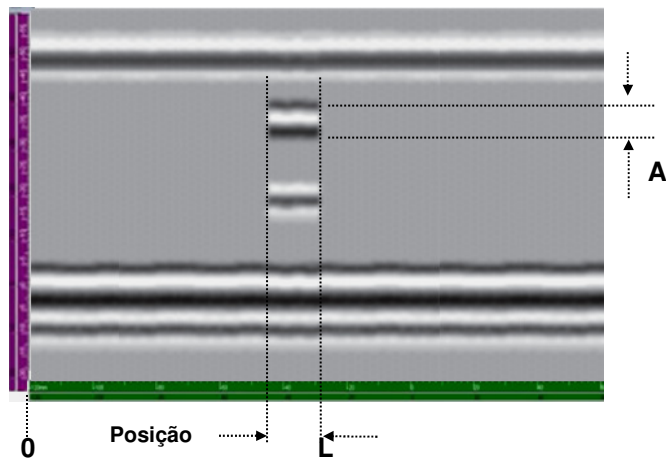


Exemplo de escaneamento TOFD manual da junta soldada usando um dispositivo mecânico dotado de rodinhas magnéticas. No dispositivo é fixado os transdutores e o encoder.

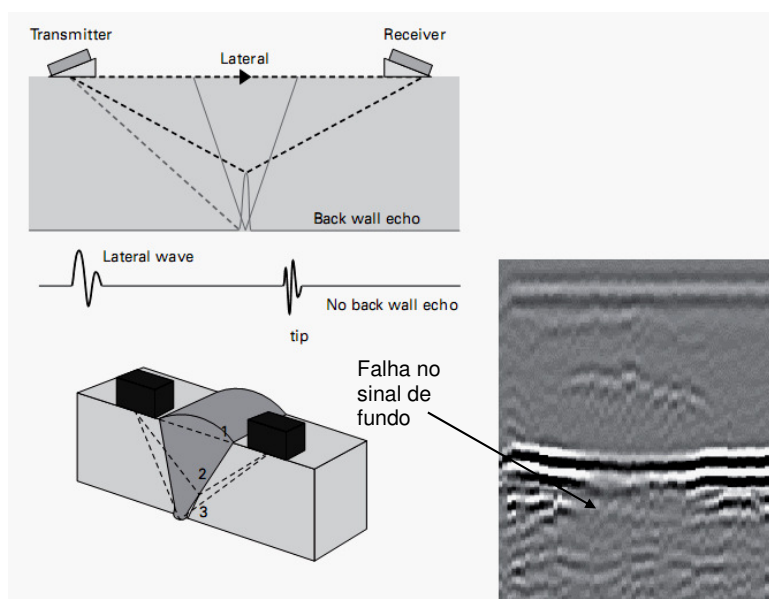
Vejamos como seria o resultado da aquisição de dados (imagem TOFD) para uma junta soldada contendo uma descontinuidade, já descrita anteriormente.



No exemplo anterior, observem que a visualização da descontinuidade é feita pela simples observação da imagem na tela. O comprimento (L) da descontinuidade, profundidade, altura (A) e sua posição na junta soldada, em relação ao ponto zero, é lida diretamente na escala na tela do aparelho (eixo X). A imagem obtida na tela é possível gravá-la ou imprimi-la para registro e análise posterior.

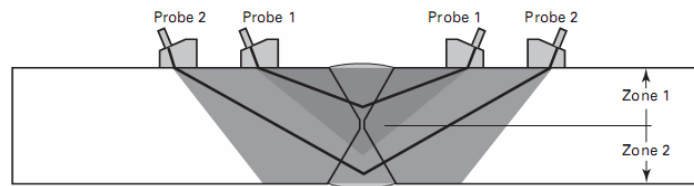


Caso exista uma descontinuidade na superfície da solda, por exemplo uma trinca superficial, a onda lateral será bloqueada pela descontinuidade e o sinal na tela não existirá, tornando fácil sua interpretação. Da mesma forma, caso exista uma falta de penetração na raiz da junta em "V" mostrada no exemplo abaixo, a reflexão de fundo será bloqueada pela descontinuidade e o sinal na tela não existirá, e assim será fácil sua identificação na tela.

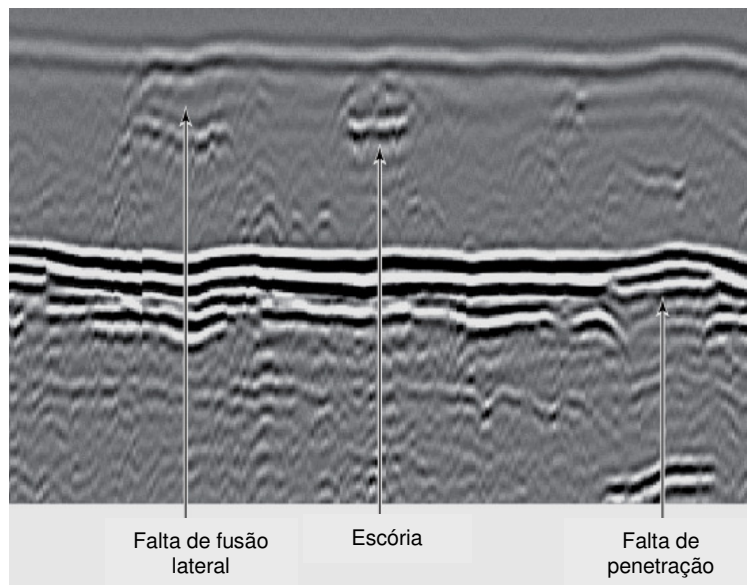


Indicação TOFD de uma descontinuidade na raiz da junta soldada

Para cobertura completa do volume da solda, bem como do atendimento do requisito de varredura com no mínimo dois ângulos, é necessário acoplar no dispositivo de varredura ou escaneamento, dois ou mais conjuntos de transdutores com ângulos diferentes, como mostra a figura a seguir.



A interpretação da imagem TOFD (D-Scan) nem sempre é intuitiva e pode trazer alguma dificuldade em visualizar a descontinuidade. Abaixo uma imagem TOFD mostrando alguns defeitos de solda.



Indicações típicas de descontinuidades em juntas soldadas pela técnica TOFD
(Figura extraída do Código ASME Sec. V Art.4)

Uma variação interessante da técnica TOFD é a substituição dos transdutores monocristal por transdutores Phased Array, as possibilidades de realização do ensaio por esta técnica são maior, e também poderá ser usado menos transdutores no dispositivo de varredura.

Procedimentos Específicos de Inspeção

Procedimento para Inspeção de Soldas:

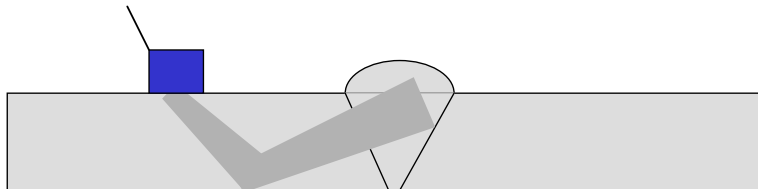
A inspeção de soldas por ultrassom ,consiste em um método que se reveste de grande importância na inspeção industrial de materiais sendo uma ferramenta indispensável para o controle da qualidade do produto final acabado, principalmente em juntas soldadas em que a radiografia industrial não consegue boa sensibilidade de imagem , como por exemplo juntas de conexões , ou mesmo juntas de topo com grandes espessuras.

Os procedimentos para inspeção de soldas descritos pelas Normas ou Códigos de fabricação, tais como ASME Sec. V Art.4 ou EN-1714, variam em função dos ajustes de sensibilidade do ensaio , dimensionamento das indicações , critérios de aceitação das descontinuidades encontradas, e outras particularidades técnicas. É importante que o procedimento de inspeção esteja de acordo com o projeto ou especificação técnica aplicável na peça sob ensaio. Portanto, descrevemos a seguir uma técnica básica para inspeção de soldas por ultrassom, entretanto o inspetor deve consultar o procedimento aprovado de sua empresa para o ensaio específico, ou ainda na falta deste, elaborá-lo segundo a norma aplicável ao produto a ser ensaiado.

Preparação das Superfícies de Varredura:

A inspeção da solda se processará através da superfície do metal base adjacente à solda , numa área que se estenderá paralelamente ao cordão de solda , que denominamos área ou superfície de varredura .

O resultado do ensaio por ultrassom é dependente da preparação das superfícies, assim devemos remover carepas, tintas, óxidos, pó, graxa e tudo que possa mascarar, ou impedir a penetração do feixe sônico na peça a ensaiar. Limitação de temperatura da peça deve ser levado em conta e está associado ao modelo e tipo do transdutor , pois altas temperaturas (acima de 60 °C) podem danificar os transdutores.

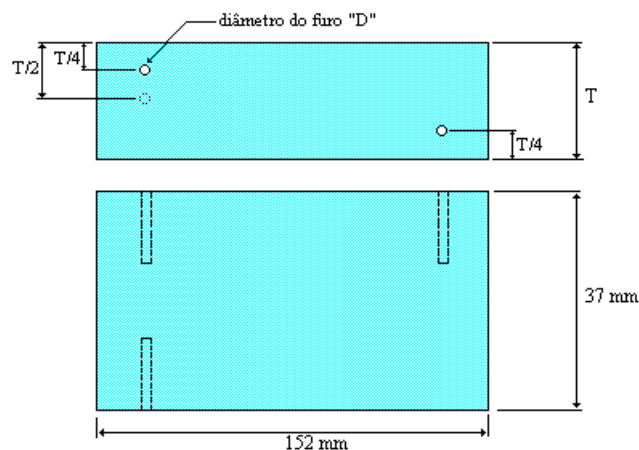


Técnica geral para inspeção de soldas de topo , por ultrassom

Calibração da Sensibilidade do Aparelho

A escala do aparelho deve ser calibrada através dos blocos padrões calibrados mencionados. A sensibilidade do aparelho deve ser calibrada através de um bloco com espessuras e furos de referência calibrados e de material acusticamente similar à peça ser ensaiada. Caso a calibração do aparelho seja feita em bloco e peça de materiais dissimilares, isto afetará a precisão das medidas efetuadas.

A figura abaixo descreve o bloco de calibração de forma simplificada, recomendado pela norma ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.V Artigo 4 usado para estabelecer a sensibilidade do ensaio pelo ajuste do controle de ganho do aparelho , que deve ser fabricado com mesmo acabamento superficial da área de varredura.



Bloco Básico de Calibração da Sensibilidade Simplificado para o Ensaio de Soldas, conforme o Código ASME Sec. V Artigo 4

Seleção do Bloco de Calibração para superfícies planas

Espessura da solda "t" (mm)	Espessura "T" do bloco (mm) *	Diâmetro "D" do furo de referência (mm)
1"(25) ou menor	3/4"(20) ou t	3/32" (2,5)
Acima de 1"(25) até 2"(50)	1.1/2"(38) ou t	1/8" (3,0)
Acima de 2"(50) até 4"(102)	3"(75) ou t	3/16" (5,0)
Acima de 4" (102)	$t \pm 1$ (25)	nota 1

Fonte: Código ASME Sec.V Art. 4 e 5

* Bloco de calibração válido para superfícies planas ou com curvaturas maiores que 20 polegadas (508 mm) de diâmetro,

Nota 1 : Para cada aumento de 2"(50) ou fração acima de 4"(102 mm) o diâmetro do furo deve ser aumentado em 1/16 da pol.(1,5 mm).

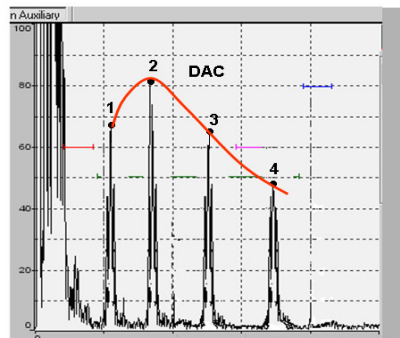
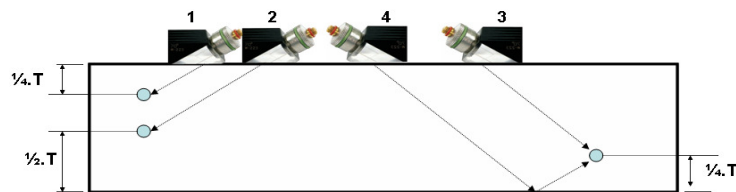
A frequência e ângulo do transdutor selecionado (ver tabela abaixo) pode ser significativo, dependendo da configuração da junta, material e espessura.

Espessura do material base (mm)	Ângulo do Transdutor (graus)
8 - 15	60 e 70
16 - 25	45 e 60 ou 60 e 70
26 - 40	45 e 60 ou 45 e 70
Maior que 40	45 e 60

A curva de sensibilidade é estabelecida de acordo com o procedimento descrito, através do posicionamento do transdutor angular (pos.1,2 ,3 e 4) de modo a detectar o furo de referência do bloco nas quatro posições indicadas. O controle de ganho do aparelho deve ser ajustado a partir da pos.1 da figura abaixo, onde o controle é ajustado até que o eco correspondente à reflexão do furo tenha uma altura de 80% da tela do aparelho. Acompanhe o processo abaixo descrito:

Preparação da Curva de Correção Distância Amplitude (DAC) e Ajuste a Sensibilidade do Ensaio

- a) Posicionar o transdutor sobre o bloco padrão de modo a obter resposta do furo que apresentar maior amplitude ;
- b) Ajustar a amplitude do eco a 80% da altura da tela. Este ganho é denominado “Ganho Primário-Gp” da curva de referência (DAC).
- c) Para completar a curva de referência e, sem alterar o ganho, posicionar o transdutor de forma a se obter ecos dos furos do bloco padrão a várias distâncias, até o alcance desejado, e traçar a curva unindo os pontos obtidos.
- d) Traçar as curvas de 50% e 20% da curva de referência (DAC).



Traçagem da Curva de Referência ou Curva DAC

A partir deste procedimento deve ser registrado o ganho do aparelho, que deverá ser mantido até o final da inspeção, porém verificado periodicamente ou quando houver troca de operadores. Caso haja uma diferença de acabamento superficial acentuada entre o bloco e a peça a ser inspecionada, um procedimento de transferência para correção do ganho do bloco para a peça deverá ser aplicado, para restabelecer o nível de sensibilidade original, conforme segue:

Um outro problema é o acoplamento do transdutor angular sobre superfícies curvas de pequeno diâmetro. Com a nova Edição 2017 do Código ASME Sec.V Artigo 4, foi introduzida uma regra para seleção do transdutor angular em função do tamanho deste e o perfeito acoplamento em tais superfícies. Componentes curvos com um diâmetro inferior a 14 polegadas (350 mm), é requerido uma verificação do tamanho da sapata do transdutor conforme segue abaixo, para garantir o suficiente acoplamento ultrassônico e limitar qualquer falha potencial do transdutor, que é movido ao longo da circunferência do componente.

Os transdutores devem ter sapatas que se molde na superfície curva, conforme requerido pela seguinte equação:

$$D \leq \left\{ \frac{A \times A}{0,113 \text{ pol. (2,87 mm)}} \right\}$$

Onde:

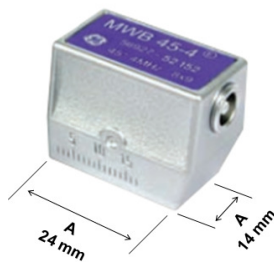
A = comprimento da sapata do transdutor na direção da varredura da solda longitudinal ou a largura quando, escaneando na direção da solda circunferencial, pol. (mm)

D = o diâmetro do componente na superfície de inspeção (D.I./D.E.), pol. (mm)

A sapata é definida como a dimensão física do transdutor na direção curva do componente.

Exemplos de Aplicação:

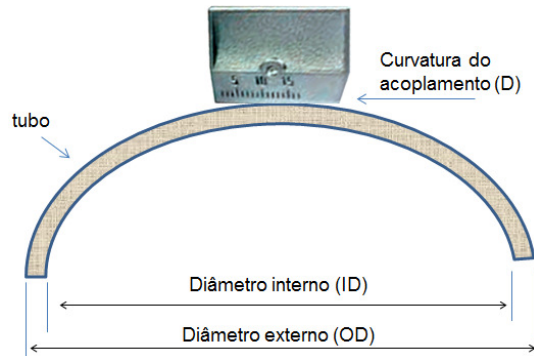
A título de exemplo para aplicação da fórmula acima, vamos pegar as dimensões de um transdutor tipo MWB:



O valor de “A” na fórmula poderá ser de 24 mm, caso a solda a ser examinada for longitudinal no tubo, e de 14 mm de a solda a ser examinada for solda circular, quer dizer, dependendo da posição do transdutor de acoplamento na superfície curva é selecionado a dimensão onde o acoplamento será prejudicado.

Vamos aos cálculos:

Exemplo 1 - Ensaio em soldas **longitudinais** em tubos com D.I ou D.E < 350 mm

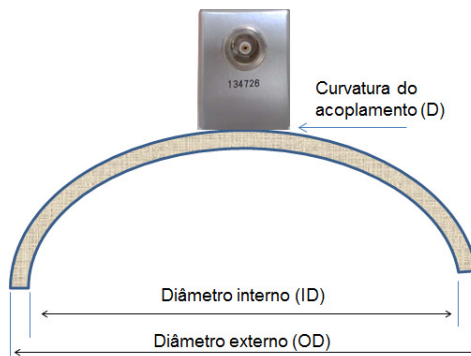


No caso do ensaio em solda longitudinalis, com o transdutor indicado no exemplo; teremos que $A = 24 \text{ mm}$:

$$D \leq \left\{ \frac{24 \times 24}{2,87} \right\} \leq 200 \text{ mm}$$

Isto significa que, este transdutor só pode ser usado nesta situação em tubos com diâmetros até 200 mm de diâmetro externo ou interno, sem perda de acoplamento.

Exemplo 2 - Ensaio em soldas **circular** em tubos D.E ou D.I < 350 mm



No caso do ensaio em solda circular, com o transdutor indicado no exemplo; teremos que $A = 14 \text{ mm}$:

$$D \leq \left\{ \frac{14 \times 14}{2,87} \right\} \leq 68,3 \text{ mm}$$

Isto significa que, este transdutor só pode ser usado nesta situação em tubos com diâmetros até 68,3 mm de diâmetro externo ou interno, sem perda de acoplamento.

Para ensaios realizados a partir do lado externo (DE) ou interno (DI) do tubo, um aumento ou redução na dimensão do diâmetro real do tubo é permitido segundo as seguintes tabelas abaixo:

Requisitos para ensaio pelo lado externo

Diâmetro externo real do Componente pol. (mm)	Aumento permitido no Contorno máximo sobre o Componente D.E pol. (mm)
< 4,0 (< 100)	< 1 (< 25)
≥4,0 até 10 (≥100 até 250)	< 2 (<50)
> 10 (>250)	< 4 (<100)

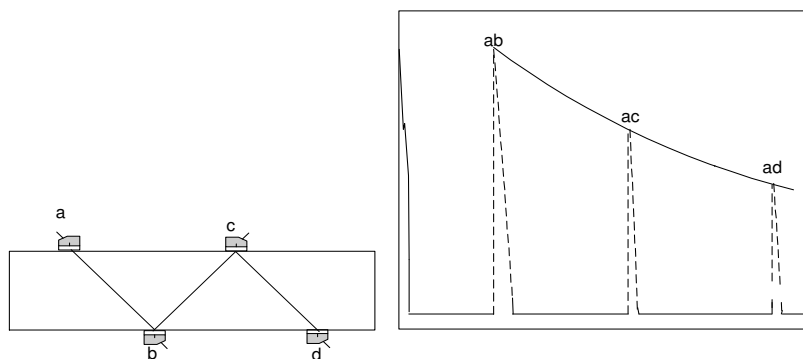
No nosso Exemplo 1, se a solda do tubo a ser inspecionada tiver um diâmetro de 180 mm, de acordo com a tabela acima é permitido um aumento máximo menor que 50 mm, ou seja, poderia ser 180 mm + 50 mm < 238 mm.

Requisitos para ensaio pelo lado interno

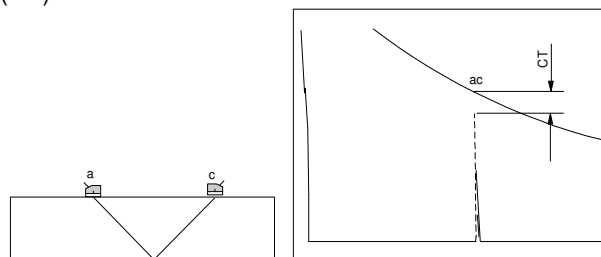
Diâmetro interno real do Componente pol. (mm)	Redução permitida no Contorno mínimo sobre o Componente D.I pol. (mm)
< 4,0 (< 100)	< 1 (< 25)
≥4,0 até 10 (≥100 até 250)	< 2 (<50)
> 10 (>250)	< 4 (<100)

Determinação do Fator de Correção da Perda por Transferência (PT)

- Posicionar dois transdutores iguais sobre o bloco de calibração com percurso sônico como mostrado na figura, usando a técnica de transparência.
- Ajustar o controle de ganho para que a amplitude do eco com os transdutores na pos. **a** e **b** esteja em 80% da altura da tela.
- Sem alterar o ganho marcar na tela os picos dos ecos das posições a-c e a-d.
- Unir os pontos para se obter uma curva de referência.



- e) Posicionar os transdutores no componente a ser ensaiado, metal base, obrigatoriamente sobre superfícies paralelas, para se obter o eco **a-c** sem alterar o ganho conforme item **b**.
- f) Ajustar, se necessário, a altura do eco obtido no componente a ser ensaiado até a curva descrita no item f
- g) Esta diferença ($\pm X$ dB) deverá ser anotada e usada como correção de transferência (PT).

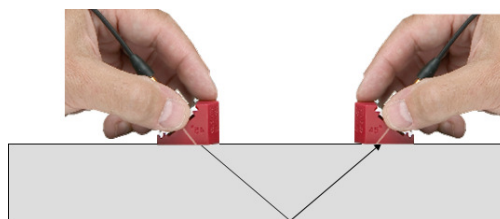


Correção da Transferência (PT)

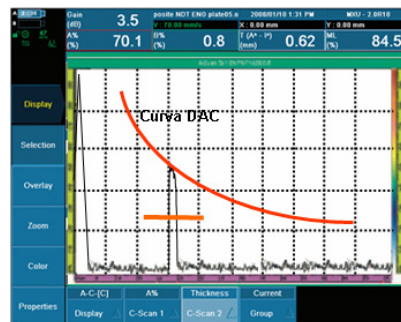
A correção da perda por transferência pode também ser realizada usando a própria curva DAC como referência para avaliar a PT ao invés da traçagem de uma nova curva, conforme descrito acima. Isso evita que o inspetor perca tempo em recalibrar o aparelho na traçagem da curva para PT.

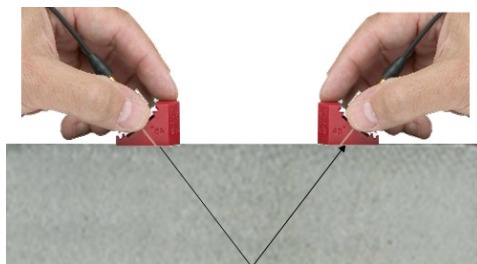
Técnica Opcional para Determinação da Correção por Transferência (PT):

Para avaliação da correção do ganho pela transferência o inspetor pode utilizar a própria curva DAC como referência, ou seja: Posicione os dois transdutores angulares no bloco de calibração, ajustando o ganho para que o eco obtido atinja a curva DAC. Após isso, posicione os mesmos transdutores na peça a ser inspecionada, que poderá ter espessura diferente. Observe a altura do eco obtido em relação à curva DAC, caso o eco fique abaixo da curva, verifique quantos dB's serão necessários para que este atinja a curva, este será a correção por transferência (PT).

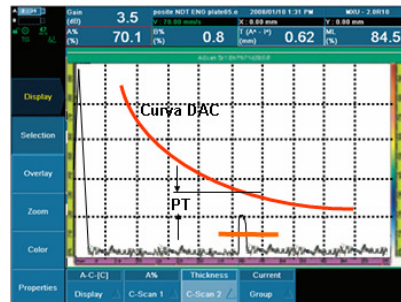


Bloco de calibração





Peça a ser inspecionada



Figuras: Cortesia da Olympus – www.olympus-ims.com

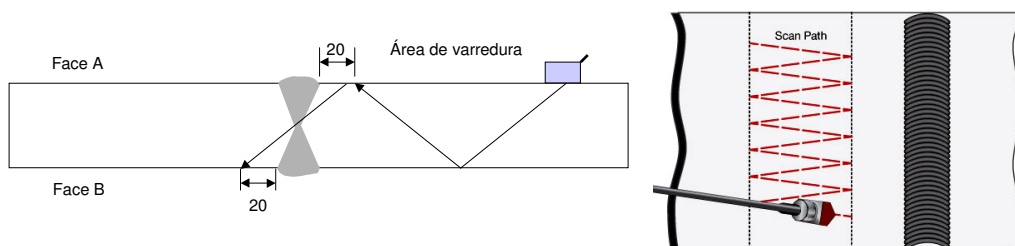
Esta técnica pode ser empregada, pois a curva do eco de fundo em intervalos pequenos tem a forma linear, conforme é mostrado nos diagramas AVG/DGS dos transdutores. Para transdutores normais, o mesmo procedimento é possível ser aplicado. Esta técnica de avaliação da PT, é indicada pelo ASME Sec.V Artigo 4.

Realização da Inspeção

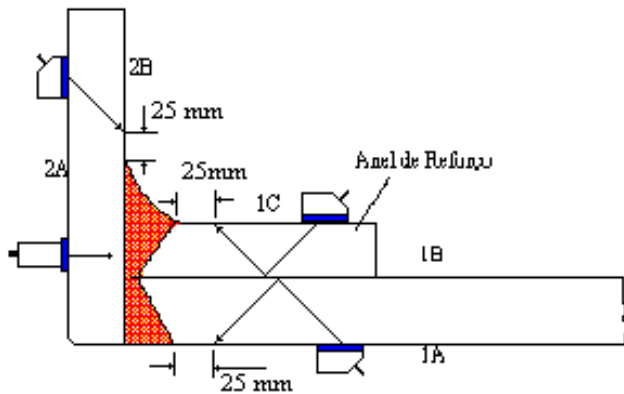
Para garantir a passagem do feixe sônico para a peça é necessário usar um líquido acoplante que se adapte à situação. Em geral, óleo, água, ou soluções de metil-celulose, podem ser utilizadas para esta finalidade. É recomendado efetuar algumas medidas no mesmo local, pois variações de acabamento superficial, pressão do transdutor sobre a superfície e outros, podem variar os resultados.

O transdutor deve ser deslizado sobre a superfície de varredura com o feixe ultrassônico voltado perpendicularmente à solda, de modo que as ondas atravessassem totalmente o volume da solda. Caso houver alguma descontinuidade no volume de solda, haverá reflexão nesta interface, retornando ao transdutor parte da energia ultra sônica, e conseqüentemente a indicação na tela do aparelho em forma de eco ou pulso.

Através da análise da posição do eco na tela do aparelho, o inspetor poderá localizar a descontinuidade no volume de solda, assim como avaliar sua dimensão e comparar com os critérios de aceitação aplicáveis.



Delimitação da Área de Varredura para juntas soldadas de Topo



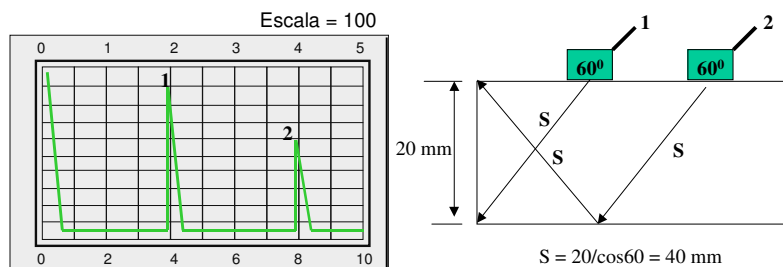
A superfície de varredura 1A ou 1B deve ser inspecionada com transdutor angular, antes da soldagem do anel de reforço, a superfície 2A deve ser inspecionada com transdutor duplo cristal e transdutor angular, a superfície 1C e 2B deve ser inspecionada com transdutor angular se houver área de varredura suficiente.

Áreas de Varredura recomendadas para Inspeção de soldas de conexões em vasos de pressão por ultrassom

Visualização da Área de Interesse na Tela do Aparelho

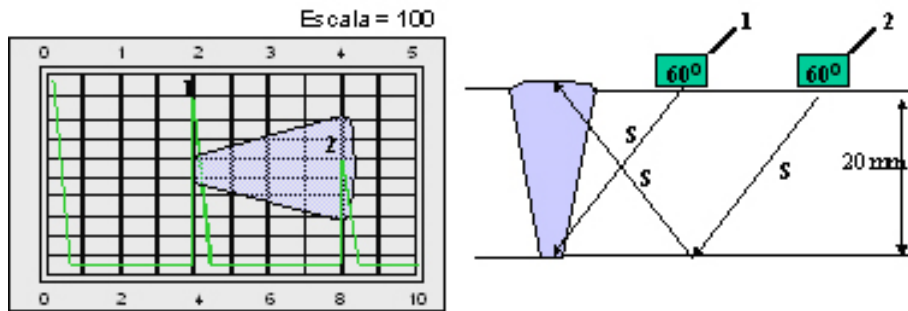
Uma das dificuldades do inspetor de ultrassom que se inicia na técnica de ensaio de soldas, é justamente saber onde ele deve monitorar a tela para que nenhuma indicação passe despercebida. Assim descrevemos abaixo uma técnica que mostra de forma fácil qual a área da tela do aparelho que deve ser observada durante a inspeção da solda.

Vamos observar a figura abaixo que mostra o posicionamento do transdutor angular de 60 graus sobre uma chapa com 20 mm de espessura, com o feixe direcionado para o canto inferior da borda da chapa, resultando num eco com caminho de som de 40 mm. Da mesma forma, se posicionarmos o transdutor com o feixe direcionado para a borda superior da chapa, teremos um eco a 80 mm, correspondente ao caminho do som em "V" na chapa.



Reflexões nas bordas da chapa

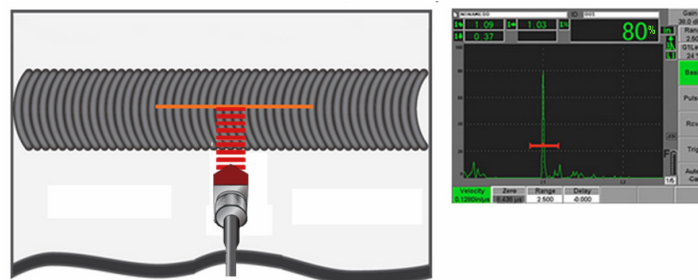
Repare que na tela do aparelho a região compreendida entre 40 e 80 mm correspondem à borda inferior e a borda superior. Agora, observe a figura abaixo e compare com a anterior. O leitor verá que um eco proveniente da raiz da solda será observado na marca de 40 mm e um eco proveniente do reforço, será observado na marca de 80 mm.



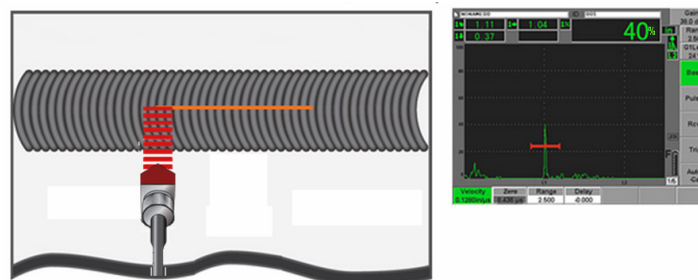
Portanto a área da solda estará compreendida entre 40 e 80 mm na tela, e caso apareçam indicações, estas devem estar nesta região da tela.

Delimitação da Extensão da descontinuidade em soldas:

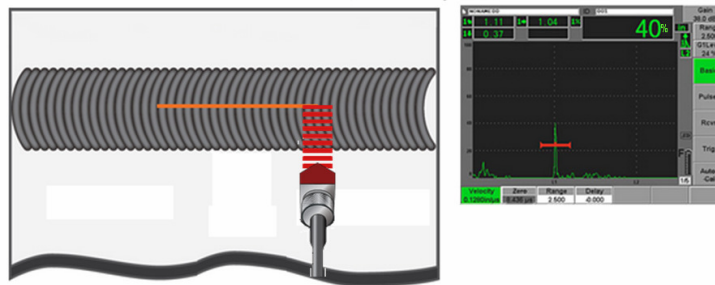
A delimitação da extensão da descontinuidade pode ser feita utilizando a técnica da queda do eco em 6 dB , ou seja o transdutor deve ser posicionado no centro geométrico da descontinuidade , de forma a maximizar a altura do eco de reflexão. Este ponto deve ser pesquisado pelo inspetor. Após, o transdutor é deslocado para a esquerda e para a direita até que se observe a altura do eco na tela do aparelho reduzir pela metade da altura que tinha inicialmente (- 6dB). Sobre a superfície da peça, deve ser marcado estes pontos onde o eco diminui em 6 dB, e o tamanho da descontinuidade será a linha que uni os dois pontos (para a esquerda e para a direita)



Ponto inicial para delimitação da imperfeição na solda. ajustando o eco a 80% da tela.



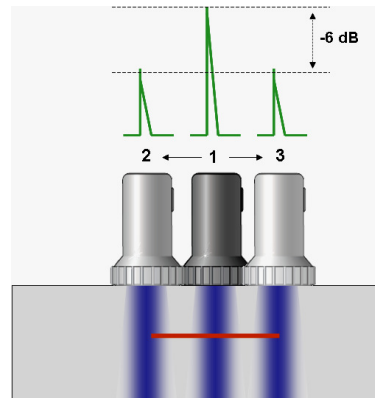
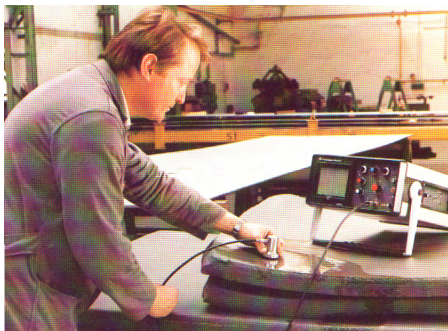
Ponto em que o eco reduz em 6 dB ou seja à metade dos 80% que é 40% para o lado esquerdo. Este ponto deve ser marcado sobre a peça



Ponto em que o eco reduz em 6 dB ou seja a metade dos 80% que é 40% para o lado direito. Este ponto deve ser marcado sobre a peça (Figuras: Cortesia da Olympus – www.olympus-ims.com)

Outros métodos, podem ser utilizados para pequenas indicações (menores que 10 mm), ou mesmo a técnica da queda do eco em 20dB, que se assemelha à técnica descrita acima.

A delimitação ou estimativa de pequenas descontinuidades deve ser feita pelo método do diagrama AVG ou DGS.



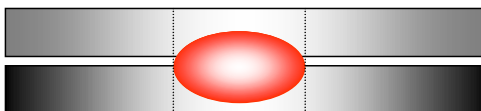
Delimitação da extensão de uma dupla laminação em uma chapa, usando a técnica da queda do eco em 6 dB, com transdutor normal. O deslocamento do transdutor para a posição (2) e posição (3), faz com que o eco de reflexão caia para metade em relação à posição (1). Esta instrução está descrita também na pág.77.

Procedimento para Inspeção de Soldas a Ponto (Spot weld)

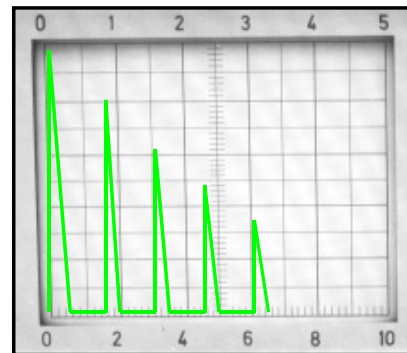
A solda a ponto ou solda por resistência é um importante método de partes união metálicas, principalmente nas indústrias automotivas e ferroviárias. A característica dessas soldas são a rapidez com que são executadas e a quantidade que se distribuem nos componentes.

Por essa razão é que a inspeção deve ser realizada de forma ágil, segura e veloz para garantir um bom desempenho das juntas. A seguir mostramos os aspectos das soldas ponto e o correspondente ecograma esperado.

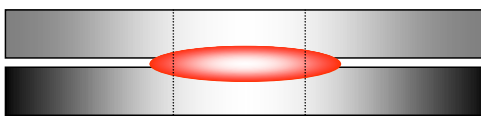
Solda Boa



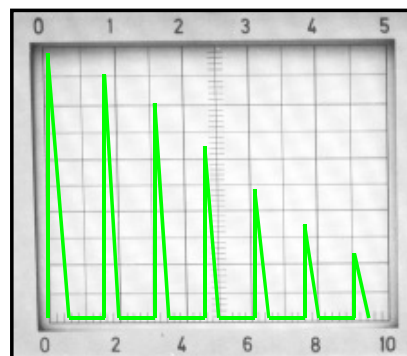
- Seqüência curta de ecos devido à atenuação sônica
- Nenhum eco intermediário



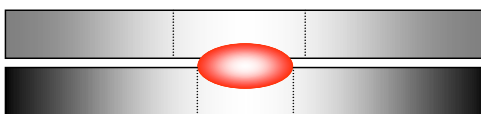
Solda estreita



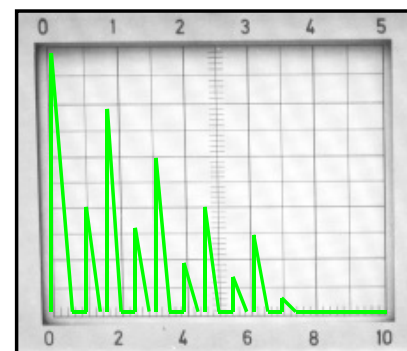
- Seqüência longa de ecos, devido à redução da atenuação sônica



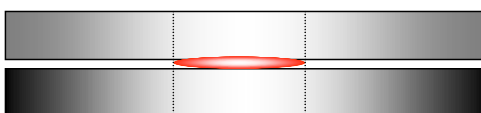
Área de solda pequena



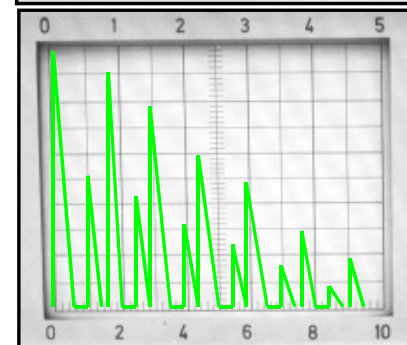
- Seqüência de ecos intermediários devido a bordas não soldadas



Stick



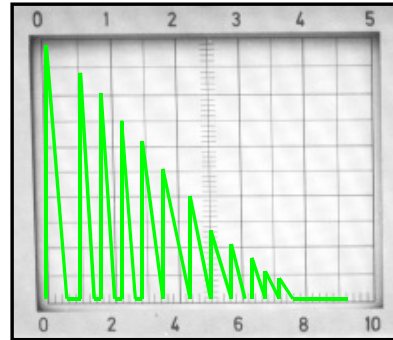
- Seqüência longa de ecos devido a pouca solda
- Ecos intermediários



Ausência de Solda



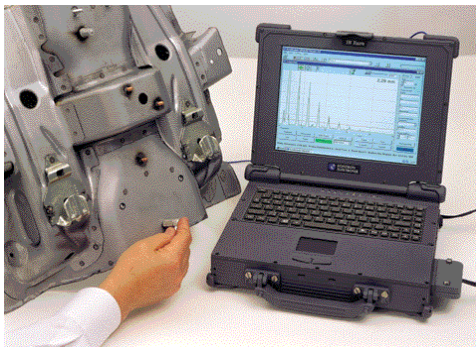
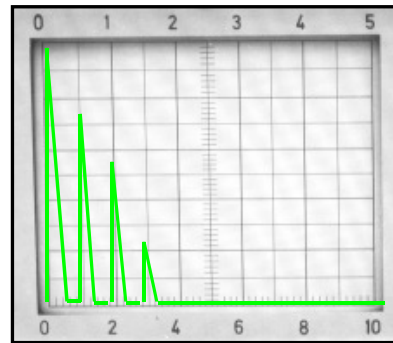
- Seqüência longa de ecos devido somente à chapa superior



Queima dos Materiais



- Seqüência curta de ecos devido a forte atenuação do som na região da solda



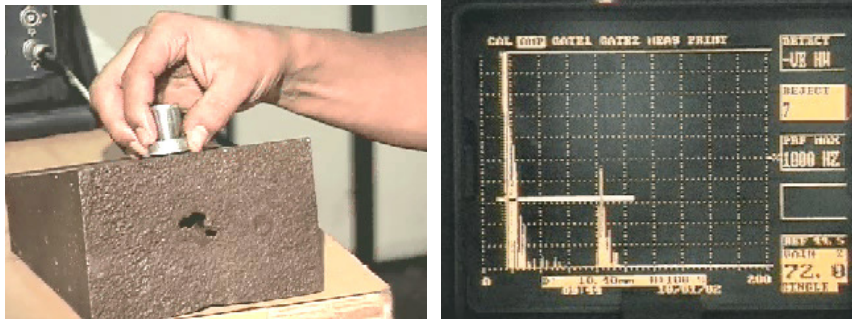
Equipamento portátil para inspeção de soldas a ponto por ultrassom

Procedimento para Inspeção de Fundidos

A inspeção por ultrassom de peças fabricadas em aço ou ferro fundido, sempre foi um desafio para a indústria de base, em razão das muitas estruturas que podem apresentar em tais materiais, das espessuras envolvidas, do acabamento superficial das peças, das formas geométricas e outras.

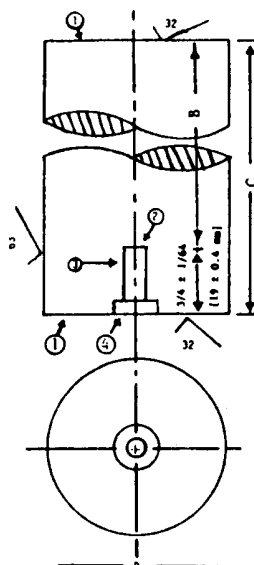
Como regra geral, sabemos que as estruturas fundidas não permitem que se use altas frequências ultrassônicas (igual ou acima de 4 MHz), e portanto baixas frequências em torno de 0,5 a 2 MHz são mais adequadas.

Devido às inúmeras aplicações dos materiais fundidos, desde pequenas peças para indústrias automotivas, de caldeiraria, de petróleo e petroquímicas, até componentes gigantescos aplicados nas indústrias de geração de energia. Essas inúmeras aplicações também se verificam nas normas, códigos e especificações técnicas para o ensaio por ultrassom em peças fundidas, assim o inspetor deve consultar o procedimento aprovado de sua empresa para o ensaio específico, ou ainda na falta deste, elabora-lo segundo a norma aplicável ao produto a ser ensaiado.



Inspeção de uma peça fundida contendo um defeito interno. Note o eco característico na tela do aparelho na figura à direita.

Uma das normas mais utilizadas é a ASTM E-609. Essa norma foi elaborada para ensaio por ultrassom em aços fundidos em carbono, baixa liga e martensíticos, com tratamento térmico, usando transdutores normais. É estabelecido dois métodos de ensaio: Método A e o Método B. No Método A, a calibração da sensibilidade do ensaio é realizada usando um bloco cilíndrico (ver figura abaixo) fabricado no mesmo material a ser inspecionado, e que contém um furo de fundo plano, na base do bloco.



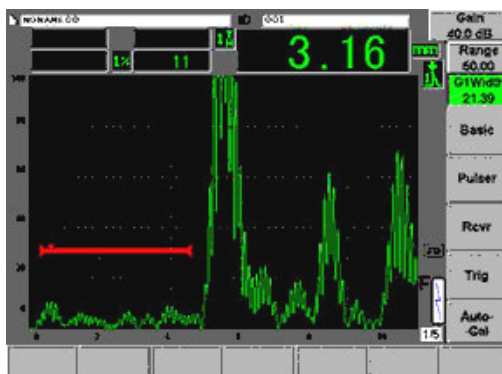
Bloco de Calibração - Norma ASTM E-609

No Método B, é requerido uma calibração da sensibilidade do ensaio usando o eco de fundo de uma série de blocos. A norma não estabelece critérios de aceitação, mas sugere alguns níveis identificados de 1 a 7 que estão relacionados com a área do defeito e o seu comprimento, avaliados pelo ultrassom. A engenharia do produto deve selecionar o nível ou níveis de aceitação aplicável ao seu produto.

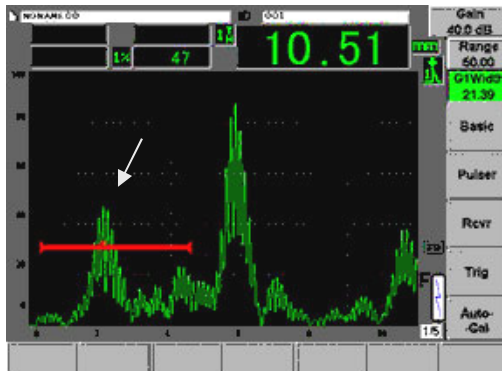
Durante o processo de fundição uma variedade muito grande de descontinuidades internas pode ocorrer metais ferrosos e não ferrosos. Isto inclui porosidade, trincas, rechupes, inclusões. Tais descontinuidades produzem condições para que o ultrassom possa mostrar as indicações que podem ser identificadas por um bem treinado inspetor usando aparelho e acessórios adequados.

A natureza granular dos materiais fundidos representa um desafio para o ensaio ultrassônico em razão das reflexões geradas por contorno de grãos, espalhamento, ruídos. A rugosidade da superfície típica encontrada em peças fundidas dificulta o acoplamento e reduzem a amplitude dos ecos. Todos esses fatores determinarão um tamanho mínimo de falha detectável em um dado ensaio. Por esta razão é importante dar atenção na seleção do transdutor, aparelho, acoplante e outros acessórios usados. Usualmente transdutores duplo cristal com frequências de 1 a 2 MHz otimizam a resolução e espalhamento. A caracterização das indicações sempre são tarefas difíceis para o inspetor, assim ajuda de outros ensaios tais como radiografia, podem colaborar para reduzir a grau de incertezas das indicações detectadas.

Nos exemplos abaixo mostram uma porosidade típica na região central de uma peça com espessura de 30 mm detectada com transdutor duplo cristal de 2,25 MHz. Um eco aparece na região do “gate” e a amplitude do eco de fundo é reduzida



Região boa sem indicações limitadas pela extensão do gate em vermelho e eco de fundo com grande amplitude



Região com indicações dentro do gate em vermelho, sugestivas de porosidade. Redução da amplitude do eco de fundo.

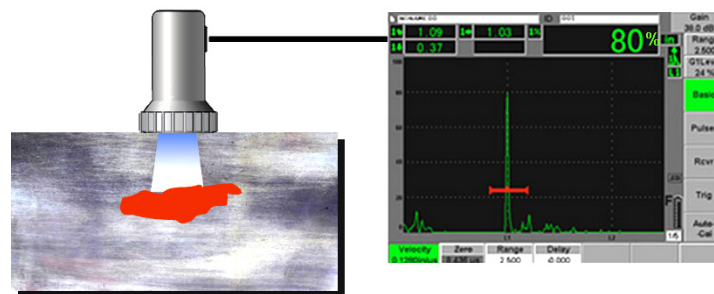
(Figuras: Cortesia da Olympus – www.olympus-ims.com)

Dimensionamento de Descontinuidades em Fundidos

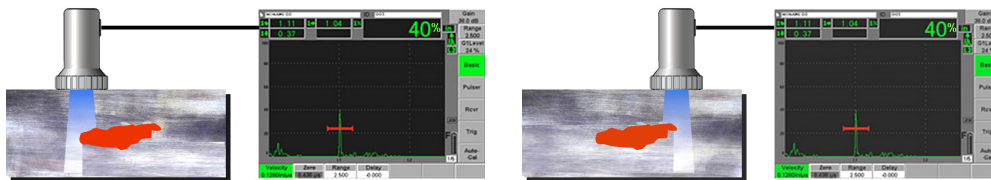
Frequentemente é necessário estimar o tamanho da descontinuidade interna na peça fundida, tanto na direção horizontal como vertical, isto é, o volume aproximado que a descontinuidade ocupa internamente na peça. Esta informação é importante pois, a presença da falha na região interna da peça pode fragilizá-la quanto à sua resistência à pressão, compressão e flexão. Assim, a engenharia do produto deve avaliar o quanto o vazio interno encontrado pode contribuir para isso.

Dimensionamento da Extensão na Direção horizontal da Peça:

O transdutor deve ser posicionado de forma a detectar com a maior amplitude possível a descontinuidade na peça. Ajustar esta amplitude para 80% da tela. Este ponto deverá ser marcado na superfície da peça usando um giz ou marcador industrial.



Em seguida, o transdutor deverá ser deslocado para a direita e esquerda, horizontalmente de forma a visualizar a queda do eco em 6 dB ou seja metade da amplitude, ou seja 40%. Nestes pontos deverão ser marcados na superfície da peça.



deslocamento horizontal para esquerda

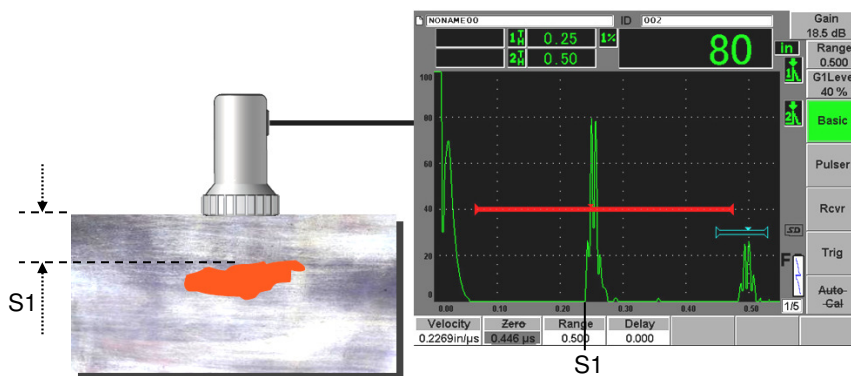
deslocamento horizontal para a direita

Assim, a ligação dos pontos que mostram o ecograma com queda da amplitude do eco em 40%, determinará a extensão da descontinuidade.

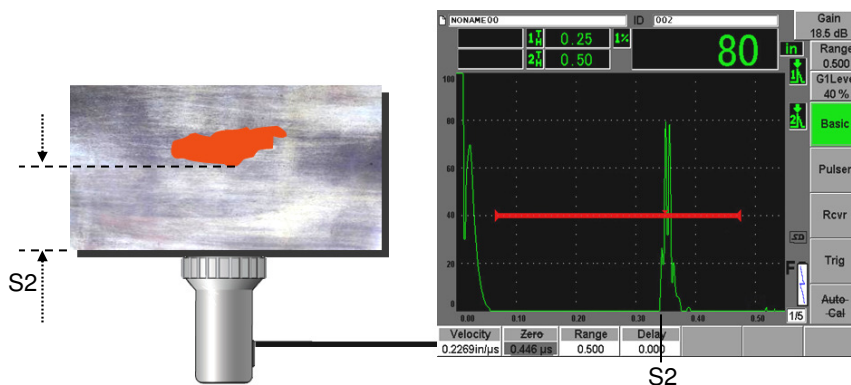
Dimensionamento da Extensão na Direção Vertical da Peça:

Na direção vertical, o objetivo desta instrução é determinar o quanto de volume do fundido a descontinuidade ocupa.

Usando uma escala correta e calibrada do aparelho de ultrassom e posicionando o transdutor nas superfícies opostas, a altura da descontinuidade é medida pela diferença das posições dos ecos na tela, discerníveis acima do nível de ruído, conforme a figura abaixo.



Medição da posição da descontinuidade pelo lado superior (S1)



Medição da posição da descontinuidade pelo lado inferior (S2)

As medições acima determinam o tamanho da descontinuidade internamente à peça, mediante ao cálculo simples:

$$\text{Tamanho} = \text{espessura} - (S_2 + S_1)$$

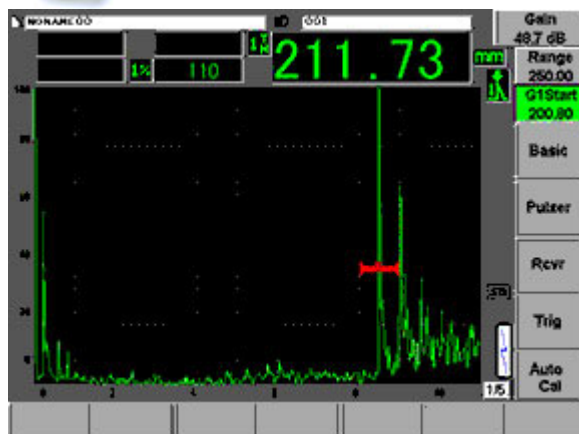
Algumas normas estabelecem critérios de aceitação para o tamanho máximo aceitável para a descontinuidade interna, é o caso da norma EN-12680-3, que estabelece 5 níveis de qualidade desde 01 até 4. Como as peças fundidas podem ser usadas nos mais diferentes segmentos industriais, a engenharia do produto ou especificação do Cliente, deve estabelecer o nível ou classe de aceitação das descontinuidades encontradas.

Procedimento para Inspeção de Forjados

Parafusos e barras, possuem em comum uma longa geometria cilíndrica que usualmente é adequada para o ensaio por ultrassom. Nestes casos, trincas podem ocorrer na posição perpendicular à peça e o ensaio é realizado com transdutores normais acoplados em ambos os terminais. O procedimento usual é identificar ecos que aparecem na posição correspondente ao comprimento da peça.

Um problema é selecionar o diâmetro correto do transdutor para permitir o acoplamento na superfície plana da peça.

No exemplo abaixo, mostra o ensaio usando um transdutor com 10 MHz de frequência, em um parafuso sem indicações (1) e outro com uma indicação artificial (2) simulando uma trinca.

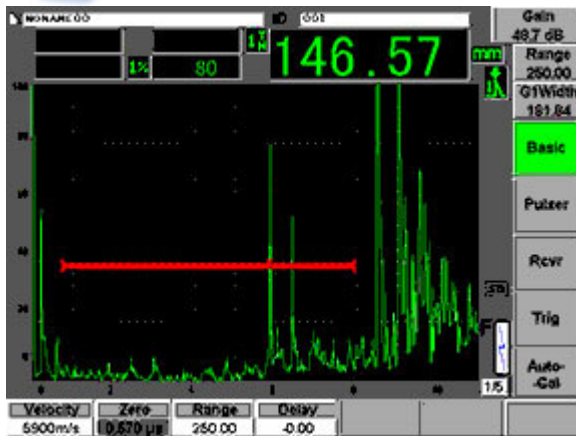


(1) Parafuso bom sem indicações com eco de fundo em 211,73 mm, limitadas pela extensão do gate em vermelho e com grande amplitude.

(Figura: Cortesia da Olympus-www.olympus-ims.com)



(2)



(2) Parafuso com indicação mostrada pelo eco em 146,57 mm, na extensão do gate em vermelho e com grande amplitude (Figura: Cortesia da Olympus-www.olympus-ims.com)

Avaliação e Critérios de Aceitação:

O julgamento da descontinuidade encontrada deve ser feito de acordo com o procedimento escrito, norma aplicável, especificação do cliente, ou por outro documento da Qualidade aplicável.

Em geral, as descontinuidades são julgadas pelo seu comprimento, e amplitude do eco de reflexão, que são quantidades mensuráveis pelo inspetor de ultrassom. Entretanto, algumas normas, estabelecem que o tipo da descontinuidade encontrada também deve ser caracterizada e decisivo na aceitação ou rejeição da junta soldada. Por exemplo: se o inspetor interpretou uma indicação como trinca, falta de fusão ou falta de penetração, a junta soldada deve ser rejeitada, independente do seu comprimento ou amplitude de eco na tela do aparelho, de acordo com o Código ASME. Mas nem sempre a identificação do tipo da descontinuidade é fácil ou possível de ser caracterizada, pois isto dependerá da complexidade da junta, experiência e conhecimento do inspetor. De qualquer forma, o inspetor deve sempre verificar os documentos de fabricação ou montagem do componente soldado, para se certificar qual critério é aplicável.

Critério de Aceitação de Juntas Soldadas , conforme Código ASME Sec. VIII Div.1 , Div. 2 e Sec. I PW-52 (Tradução livre)

Imperfeições as quais produzirem uma resposta maior que 20% do nível de referência deve ser investigado a extensão para que o operador possa determinar a forma, identificar, e localizar tais indicações e avaliar as mesmas em termos do padrão de aceitação dado em (a) e (b) abaixo.

(a) Indicações caracterizadas como trincas, falta de fusão ou penetração incompleta são inaceitáveis independente do comprimento ;

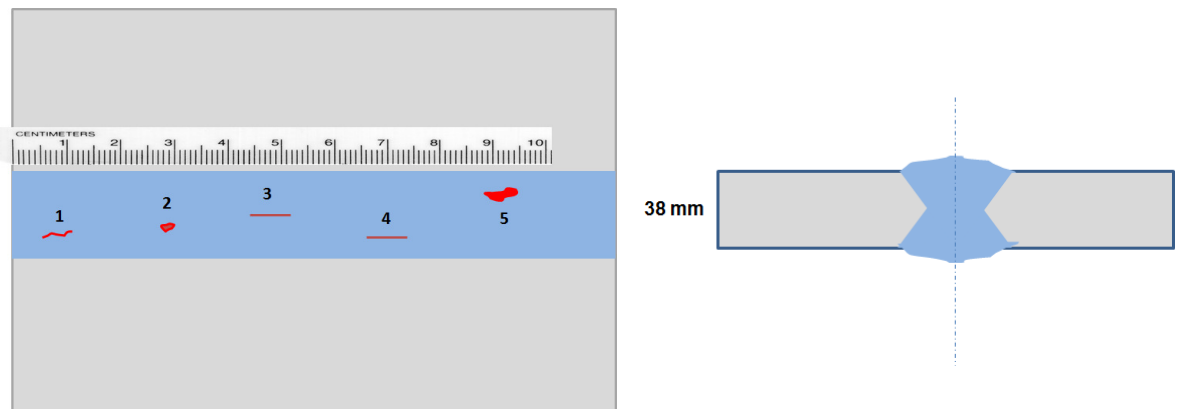
(b) Outras imperfeições são inaceitáveis se indicações excedem em amplitude o nível de referência e tenha um comprimento que exceda:

$\frac{1}{4}$ pol. (6,0 mm) para t até $\frac{3}{4}$ pol. (19 mm);
 $\frac{1}{3} \cdot t$ para t de $\frac{3}{4}$ (19 mm) até 2.1/4 (57,0 mm);
 $\frac{3}{4}$ pol. para t acima de 2.1/4 pol. (57,0 mm)

onde t é a espessura da solda excluindo qualquer reforço permitido. Para juntas soldadas de topo onde dois membros tendo diferentes espessuras de solda , t é a mais fina dessas duas espessuras. Se uma solda de penetração total inclui uma solda de filete , a espessura da garganta do filete deve ser incluída em t .

Exemplo de Aplicação do Critério de Aceitação

Seja a junta soldada abaixo, contendo 5 indicações descritas a seguir:



Indicação 1:

Trinca, com amplitude de -4dB da DAC, comprimento 6 mm

Laudo: **Reprovado**

Indicação 2:

Escória, com amplitude de +2dB da DAC, comprimento 4 mm

Laudo: **Aprovado**, pois é menor que $\frac{1}{3} \cdot t$ (12,7 mm)

Indicação 3:

Falta de penetração, com amplitude de -6dB da DAC, comprimento 7 mm

Laudos: **Reprovado**

Indicação 4:

Falta de fusão na lateral do cordão, com amplitude de -10dB da DAC, comprimento 8 mm

Laudos: **Reprovado**

Indicação 5:

Escória, com amplitude de +4dB da DAC, comprimento 7 mm

Laudos: **Aprovado**, pois é menor que $1/3 \cdot t$ (12,7 mm)

Nota do autor: O critério de aceitação descrito no ASME Sec.VIII Div.1 acima, não é aplicável para ensaio por ultrassom com finalidade de substituir o ensaio radiográfico. Neste caso o critério é dado pelo ASME Sec.VIII Div.2 par.7.5.5, onde a análise da indicação, leva em consideração a mecânica da fratura.

O Critério de Aceitação para Qualificação de Soldadores por ensaio ultrassônico, conforme ASME Sec. IX QW-191-2:

a) Todas as indicações caracterizadas como trincas, falta de fusão ou penetração incompleta são inaceitáveis independente do comprimento;

b) Indicações excedendo 3 mm de comprimento são consideradas relevantes, e serão inaceitáveis se seus comprimentos avaliados excederem a:

- (1) 3 mm para t até 10 mm,
- (2) $1/3 \cdot t$ para t de 10 mm até 57 mm,
- (3) 19 mm para t acima de 57 mm.

Onde t é a espessura da solda excluindo-se o reforço permitido. Para solda de topo de diferentes espessuras, deve-se adotar como t a menor espessura da junta soldada. Em soldas de ângulo ou filete com penetração total, considerar como "t" a espessura da garganta.

Nota do autor: Observem que o critério acima não faz referência à Curva DAC ou Nível de Referência para julgamento da amplitude do eco na tela, e portanto independe desta. Isto torna o sucesso na qualificação do soldador, mais difícil para o profissional, uma vez que o critério de aceitação do ensaio por ultrassom é mais rígido comparado ao ensaio radiográfico.

Inspeção por Ultrassom em Alturas usando por Drones

Fonte: Olympus Scientific Solutions

Os métodos comuns de inspeção de ensaios não destrutivos em altura envolvem andaimes, elevadores de mão ou cordas para inspecionar a superfície em uma estrutura, no entanto essas técnicas podem ser perigosas, demoradas e caras. Assim sendo, à medida que a robótica continua avançando e revolucionando a maneira como trabalhamos, a resposta pode ser encontrada procurando a tecnologia mais recente nos céus: drones ultrassônicos.



Fonte: e-Journal of Nondestructive Testing (NDT) ISSN 1435-4934 (NDT.net Journal)

Os benefícios da inspeção por drone para profissionais de END que trabalham em altura, são muitos. Os sistemas aéreos não tripulados (mais comumente conhecidos como drones) fornecem aos especialistas em END, em todos os setores uma perspectiva aérea única. Este ponto de vista, permite fácil acesso a áreas remotas ou inacessíveis sem comprometer a segurança do piloto. Os drones oferecem uma maneira rápida e precisa de realizar inspeções, reduzindo os custos operacionais e minimizando os riscos de segurança.

Empresas especializadas, fornecem drones para equipes de inspeção que atendem nas áreas de petróleo e gás, infraestrutura, offshore, telecomunicações e muito mais. Notavelmente, as equipes de robótica produziram uma solução de drone exclusiva para inspeções visuais e UT mais seguras, rápidas e econômicas.

Um exemplo de sistema de inspeção aérea é o Skygauge Robotics, produzido pela Olympus, que é um medidor de espessura ultrassônica acoplado em um drone projetado para inspeção visual e de espessura de parede. Em vez de fazer com que os trabalhadores comprometam sua segurança em cordas, elevadores de lança e andaimes para inspeções industriais, o drone permite que os trabalhadores permaneçam no chão enquanto o drone realiza inspeções em locais perigosos.

O drone vem integrado com o medidor de espessura ultrassônico equipado com um transdutor duplo cristal, na ponta de uma haste longa e regulável o suficiente para tocar a superfície do equipamento a ser inspecionado, para medir a espessura do metal sem interferência com os revestimentos de tinta.



Preparação do sistema de medidor de espessura para ser elevado pelo drone
 Fonte: Skygauge Robotics

O fluxo de trabalho geral do drone é dividido em três categorias principais: aquisição no local, planejamento da trajetória de voo e pós-análise. Antes de inspecionar a estrutura em questão, os operadores devem verificar se o entorno da área de inspeção está desobstruído para garantir uma operação segura.

O drone pode fazer leituras para estudo da espessura da parede de metal do equipamento ao longo do tempo (por exemplo, a cada 6 meses), para verificar se a parede de metal de um tubo, vaso de pressão ou tanque de armazenamento está ficando mais fina por corrosão.

O drone dispõe de uma haste de detecção que aplica no transdutor uma força contra a parede metálica, na pressão exata para o acoplamento necessário, para fazer leituras da espessura e manter contato com a superfície durante a varredura. O design do drone permite voo preciso, acoplamento, resistência ao vento e inspeções em ângulo. Os drones podem inclinar seus rotores para voar mais perto de estruturas para realizar inspeções com maior estabilidade.



Os dados e registros enviados pelo Drone são através do sistema sem fio, transmitido de volta ao operador no solo. Fonte: Skygauge Robotics

Usando os drones para ter acesso a áreas difíceis, os inspetores de END podem avaliar estruturas e coletar dados abrangentes que levariam vários dias usando métodos de acesso tradicionais. Para pontos de inspeção em alturas ou outros locais de difícil acesso como barcos, navios e fretes offshore, refinarias de petróleo e gás e turbinas eólicas, as empresas especializadas estimam que sua solução de drone pode realizar inspeções de ultrassom de 5 a 10 vezes mais rápido do que manualmente. O sistema pode ser operado por dois inspetores, reduzindo o tempo no local em 80%”

Hoje, os drones estão sendo adotados para melhorar as tarefas manuais em todos os setores. O uso de drones para inspeção END abre uma ampla gama de possibilidades que combinam a mobilidade do drone com diferentes métodos de ensaios. As inspeções com drones podem fornecer dados em vários equipamentos a indústria de petróleo e gás para identificar defeitos e, por sua vez, reduzir a taxa de falhas e desligamentos não planejados.

O sistema de inspeção por drones, oferece um vislumbre do futuro da inspeção por END, reduzindo o tempo de resposta, os custos de inspeção e aumenta a segurança dos inspetores, que não estarão expostos aos riscos envolvidos no trabalho em altura.

Sem dúvida, os sistemas usando drones, serão um novo desafio para os programas de qualificação e certificação de inspetores (SNQC), pois um novo componente deverá ser introduzido neste programa, pois além da qualificação técnica no método de END do inspetor, este ainda deverá apresentar habilidade na operação do drone, para cumprir com seu trabalho. Para tanto, os programas de treinamento em END, deverão incluir a carga horária adequada para assegurar a competência necessária do técnico em operar o drone, projetado para a inspeção.

Questões para Estudo

Nas questões abaixo, marque a alternativa correta

1. Uma onda mecânica produzida por um transdutor ultrassônico com frequência de 2 MHz , se propagando no aço ($V = 5.900 \text{ m/s}$) , terá um comprimento de onda de:
 - a) 2,27 mm
 - b) 2,95 mm
 - c) 29,5 mm
 - d) 36,3 mm
2. Defini-se frequência de uma onda sonora como sendo:
 - a) o número de ondas acústicas que passam por segundo por um ponto de referência.
 - b) a amplitude máxima que uma onda acústica atinge um ponto de referência
 - c) a potência com que uma onda acústica é emitida
 - d) o comprimento entre dois pontos de mesma fase
3. A faixa de frequência considerada infrassom é:
 - a) acima de 20 kHz
 - b) abaixo de 45 Hz
 - c) abaixo de 20000 Hz
 - d) Abaixo de 20 Hz
4. Se um som de grande intensidade for produzido na frequência de 23 kHz , então:
 - a) uma pessoa poderá ficar surda, caso estiver próxima da fonte sonora
 - b) o som produzido não será ouvido por ninguém, pois a frequência é ultrassônica.
 - c) o som produzido será muito agudo, comparável a um apito
 - d) qualquer pessoa ouvirá normalmente este som
5. Para permitir o acoplamento acústico do transdutor ultrassônico , na peça sob ensaio devemos:
 - a) usinar a superfície de ensaio
 - b) pressionar o transdutor sobre a peça ,para completo acoplamento
 - c) utilizar o líquido acoplante
 - d) preparar adequadamente a superfície de ensaio
6. O tipo de onda longitudinal é gerado por transdutores:
 - a) angulares
 - b) normais.
 - c) bifocais
 - d) de banda larga

7. Qual dos transdutores abaixo possuirá maior divergência:
 - a) de diâmetro 24 mm
 - b) de diâmetro 12 mm
 - c) de diâmetro 5 mm
 - d) de frequência 1 MHz

8. O cristal responsável pela geração e recepção das ondas ultrassônicas ,possui a propriedade:
 - a) magnética
 - b) magnetoestrícção
 - c) piezoeletricidade.
 - d) supercondutora

9. Qual dos materiais abaixo possui maior impedância acústica ($Z = \rho \times V$):
 - a) aço inoxidável
 - b) alumínio
 - c) água
 - d) acrílico

10. A velocidade das ondas acústicas longitudinais no aço é aproximadamente:
 - a) o dobro das transversais
 - b) 5900 m/s
 - c) 1500 m/s
 - d) as alternativas (a) e (b) são corretas

- 11.Quando posicionamos o transdutor ultrassônico sobre o bloco Tipo 2 , com o feixe sônico voltado para o raio de 25 mm, devemos obter na tela do aparelho de ultrassom, ecos múltiplos correspondentes aos percursos sônicos de:
 - a) 25, 100 , 175 mm
 - b) 50 , 125 , 200 mm
 - c) 25 , 125 , 200 mm
 - d) 25, 50 , 75 mm

- 12.O fenômeno da perda de energia na propagação ondulatória , pelos efeitos de espalhamento, vibração das partículas que formam o meio de propagação , é denominado:
 - a) atenuação sônica
 - b) perda por transferência
 - c) interferência ondulatória
 - d) divergência

- 13.Na inspeção ultrassônica, a superfície limite , entre o metal base e uma descontinuidade, forma:
 - a) uma interface
 - b) um eco espúrio
 - c) um eco de reflexão
 - d) as alternativas (a) e (c) são possíveis

14. Na inspeção de fundidos por ultrassom , é recomendado o uso de transdutores:
- a) com maior diâmetro possível
 - b) com maior frequência possível
 - c) com menor diâmetro
 - d) com menor frequência
15. O transdutor ultrassônico que possui dois cristais , um que emite as ondas ultrassônicas e outro que as recebe , denomina-se comumente:
- a) normal
 - b) transversal
 - c) emissor-receptor
 - d) duplo-cristal.
16. Um eco com amplitude de 100% da tela do aparelho de ultrassom , reduz para 20% de altura. A variação do ganho do aparelho em "dB" será de:
- a) -6
 - b) -12
 - c) -14
 - d) -20
17. Geralmente um transdutor com baixa frequência, em torno de 0,5 MHz , é utilizado em:
- a) inspeção de chapas laminadas
 - b) inspeção de fundidos
 - c) inspeção de soldas em aço inoxidável
 - d) inspeção de tubos , por imersão
18. A impedância acústica é uma característica de um meio de propagação das vibrações, e pode ser avaliada através da fórmula:
- a) densidade x velocidade de propagação
 - b) velocidade de propagação x coeficiente de elasticidade
 - c) densidade x coeficiente de atenuação do meio
 - d) velocidade de propagação / densidade
19. Teóricamente ,do ponto de vista das propriedades acústicas, qual dos acoplantes abaixo seria melhor e mais prático, para inspeção de aços laminados:
- a) óleo diesel
 - b) glicerina
 - c) metil celulose
 - d) água
20. Uma característica da propagação da vibração acústica , nos meios líquidos é que:
- a) somente se propagam as ondas longitudinais.
 - b) podem se propagar quaisquer tipo de vibrações mecânicas
 - c) a velocidade de propagação das vibrações é muitas vezes maiores que nos materiais metálicos
 - d) as vibrações mecânicas são fortemente atenuadas

21. O comprimento de onda de uma vibração mecânica ,pode ser calculado:
- a) pelo produto da freqüência e a velocidade de propagação
 - b) pela razão entre a freqüência e a velocidade de propagação
 - c) pela razão entre a velocidade de propagação e a freqüência
 - d) pelo produto da densidade e a velocidade de propagação
22. O uso de jateamento ou esmerilhamento para a operação de preparação das superfícies ,para ensaio ultrassônico :
- a) não é recomendável
 - b) pode ser aplicado,dependendo do acabamento superficial do material.
 - c) pode ser aplicado desde que seja feita uma pré-usinagem
 - d) não é recomendável apenas quando for utilizado transdutores com alta freqüência
23. Se medirmos a intensidade sonora ao longo do eixo central do transdutor ultrassônico, verificamos que a mesma diminui conforme nos afastamos do cristal, independente do material. Isto se deve a:
- a) atenuação sônica
 - b) anisotropia do material
 - c) interferência ondulatória
 - d) divergência do feixe sônico
24. Dos cristais abaixo que podem ser utilizados como cristais ultrassônicos:
- a) metaniobato de chumbo
 - b) titanato de bário
 - c) sulfato de lítio
 - d) todos acima podem ser usados
25. A técnica de inspeção por ultrassom que utiliza dois transdutores separados , um emitindo as ondas sônicas e outro as recebendo é denominada :
- a) impulso-eco
 - b) transparência
 - c) estereoscópico
 - d) imersão
26. Os transdutores ultrassônicos angulares, geram ondas com ângulos:
- a) iguais ao valor gravado no transdutor
 - b) iguais ao valor gravado no transdutor , válidos para o aço
 - c) menores que 90 graus , para qualquer material
 - d) as alternativas (a) e (c) são corretas
27. Transdutores ultrassônicos com pequenos diâmetros geram:
- a) feixe ultrassônico com pouca divergência
 - b) um campo próximo menor
 - c) feixe sônico com muita divergência
 - d) as alternativas (b) e (c) são corretas

28. Em geral, uma descontinuidade pequena que esteja posicionada no campo próximo:
- a) é de difícil análise
 - b) não pode ser detectada
 - c) será detectada, porém seu comprimento será menor que o real
 - d) somente será detectada se o seu comprimento for maior que duas vezes o comprimento de onda
29. Quais dos seguintes fatores, poderão produzir falsas indicações, no ensaio por ultrassom em soldas ?
- a) alta atenuação sônica
 - b) espalhamento
 - c) alta perda por transferência
 - d) mudança do modo de conversão
30. Teoricamente, a menor descontinuidade detectável pelo ensaio ultrassônico deve ter:
- a) dimensões maiores que metade do comprimento de onda ultrassônica
 - b) dimensões maiores que metade do campo próximo
 - c) no mínimo o diâmetro do furo pequeno do bloco Tipo 1
 - d) no mínimo 1/4 do comprimento de onda
31. O diagrama AVG ou DGS foi elaborado de modo:
- a) a analisar o comportamento da onda ultrassônica, ao refletir em superfícies planas
 - b) a estudar a variação do ganho com a frequência da onda sônica
 - c) a estudar a variação do ganho na refletividade da onda sônica em pequenas descontinuidades, artificiais efetuadas no aço, a diversas profundidades
 - d) a analisar a variação do diâmetro das descontinuidades em função da frequência da onda
32. Qual das afirmativas abaixo é verdadeira?
- a) O bloco de aço com as dimensões calibradas, para ajustar as escalas do aparelho de ultrassom é denominado, bloco de calibração
 - b) A superfície ideal para o ensaio ultrassônico de materiais, é aquela lisa e plana
 - c) A vibração mecânica superficial tem velocidade de propagação bem menor que as vibrações transversais
 - d) todas as alternativas são verdadeiras
33. A razão entre o seno do ângulo de incidência da onda ultrassônica e a sua velocidade de propagação no mesmo meio, defini:
- a) a lei de Snell, para incidência oblíqua
 - b) o princípio da interferência ondulatória
 - c) a divergência do feixe sônico
 - d) o comprimento do campo próximo

34. Quando posicionamos o transdutor angular sobre o bloco Tipo 2, com o feixe direcionado para o raio de 50 mm, a leitura na escala da tela do aparelho de ultrassom, dos ecos de reflexão, deverão ser respectivamente de:

- a) 50 mm, 75 mm, 100 mm
- b) 50 mm, 100 mm, 175 mm
- c) 100 mm, 175 mm, 200 mm
- d) 50 mm, 125 mm, 200 mm

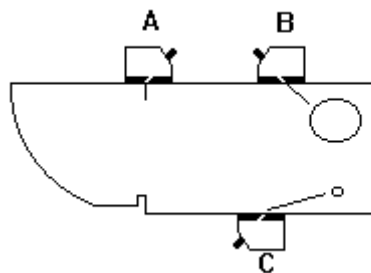


Figura 1

35. Observe a fig.1, ao acoplarmos o transdutor na posição "A", obteremos na tela do aparelho de ultrassom:

- a) ecos múltiplos referente a 200 mm
- b) um eco de reflexão correspondente a 100 mm, se a escala estiver ajustada para 100 mm
- c) dois ecos de reflexão, na posição 100 e 200 mm, se a escala estiver ajustada para 200 mm
- d) as alternativas (b) e (c) estão corretas

36. Observe a fig.1, ao posicionar em "B" o transdutor, a intenção do inspetor será provavelmente:

- a) calibrar a escala do aparelho para 50 mm
- b) calibrar a escala do aparelho para 25 mm
- c) verificar o ângulo de saída do feixe sônico do transdutor
- d) nenhuma das alternativas

37. Ao posicionarmos o transdutor em "C" na fig.1, será observado um eco de reflexão, proveniente do furo de:

- a) diâmetro 2,0 mm
- b) diâmetro 1,5 mm
- c) diâmetro 3 mm
- d) diâmetro 3,0 mm

38. A espessura do bloco Tipo 1 mostrado na fig.1 é de:

- a) 50 mm
- b) 25 mm
- c) 15 mm
- d) 20 mm

39. Observando a fig.1, em qual posição devemos acoplar o transdutor para verificar o ponto de saída do feixe sônico do transdutor ?
- A
 - B
 - C
 - d) numa outra diferente das apresentadas na figura.
40. A diferença entre ondas de compressão e ondas de cisalhamento é :
- tamanho do comprimento de onda
 - direção de vibração das partículas
 - amplitude
 - freqüência
41. A habilidade dos transdutores em detectar ecos provenientes de pequenas descontinuidades é uma definição para:
- resolução
 - sensibilidade
 - definição
 - ganho
42. O comprimento do campo próximo de um transdutor normal pode ser calculado através da fórmula:
- $\text{Diâmetro} / 4 \times \text{freqüência}$
 - $\text{Velocidade} / 2 \times \text{Comprimento de onda}$
 - $\text{Diâmetro} / 4 \times \text{Comprimento de onda}$
 - nenhuma das alternativas
43. O critério de aceitação do ensaio por ultrassom de uma peça , deve estar:
- baseado no furo padrão de referência ,em que o aparelho foi calibrado
 - baseado no bom senso do inspetor, ao analisar as indicações produzidas na tela do aparelho
 - baseado no procedimento de ensaio, norma ou projeto de construção da peça ensaiada
 - as alternativas (b) e (c) são corretas
44. A inspeção por ultrassom de soldas em materiais inoxidáveis austeníticos.....
- deve ser evitada ,pois a grande atenuação sônica neste material é fator de não confiabilidade
 - pode ser feita da mesma forma que em aços carbono
 - pode ser feita da mesma forma que aços carbono , porém acrescentando um ganho de 6 dB como fator de segurança
 - deve ser evitada,pois a impedância acústica neste material é muito alta,dificultando o ensaio

45. Na representação B-scan no ensaio por ultrassom, a imagem na tela do aparelho:
- representará a peça no sistema de dois eixos (x,y) no plano, mostrando a posição das indicações no sistema cartesiano
 - representará os ecos provenientes das interfaces
 - representará a secção da peça, em corte
 - nenhuma das alternativas
46. O método de inspeção por ultrassom por transparência tem sua aplicação típica, quando:
- se pretende avaliar a profundidade das descontinuidades detectadas
 - se pretende avaliar o tamanho das descontinuidades encontradas
 - se pretende avaliar a natureza das descontinuidades encontradas
 - se pretende apenas aplicar uma inspeção do tipo passa / não passa
47. Qual é o valor em graus da divergência do feixe sônico de um transdutor com diâmetro de 12 mm e 2,0 MHz de frequência, $v = 6000$ m/s ? ($\text{sen } \theta = 1,08 \times \lambda/D$)
- 2,5 graus
 - 40,5 graus
 - 16 graus
 - 37,5 graus
48. O comprimento do campo próximo de um transdutor com 10 mm de diâmetro, com 4 MHz de frequência acoplado no aço é aproximadamente:
- 0,08 cm
 - 6,25 cm
 - 55,8 cm
 - 16 mm
49. A dificuldade na obtenção e interpretação de registros no ensaio ultrassônico, representa uma:
- desvantagem na aplicação deste método
 - inverdade, que não se aplica ao ensaio ultrassônico
 - característica somente aplicável em obras de campo
 - nenhuma das alternativas anteriores
50. Qual dos materiais abaixo possui maior velocidade de propagação do som:
- aço
 - água
 - alumínio
 - chumbo
51. O fenômeno da divergência que ocorre quando um feixe de ultrassom se propaga num material, é devido:
- à estrutura do material
 - ao afastamento da frente de ondas em relação ao transdutor
 - à atenuação do som no material
 - à variação da frequência da onda sônica

52. "25 milhões de ciclos por segundo" pode também ser definido como:
- a) 25 kilohertz
 - b) 2500 kilohertz
 - c) 25 megahertz
 - d) 25 microhertz
53. No ensaio por contato direto em peças com granulação grosseira, em geral aparecem em toda a extensão da tela do aparelho de ultrassom uma série de ecos com baixa amplitude. A estes ecos denominamos:
- a) ecos de indicações
 - b) ecos espúrios
 - c) descontinuidades
 - d) granulometria
54. Qual das ondas sonoras que podem ser transmitidas através dos líquidos ?
- a) transversal
 - b) longitudinal.
 - c) de cisalhamento
 - d) nenhuma delas
55. Para permitir o acoplamento acústico do transdutor ultrassônico, na peça sob ensaio devemos:
- a) usinar a superfície de ensaio
 - b) pressionar o transdutor sobre a peça , para completo acoplamento
 - c) utilizar o líquido acoplante.
 - d) preparar adequadamente a superfície de ensaio
56. Na inspeção ultrassônica, a superfície limite, entre o metal base e uma descontinuidade, forma:
- a) uma interface
 - b) um eco espúrio
 - c) um eco de reflexão
 - d) as alternativas (a) e (c) são possíveis
57. No ensaio ultrassônico, um líquido acoplante colocado entre o cristal e a superfície da peça é necessário pois:
- a) um lubrificante é necessário para atenuar o desgaste do transdutor
 - b) o ar existente entre o cristal e a superfície da peça impede completamente a transmissão da vibração ultrassônica
 - c) o cristal não vibrará se colocado diretamente em contato com a peça
 - d) o líquido é necessário para completar o circuito elétrico no transdutor
58. Quando defeitos planares e paralelos à superfície da peça devem ser detectados , que método de ensaio ultrassônico é mais frequentemente usado?
- a) feixe angular
 - b) transmissão
 - c) feixe reto ou longitudinal
 - d) transparência

59. A velocidade do som nos materiais é primeiramente dependente:
- do comprimento do pulso sônico
 - da frequência
 - do material no qual o som está sendo transmitido e o do modo de vibração
 - nenhuma das alternativas
60. O diagrama construído com base na resposta do transdutor de um sinal refletido em um refletor circular de fundo plano, é conhecido com nome de :
- diagrama AVG
 - diagrama DGS
 - diagrama de Snell
 - as alternativas (a) e (b) são corretas
61. Em qual zona do campo sônico a densidade de energia é mais intensa e causa maior interferência ondulatória ?
- campo longínquo
 - campo próximo
 - zona morta
 - zona de Snell
62. O fenômeno da divergência é primeiramente causado por:
- atenuação
 - espalhamento
 - abertura do feixe sônico
 - interface
63. Uma onda sônica com comprimento de onda de 3 mm se propagando no material com velocidade de 6000 m/s , provavelmente foi formada a partir de uma frequência de:
- 1 MHz
 - 2 MHz
 - 4 MHz
 - 5 MHz
64. A frequência de uma vibração mecânica depende:
- do material
 - da temperatura
 - do modo de vibração
 - da fonte emissora da vibração mecânica
65. A presença de uma descontinuidade no material não produzirá nenhuma indicação de descontinuidade na tela do aparelho, quando usado:
- transdutor normal pela técnica pulso-eco
 - transdutor angular pela técnica pulso -eco
 - ondas superficiais
 - método de ensaio por transparência

66. O fenômeno da perda gradual da energia sônica que ocorre quando um feixe de ultrassom se propaga num material, é devido:
- a) à reflexão
 - b) a refração
 - c) ao líquido acoplante
 - d) a atenuação
67. Um bloco metálico com dimensões conhecidas e calibradas contendo furos ou entalhes que deve ser usado para ajustes do aparelho de ultrassom antes do início do ensaio, é denominado:
- a) bloco de calibração
 - b) bloco de ajuste
 - c) bloco comparador
 - d) bloco dimensional para inspeção por ultrassom
68. Em geral o controle de ganho dos aparelhos de ultrassom é responsável pela amplificação do sinal ou eco na tela do aparelho, e é calibrado em:
- a) metros/segundos
 - b) unidades de energia
 - c) decibel
 - d) Angstroms
69. O processo de comparação de instrumento com um padrão é denominado:
- a) angulação
 - b) padronização
 - c) calibração
 - d) correlação
70. A habilidade dos transdutores em detectar ecos provenientes de duas pequenas descontinuidades próximas entre si, é uma característica para:
- a) resolução
 - b) sensibilidade
 - c) definição
 - d) ganho
71. Qual dos transdutores abaixo terá tamanho maior para o campo próximo, para um mesmo material e frequência?
- a) Ø 24 mm
 - b) Ø 10 mm
 - c) Ø 15 mm
 - d) Ø 5 mm
72. No aço, a velocidade do som será maior em qual dos seguintes modos de vibração?
- a) longitudinal
 - b) transversal
 - c) superficial
 - d) a velocidade do som é idêntica em todos os modos, para um dado material

73. Porque a inspeção ultrassônica de materiais fundidos são geralmente difíceis de serem executadas ?
- porque geralmente a estrutura do material fundido é grosseira causando atenuação do feixe sônico e ruídos espúrios na tela do aparelho.
 - porque o inspetor deve utilizar sempre dois ou mais transdutores com frequências diferentes
 - porque os defeitos são muito menores que a sensibilidade do ensaio
 - porque geralmente requer blocos de calibração muito pesados
74. A falta de paralelismo entre a superfície de entrada do feixe sônico e a superfície de fundo:
- podem resultar numa tela do aparelho de ultrassom que não contém reflexões de fundo
 - tornam difíceis em localizar descontinuidades paralelas à superfície de entrada
 - usualmente indicam que porosidade podem existir no material
 - reduzirá a sensibilidade do ensaio
75. Transdutores que contém dois cristais individuais são frequentemente referidos aos do tipo:
- transdutores duplo-cristal
 - transdutores SE
 - transdutores de duplos elementos
 - as alternativas (a) e (b) são corretas
76. Um outro nome para zona de Fresnel é:
- zona de Fraunhofer
 - campo próximo
 - campo longínquo
 - zona morta
77. A rugosidade superficial de uma peça a ser submetida ao ensaio por ultrassom, pode resultar em:
- uma perda da amplitude de ecos provenientes de descontinuidades
 - uma perda da amplitude do eco de fundo
 - desgaste prematuro dos transdutores
 - todas as alternativas são verdadeiras
78. Um outro nome para as ondas de compressão é:
- ondas de Rayleigh
 - ondas transversais
 - ondas longitudinais
 - ondas de Fresnel
79. Uma onda mecânica produzida por um transdutor ultrassônico com frequência de 4 MHz, se propagando no aço ($v=6000$ m/s) , será capaz de detectar uma descontinuidade com diâmetro mínimo:
- 1 mm
 - 0,75 mm
 - 2 mm
 - 3 mm

80. O tipo de onda transversal é gerado por transdutores:

- a) angulares
- b) normais
- c) bifocais
- d) de banda larga

81. Qual dos diâmetros de furos de fundo plano abaixo, representará uma reflexão com amplitude maior de eco na tela do aparelho de ultrassom ?

- a) 5 mm
- b) 2 mm
- c) 1,5 mm
- d) 3 mm

Usando a figura 2 abaixo, responda as questões 82 a 87

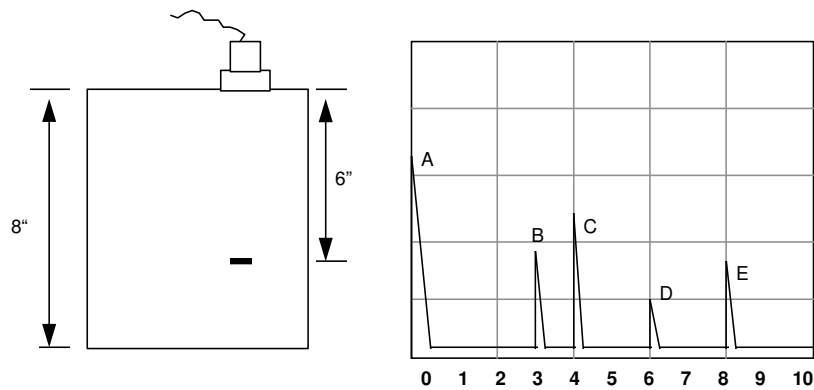


Figura 2

82. O que representa a indicação B da figura 2 ?

- a) pulso inicial
- b) primeira indicação da descontinuidade
- c) primeira reflexão de fundo
- d) nenhuma das alternativas

83. O que representa a indicação C na figura 2 ?

- a) segunda reflexão de fundo
- b) primeira indicação da descontinuidade
- c) segunda indicação da descontinuidade
- d) primeira reflexão de fundo

84. O que representa a indicação A na figura 2 ?

- a) pulso inicial
- b) indicação de descontinuidade na superfície
- c) primeira indicação da descontinuidade
- d) nenhuma das alternativas

85.O que representa a indicação D na figura 2 ?

- a) primeira indicação da descontinuidade
- b) segunda indicação da descontinuidade
- c) primeira reflexão de fundo
- d) segunda reflexão de fundo

86.O que representa a indicação E na figura 2 ?

- a) primeira indicação da descontinuidade
- b) segunda indicação da descontinuidade
- c) primeira reflexão de fundo
- d) segunda reflexão de fundo

87.Qual a escala na tela do aparelho, utilizada pelo inspetor ?

- a) 8 pol
- b) 200 mm
- c) 20 pol
- d) 16 pol

O ecograma a seguir , é o resultado da inspeção por ultrassom, de uma seção de uma peça com 50 mm de espessura , com superfícies paralelas.

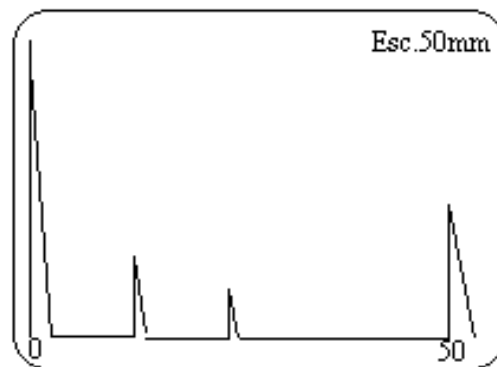


Figura 3

88.No ecograma acima , existem descontinuidades detectadas na peça ensaiada ?

- a) existem 2 descontinuidades
- b) não existem descontinuidades
- c) existem 3 descontinuidades
- d) existem 4 descontinuidades

89. Num processo de medição de espessura, o operador encontrou o resultado mostrado no ecograma abaixo. Qual o resultado da medida encontrada, considerando que a calibração da escala está correta?

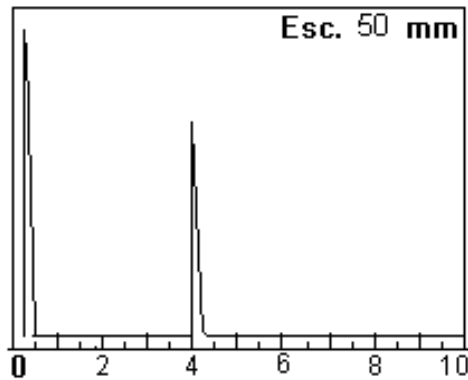
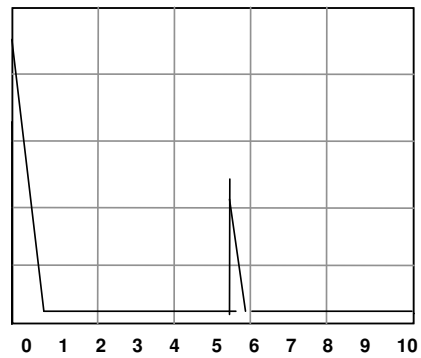
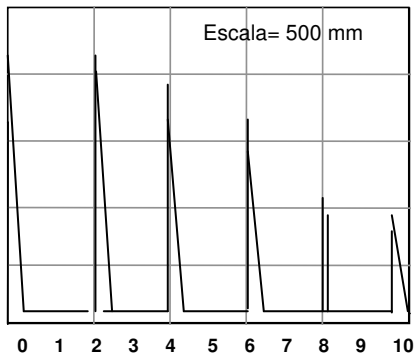


Figura 4

- a) 40 mm
- b) 10 mm
- c) 20 mm
- d) 80 mm

90. O inspetor de ultrassom no processo de medição da velocidade sônica de um material obteve os ecogramas abaixo. Qual a velocidade de propagação encontrada ?



Bloco V1 , $V = 5920 \pm 30$ m/s

peça , diâmetro real = 300 mm

Responda a seguir:

A velocidade de propagação na peça será aproximadamente:

- a) 5.980 m/s
- b) 6.458 m/s
- c) 5.426 m/s
- d) nenhuma das alternativas

91. Se durante o ensaio por ultrassom num cilindro fundido, o eco de fundo desaparece, então:
- provavelmente o cabo coaxial deve ter defeito
 - a peça pode apresentar defeito interno nesta seção
 - a atenuação do material pode ser muito alta nesta região
 - as alternativas (b) e (c) são possíveis
92. O critério de aceitação do ensaio por ultrassom de uma peça, deve estar:
- baseado no furo padrão de referência, em que o aparelho foi calibrado.
 - baseado no bom senso do inspetor, ao analisar as indicações produzidas na tela do aparelho.
 - baseado no procedimento de ensaio, norma ou projeto de construção da peça ensaiada.
 - as alternativas (b) e (c) são corretas
93. Erros significantes na medição de espessura por ultrassom podem ocorrer se:
- a frequência de teste varia a uma taxa constante
 - a velocidade de propagação se desvia de forma significativa do valor constante do material.
 - água for usada como acoplante entre o transdutor e a peça
 - nenhuma das anteriores
94. De acordo com ASME Sec. V Art. 4, o limite de registro (furo de referência) para calibração da sensibilidade do ensaio em soldas com espessura do material base de 45 mm, deve ser de diâmetro:
- 1,5 mm com transdutores angulares
 - 4,0 mm
 - 3,0 mm para transdutores angulares
 - não há limite de registro neste caso
95. Para espessuras de material base de 38 mm, as soldas que compõem partes de um vaso de pressão projetado conforme ASME Sec. VIII Div. 2, devem ser inspecionadas com nível de referência ajustado para um refletor (furo), de diâmetro:
- 1,5 mm
 - 3/16"
 - 3/32"
 - 3,18 mm (1/8")
96. Uma junta soldada com espessura de 20 mm, inspecionada conforme ASME Sec. VIII Div. 1, foi observado uma descontinuidade isolada com um eco de amplitude de 50% do nível de referência. Neste caso:
- deverá ser rejeitada se o comprimento for acima de 6,7 mm e se tratar de inclusão de escória
 - deverá ser rejeitada caso tratar-se de trinca
 - deverá ser aprovada, caso tratar-se inclusão de escória
 - todas as alternativas são verdadeiras.

97. Uma descontinuidade do tipo dupla-laminação, numa chapa com espessura de 40 mm, com extensão de 80 mm de comprimento, deve ser tratada conforme ASME Sec. V SA-435 como:
- uma descontinuidade permitida
 - uma descontinuidade inaceitável
 - uma descontinuidade que poderá ser rejeitada, dependendo da localização, com relação à espessura da chapa
 - nenhuma das anteriores

98. O ecograma abaixo representa uma indicação observada durante a inspeção de uma solda por ultrassom. A que profundidade em relação à superfície, se encontra a descontinuidade detectada na solda?

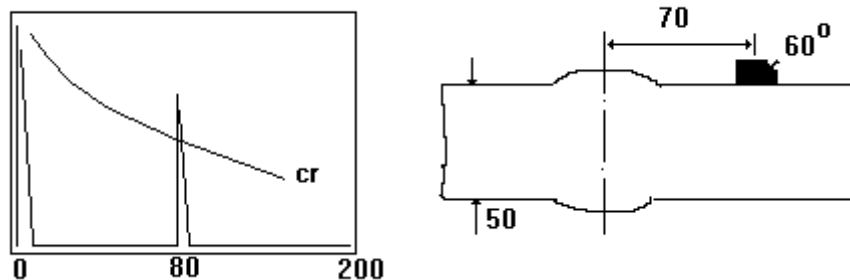
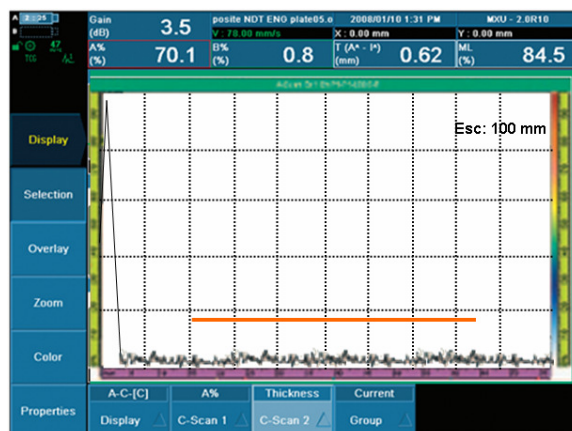
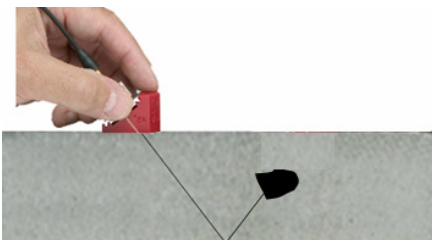


Fig. 5

- 15 mm
 - 40 mm
 - 30 mm
 - o eco na tela é proveniente do reforço do lado oposto da solda
99. De acordo com ASME Sec. V Art. 4, qual a espessura do bloco de calibração a ser selecionado para ajuste da sensibilidade do ensaio da solda da Fig.5 ?
- 76 mm
 - 19 mm
 - 38 mm
 - 25 mm
100. De acordo com ASME Sec. V Art. 5, qual das afirmações abaixo é verdadeira?
- Os aparelhos de ultrassom não necessitam de serem verificados quanto ao requisito de aferição periódica
 - São permitidos inspetores qualificados como Nível I para inspeção de material prima
 - A rugosidade da superfície pode ser qualquer desde que seja usinada.
 - nenhuma das alternativas é correta

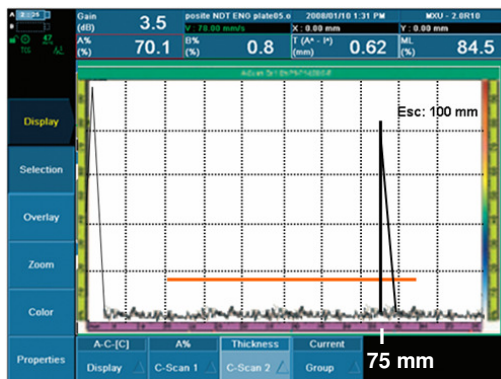
101. Para inspeção por ultrassom de chapas conforme ASME Sec. V SA 435, a calibração do aparelho deve ser feita:
- usando um furo de referência especificado
 - usando um bloco de espessura igual ao da chapa a ser inspecionada
 - ajustando o eco de fundo da própria chapa entre 50% e 90% da altura da tela do aparelho
 - ajustando o eco de fundo entre 50% e 75 % da altura da tela.
102. A inspeção de soldas conforme o procedimento de ensaio por ultrassom de acordo com ASME Sec. V Art. 4 requer:
- que a espessura do bloco de calibração a ser selecionado quando duas ou mais espessuras do metal base forem envolvidas deve ser definido pela média da espessura da solda
 - uso de acoplante tal como metil celulose
 - que a calibração da escala do aparelho seja feita através dos blocos Tipo 1 ou Tipo 2
 - todas as alternativas são corretas
103. Uma característica principal que diferencia o transdutor convencional de um phased array é:
- o transdutor convencional pode ser adquirido em vários ângulos e o phased array não
 - o transdutor convencional é conectado ao aparelho por um único cabo coaxial e o phased array são vários cabos interligados no transdutor
 - o transdutor convencional é monocristal e o phased array são inúmeros cristais.
 - não existe diferenças
104. Considerando que o transdutor da figura abaixo é de 60 graus, que a espessura da peça é de 25 mm, represente na tela do aparelho, como seria o sinal ou eco da descontinuidade indicada no meio da peça.



Gabarito das Questões

01- b	22- b	43- c	64- d	85- b
02- a	23- d	44- a	65- d	86- d
03- d	24- d	45- c	66- d	87- c
04- b	25- b	46- d	67- a	88- a
05- c	26- b	47- c	68- c	89- c
06- b	27- d	48- d	69- c	90- b
07- c	28- a	49- a	70- a	91- d
08- c	29- d	50- c	71- a	92- c
09- a	30- a	51- b	72- a	93- b
10- d	31- c	52- c	73- a	94- c
11- a	32- d	53- b	74- a	95- d
12- a	33- a	54- b	75- d	96- c
13- d	34- d	55- c	76- b	97- b
14- d	35- d	56- d	77- d	98- b
15- d	36- c	57- b	78- c	99- c
16- c	37- d	58- c	79- b	100- d
17- b	38- b	59- c	80- a	101- d
18- a	39- a	60- d	81- a	102- a
19- d	40- b	61- b	82- b	103- c
20- a	41- b	62- c	83- d	104 -ver abaixo
21- c	42- d	63- b	84- a	

Questão - 104



Obras Consultadas

1. American Society of Mechanical Engineers - ASME Boiler and Pressure Vessel Code , Section V , NY, Ed.2017;
2. Leite, Paulo G.P , “Curso de Ensaios Não Destrutivos”, Associação Brasileira de Metais, São Paulo, ABM, 8a. edição 1966 ;
3. American Society of Mechanical Engineers - ASME Boiler and Pressure Vessel Code , Section VIII Div.1 e Sec.I , NY, Ed.2017;
4. Mac Master R ; "Non Destructive Testing Handbook, N.York , Ronald Press, 1959 Vol. 1
5. SENAI , "Soldagem" , São Paulo , SP , 1997
6. Krautkramer, "Ultrasonic Testing of Materials", Alemanha, second edition
7. Website – www.olympus-ims.com. O material utilizado nesta apostila extraída deste website, possui autorização para uso das imagens e textos, emitida em caráter exclusivo ao autor.
8. ASTM E164-13 Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Weldments, PA/USA, 2013, ASTM

**DIREITOS RESERVADOS PARA PUBLICAÇÃO E VENDAS
COM AUTORIZAÇÃO DO AUTOR.**



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO
Rua Guapiaçu 05 , 04024-020 , São Paulo / SP
Tel: 0XX11-5586-3199 , e-mail : biblioteca@abendi.org.br
website: www.abendi.org.br

