

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAIS DE
MÁQUINAS**



FABRICIO REBELO BRAGA

IMPORTÂNCIA DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

RIO DE JANEIRO

2011

FABRICIO REBELO BRAGA

IMPORTÂNCIA DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para aprovação no curso de Aperfeiçoamento de Oficiais de Máquinas pelo Centro de Instrução Graça Aranha.

**ORIENTADOR: PROFESSOR LUIZ OTAVIO RIBEIRO
CARNEIRO**

RIO DE JANEIRO

2011

FABRICIO REBELO BRAGA

IMPORTÂNCIA DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para aprovação no curso de Aperfeiçoamento de Oficiais de Máquinas pelo Centro de Instrução Graça Aranha.

Aprovado pela Banca Examinadora em _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Professor Luiz Otavio Ribeiro Carneiro

Centro de Instrução Almirante Graça Aranha

Professor (a)

Centro de Instrução Almirante Graça Aranha

Professor (a)

Centro de Instrução Almirante Graça Aranha

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, assim como todas as minhas vitórias acadêmicas, por sempre zelarem por minha educação.

Agradeço a minha noiva por sempre me apoiar principalmente nos momentos mais difíceis de minha jornada.

Agradeço ao meu orientador e professor Luiz Otavio Ribeiro Carneiro pelos ensinamentos, amizade, incentivo e paciência em me ajudar a desenvolver este trabalho. Agradeço aos meus amigos e funcionários da biblioteca Tereza e Fidélis por me auxiliarem na pesquisa bibliográfica deste trabalho.

Agradeço a todos os professores do curso de Aperfeiçoamento de Oficiais de Maquinas que mesmo diante de adversidades perseveraram na missão de transmitirem conhecimentos aos alunos com toda dedicação.

Agradeço aos colegas de curso pela oportunidade de aumentar meus conhecimentos através da nossa convivência.

RESUMO

Este estudo objetiva demonstrar a importância dos ensaios não destrutivos para o controle de qualidade de peças acabadas ou semi-acabadas. Mostra os principais tipos de Ensaio não Destrutivo assim como suas principais características, vantagens, limitações, procedimentos, aplicações e seus riscos. Esses ensaios são usados em diversos tipos de indústrias como as de construção naval, petroquímica, aeronáutica entre outras. São ensaios feitos por técnicos capacitados e experientes dentro do ensaio escolhido a ser realizado devido ao alto grau de responsabilidade em seus laudos técnicos, pois essas peças, no futuro, sofrerão diversos tipos de esforços mecânicos. Estes tipos de ensaios são chamados de Ensaio Não Destrutivo porque eles, no decorrer do ensaio, não inutilizam a peça a ser ensaiada, podendo a mesma ser utilizada no processo de fabricação final do equipamento a ser fabricado.

ABSTRACT

This study aims to demonstrate the importance of non-destructive testing for quality control of finished parts or semi-finished. Shows the main types of Non destructive Testing and its main characteristics, advantages, limitations, procedures, applications and risks. These tests are used in various types of industries such as shipbuilding, petrochemical, aerospace and others. Tests are performed by trained technicians and experienced within the chosen test to be performed due to the high degree of responsibility in their technical reports, as these parts in the future, suffer various types of mechanical stress. These types of tests are called Non destructive Testing because they, during the test, no failure of the part to be tested, it can be used in the manufacturing end of the equipment to be manufactured.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 O QUE SÃO OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	13
1.2 QUAIS SÃO OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS?.....	14
1.3 OS END MAIS UTILIZADOS SÃO.....	14
2 EMISSÃO ACUSTICA.....	15
2.1 APLICAÇÕES.....	16
2.2 TÉCNICAS DE ENSIO.....	17
2.3 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO.....	17
2.4 SENSORES PARA DETECÇÃO DE SINAIS DE EMISSÃO ACUSTICA.....	18
2.5 VANTAGENS E LIMITAÇÕES.	18
2.6 DESENVOLVIMENTOS.....	19
3 ENSAIO POR LÍQUIDO PENRTRANTE.....	19
3.1 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS E FINALIDADE.....	20
3.2 VANTAGENS E LIMITAÇÕES.....	20
3.2.1 VANTAGENS.....	20
3.2.2 LIMITAÇÕES.....	21
3.3 APLICAÇÕES.....	21
3.4 VISIBILIDADE DA INDICAÇÃO.....	22
3.5 CLASSIFICAÇÃO DOS PENETRANTES, PROCESSOS E MATERIAIS (DE ACORDO COM A ASTM 1417).....	22
3.6 ETAPAS DO ENSAIO.....	23
3.7 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DAS PEÇAS PARA ENSAIO LIMPEZA.....	23

3.7.1 PRÉ - LIMPEZA.....	24
3.8 TIPOS DE PENETRANTE.....	24
3.8.1 SELEÇÃO DO TIPO DE PENETRANTE.....	25
3.9 APLICAÇÃO DOS PENETRANTES.....	25
3.10 TEMPO DE PENETRAÇÃO.....	26
3.11 TEMPERATURA DE ENSAIO.....	26
3.12 REMOÇÃO DO EXCESSO DE PENETRANTE.....	26
3.13 INSPEÇÃO VISUAL DA REMOÇÃO.....	27
3.14 SECAGEM.....	28
3.15 REVELADORES.....	28
3.16 LUZ NEGRA.....	29
3.17 LOCAL DA INSPEÇÃO.....	29
3.18 INSPEÇÃO.....	30
3.19 DESCONTINUIDADES.....	30
3.20 INTERPRETAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO.....	31
3.21 LIMPEZA APÓS O ENSAIO.....	31
4 ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS.....	31
4.1 APLICAÇÕES.....	32
4.2 VANTAGENS DO ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS.....	32
4.3 TIPOS DE SONDAS PARA ENSAIOS POR CORRENTES PARASITAS.....	33
4.4 TÉCNICAS DE ENSAIO.....	34
4.5 SÃO LIMITAÇÕES DESSE TIPO DE ENSAIO.....	35
5 INSAIO DE INSPEÇÃO VISUAL.....	35

5.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	36
5.1.1 VANTAGENS.....	36
5.1.2 DESVANTAGENS.....	37
5.2 OLHO HUMANO.....	37
5.3 FATORES IMPORTANTES.....	37
5.4 TÉCNICAS DE ENSAIOS VISUAL.....	38
5.4.1 TRADICIONAL.....	38
5.4.2 AVANÇADAS.....	39
5.5 LIMITAÇÕES DO ENSAIO.....	39
5.6 APRESENTAÇÃO DE DESCONTINUIDADES.....	40
6 ENSAIO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	40
6.1 AS PRINCIPAIS VANTAGENS DA INSPEÇÃO COM PARTÍCULAS PARTÍCULAS MAGNÉTICAS SÃO:.....	41
6.2 LIMITAÇÕES DO ENSAIO.....	42
6.3 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE.....	42
6.4 REMOÇÃO DE OXIDAÇÃO E CAREPAS OU CARBONIZAÇÃO.....	43
6.5 REMOÇÃO DE TINTAS.....	43
6.6 LIMPEZA DA PEÇA - PRÉ-LIMPEZA.....	43
6.6.1 PRINCIPAIS PROCESSOS DE PRÉ-LIMPEZA.....	44
6.7 PROTEÇÃO E ISOLAMENTOS DE REGIÕES.....	44
6.8 MATERIAIS INFLUENCIÁVEIS PELO CAMPO MAGNÉTICO.....	44
6.8.1 MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS:.....	44
6.8.2 MATERIAIS PARAMAGNÉTICOS.....	45

6.8.3 MATERIAIS DIAMAGNÉTICOS.....	45
6.9 CAMPO MAGNÉTICO E DESCONTINUIDADE.....	45
6.10 CAMPO DE FUGA.....	46
6.11 TIPOS DE CORRENTES DE MAGNETIZAÇÃO.....	46
6.12 TÉCNICAS DE MAGNETIZAÇÃO.....	46
6.12.1 MAGNETIZAÇÃO CIRCULAR MÁQUINA ESTACIONÁRIA.....	46
6.12.2 MAGNETIZAÇÃO CIRCULAR COM CONDUTOR CENTRAL.....	47
6.12.3 MAGNETIZAÇÃO CIRCULAR COM PRODS.....	47
6.12.4 MAGNETIZAÇÃO CIRCULAR COM GRAMPOS.....	48
6.12.5 MAGNETIZAÇÃO LONGITUDINAL.....	48
6.12.6 MAGNETIZAÇÃO LONGITUDINAL COM BOBINAS.....	48
6.12.7 MAGNETIZAÇÃO LONGITUDINAL COM YOKE.....	49
6.13 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	49
6.14 TIPOS DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	49
6.14.1 PARTÍCULAS VISÍVEIS.....	49
6.14.2 PARTÍCULAS FLUORESCENTES.....	50
6.15 FORMAS DE APLICAÇÃO.....	50
6.16 MÉTODOS DE ENSAIO.....	52
6.16.1 MÉTODO CONTÍNUO.....	52
6.16.2 MÉTODO RESIDUAL.....	52
6.17 INSPEÇÃO.....	52
6.18 DESCONTINUIDADES.....	53
6.19 INTERPRETAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO.....	53

6.20 DESMAGNETIZAÇÃO E LIMPEZA FINAL.....	54
6.21 INDICADOR DO CAMPO MAGNÉTICO.....	54
6.22 LIMPEZA FINAL.....	55
7 ENSAIO RADIOGRAFICO.....	55
7.1 FILME.....	56
7.2 TELAS INTENSIFICADORAS DE IMAGEM (ECRANS/SCREENS).....	57
7.3 INDICADORES DE QUALIDADE DE IMAGEM (PENETRÂMETROS).....	58
7.4 RAIOS X.....	59
7.5 GERADORES DE RADIAÇÃO X.....	59
7.6 COMPONENTES E PROPIEDADES DE UM TUBO DE RAIOS X.....	59
7.6.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	60
7.6.2 UNIDADE DE COMANDO.....	61
7.7 PRINCÍPIOS GEOMÉTRICOS DA EXPOSIÇÃO/FATORES QUE AFETAM A QUALIDADE DA IMAGEM.....	61
7.7.1 LEI DO QUADRADO DA DISTANCIA.....	61
7.7.2 PENUMBRA GEOMÉTRICA.....	61
7.8 VARIÁVEIS QUE AFETAM A QUANTIDADE DE RAIOS X EMITIDO.....	62
7.9 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO.....	62
7.10 PREPARAÇÃO DO ENSAIO POR RAIOS X.....	62
7.11 RAIOS-GAMA.....	63
7.12 DECAIMENTOS RADIOATIVOS.....	63
7.13 SENSIBILIDADE DOS ISÓTOPOS (QUALIDADE DE IMAGEM).....	64
7.14 CÂMARA DE ISÓTOPOS OU IRRADIADOR GAMA.....	64

7.15 COMPOSIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO POR RAIOS GAMA.....	64
7.16 PREPARAÇÃO DO ENSAIO POR RAIOS GAMA.....	65
7.17 COMPARAÇÃO ENTRE RAIOS-X E RAIOS- GAMA.....	66
7.18 VISUALIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES.....	66
7.19 PROTEÇÃO.....	67
7.20 VANTAGENS.....	67
7.21 LIMITAÇÕES E DESVANTAGENS.....	68
8 ULTRA-SOM.....	68
8.1 GERAÇÃO E DETECÇÃO DO ULTRA-SOM.....	70
8.2 END POR ULTRA-SOM.....	71
8.3 VANTAGENS EM RELAÇÃO A OUTROS ENSAIOS.....	72
8.4 COMO DESVANTAGENS PODEMOS CITAR:.....	73
8.5 CAMPOS DE APLICAÇÃO DO END.....	73
8.6 TIPOS DE CRISTAIS PARA TRANSDUTORES.....	73
8.6.1 TRANSDUTORES NORMAIS OU RETOS.....	74
8.6.2 TRANSDUTORES ANGULARES.....	74
8.6.3 TRANSDUTORES DUPLO-CRISTAL.....	75
8.6.4 TRANSDUTORES PHASED ARRAY.....	75
8.7 CARACTERÍSTICAS DOS TRANSDUTORES.....	76
8.8 ACOPLANTE.....	77
8.9 MÉTODO DE ENSAIO.....	77
8.10 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO POR ULTRA-SOM.....	78
8.10.1 TÉCNICA DE IMPULSO-ECO OU PULSO-ECO.....	78

8.10.2 TÉCNICA DE TRANSPARÊNCIA.....	79
8.10.3 TÉCNICA DE IMERSÃO.....	80
8.11 APRESENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES.....	80
9 CONCLUSÃO.....	82
10 REFERÊNCIAS.....	83

1 Introdução

Características de materiais obtidas através dos ensaios são fundamentais para o dimensionamento de elementos estruturais. Pode-se definir ensaio como a observação do comportamento de um material quando submetido à ação de agentes externos como esforços e outros. Os ensaios são executados sob condições padronizadas, em geral definidas por normas, de forma que seus resultados sejam significativos para cada material e possam ser facilmente comparados. São testes realizados em materiais, visando determinar suas propriedades mecânicas, comparar materiais, controlar produção bem como participação fundamental na garantia da qualidade, onde os resultados obtidos devem ser comparados com padrões estabelecidos por normas. Atualmente, entende-se que o controle de qualidade precisa começar pela matéria-prima e deve ocorrer durante todo o processo de produção, incluindo a inspeção e os ensaios finais nos produtos acabados.

1.1 O que são os Ensaio Não Destrutivos

Os Ensaio Não Destrutivos (END) são definidos como testes para o controle da qualidade, realizados sobre peças acabadas ou semi-acabadas, para a detecção de falta de homogeneidade ou defeitos, através de princípios físicos definidos, sem prejudicar a posterior utilização dos produtos inspecionados. Constituem uma das principais ferramentas do Controle da Qualidade e são utilizados na inspeção de produtos soldados, fundidos, forjados, laminados, entre outros, com vasta aplicação nos setores petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, naval, autopeças e transporte rodo-ferroviário.

1.2 Quais são os Ensaios Não Destrutivos?

O método a ser utilizado depende das propriedades físicas do material. Um conhecimento geral dos métodos de END disponíveis é necessário para a seleção do método adequado.

Algumas situações típicas em que os ensaios não destrutivos são aplicados:

- Prevenção de acidentes
- Redução de custos
- Melhorar a confiabilidade de produtos
- Dar informações para reparo

1.3 Os END mais utilizados são:

- Inspeção Visual
- Partículas Magnéticas
- Líquidos Penetrantes
- Ultra-Som
- Radiografia
- Emissão Acústica
- Correntes Parasitas

2 EMISSÃO ACÚSTICA

O método de inspeção com a técnica de emissão acústica está baseado na detecção de fontes de sinais acústicos que são emitidos durante a propagação de descontinuidades e deformações plásticas acentuadas, ou seja, os resultados obtidos com método de inspeção por emissão acústica são, em princípio, os desejados para a monitoração em tempo real das estruturas. Por ser um método qualitativo o ensaio de emissão acústica não fornece as dimensões das descontinuidades, uma vez que só fornece indicações de descontinuidades ativas durante o carregamento das estruturas. As dimensões das descontinuidades são fornecidas por outros métodos de ensaios não destrutivos.

Emissão acústica foi definida como um fenômeno onde ondas elásticas transientes são geradas por rápida liberação de energia mecânica a partir de fontes localizadas em um material ensaiado (ABNT, 2004). Fontes de emissão acústica incluem os mecanismos de deformação e fratura, tais como: crescimento de trincas, movimento de discordâncias, maclação, deslocamento de contornos de grão, fratura e de coesão de inclusões (Miller, 1987).

O método de inspeção com a técnica de emissão acústica é capaz de detectar vazamentos em equipamentos submetidos à pressão interna e detectar prematuramente falhas em estruturas permitindo a monitoração constante e em tempo real de estruturas industriais.

Sinais de emissão acústica são ondas mecânica de natureza transitória que se propagam através do óleo isolante e estrutura interna até superfície externa do equipamento. Estes sinais de emissão acústica podem ser gerados por descargas parciais, vibrações mecânicas, trincas, etc. Estas ondas são captadas e transmitidas através de sensores piezoelétricos montados sobre a superfície do equipamento. Estes sensores transformam os sinais captados em sinais elétricos onde são transmitidos através de cabos até uma unidade de processamento de sinais. Nesta unidade de processamento o sinal é digitalizado e feito a sua caracterização.

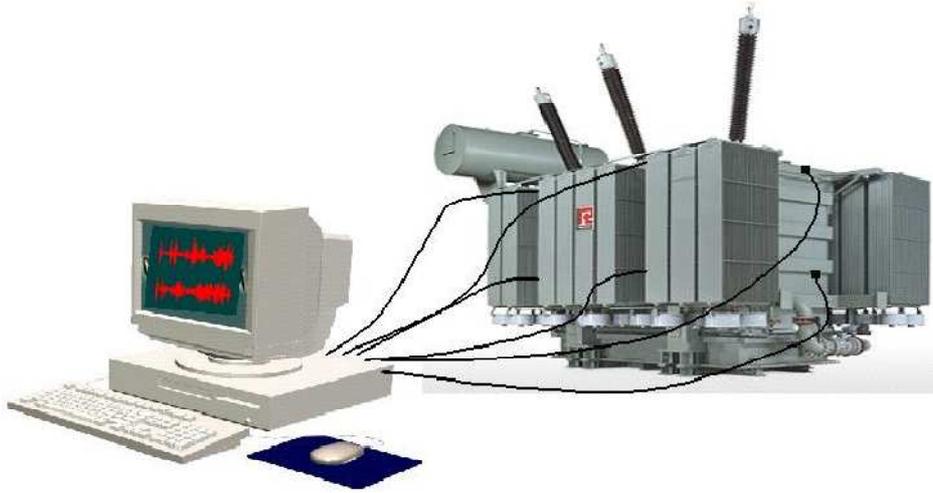


Figura 1 Exemplicação do ensaio de emissão acústica

2.1 APLICAÇÕES

A maior contribuição da técnica é a de analisar o comportamento dinâmico das desconti

nuidades, recurso este único dentro do elenco dos ensaios não destrutivos. O método tem várias aplicações incluindo-se as seguintes:

- Monitoramento do teste hidrostático inicial em vasos de pressão;
- Monitoramento contínuo para equipamentos, componentes ou maquinas em operação, fadiga em serviço ou em protótipos, regiões em plataformas, vasos de pressão, etc;
- Monitoramento do desgaste de ferramentas e controle do processo de soldagem;
- Caracterização de materiais compostos (fibras de vidro, fibra de carbono, concreto, etc).

2.2 TÉCNICAS DE ENSAIO

O ensaio por emissão acústica permite a detecção, localização e a classificação da fonte ativa. A localização da fonte é atingida medindo-se a diferença dos tempos de chegada das ondas elásticas geradas pela fonte emissora, quando elas atingirem os vários sensores instalados na estrutura. A posição da fonte emissora é geralmente estabelecida pelo método da triangulação utilizando-se três ou mais sensores. A quantidade de sensores requerida para a verificação de toda a estrutura é dependente da espessura e geometria do componente ensaiado. A possibilidade de localização das discontinuidades sem a necessidade de movimentação dos sensores permite o ensaio global de estruturas mesmo em áreas de difícil acesso.

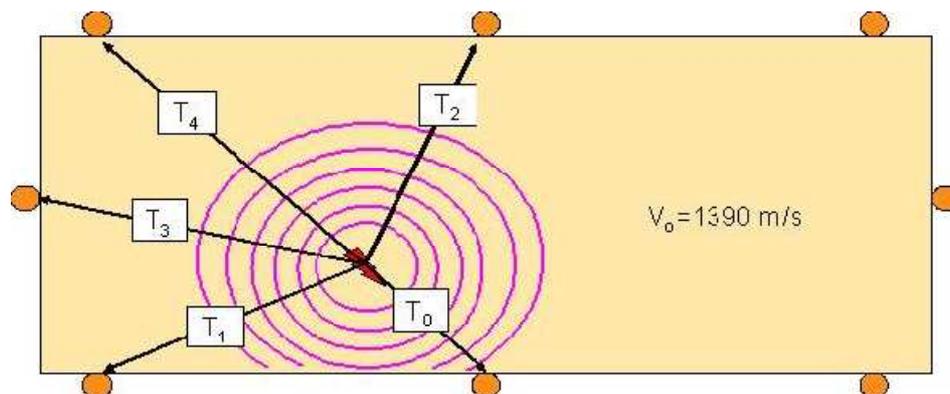


Figura 2 Processo de localização do defeito

2.3 Velocidade de propagação

A velocidade de propagação da onda acústica é um parâmetro importante no ensaio de emissão acústica, pois a utilização de seu valor correto permitirá a determinação precisa da localização da fonte do sinal de emissão acústica. Os valores de velocidade de propagação são característicos de cada material.

2.4 Sensores para detecção de sinais de emissão acústica

Os sensores utilizados industrialmente para a detecção de sinais de emissão acústica são do tipo piezoelétricos, e são os mais utilizados em função do custo de fabricação e facilidade de fabricação. O fenômeno da piezoelectricidade que confere o nome ao tipo de sensor permite a geração de cargas elétricas como resultado de deformação mecânica e o efeito reverso (Krautkrämer, 1977). A frequência de ressonância de um sensor é identificada pela frequência onde ocorre a maior resposta em amplitude.

A banda em frequência é a descrição da faixa percentual da frequência de ressonância para uma resposta de até -3 dB. Sensores são identificados como banda estreita ou banda larga, para bandas de frequência de até 50% e acima de 50%, respectivamente. Os sensores mais utilizados no ensaio de emissão acústica em materiais metálicos são ressonantes em 150 kHz, com banda larga em frequência (100%), ou seja, apresentam uma extensa faixa útil de 75 kHz até 225 kHz.

A resposta do sensor é determinada, inicialmente, pela forma e dimensão do cristal piezoelétrico e pelas constantes elásticas e piezoelétricas; em seguida pela forma com que o cristal é amortecido e montado dentro da caixa do sensor e, finalmente, pelo acoplamento e montagem do sensor na estrutura em teste e pelas propriedades acústicas da estrutura em teste.

2.5 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

O ensaio não detecta descontinuidades estáveis que não comprometem a integridade estrutural, assim como não dimensiona o defeito e tão pouco indica sua morfologia. Daí a necessidade de ensaios complementares de ultra-som e partículas magnéticas. A combinação do ensaio global de emissão acústica e métodos complementares é a melhor alternativa para avaliação de integridade. A utilização de uma técnica de avaliação global como a Emissão Acústica, produz os seguintes benefícios diretos:

- Redução das áreas a inspecionar, com a conseqüente redução do tempo de indisponibilidade do equipamento;

- Detecção e localização de descontinuidades com significância estrutural para as condições de carregamento durante o ensaio;
- Ferramenta que permite uma avaliação de locais com geometrias complexas, com dificuldades de utilização de END's convencionais;
- Permite a realização do ensaio em operação ou durante resfriamento da unidade, anterior a parada.

2.6 DESENVOLVIMENTOS

Diversas descontinuidades detectadas em equipamentos, principalmente os mais antigos, são oriundas da fase de fabricação, não interferindo nos aspectos relacionados à segurança ou sua funcionalidade. Assim a utilização apenas de ensaios não-destrutivos de alcance local, na maioria dos casos, não é suficiente para uma definição sobre a capacidade operacional do equipamento. A integração de uma técnica global de inspeção em serviço (emissão acústica), técnicas localizadas de dimensionamento e caracterização (ultra-som e partículas magnéticas), e a análise da influência da presença de descontinuidades na estrutura (mecânica da fratura) é a resposta para os usuários e executantes dos ensaios não destrutivos envolvidos com a avaliação de integridade estrutural em serviço, situação esta na qual o ensaio de emissão acústica tem relevante contribuição.

3 ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE

Está baseado na penetração de um líquido de características específicas em trincas superficiais pelo fenômeno da capilaridade. Sua aplicação é restrita à detecção de defeitos superficiais não visíveis a olho nu.

3.1 Aplicações Industriais e finalidade

Devido às características básicas do Ensaio por Líquido Penetrante, eles podem ser aplicados em grande variedade de produtos metálicos e não metálicos, ferrosos e não ferrosos, sejam forjados, fundidos, cerâmicos de alta densidade e etc., desde que não sejam porosos, com resultados técnicos e economicamente satisfatórios na revelação de descontinuidades superficiais, por menores que sejam. Pode ser aplicado durante o processo de fabricação, ao final deste ou durante a manutenção, aqui para detectar as o surgimento das descontinuidades em serviço.

Considerando que alguns materiais podem ser afetados pelos produtos utilizados no ensaio, devem ser realizados testes para assegurar que o material a ser ensaiado não seja danificado.

3.2 Vantagens e limitações

3.2.1 Vantagens:

- É capaz de ensaiar peças de tamanhos e formas variadas bem como pequenas áreas isoladas em uma superfície;
 - É capaz de detectar descontinuidades muito pequenas, é um dos ensaios mais sensíveis para detectar descontinuidades superficiais;
 - É relativamente barato e não requer equipamentos sofisticados. Para pequena quantidade de peças ou pequenas regiões, pode-se utilizar um sistema portátil;
 - O líquido penetrante fornece uma indicação ampliada da descontinuidade, tornando-a mais visível;
 - As instalações podem ser adaptadas ao tamanho e quantidade de peças;
- A sensibilidade do ensaio pode ser ajustada, selecionando os materiais e técnicas de ensaio.

3.2.2 Limitações:

- As peças devem estar completamente limpas e a entrada das possíveis descontinuidades desobstruídas;
- Os produtos utilizados no ensaio podem danificar alguns materiais ou ficarem permanentemente retidos em materiais porosos;
- Alguns produtos utilizados podem conter enxofre ou compostos halógenos (cloretos, fluoretos, brometos e iodetos).
- Estes compostos podem causar fragilização ou trincas em aços inoxidáveis austeníticos se não forem completamente removidos antes de tratamentos térmicos ou exposição a altas temperaturas.
- Podem também causar corrosão em ligas de titânio se não forem completamente removidos após o ensaio e a peça for exposta a altas temperaturas.
- Os produtos utilizados podem causar irritação na pele se manuseados sem luvas;
- A luz negra deve ser usada mantendo-se os cuidados com os olhos e pele.

3.3 Aplicação

Quando um líquido penetrante é aplicado numa peça, deve-se aguardar o tempo suficiente para ocorrer a penetração nas descontinuidades superficiais. Como elas são normalmente pequenas e estreitas, o fenômeno da capilaridade propicia a penetração.

Terminada a penetração, o excesso de líquido penetrante deve ser escoado e o residual que ainda permanecer sobre a superfície deve ser removido.

3.4 Visibilidade da Indicação

O sucesso deste ensaio depende da visibilidade da indicação, por isso o penetrante contém agente químico corante (de cor usualmente vermelha) para ser analisado sob luz branca, ou agente químico fluorescente (de cor usualmente amarelo-esverdeada) para ser analisado sob luz negra (ultravioleta), este muito mais sensível que o visível.

3.5 Classificação dos penetrantes, processos e materiais (de acordo com a ASTM 1417)

- **Tipo - Classificação dos Penetrantes**

Tipo I – fluorescente

Tipo II - visível

- **Método - Classificação dos Métodos**

Método A – Lavável com água

Método B – Pós emulsificável, Lipofílico

Método C – Removível com solvente

Método D – Pós emulsificável, Hidrofílico

- **Reveladores - Classificação dos Reveladores:**

Forma a – pó seco

Forma b – solúvel em água

Forma c – suspenso em água

Forma d – não-aquoso

Forma e – aplicação específica

- **Solventes - Classificação dos Solventes:**

Classe 1 – halogenados

Classe 2 – não halogenados

Classe 3 – aplicação específica.

3.6 ETAPAS DO ENSAIO

As etapas do ensaio são praticamente as mesmas, tanto para o penetrante visível, como para o penetrante fluorescente, variando ou alternando algumas seqüências devido aos métodos de remoção do excesso do penetrante e o tipo de revelador utilizado.

Um das etapas mais importantes neste ensaio é a preparação da superfície e a pré-limpeza. Podemos considerar as etapas do ensaio como sendo:

- Preparação da superfície/limpeza:
- Pré-limpeza;
- Aplicação do penetrante;
- Tempo de penetração;
- Remoção do excesso do penetrante;
- Secagem da peça, se o revelador utilizado for o seco ou o não aquoso;
- Aplicação do revelador
- Tempo de revelação;
- Inspeção, verificar a revelação das indicações e enquadrá-las no critério de aceitação e rejeição;
- Elaboração do registro dos resultados obtidos no ensaio;
- Limpeza após ensaio, para a retirada do revelador e penetrante da superfície e do penetrante do interior das descontinuidades;
- Proteção da superfície, embalagem e identificação.

3.7 Preparação da superfície das peças para ensaio - limpeza

Consideremos aqui a preparação da superfície ou limpeza, como sendo a remoção de camadas de óxido, tintas, produtos de queima de óleos, combustíveis ou qualquer lubrificante ou outros tipos de contaminantes que possam interferir no ensaio. Tais contaminantes não devem ser removidos pelos executantes do ensaio, pois, geralmente exige-se para tais remoções, conhecimento e técnicas específicas, tais como a aplicação de substâncias ácidas e alcalinas ou algum processo mecânico específico.

Métodos ou produtos impróprios podem causar danos irreversíveis à superfície em ensaio, como por exemplo, a corrosão. Por esse motivo, o método de limpeza deverá ser criteriosamente especificado. Como preparação da superfície consideramos: remoção de oxidação e carepas, remoção de tintas e etc..

3.7.1 Pré-limpeza

Esta etapa é de responsabilidade do operador, que deverá remover qualquer resíduo proveniente da preparação da superfície. O objetivo desta etapa é deixar a superfície a ser ensaiada, completamente limpa e seca.

Atenção: na pré-limpeza, não estamos limpando apenas a superfície, mas também a entrada e se possível o interior das possíveis discontinuidades, pois quanto mais limpas estiverem, mais penetrante irá penetrar em seu interior, que por consequência, provocará uma indicação de maior visibilidade

Principais Processos de Pré-Limpeza

- Limpeza por vapor desengraxante
- Limpeza por vapor d'água
- Limpeza por detergentes
- Limpeza por solventes e removedores

3.8 Tipos de penetrante

Os líquidos penetrantes são encontrados em dois tipos, sendo:

TIPO I - Penetrante fluorescente, mais sensível porque possibilita melhor visualização sob luz negra

TIPO II - Penetrante visível (vermelho), menos sensível, com utilização proibida em peças de motores e turbinas, a menos que apresente uma técnica aprovada.

3.8.1 Seleção do Tipo de Penetrante

Selecionar o tipo de penetrante e o método de remoção adequado para o ensaio é uma tarefa que implica em certo grau de dificuldade, pois requer algum conhecimento sobre os processos de fabricação de cada peça a ensaiar, as condições de cada superfície a ser submetida a ensaio, as descontinuidades esperadas, o material, o tamanho e o peso de cada peça e, ainda, a disponibilidade de água, eletricidade, ar comprimido, etc..

A função de selecionar o tipo e método não deve ser do operador. Em caso de dúvidas, utilize o mais sensível, aliado ao melhor método de remoção do excesso, de acordo com o tipo de material, processo de fabricação e acabamento superficial.

3.9 Aplicação dos Penetrantes

A maneira de aplicar o líquido penetrante vai depender da quantidade de peças, tamanho e localização. Podem ser aplicados por "spray", derramamento, pincelamento ou imersão (banho) e spray eletrostático. O penetrante aplicado deve permanecer em contato com a superfície em ensaio por um determinado tempo (tempo de penetração)

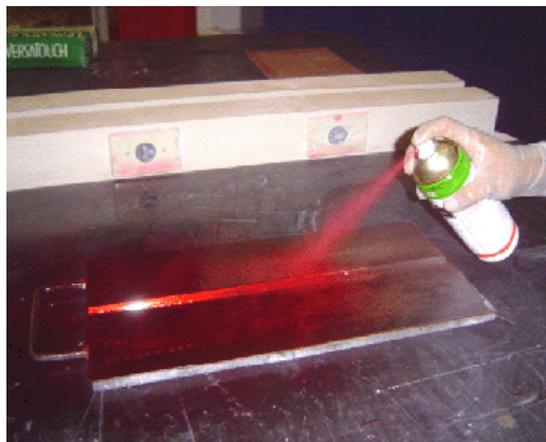


Figura 3 Aplicação do líquido penetrante por spray

3.10 Tempo de Penetração

O tempo mínimo de penetração deve ser de 10 (dez) minutos e o tempo máximo de 2 (duas) horas. Para tempos maiores que duas horas, o penetrante deve ser reaplicado para evitar a sua secagem.

O tempo de penetração deve ser determinado por procedimento escrito, pelo fabricante da peça em ensaio (manual) ou através de uma técnica desenvolvida, em um corpo de prova, de preferência uma peça igual, contendo uma descontinuidade conhecida e feita por um profissional qualificado nível III em END.

3.11 Temperatura de ensaio

A temperatura da peça, o líquido penetrante fluorescente e o ambiente devem estar na faixa de 4 a 49° C. A temperatura da peça, o líquido penetrante visível e o ambiente devem estar na faixa de 16 a 52° C. Penetrantes especiais para alta temperatura podem ser utilizados desde que aprovados pelo manual do fabricante da peça em ensaio ou por um acordo entre as partes e sempre com base numa técnica testada e aprovada.

3.12 Remoção do excesso de penetrante

Após a aplicação do penetrante e decorrido o tempo de penetração, o excesso de penetrante deve ser removido da superfície, mantendo-se apenas o penetrante que está alojado no interior das possíveis descontinuidades.

Os métodos de remoção são os seguintes:

Método A – Penetrante lavável com água

Devem ser removidos com jato d'água controlando a pressão e temperatura, ou por imersão. Quando utilizando o penetrante Tipo I (fluorescente), o enxágüe deve ser feito sob luz negra.

Método B – Penetrante pós-emulsificável lipofílico

O emulsificador deve ser aplicado por imersão ou derramamento. Não pode ser aplicado através de pincel ou spray e não deve ser agitado enquanto estiver sobre a superfície da peça.

Método C – Penetrante removível com solvente

O penetrante é removido inicialmente através de panos secos ou toalhas absorventes e quando o excesso não mais puder ser removido assim, aplica-se o solvente em panos ou papéis limpos e secos, de uma forma que não fiquem encharcados. Procedese então a remoção sob iluminação adequada, luz negra para os penetrantes fluorescentes e luz branca para penetrantes visíveis.

Método D– Penetrante pós-emulsificável hidrofílico

Depois de passado o tempo de penetração, seguem-se as etapas:

- Pré-enxágüe: para retirar o que for possível do excesso do penetrante
- Aplicação do emulsificador hidrofílico
- Enxágüe: proceder da mesma maneira que já descrito para o método A

3.13 Inspeção Visual da Remoção

Nesta etapa, acompanha-se a remoção do excesso do penetrante para que ao final da operação, a peça esteja completamente livre de acúmulos indesejáveis de penetrante na superfície. Desejamos apenas manter na peça, o penetrante que se encontra no interior das discontinuidades.

Quando é utilizado um penetrante do TIPO I, a remoção deve ser feita sob luz negra, para um maior controle no enxágüe. Se o penetrante for do TIPO II, o simples fato de não se constatar traços vermelhos na peça ou no pano utilizado, assegura uma completa remoção.

3.14 Secagem

Esta é uma etapa necessária antes de aplicar o revelador seco e o não aquoso. No caso de utilizar o revelador em solução ou suspensão em água, apenas retira-se o excesso de água aplica-se o revelador e só então a peça é levada à estufa para a secagem do revelador.

Normalmente são usadas estufas com controles que permitem regulação de temperatura, entre 0 e 100°C e a temperatura máxima permitida é de 71°C.

3.15 Reveladores

Como regra geral, o tempo de revelação não deverá ser menor que a metade do tempo de penetração. É importante salientar que para a aplicação dos reveladores secos e não aquosos, a peça deverá estar completamente limpa e seca. Os reveladores podem ser aplicados por: spray, spray eletrostático, imersão, ventilação, polvilhamento, sopro, mergulho e etc.

Podem ser aplicados por processos manuais ou automáticos. Isso dependerá das necessidades. Para linhas de produção seriada, existem sistemas automáticos não apenas para a aplicação do revelador, mas para toda a seqüência do ensaio, desde a pré-limpeza até a limpeza final.

Tipos de Reveladores

- Forma a - pó seco
- Forma b - solúvel em água
- Forma c - suspenso em água
- Forma d - não-aquoso
- Forma e – aplicação específica



Figura 4 Exemplo de revelador aplicado na peça

3.16 Luz negra

Intensidade: A lâmpada deve estar acesa pelo menos 5 (cinco) minutos antes do início do ensaio ou até atingir a intensidade requerida de 1.000 micro watts/cm².

3.17 Local da inspeção

A inspeção deve ser feita em local apropriado, com iluminação apropriada e limpo, para evitar que a peça venha a ser contaminada com resíduos que possam interferir não ensaio.

Quando utilizando o penetrante Tipo I (fluorescente), necessita-se de uma fonte de luz ultravioleta (luz negra), com uma intensidade luminosa mínima de 1.000 micro watts/cm². A luz negra deve ser posicionada de tal maneira que não incida diretamente nos olhos do operador.

Quando utilizando o penetrante Tipo II (visível): deve se inspecionar a peça em local limpo e que tenha uma iluminação mínima de 1.000 lux.

3.18 Inspeção

Fazer incidir sobre a área a ser inspecionada, o foco de luz negra ou branca.

Observar atentamente a área a ser inspecionada, havendo descontinuidades elas serão denunciadas pela manifestação do fenômeno da fluorescência ou indicações vermelhas no caso do penetrante visível.



Figura 5 Revelação de descontinuidade sob luz negra



Figura 6 Revelação de descontinuidade sob luz branca

3.19 Descontinuidades

As descontinuidades podem surgir durante a fabricação da peça, isso dependerá do processo, podem ser: bolhas de gás, porosidade, inclusão, contração, dobras, costura,

delaminação, trincas e etc.. As descontinuidades mais encontradas nas peças em serviço são as trincas.

3.20 Interpretação e avaliação dos resultados do ensaio

O ensaios por Líquido Penetrante exige a correta aplicação das técnicas de ensaio e um grande conhecimento e prática para a interpretação e avaliação das indicações, conhecimento prévios sobre os documentos aplicáveis ao ensaio, o tipo de material, o processo de fabricação da peça e uma grande dose de bom senso, somando tudo isso à qualificação nível I para o operador e nível II para o inspetor.

3.21 Limpeza após o ensaio

A princípio, todas as peças ensaiadas devem ser limpas após a inspeção, independentemente se esta aprovada ou rejeitada. Não necessitam de limpeza após o ensaio se esta atitude estiver mencionada em procedimento escrito e se a peça rejeitada tiver um destino onde os resíduos do ensaio não possam interferir.

4 ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS

O Ensaio por Correntes Parasitas baseia-se fundamentalmente na Lei de Indução de Faraday, onde o campo magnético, gerado por uma bobina quando alimentada por uma corrente elétrica alternada, induz, na peça a ser ensaiada, correntes elétricas, também denominadas correntes parasitas. Estas correntes elétricas, por sua vez, afetam a impedância da bobina que as gerou. Assim, quaisquer variações no fluxo das correntes parasitas geradas na peça ensaiada implicarão em variações da impedância da bobina. Este fato leva a uma das

maiores aplicações deste método de ensaio que é o de detectar a presença de possíveis descontinuidades existentes nessa peça, que venham a interferir no fluxo das correntes parasitas, através das variações ocorridas na impedância da bobina de ensaio. Através de tratamento eletrônico específico, os sinais gerados das variações da impedância, permitem ao inspetor não só detectar a presença de descontinuidades, mas também fazer avaliações de suas profundidades, classificando-as como internas ou externas à superfície em que se encontra a sonda de ensaio. Analisando as amplitudes dos sinais gerados, é possível ter estimativas do tamanho das descontinuidades detectadas.

4.1 APLICAÇÕES

O método de ensaio por correntes parasitas é extremamente versátil visto que pode ser utilizado para todas as aplicações onde possa ser correlacionado com as variações geométricas, elétricas ou magnéticas. Fazendo-se a devida adaptação a cada necessidade, sobretudo quanto ao tipo e tamanho de sonda, o ensaio pode ser realizado para:

- Detectar falta de homogeneidade no material tais como trincas, deformações, inclusões, variações de espessura, corrosão, etc.;
- Medir espessura ou variação de espessura de camada não condutora aplicada em material condutor ou camada condutora aplicada em material de condutividade diferente;
- Detectar variações associadas à condutividade do material, falta de homogeneidade em ligas, superaquecimento local, erros de tratamento térmico, etc.;
- Detectar variações associadas à permeabilidade magnética através de medição das intensidades dos campos magnéticos.

4.2 VANTAGENS DO ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS

Além de uma vasta área de aplicações, o ensaio por correntes parasitas ainda oferece uma série de vantagens tais como:

- alta sensibilidade;

- alta confiabilidade;
- rapidez de execução;
- facilidades para automação;
- não exige contato direto entre a sonda e a superfície inspecionada;
- limpeza;

Na área siderúrgica, os materiais podem ser diretamente ensaiados ainda quentes. Da mesma forma, em superfícies polidas ou lapidadas, assim como no campo das artes e arqueologia, não existe o risco de danos a superfície, à obra ou achado arqueológico durante a realização do ensaio, uma vez que a sonda não toca na superfície.

4.3 Tipos de Sondas para Ensaios por Correntes Parasitas

Os elementos sensores de qualquer modalidade de ensaio não destrutivo representam, juntamente com o aparelho correspondente, um papel fundamental na capacidade de detectar e avaliar com precisão descontinuidades existentes em diferentes tipos de materiais, geometria e dimensões de equipamentos, peças e componentes. No Ensaio por Correntes Parasitas, os elementos sensores são bobinas, as quais, em diferentes formas, arranjos e tamanhos, compõem diversos tipos de sondas, para diferentes aplicações. Além disso, o número de bobinas que compõem uma determinada sonda pode variar em função do aparelho utilizado, ao qual a sonda é acoplada.

Numa inspeção, quando se utiliza o campo magnético gerado fora da bobina, exatamente na região de um dos pólos magnéticos, diz-se que a sonda é superficial.

A sensibilidade de uma sonda superficial está diretamente ligada à área de sua bobina, que tem a forma normalmente de um círculo; maior área significa menor sensibilidade e vice-versa. Por outro lado, maior área da bobina, maior poder de penetração das correntes parasitas, para uma mesma condição de frequência e material inspecionado.

A sonda superficial é indicada para inspecionar, em princípio, qualquer geometria de superfície: plana, côncava ou convexa. Pode ser apresentada com uma determinada área circular ou com uma área mínima, que lhe confere a denominação de sonda tipo “lápiz” ou “caneta”.

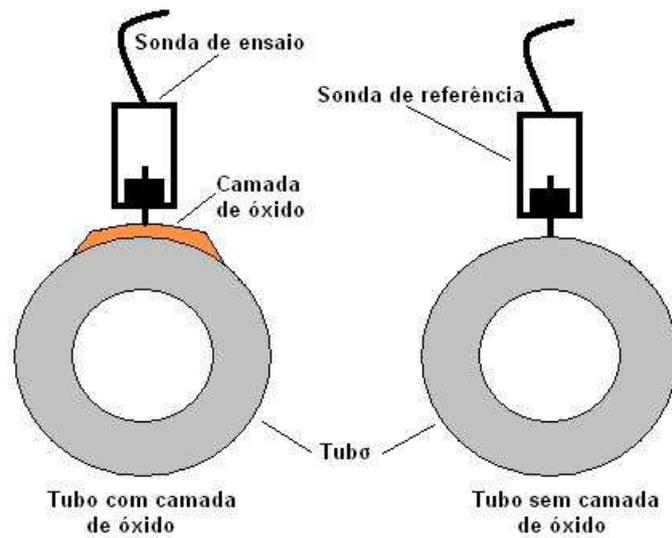


Figura 7 Desenho Mostrando a Utilização de Sondas Superficiais do Tipo “Caneta”



Figura 8 Fotografia das Duas Sondas Tipo “Caneta”, em Arranjo Diferencial.

4.4 TÉCNICAS DE ENSAIO

As técnicas em que se desdobra este método de ensaio dependem do material a ser ensaiado, se o ensaio a ser efetuado é manual ou automaticamente e, sobretudo, do tipo e da localização das discontinuidades que se deseja detectar.

Desta maneira, temos as seguintes técnicas de ensaio:

- Técnica de Magnetização DC, para inspeção principalmente de tubos, barras ou arames de material ferromagnético;
- Técnica de Campo Remoto, para inspeção de tubos, barras ou arames de material ferromagnético e não ferromagnéticos;
- Técnica de Multifrequência com Mistura de Sinais destinada a detectar e avaliar discontinuidades localizadas próximas ou sob placas suportes ou chicanas;
- Inspeção por controle remoto, em geradores de vapor de centrais nucleares;
- Inspeção com a utilização de sondas rotativas e/ou do tipo “pancake” para detectar e avaliar discontinuidades em tubos, soldados em espelhos de caldeiras e trocadores de calor.

4.5 São limitações desse método de ensaio

- Esse método de ensaio só é aplicável a materiais eletricamente condutores.
- A profundidade de penetração das correntes parasitas restringe-se, na maioria das vezes, a menos que 6 mm.
- O sucesso do ensaio está diretamente relacionado à habilidade do sistema operador/equipamento em suprimir variáveis indesejáveis.
- O ensaio de materiais ferromagnéticos é muitas vezes difícil de executar.

5 ENSAIOS DE INSPEÇÃO VISUAL

O ensaio visual foi o primeiro método de ensaios não-destrutivos aplicado pelo homem. É certamente o ensaio mais usado de todos, em todos os ramos da Engenharia, por este motivo, pode-se imaginar que seja o ensaio mais simples de todos; entretanto, na moderna época em que vivemos, ensaio ainda é fundamental.

Todos os modernos métodos de ensaios não-destrutivos, não fizeram do ensaio visual um ensaio obsoleto, por muitos anos ainda será utilizado. O ensaio visual é simples de ser aplicado, fácil de ser aprendido e, quando sua aplicação é bem projetada, ele é um dos mais econômicos. Entretanto, insistimos que um método de ensaio não-destrutivo não é concorrente de outro; logo, o ensaio visual tem uma enorme área de aplicação, porém, jamais poderemos usar apenas o ensaio visual em inspeções de peças de responsabilidade.

O ensaio visual é necessário mas não suficiente, como qualquer outro método. Pela sua simplicidade, ele nunca poderá deixar de ser aplicado à inspeção. A inspeção visual tem grande importância na condução de outros ensaios, como por exemplo, nas radiografias das soldas de estruturas, de componentes e órgãos de máquinas. Cada tipo de inspeção visual necessita de um profissional com conhecimentos práticos, treinado e qualificado através de provas. O ensaio visual é executado por uma série de inspeções visuais sobre as superfícies dos objetos avaliados. Dessas inspeções visuais é gerado um laudo sobre a aparência da superfície, formatos, dimensões e descontinuidades grosseiras sobre as mesmas.

5.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS

5.1.1 VANTAGENS

- Pode ser executado em equipamentos em operação.
- É o exame não-destrutivo de mais baixo custo.
- Permite detectar e eliminar possíveis descontinuidades antes de se iniciar ou completar a soldagem de uma junta.
- Exame visual detecta as descontinuidades maiores e geralmente indica pontos de prováveis descontinuidades, que devem ser examinados por outras técnicas de exame.
- Um exame visual bem executado proporciona uma diminuição da quantidade de reparos de solda, uma maior produção dos outros exames não-destrutivos, diminuindo o custo da manutenção e da operação.

5.1.2 DESVANTAGEM

- Depende grandemente da experiência e conhecimento por parte do executor, e este deve estar familiarizado com o projeto e mecanismos de avarias.
- É limitado a detecção de defeitos superficiais.

5.2 OLHO HUMANO

O olho humano é conhecido como um órgão pouco preciso. A visão é qualquer coisa variável em cada um de nós e muito mais variável quando se comparam observações visuais de um grupo de pessoas.

Como sabemos, a visão humana, adulta, normal, envolve a percepção de luz visível, das cores, profundidade e distância. Sabemos também que existem ilusões de ótica. Quando se observa uma descontinuidade na superfície de um objeto, ela nos parece maior, quando olhada de perto, e menor se olhada de longe. A formação da imagem de um objeto no olho envolve sempre o ângulo visual, que cresce quando aproximamos o olho do objeto.

Para o exame minucioso da superfície dos metais, aproxima-se quanto se pode o olho da superfície metálica, Com esta providência, estamos aumentando o angulo visual. Entretanto, a aproximação do olho normal à superfície do metal não pode ser em geral menor que 25 centímetros, quando termina a acomodação. Se, entretanto, se colocar na frente do olho uma lente convergente, o ângulo visual aumenta por razões bem conhecidas na ótica geométrica.

5.3 FATORES IMPORTANTES

Alguns cuidados devem ser observados antes de iniciar a inspeção visual, tais como:

- Limpeza da superfície

- Acabamento da superfície
- Nível de iluminação da superfície
- Maneira de iluminar a superfície
- Contraste entre a descontinuidade e o resto da superfície.

5.4 TÉCNICAS DE ENSAIO VISUAL

5.4.1 TRADICIONAL

Em todos os casos onde a superfície a ser ensaiada for de fácil acesso, o ensaio é realizado a olho nu, com ou sem o auxílio de lente de aumento, ou, até mesmo de uma câmara de vídeo. A realização das sofisticadas técnicas de processamento de imagem é possível através do uso de sistemas de vídeo.

As superfícies sem acesso podem ser inspecionadas visualmente usando-se endoscópios com fibras óticas rígidas ou flexíveis, que permitem o acesso a complexas áreas internas. Os endoscópios mais modernos utilizam câmaras de vídeo de 6 a 8mm de diâmetro, guiadas para dentro da cavidade a ser examinada.



Figura 9 Método de ensaio visual tradicional

5.4.2 AVANÇADAS

Basicamente existem duas técnicas avançadas: exposição dupla e interferometria holográfica em tempo real. A técnica da exposição dupla consiste em se obter duas exposições sucessivas da peça sob diferentes condições de tensões, na mesma placa holográfica. Quando a imagem é reconstituída iluminando-se a placa com raios-laser, as duas imagens virtuais interferem entre si dando origem a padrões claros e escuros que representam os pontos que sofreram as mesmas alterações. Através desta técnica os pontos de interferência são "congelados" pelo holograma podendo ser reconstituídos pelo computador a qualquer instante. A técnica do tempo real é conseguida fazendo-se a interferência da imagem holográfica com a da peça ainda sob tensão mecânica. Esta técnica permite o desenvolvimento dos padrões de interferência que podem ser monitorados em tempo real. O grau de micro movimentos pode ser avaliado contando-se a quantidade de linhas de interferência do holograma.

5.5LIMITAÇÕES DO ENSAIO

- Executando-se os métodos holográficos, os quais ainda não são muito comuns, teremos como principal limitação do ensaio visual a possibilidade de se detectar somente descontinuidades superficiais, assim como o subjetivismo na interpretação dos sinais.
- Todas as técnicas que fizerem uso da luz incidindo em ângulo muito pequeno para a detecção de descontinuidades através da difusão, são inúteis em superfícies espelhadas.
- Ensaio de grandes componentes envolve o problema do arranjo do equipamento de interferometria, em virtude da necessidade de iluminação em áreas extensas e a possibilidade de distúrbios provocados por pequenos movimentos.

5.6 APRESENTAÇÃO DE DESCONTINUIDADES

Nos métodos tradicionais as descontinuidades são simplesmente observadas tal como elas aparecem na superfície examinada, ou ligeiramente ampliada.

Nas técnicas mais avançadas, tal como interferometria holográfica, a imagem da descontinuidade é processada pelo computador e é reconstituída num monitor na forma de padrões de interferência



Figura 10 Descontinuidade detectada por ensaio visual em cordão de solda

6 Ensaio por Partículas Magnéticas

Este ensaio é utilizado para detectar descontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos fundidos, forjados, soldados, laminados, extrudados, trefilados, usinados e etc.. Aplicado durante a fabricação, após a fabricação e na manutenção para a detecção de descontinuidades em serviço.

A peça é magnetizada utilizando uma corrente elétrica que cria ou induz um campo magnético. Se uma descontinuidade estiver no sentido perpendicular ao campo magnético, desviará este campo, que saltará para fora da peça, criando o que chamamos de campo de fuga. Este campo de fuga formará um dipolo magnético, pólo Norte e pólo Sul.

Quando as partículas magnéticas são aplicadas sobre a peça, os pólos irão atraí-las e uma indicação desta descontinuidade é formada na superfície.

Para que as descontinuidades sejam detectadas é importante que elas estejam de tal forma que sejam "interceptadas" ou "cruzadas" pelas linhas do fluxo magnético induzido, conseqüentemente, a peça deverá ser magnetizada em pelo menos duas direções defasadas de 90°.

Este ensaio consiste em etapas básicas:

- Estudar os documentos aplicáveis;
- Efetuar uma pré-limpeza;
- Estabelecer na peça um campo magnético adequado;
- Aplicar as partículas magnéticas na superfície da peça;
- Examinar e analisar os acúmulos de partículas na superfície da peça;
- Desmagnetizar, limpar, proteger e identificar a peça.

6.1 As principais vantagens da inspeção com partículas magnéticas são:

- É capaz de detectar descontinuidades superficiais e sub-superficiais;
- Sua realização é relativamente simples e rápida;
- A preparação das peças para o ensaio é simples, não havendo necessidade das possíveis descontinuidades estarem necessariamente abertas à superfície, como no ensaio com líquidos penetrantes;
- O tamanho e a forma da peça inspecionada têm pouca ou nenhuma influência no resultado.

6.2 Limitações do ensaio

- Aplicável apenas para detectar discontinuidades superficiais e sub-superficiais (próximas da superfície), em peças e materiais ferromagnéticos.
- A forma e a orientação das discontinuidades em relação ao campo magnético interferem fortemente no resultado do ensaio, sendo necessário, em muitos casos, a realização de mais de um ensaio na mesma peça;
- Muitas vezes é necessária a desmagnetização da peça após a inspeção;
- Em geral são necessárias correntes elétricas elevadas, que podem causar o aquecimento indesejado das partes examinadas.

6.3 Preparação da superfície

Consideremos aqui a preparação da superfície ou limpeza, como sendo a remoção de camadas mais densas ou mais espessas de óxido, tintas, produtos de queima de óleos combustíveis ou qualquer lubrificante, carepas de laminação soltas ou aderentes, escória ou respingos de solda, rebarbas, camadas de tinta, cromo, níquel ou outros tipos de contaminantes que possam interferir no ensaio. Tais contaminantes não devem ser removidos pelos executantes do ensaio pois, geralmente exige-se para tais remoções, conhecimento e técnicas específicas, tais como a aplicação de substâncias ácidas e alcalinas ou algum processo mecânico específico.

Todo produto utilizado para a limpeza deve ser testado para verificar se há a possibilidade de causar algum dano à superfície. Deve-se aí, controlar o tempo de exposição da superfície da peça aos produtos aplicados.

Métodos ou produtos impróprios podem causar danos irreversíveis à superfície em ensaio, como por exemplo, a corrosão. Por esse motivo, o método de limpeza deverá ser criteriosamente especificado. Toda camada isolante deve ser removida das regiões de contato elétrico.

6.4 Remoção de oxidação e carepas ou carbonização

Para a remoção de espessas camadas de óxido, se faz necessária a aplicação de soluções ácidas ou alcalinas para fazer o que geralmente é conhecido como decapagem. Cuidado deve ser tomado para que os produtos usados não venham a corroer demasiadamente o material. Deve-se neutralizar a ação do decapante com outra solução inibidora e logo em seguida, lavar com água em abundância.

6.5 Remoção de tintas

Existem no mercado vários tipos de removedores de tinta, porém deve-se consultar o manual do fabricante da peça em ensaio para verificar se é permitida a utilização de qualquer removedor ou se existe uma linha mais adequada e menos nociva à superfície. O tempo que a peça fica em contato com o removedor, deve ser monitorado pois, os removedores podem iniciar um processo de oxidação.

6.6 Limpeza da peça - pré-limpeza.

Esta etapa é de responsabilidade do operador, que deverá remover qualquer resíduo proveniente da preparação da superfície. Deve-se remover todo material estranho, contaminantes ou sujeira (óleo, graxa, corrosão, poeira, água e etc.), pois, interferem na formação das descontinuidade, dificultando ou impedindo a mobilidade das partículas ou encobrendo um possível campo de fuga. Após a pré-limpeza, a peça deve ficar limpa e seca.

6.6.1 Principais Processos de Pré-Limpeza

- Limpeza por vapor desengraxante;
- Limpeza por vapor d'água;
- Limpeza por detergentes;
- Limpeza por solventes e removedores.

6.7 Proteção e Isolamento de Regiões

Quando uma peça a ser ensaiada possuir furos, pequenas aberturas, passagens para galerias ou componentes metálicos ou não que possam reter ou serem contaminados com os produtos e resíduos provenientes do ensaio, essas regiões devem ser mascaradas ou obstruídas com material não abrasivo e que possa ser removido sem exigir trabalho mecânico. O material da máscara não deverá contaminar o banho.

6.8 Materiais influenciáveis pelo campo magnético

Os materiais podem ser divididos em três grandes grupos, segundo a influência que venham a sofrer em função do campo magnético:

6.8.1 Materiais ferromagnéticos:

Em elementos como o Ferro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Gadolínio (Gd), e em certas ligas destes, ocorre um fenômeno denominado ferromagnetismo, que os possibilita

adquirir um alto grau de alinhamento magnético de tal modo que venham ser fortemente atraídas por ímãs. Nesses elementos a permeabilidade magnética é maior do que 1 (um).

6.8.2 Materiais paramagnéticos:

Quando colocadas num campo magnético, o alinhamento dos dipolos atômicos elementares não é perfeito, ocasionando uma fraca atração pelos ímãs. Normalmente a permeabilidade magnética relativa de tais metais é praticamente igual a 1 (um).

6.8.3 Materiais diamagnéticos:

São os materiais cuja permeabilidade relativa é pouco menor que 1 (um); são levemente repelidos por uma força magnetizante, ou por um ímã. Como exemplo, tem-se o Zinco (Zn), Mercúrio (Hg), Bismuto (Bi) e o Cobre (Cu), em que a permeabilidade relativa é pouco menor que 1 (um).

6.9 Campo magnético e descontinuidade

Existindo um campo de fuga, as linhas de fluxo atraem as partículas magnéticas para que elas funcionem como uma ponte para as linhas de fluxo do campo magnético. No caso de um campo magnético circular criado ou induzido numa peça tubular, teremos um campo contido, sem a possibilidade da formação dos pólos magnéticos N e S.

Se interrompermos esse campo circular promovendo um corte, possibilitaremos a formação dos pólos magnéticos no campo de fuga das linhas de força. Para melhor

sensibilidade do ensaio por partículas magnéticas, a descontinuidade deve estar orientada a 90° em relação à direção do campo magnético.

6.10 Campo de fuga

Originam-se quando as linhas de força do campo magnético são perturbadas por uma descontinuidade (trinca). Quando aplicamos as Partículas Magnéticas elas se acumulam em torno do campo de fuga, ou seja, se acumulam para facilitar a passagem do campo magnético e compensar o vazio existente, devido à falta de continuidade mecânica do material. Podemos dizer que o ensaio por Partículas Magnéticas é um ensaio detector de campos de fuga, assim toda descontinuidade como trincas, escórias, falta de fusão, porosidade, inclusões, e etc., possuem características bem diferentes do metal base, o que atribui ao ensaio grande sensibilidade de detecção. Para podermos detectar com precisão um campo de fuga, ele deve estar o mais perpendicular possível ao plano formado pela força magnetizante.

6.11 Tipos de correntes de magnetização

- Corrente alternada (monofásica);
- Corrente contínua;
- Corrente retificada de meia onda (monofásica);
- Corrente retificada de onda completa (monofásica);
- Corrente retificada de onda completa (trifásica).

6.12 Técnicas de Magnetização

6.12.1 Magnetização circular máquina estacionária

Consiste em posicionar a peça entre contatos elétricos, feitos nas extremidades da peça em ensaio através de placas, malhas de cobre ou placas de chumbo, possibilitando um bom contato. A corrente passa pela peça criando um campo magnético circular, que irá detectar as descontinuidades longitudinais.

6.12.2 Magnetização circular com condutor central

Consiste em introduzir uma barra de material condutor (cobre), no interior de peças (tubos, anéis, porcas arruelas, furos e etc.), e fazer passar uma corrente elétrica por este material, gerando um campo magnético circular ao redor deste, que será induzido na peça magnetizando-a.

6.12.3 Magnetização circular com Prods

Prods são dispositivos usados aos pares, são compostos por manoplas isoladas e os contatos elétricos são feitos de barras cilíndricas de cobre. Em um dos prod, é mantido o interruptor de acionamento da corrente elétrica, que será ativado somente quando os dois contatos estiverem devidamente posicionados na superfície a ser ensaiada. Estando os contatos devidamente posicionados, aplica-se a corrente que irá fluir entre os contatos e a região da peça que estiver entre eles. Isso produzirá um campo magnético circular em torno dos contatos e nas regiões da peça ao redor dos pontos de contato.

Os prods são geralmente usados para ensaios de chapas, juntas soldadas e peças de grande porte, onde não é possível o posicionamento entre garras. Geralmente após a utilização de prods, deve-se fazer um ensaio por líquido penetrante na peça, nas regiões de contato.

6.12.4 Magnetização circular com grampos

Esta técnica consiste na utilização de grampos nas extremidades de cabos energizados. Podem-se utilizar os contatos das garras de uma máquina estacionária ou o sistema utilizado com os prods. É ideal para peças de grande porte que não podem ser ensaiadas em equipamentos estacionários, nem possibilitam contato com prods, utilizam-se grampos de fixação que são posicionados nas extremidades ou em pontos específicos.

6.12.5 Magnetização longitudinal

A corrente elétrica também é usada para criar um campo magnético longitudinal. Neste caso a corrente não passa diretamente pela peça. A corrente circula pelas espiras de uma bobina, produzindo um campo circular ao redor de cada espira que somado, irá induzir um campo longitudinal na peça posicionada em seu interior, polarizando suas extremidades, sendo uma Norte e outra Sul. O campo longitudinal detecta as discontinuidades no sentido transversal.

6.12.6 Magnetização longitudinal com bobinas

Quando uma peça ferromagnética é colocada dentro de uma bobina, as linhas de força do campo gerado penetram na peça, induzindo nela um campo longitudinal paralelo ao eixo longitudinal

6.12.7 Magnetização longitudinal com Yoke

O yoke é um gerador de campo magnético, o qual consiste de uma barra de aço de altíssima permeabilidade, em forma de “U” onde é enrolado um cabo condutor (bobina), que irá gerar um campo magnético longitudinal na barra que é conectada em pernas fixas ou articuláveis, que quando devidamente em contato com uma peça ferromagnética, induzirá a esta um campo magnético longitudinal. Recebe uma carcaça protetora que poderá ser de metal ou de plástico de alta resistência, deixando as pernas expostas.

Esta técnica é amplamente utilizada para ensaios em campo, em juntas soldadas, chapas, chanfros, peças pequenas, regiões específicas em componentes montados e etc..

As dimensões dos contatos devem ser suficientes para garantir um perfeito contato com a peça a ser ensaiada.

6.13 Partículas Magnéticas

As partículas são feitas de material ferromagnético. Geralmente utiliza-se uma combinação de ferro e óxido de ferro, tendo alta permeabilidade e baixa retentividade.

Tendo alta permeabilidade magnética, são facilmente atraídas pelo campo de fuga gerado pela descontinuidade. A baixa retentividade é requerida para evitar que fiquem magnetizadas.

6.14 Tipos de Partículas Magnéticas

6.14.1 Partículas Visíveis

São Partículas visíveis a olho nu, essas partículas podem ter cores variadas como: vermelha, marrom, amarela, branca, preta, etc.



Figura 11 Exemplos de partículas visíveis

6.14.2 Partículas Fluorescentes

São Partículas visíveis à luz negra, elas são recobertas com uma fina película de corante fluorescente e exibem acentuada fluorescência sob ação de luz negra que tem comprimento de onda de aprox. 360nm.

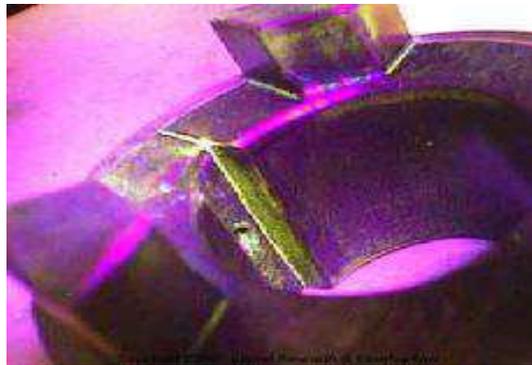


Figura 12 Ensaio com partículas fluorescentes

6.15 Formas de aplicação

A forma de aplicação das partículas magnéticas interfere diretamente na mobilidade das mesmas devido à maior ou menor facilidade que elas encontram de se deslocar até um campo de fuga. Existem dois tipos de forma de aplicação que se resumem basicamente em:

- Via seca: As partículas via seca se apresentam em pó tendo como veículo o ar. Esse tipo de partícula é aplicado nas peças com bulbos de borracha, embalagens plásticas ou pulverizadores de ar comprimido à baixa pressão.



Figura 13 Aplicação em via seca



Figura 14 Ensaio por via seca

Vantagens da via seca: ótimo processo para detecção de descontinuidades superficiais e sub-superficiais de porte médio ou grande e indicada para superfícies com temperaturas de até 300° C.

Desvantagens da Via Seca: apresenta baixa capacidade de detecção para descontinuidades muito finas ou rasas.

- Via Úmida: As partículas via úmida se apresentam em uma suspensão líquida, o que aumenta sensivelmente a sua mobilidade à medida que diminui a viscosidade do líquido utilizado como veículo, essa solução é chamada de banho.



Figura 15 Ensaio por via úmida

Vantagens da via úmida: maior sensibilidade para detecção de pequenas descontinuidades; aplicação rápida para ensaio em pequenas peças em grande quantidade e reaproveitamento contínuo do banho.

Desvantagens da via úmida: limita-se a superfícies com temperaturas até 60° C e pouco visível para detecção de descontinuidades sub-superficiais.

6.16 Métodos de Ensaio

6.16.1 Método contínuo

É mais rápido e eficiente que o residual e não se limita às descontinuidades superficiais. Consiste em aplicar as partículas tanto pela técnica seca como pela técnica úmida durante a magnetização, ou seja, durante o período em que a força magnetizante está sendo aplicada.

6.16.2 Método residual

Consiste em aplicar as partículas magnéticas após a força de magnetização ter sido removida. Para casos especiais o método residual será aplicado, mas somente tendo em mãos uma técnica devidamente elaborada e aprovada. Existem casos em que fabricantes de aeronaves recomendam o método residual, mas a técnica detalhada deverá ser encontrada no manual ou boletim.

6.17 Inspeção

Estando a peça magnetizada e as partículas aplicadas, a peça estará pronta para ser inspecionada sob luz negra. Deve se incidir o fecho de luz diretamente na peça e observar atentamente a área a ser inspecionada. Havendo descontinuidades, elas serão denunciadas pelo fenômeno da fluorescência ou pelas indicações características da cor das partículas visíveis.

O operador deve deixar que seus olhos acostumem-se com a cabine escura e com a luz negra acesa, por um período mínimo de 1 (um) minuto antes de iniciar a inspeção. O tempo de permanência do operador dentro da cabine deve ser de no máximo 2 (duas) horas, necessitando após este período, de um intervalo de 15 (quinze) minutos para evitar a fadiga visual. A intensidade mínima da luz negra é de 1.000 m w/cm^2

Quando for utilizado material fluorescente, o inspetor não deve usar óculos com lentes fotocromáticas ou de lentes escuras, porém o operador deverá utilizar um protetor ocular desde que permitido pelo documento específico do ensaio (manual do fabricante, norma técnica ou contrato entre as partes envolvidas). A lâmpada de luz negra deve estar instalada de maneira que seu foco não incida diretamente nos olhos do operador.

6.18 Descontinuidades

As descontinuidades podem surgir durante a fabricação da peça, isso dependerá do processo, podem ser: bolhas de gás, porosidade, inclusão, contração, dobras, costura, delaminação, trincas e etc. A descontinuidade mais encontrada nas peças em serviço é a trinca por fadiga, geralmente muito fina e pequena, requer técnica, conhecimento, qualificação e bons equipamentos e materiais.

6.19 Interpretação e avaliação dos resultados do ensaio

O ensaio por Partículas Magnéticas exige a correta aplicação das técnicas de ensaio e um grande conhecimento e prática para a interpretação e avaliação das indicações,

conhecimento prévio sobre os documentos aplicáveis ao ensaio, o tipo de material, o processo de fabricação da peça e uma grande dose de bom senso, somando tudo isso à qualificação nível I para o operador e nível II para o inspetor.

6.20 Desmagnetização e limpeza final

Todas as peças devem ser desmagnetizadas independente de serem aprovadas ou não. A necessidade de desmagnetização é explicada pelos seguintes fatores:

- O campo residual pode atrair e reter limalhas que podem, em uma operação de usinagem posterior, prejudicar o acabamento da peça;
- Peças que trabalham em rotação, como rolamentos, o campo residual pode atrair partículas ou resíduos metálicos, que irão apressar o desgaste das mesmas;
- Os campos de fuga presentes em peças a serem utilizadas perto de equipamentos sofisticados, podem interferir no bom funcionamento destes;
- A presença de campos residuais pode dificultar a remoção das partículas na operação de limpeza.

6.21 INDICADOR DE CAMPO MAGNÉTICO

Serve para verificar se existe campo magnético residual ou remanente na peça. O valor desse magnetismo não deve exceder 3 Gauss em qualquer parte da superfície do material.



Figura 16 Indicador de campo magnético

O emprego do indicador é válido também para peças que foram rejeitadas, pois vale salientar que toda peça seja ela aprovada ou rejeitada tem que ser desmagnetizada.

6.22 Limpeza final

Após a desmagnetização, deve-se realizar a limpeza final, para eliminar os resíduos provenientes do ensaio. Após a limpeza final, se a peça for para o estoque ou se for passível de corrosão, deve ser aplicada uma camada de óleo protetor.

7 ENSAIO RADIOGRÁFICO

O método está baseado na variação da atenuação da radiação eletromagnética (Raios X ou Gama), causada pela presença de discontinuidades durante a passagem da radiação pela peça, sendo a imagem registrada em um filme radiográfico ou em um sistema de radioscopia, tipo intensificador e integrador de imagem que mostra o resultado em um monitor de TV.

Para a realização deste ensaio necessita-se de uma fonte de radiação, que pode ser natural ou artificial, de um objeto (peça) e um meio de registro, no caso o filme radiográfico. Chamaremos de radiografia o resultado da exposição de um filme utilizando raios-X e gamagrafia o resultado da utilização de raios gama.

7.1 Filme

O filme radiográfico consiste de uma fina chapa de plástico transparente, revestida de um ou ambos os lados com uma emulsão de gelatina, de aproximadamente 0,03 mm de espessura, contendo finos grãos de brometo de prata. Quando expostos aos raios-X, raios- γ ou luz visível, os cristais de brometo de prata sofrem uma reação que os tornam mais sensíveis ao processo químico (revelação), que os converte em depósitos negros de prata metálica. Em resumo, a exposição à radiação cria uma imagem latente no filme, e a revelação torna a imagem visível. Quando o Inspetor interpreta uma radiografia, ele está vendo os detalhes da imagem da peça em termos da quantidade de luz que passa através do filme revelado. Áreas de alta densidade (expostas a grandes quantidades de radiação) aparecem cinza escuro; áreas de baixa densidade (áreas expostas a menos radiação) aparecem cinza claro. A densidade é o grau de enegrecimento do filme. A densidade é medida por meio de densitômetros de fita ou densitômetros eletrônico. A medição da densidade é feita no negatoscópio, que é o aparelho que é usado para a interpretação de radiografias. É uma caixa contendo lâmpadas, com luminosidade variável e um suporte de plástico ou vidro leitoso onde o filme é colocado.

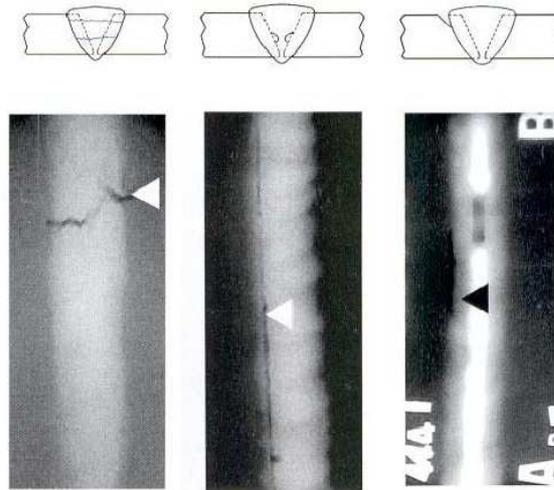


Figura 17 Exemplos de filmes radiográficos

Principais características dos filmes radiográficos:

- Densidade radiográfica: é o grau de enegrecimento registrado no filme em função da exposição;
- Contraste de imagem: é dada pela diferença de densidade entre as regiões do filme;
- Velocidade: é a taxa em que ocorre a sensibilização dos grãos dos sais de prata;
- Granulometria: é o tamanho dos grãos dos sais de prata da emulsão, grãos menores significam mais nitidez.

7.2 Telas intensificadoras de imagem (ecrans/screens)

São utilizadas em contato direto com o filme. Têm como objetivos, intensificar a imagem e proteger o filme contra a radiação espalhada, retroespalhada e de fundo. Existem dois tipos de telas intensificadoras: as fluorescentes e as de chumbo.

- **Telas intensificadoras fluorescentes:** São feitas de cristais de tungstato de cálcio ou outros cristais de sais químicos que tornam-se fluorescentes (emitem luz visível),

quando bombardeados pelos raios-X. Esses materiais têm a habilidade para converter a radiação em fótons eletromagnéticos de luz visível, no espectro ultravioleta.

- **Telas intensificadoras de chumbo:** Estas telas de chumbo e óxido de chumbo são muito utilizadas em radiografia industrial. Quando usadas adequadamente melhoram o contraste da imagem e a sensibilidade final da radiografia. Os ecrans (telas intensificadoras), consistem de uma folha muito fina de uma liga de chumbo (94% de chumbo e 6% de antimônio), depositada sobre uma base de papel grosso ou plástico. É a folha de chumbo que ficará em contato com o filme, nunca o papel.

7.3 Indicadores de Qualidade de Imagem (PENETRÂMETROS)

O penetrâmetro é um dispositivo, cuja imagem na radiografia é usada para determinar o nível de qualidade radiográfica (sensibilidade). Não é usado para julgar o tamanho das discontinuidades ou estabelecer limites de aceitação das mesmas. O penetrâmetro padrão adotado pelo código ASME (American Society of Mechanical Engineers) é um prisma retangular de metal com três furos de determinados diâmetros, e a sensibilidade radiográfica é definida em função do menor furo visível na radiografia. O penetrômetro padrão adotado pela norma DIN (Deutsche Industrie Normen) é composto de uma série de sete arames de metal e de diâmetros padronizados. A sensibilidade radiográfica é definida em função do menor arame visível na radiografia. Os penetrômetros devem sempre ser de material idêntico ou radiograficamente similar ao material radiografado.

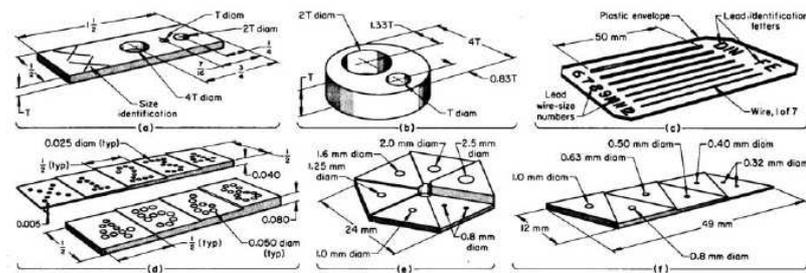


Figura 18 Imagem de um penetrômetro

7.4 Raios-X

São produzidos eletricamente e são formados pela interação de elétrons de alta velocidade com a matéria. Quando elétrons de suficiente energia colidem com elétrons de um átomo, pode ser gerado um raio-X característico. Cada elemento quando atingido por elétrons em alta velocidade emite o seu raio-X característico.

Quando elétrons de suficiente energia colidem com o núcleo de átomos são gerados raios-X contínuos, que são assim chamados porque o seu espectro de energia é contínuo. As condições necessárias para a geração de raios-X são:

- fonte de elétrons;
- alvo para ser atingido pelos elétrons (foco);
- acelerador de elétrons na direção desejada.

7.5 Geradores de radiação X

Os geradores de radiação X são aparelhos com dispositivos elétricos e eletrônicos fabricados pelo homem, portanto não constituem uma fonte natural de radiação. Muitos tipos de geradores de raios-x são encontrados no mercado. Podem ser portáteis ou estacionários e variam muito em termos de características de ajustes e potência.

7.6 Componentes e propriedades de um tubo de raios-X

A ampola de raios-X, também chamado de Tubo de Coolidge, tem em seu interior, o ânodo (terminal positivo) e o cátodo (terminal negativo) sob vácuo. Geralmente o tubo de raios-X é uma ampola de vidro de alta resistência ao calor.

O vácuo reduz o problema da colisão dos elétrons com moléculas de ar, absorvendo-os e fazendo uma isolação entre o ânodo e o cátodo.

- **Cátodo:** A estrutura conhecida como cátodo serve como fonte de elétrons. Consiste de um filamento ou bobina de liga de tungstênio que emite elétrons quando aquecidos a uma temperatura muito elevada.
- **Ânodo:** O material do alvo geralmente é de tungstênio. A escolha deste material deve-se à ao seu alto número atômico e outras características.
- **Ponto focal:** O ponto focal é a área do alvo bombardeada pelos elétrons, tem grande importância na qualidade da imagem obtida em uma radiografia. Quanto menor o ponto focal, melhor serão os detalhes da imagem. O ponto focal é a área do alvo bombardeada pelos elétrons.

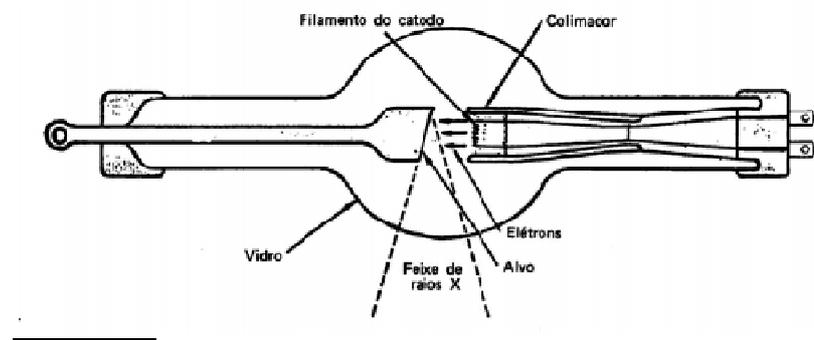


Figura 18 Tubo de raio X

7.6.1 Sistema de refrigeração

Como a produção de raios-X gera altas temperaturas dentro do tubo, necessita-se de técnicas eficazes para a remoção de calor. Alguns aparelhos contam com um radiador de óleo que circular nas proximidades do ânodo, promovendo a troca de calor. Esse óleo que circula, retorna ao radiador, onde é refrigerado por água, de um outro radiador que envolve o circuito de óleo.

Outros aparelhos contam com a dissipação de calor utilizando membranas de radiador térmico, contando com a dissipação de calor pelo cobre que envolve o alvo e externamente ao tubo os dissipadores secos. O sistema de refrigeração dependerá da capacidade e a portabilidade do aparelho. A troca de calor é fundamental para o bom funcionamento do tubo, é uma parte que merece constante atenção.

7.6.2 Unidade de Comando

Em geral esta unidade é manipulada à distância do local de radiografia. A unidade de comando controla a corrente de filamento (em miliamper), controla a voltagem aplicada no tubo (em kilovolts) e o tempo de exposição a irradiação.

7.7 Princípios geométricos da exposição / fatores que afetam a qualidade da imagem

7.7.1 Lei do quadrado da distância

Quando o tubo de raios-X ou uma fonte de raios gama são mantidos constantes, a intensidade da radiação que passa por uma peça é governada pela distância entre a fonte e a peça, variando com o quadrado da distância. Assim como um feixe de luz diverge de um ponto de emissão, aumentando a área iluminada conforme a distância aumenta. No ensaio radiográfico, quando afastamos a peça do ânodo (RX) o feixe irá cobrir uma área maior porém com menor intensidade.

7.7.2 Penumbra geométrica

No caso de fonte de radiação em um tubo de raios-X não ser pontual, existe o efeito da penumbra geométrica, que é uma sombra na borda da imagem-peça ou nas regiões de mudança de geometria.

Este efeito irá diminuir quando a distância foco-filme for aumentada e a distância peça-filme for diminuída. Quanto mais perto a peça estiver do filme, melhor.

7.8 Variáveis que afetam a quantidade de raio X emitido

- Intensidade da corrente: quanto maior a corrente, maior a quantidade de elétrons emitidos, medido em miliamper.
- Diferença de potencial: quanto maior a diferença de potencial entre o anodo e o catodo, maior será a aceleração dos elétrons, causando maior impacto no anodo e gerando raio X de maior energia e menos comprimento de onda e, conseqüentemente, maior poder de penetração.

7.9 Determinação do tempo de exposição

A exposição é a quantidade de radiação recebida pelo filme. São usadas tabelas e curvas de exposição fornecidas pelo fabricante.

7.10 Preparação do ensaio por raio X

Deve-se escolher o tipo de filme de acordo com o tempo de exposição. Com o auxílio de tabelas podemos escolher o tipo de filme baseado na espessura da peça a ser ensaiada e da voltagem a ser aplicada no equipamento.

Feito isso, o operador deve montar o chassi blindado de modo a não receber luz. No chassi são colocados a etiqueta de identificação, o filme e o écran. Depois disso, deve-se

montar o sistema no bunker, deve-se colocar a peça e o chassi montado e regular a distancia correta entre a fonte e o filme. Deve-se colocar o IQI sobre a peça, fecha-se a porta do bunker e regular o painel de controles. Depois de ligar o dispositivo de segurança, liga-se a refrigeração do tubo de raio X e inicia o ensaio. Decorrido o tempo determinado, desliga-se a maquina e retira o chassi do bunker. Depois de revelada por processo químico, a chapa radiografada passa pela verificação de qualidade no negatoscópio.

7.11 Raios-gama

Os isótopos de alguns elementos tem seus núcleos em estado de desequilíbrio, devido ao excesso de neutrons, e tendem a evoluir espontaneamente para uma configuração mais estável, de menor energia. As transformações nucleares são sempre acompanhadas de uma emissão intensa de ondas eletromagnéticas chamadas raios- γ .

Os raios- γ são ondas eletromagnéticas de baixo comprimento de onda, e com as mesmas propriedades dos raios-X. Os isótopos radioativos o Cobalto 60 e o Irídio 192 são os mais utilizados na radiografia industrial. Por causa do perigo de radiação sempre presente, as fontes radioativas devem ser manejadas com muito cuidado e são necessários aparelhos que permitam guardá-las e transportá-las em condições de segurança total. Estes aparelhos consistem de uma blindagem ou carcaça protetora de chumbo, tungstênio ou urânio 238. Esta carcaça apresenta um furo axial no interior do qual existe um estojo metálico, chamado porta-isótopo, fixado a um comando mecânico flexível munido de um pequeno volante ou manivela para manobra a distância.

7.12 Decaimento radiativo.

Consiste na quantidade cada vez menor de átomos instáveis em um material radiativo, com o passar do tempo este material radiativo vai se tornando menos e menos radiativo. Isótopos diferentes têm diferentes valores de decaimento.

7.13 Sensibilidade dos isótopos (qualidade de imagem)

A definição radiográfica obtida com isótopos radiativos é menor quando comparada quando se utilizando os raios-X. A qualidade da imagem é mais baixa.

7.14 Câmara de isótopo ou irradiador gama

Consiste numa caixa blindada onde é recolhido o isótopo radiativo e os dispositivos que permitam a abertura da blindagem em uma distância segura para o operador.

Existem tipos diferentes de irradiadores, dos mais simples aos mais sofisticados. As câmeras mais simples são caixas com uma janela que é aberta a distância, neste caso a caixa toda é levada até as proximidades da peça a ser ensaiada, o feixe de radiação limita-se à janela. Outro tipo mais sofisticado permite que a fonte seja retirada do interior da blindagem, passando por mangueiras e conduzida até a área de interesse. Através de comandos, pode-se liberar uma pequena blindagem que envolve a fonte.



Figura 19 Irradiador gama

7.15 Composição do equipamento de ensaio por raios gama

O equipamento é composto por 3 elementos: blindagem, mangote e os comandos.

A blindagem serve para conter a radiação emitida continuamente pela fonte, mantendo a parte externa em padrões aceitáveis, segundo normas internacionais. Ela é fabricada em urânio exaurido, que é um átomo estável, ou chumbo. E a estrutura externa é em aço inoxidável.

O mangote é um tubo por onde será conduzida a fonte radioativa da blindagem até o ponto determinado para irradiação.

Os comandos permitem o acionamento e o controle da fonte. Através destes acionamentos, a fonte radioativa vai para fora da blindagem pelo mangote. Após o tempo de exposição, a fonte é recolhida à blindagem.

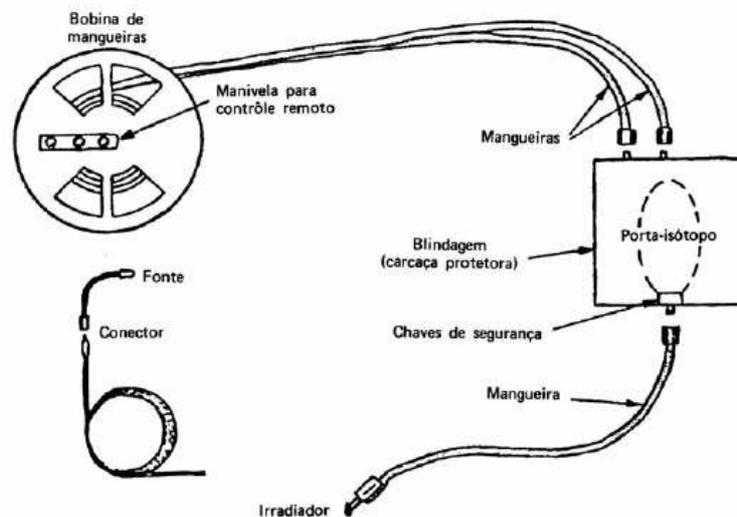


Figura 20 Equipamento de raio gama

7.16 Preparação do ensaio por raios gama

Deve-se determinar o tempo de exposição, que é determinado pelo gráfico específico para cada isótopo. O gráfico relaciona o fator de exposição com a espessura da peça e a densidade radiográfica requerida, fixando alguns parâmetros, como o tipo de filme, a tela intensificadora e as condições de revelação. Deve-se determinar a distância da fonte radioativa até a peça a ser ensaiada. Deve-se realizar o ensaio dentro de um bunker para evitar a contaminação por radiação, este local deve ser sinalizado alertando para o perigo da radiação.

Primeiro o operador deve montar o chassi, esta operação deve ser feita no escuro. Depois, tem que colocar a peça, o chassi montado, o IQI e o irradiador na posição correta. Do lado de fora do bunker, o operador aciona os comandos do equipamento para iniciar a exposição. Depois disso, recolhe a fonte e o irradiador. O filme é revelado e analisado no negatoscópio.

7.17 Comparação entre Raios-X e raios-gama

A diferença mais importante entre os raios-X e γ é o fato de se poder regular a tensão anódica e, por conseqüência, o poder de penetração dos raios-X, ao passo que não é possível de maneira alguma fazer variar o comprimento de onda dos raios- γ . Com os raios- γ , a única solução é mudar a fonte radioativa. Prefere-se o irídio para as menores espessuras (de 10 a 60 mm para aços); e o cobalto para as espessuras maiores (de 60 a 160 mm para aços). Do ponto de vista de qualidade, os raios-X são melhores que os raios- γ . Porém, existem, a favor dos raios- γ , diversas circunstâncias nas quais eles apresentam um interesse prático. Os raios- γ são emitidos espontaneamente, não necessitando de aparelhagem ou alimentação elétrica. Em locais onde não existe energia elétrica os raios- γ devem ser usados. Para espessuras muito altas (acima de 90 mm) o poder de penetração dos raios-X não é suficiente. As instalações para uso de raios- γ são bem mais baratas que as dos raios-X. Certos casos particulares apresentam problemas de acesso e o uso de raios- γ é o indicado. Para estes casos as fontes radioativas são mais maleáveis e tornam possíveis posicionamentos corretos. Uma grande vantagem dos raios- γ é a sua emissão esférica a partir da fonte, permitindo efetuar radiografias circunferenciais em uma única exposição (exposição panorâmica).

7.18 Visualização das descontinuidades

Uma descontinuidade em um material, como um vazio ou uma mudança de geometria, alteram a espessura do material e essa mudança causa diferenças no grau de

absorção da radiação, quando um feixe de radiação incide num material, parte é absorvida ou dispersada e uma parte é transmitida, a parte transmitida vai variar com as mudanças na espessura do material. A radiação transmitida é a parte do feixe utilizada para detectar as descontinuidades, uma descontinuidade, sendo uma inclusão ou um vazio, irá ocasionar uma diferença na intensidade da radiação transmitida.

O grau da diferença de transmissão varia de acordo com as diferenças entre o material e as descontinuidades existentes. Algumas descontinuidades não são facilmente detectáveis, seja pelo seu tamanho, orientação ou localização em relação ao feixe de radiação.

7.19 Proteção

As radiações ionizantes dos tipos X ou gama têm uma ação nociva sobre o organismo humano. Os efeitos dependem da quantidade de raios que o corpo recebe. Os sintomas que se observa, na ordem de doses crescentes são dores de cabeça, falta de apetite, diminuição dos glóbulos vermelhos no sangue, esterilidade, destruição de tecidos. Um excesso de radiação pode provocar a morte de uma pessoa.

Para se evitar qualquer problema, deve ser rigorosamente seguido o Plano de Proteção Radiológica previsto para cada caso, o qual prevê as áreas a serem isoladas e os controles a serem efetuados (contador Geiger, canetas dosimétricas, filmes dosimétricos, etc.). Desta maneira, os trabalhos podem ser desenvolvidos preservando-se a saúde dos que trabalham nos serviços de radiografia e nas imediações dos locais do exame.

7.20 Vantagens

- Registro permanente dos resultados;
- Detecta facilmente defeitos volumétricos, tais como porosidades, inclusões, falta de penetração, excesso de penetração.

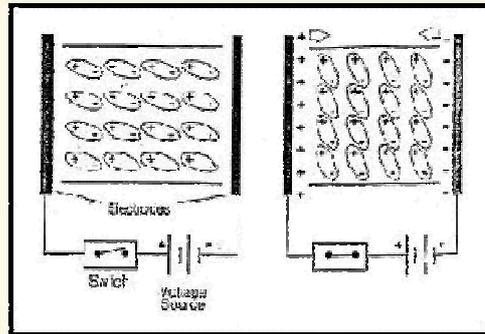
7.21 Limitações e Desvantagens

- Descontinuidades bi-dimensionais, tais como, trincas, duplas-laminações e faltas de fusão são detectadas somente se o plano delas estiver alinhado ou paralelo ao feixe de radiação;
- É necessário o acesso a ambas as superfícies de uma peça para radiografá-la;
- Dependendo da geometria da peça não é possível obter radiografias com qualidade aceitável, que permitam uma interpretação confiável;
- A radiografia afeta a saúde dos operadores, inspetores e do público e deve por isso, ser criteriosamente utilizada;
- É necessária a interrupção de trabalhos próximos para a exposição da fonte;
- O custo do equipamento e material de consumo são relativamente altos;
- É um ensaio relativamente demorado;
- No caso de raios-X, o aparelho não é totalmente portátil, dificultando a execução de radiografias em lugares de difícil acesso;
- A interpretação requer experiência e conhecimento dos processos de soldagem, para identificação correta das descontinuidades.

8 Ultra-som

São ondas sonoras com frequências situadas acima do limite audível para o ser humano (acima de 20 kHz). Para os propósitos de obtenção de imagens (ultra-sonografia), frequências entre 1 e 10 MHz são usadas. As ondas ultra-sônicas são geradas por transdutores construídos a partir de materiais piezoelétricos.

Efeito piezoelétrico



Piezoeletricidade:
Tensão alternada produz oscilações nas dimensões do cristal, devido ao re-alinhamento das moléculas polarizadas

Figura 21 Demonstração do efeito piezoelétrico

O ultra-som, em geral, se propaga através de líquidos, tecidos e sólidos. Apresenta velocidades de propagação compatíveis com diferentes meios, sendo essa característica inerente ao processo de interação das ondas ultra-sônicas (mecânicas) com o meio em particular:

<i>Velocidade de propagação</i>	<i>Metros/segundo</i>
Ar	330
Água	1480
Gordura	1460
Músculo	1620
Tecidos moles	1540
Fígado	1555
Sangue	1560
Osso	4080

Figura 22 Velocidade do som em diferentes meios de propagação

O ultra-som sofre reflexão e refração nas interfaces onde ocorre uma mudança na densidade.

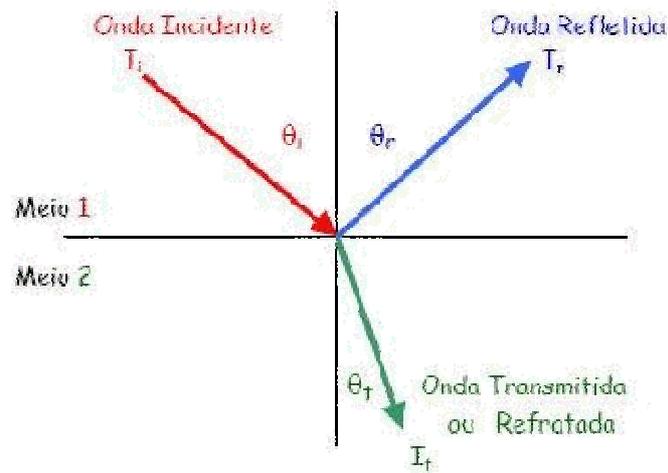


Figura 23 Demonstração da reflexão do som

O ultra-som ao se propagar em um meio e ao passar de um meio para outro, sempre sofre atenuação da intensidade do sinal, devido aos efeitos de absorção, reflexão e espalhamento.

8.1 Geração e detecção do ultra-som

As ondas ultra-sônicas são geradas por transdutores ultra-sônicos também chamados simplesmente de transdutores. De uma forma geral, um transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro. Os transdutores ultra-sônicos convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Esses transdutores são feitos de materiais piezoelétricos. Certos cristais naturais como o quartzo e a turmalina são piezoelétricos. Outros se tornam artificialmente como o sulfato de lítio, o titanato de bário e o titanato de zirconato de chumbo (PZT).

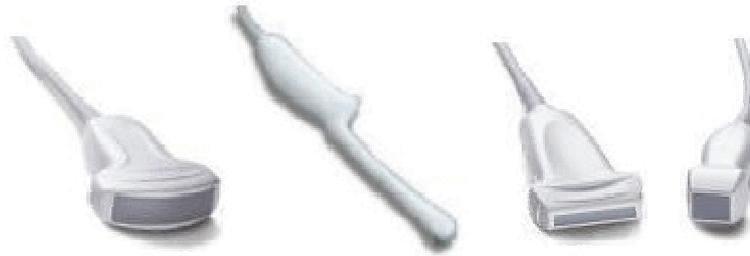


Figura 24 Transdutores

Cada transdutor possui uma frequência de ressonância natural, tal que quanto menor a espessura do cristal, maior será sua frequência de vibração.

O mesmo transdutor que emite o sinal ultra-sônico funciona como detector. Dependendo da aplicação, o elemento piezoelétrico é quem determina a frequência de operação do transdutor. Em geral os transdutores são acondicionados em um suporte plástico para lhes dar proteção mecânica e elétrica. Na superfície por onde emergem, as ondas ultra-sônicas tem uma camada especial para permitir o perfeito acoplamento acústico e também para dar proteção ao elemento piezoelétrico.

8.2 END por ultra-som

Assim como uma onda sonora reflete ao incidir numa anteparo, a onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico, refletirá da mesma forma ao incidir numa descontinuidade ou falha interna a este meio considerado. Através de aparelhos, detectamos as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades.

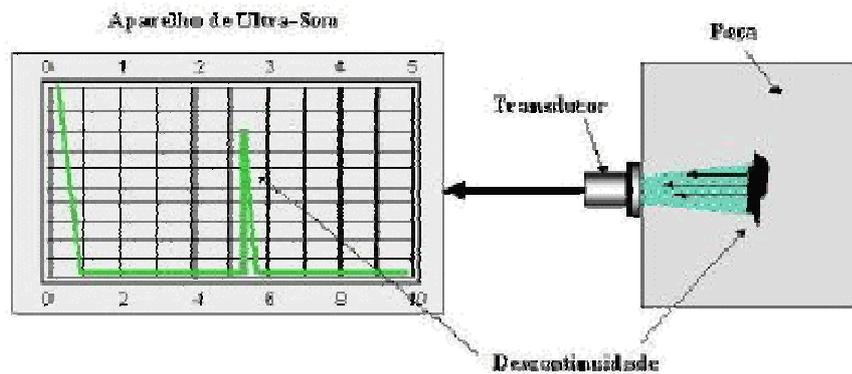


Figura 25 Detecção de descontinuidade

O ensaio por ultra-som caracteriza-se:

- Pela detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos;
- Por visar diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades.

8.3 Vantagens em relação a outros ensaios:

- A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultra-sônico;
- Alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas, como trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações ionizantes;
- Não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação.
- Maior penetração para detectar descontinuidades internas na peça;

8.4 Como desvantagens podemos citar:

- exigência de bons conhecimentos técnicos do operador;
- atenção durante todo o ensaio;
- obediência a padrões para calibração do equipamento;
- necessidade de aplicar substâncias que façam a ligação entre o equipamento de ensaio e a peça (acoplantes).

8.5 Campos de aplicação do END

- As áreas de caldeiraria e estruturas marítimas, constituindo ferramenta indispensável para garantia da qualidade em de peças de grandes espessuras e geometria complexa de juntas soldadas;
- 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.

8.6 Tipos de cristais para transdutores

Os cristais são montados sobre uma base de suporte (bloco amortecedor) e junto com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor. Existem quatro tipos usuais de transdutores:

- Reto ou normal;
- Angular;
- Duplo-cristal;

- Phased Array.

8.6.1 Transdutores normais ou retos - São cabeçotes monocristal geradores de ondas longitudinais perpendiculares a superfície de acoplamento. O transdutor emite um impulso ultra-sônico que atravessa o material a inspecionar e reflete nas interfaces, originando ecos. Estes ecos retornam ao transdutor e geram, no mesmo, o sinal elétrico correspondente.

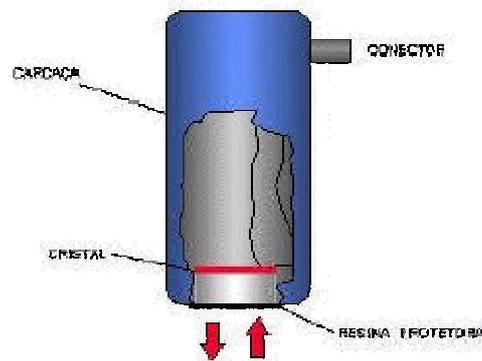


Figura 26 Transdutores normais ou retos

8.6.2 Transdutores angulares - A rigor, diferem dos transdutores retos ou normais pelo fato do cristal formar um determinado ângulo com a superfície do material.

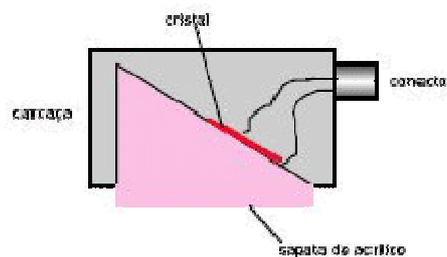


Figura 27 Transdutores angulares

8.6.3 Transdutores duplo-cristal - São utilizados quando se trata de inspecionar ou medir materiais de reduzida espessura, ou quando se deseja detectar discontinuidades logo abaixo da superfície do material. Neste caso o cristal piezelétrico recebe uma “resposta” num espaço de tempo curto após a emissão. Neste transdutor cada um dos cristais funciona somente como emissor ou somente como receptor, separados por um material acústico isolante possibilitando uma resposta clara.

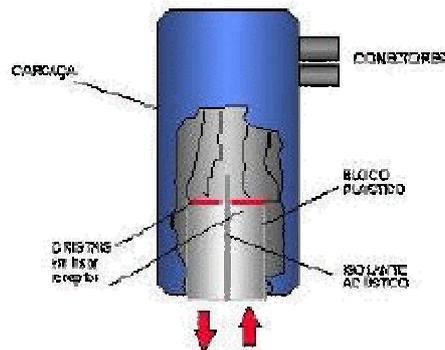


Figura 28 Transdutores duplo-cristal

8.6.4 Transdutores Phased Array - Os transdutores convencionais dispõem de um único cristal ou no máximo dois, em que o tempo de excitação do cristal é determinado pelo aparelho de ultra-som, sempre realizado de uma mesma forma. Com o avanço da tecnologia dos computadores e com materiais piezocompostos para fabricação de novos cristais, desde os anos 90 é possível num mesmo transdutor operar dezenas de pequenos cristais, cada um ligado à circuitos independentes capazes de controlar o tempo de excitação de cada um destes cristais. O resultado é a modificação do comportamento do feixe sônico emitido pelo conjunto de cristais ou pelo transdutor.

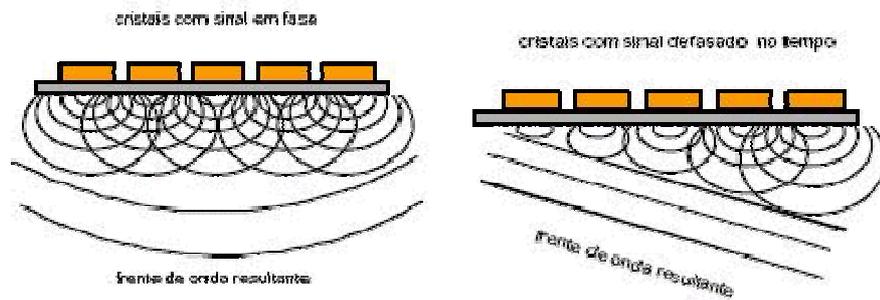


Figura 29 Transdutores Phased Array

8.7 Características dos transdutores

Os elementos que caracterizam os transdutores são:

- Tamanho do cristal piezelétrico: os transdutores normais mais utilizados possuem de 5 a 25 mm de diâmetro. Em geral, nos transdutores angulares utilizam-se cristais retangulares.
- Frequência: devido às diferentes aplicações, existem transdutores com frequência de 0,5 a 25 MHz. Os mais usuais vão de 1 a 6 MHz.
- Amortecimento mecânico: o elemento amortecedor suprime no transdutor todas as vibrações indesejáveis do cristal.
- Face protetora: são elementos de contato com a peça. Em geral, são películas de material plástico.
- Carcaça: elemento com forma apropriada para acomodar todo o conjunto e, ao mesmo tempo, facilitar seu manuseio.
- Elementos elétricos: são contatos elétricos ligando o cristal piezelétrico ao elemento de engate do cabo coaxial e à bobina geradora de frequência.

8.8 Acoplante

Como o ultra-som deve passar do transdutor para a peça com o mínimo de interferência, há necessidade de colocar um elemento, o acoplante, que faça esta ligação, evitando o mau contato. Este acoplante pode ser óleo, água, glicerina, graxa etc.

8.9 Método de ensaio

Quanto ao tipo de acoplamento, o ensaio por ultra-som pode ser classificado em dois grupos:

- Ensaio por contato direto: o acoplante é colocado em pequena quantidade entre a peça e o cabeçote, formando uma película.

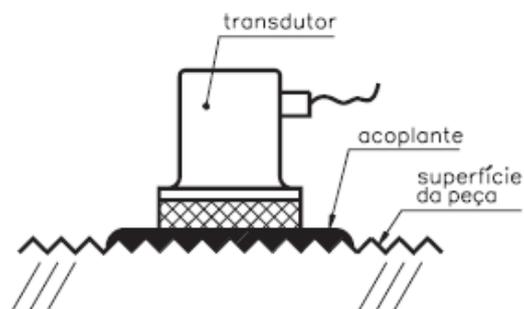


Figura 30 Ensaio por contato direto

- Ensaio por imersão: a peça e o cabeçote são mergulhados num líquido, geralmente água, obtendo-se um acoplamento perfeito.

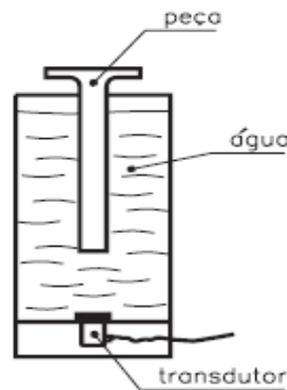


Figura 31 Ensaio por imersão

A escolha do método deverá ser feita levando-se em consideração a sensibilidade, forma geométrica da peça, tipo e orientação da descontinuidade, simplicidade de operação, velocidade necessária para a inspeção, etc..

O método de contato é mais aplicado a produtos de grandes dimensões e estruturas soldadas, ao passo que o método de imersão é utilizado para o ensaio de grandes lotes de peças pequenas e idênticas através de sistemas automatizados, especialmente na indústria automobilística e aeronáutica onde se exige alta sensibilidade no ensaio.

8.10 Técnicas de inspeção por ultra-som

A inspeção de materiais por ultra-som pode ser efetuada através de três métodos ou técnicas:

- Técnica de Impulso-eco ou Pulso-eco;
- Técnica de Transparência;
- Técnica de imersão.

8.10.1 Técnica de Impulso-Eco ou Pulso-Eco - Somente um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultra-sônicas que se propagam no material; O

transdutor é acoplado em somente um lado do material; Pode-se verificar a profundidade da descontinuidade, suas dimensões, e localização na peça.

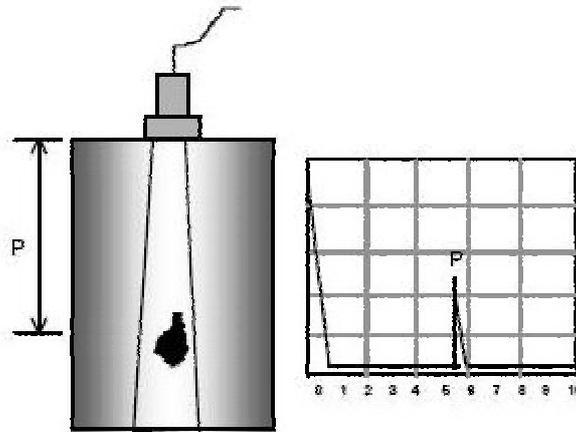


Figura 32 Técnica de Impulso-Eco ou Pulso-Eco

8.10.2 Técnica de Transparência - São utilizados dois transdutores separados (nos dois lados da peça), um transmitindo e outro recebendo as ondas ultra-sônicas. Não se pode determinar a posição da descontinuidade, sua extensão, ou localização na peça, é somente um ensaio do tipo passa-não passa que estabelece um critério comparativo de avaliação do sinal recebido com uma peça sem descontinuidades. Pode ser aplicada para chapas, juntas soldadas e barras.

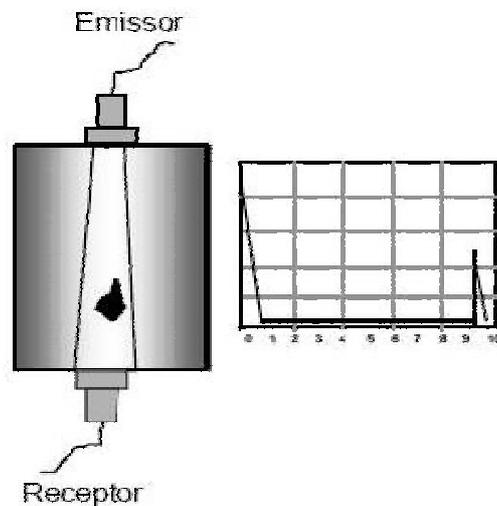


Figura 33 Técnica de Transparência

8.10.3 Técnica de Imersão - É empregado um transdutor de imersão à prova d'água. O transdutor pode se movimentar em relação a superfície da peça. A peça é colocada dentro de um tanque com água, propiciando um acoplamento sempre homogêneo.

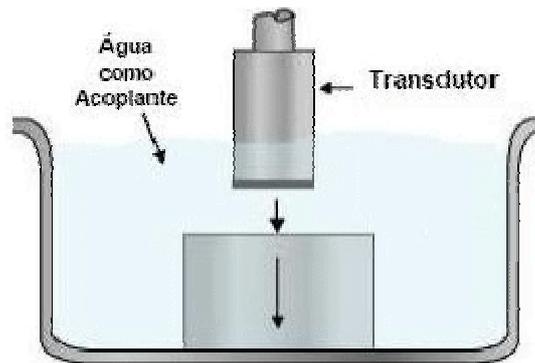


Figura 34 Técnica de Imersão

8.11 APRESENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

As descontinuidades se tornam visíveis na tela de cristal líquido sob a forma de um ecograma produzido por um sinal eletrônico (sinal do eco x tempo). Além deste tipo de apresentação, o qual é o mais comum, existem outros métodos mais sofisticados tais como o que mostra toda uma secção da peça com todas as suas relativas descontinuidades.

O equipamento que realiza tais medidas no ensaio por ultra-som é um tipo de osciloscópio. Os sinais elétricos recebidos do transdutor são tratados eletronicamente no aparelho e mostrados numa tela, a partir da qual o técnico em ultra-som interpreta os resultados.

Na tela, vemos na vertical a intensidade do sinal elétrico de saída do eco e de retorno e, na horizontal, o intervalo entre a emissão e a recepção do pulso. Além de operar como osciloscópio efetuando medições (fonte receptora), o aparelho possui também uma fonte emissora de sinais elétricos, para gerar o ultra-som através dos transdutores.

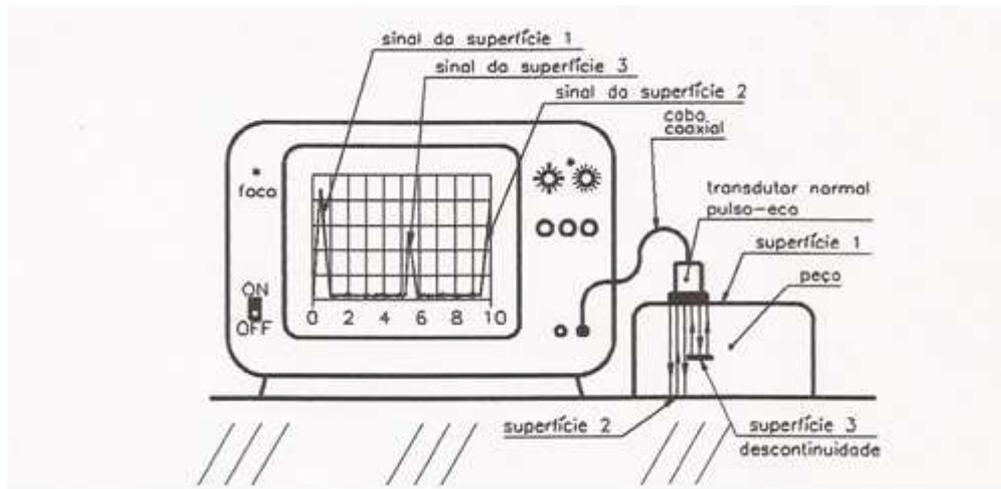


Figura 35 Esquema básico da resposta obtida no ensaio de ultra-som

9 CONCLUSÃO

Conforme foi observado neste trabalho, os Ensaios Não Destrutíveis são ferramentas importantes no controle de qualidade de peças acabadas ou semi-acabadas, pois detectam falhas e possíveis falhas que um equipamento pode sofrer devido à má qualidade da peça ou por um reparo mal feito ou até mesmo por falhas na fabricação das mesmas. Foi demonstrado que na impossibilidade da realização de um tipo de ensaio, seja pela dificuldade de acesso, pela geometria da peça ou pelo tipo do material da peça, podemos realizar outro ensaio para testar a qualidade da peça.

Observamos que os ensaios devem ser feitos por pessoas capacitadas e com o máximo de segurança possível, pois existem ensaios que se não forem feitos com as devidas proteções, podem causar danos às peças e pior ainda, podem causar danos aos técnicos que realizam a atividade.

Concluimos que a escolha do ensaio pode ser por vários fatores tais como: pela confiabilidade que o ensaio deve proporcionar, pelo material a ser ensaiado, pelos custos do ensaio, pois observamos que há ensaios que têm um custo zero como é o caso do ensaio visual, pela disponibilidade do espaço para a realização do ensaio entre outros.

Vale salientar a fim de complementar esta conclusão que se fossem realizados tais ensaios, como manutenção preventiva, nos diversos equipamentos de indústrias em que já ocorreram problemas de vazamentos ou explosões causados por fadiga dos materiais, trincas ou falhas nos cordões de solda, acidentes, poluições e mortes poderiam ter sido evitados.

10 REFERÊNCIAS

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.

COMETTA, Emilia. **Resistência dos Materiais: Para Técnicos Mecânicos**. São Paulo: Hemus, 1969.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Departamento de Engenharia Mecânica. **Tecnologia e Materiais de Construção Mecânica: Propriedades e Ensaios Industriais dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: [s.n.], 1969.

Tele Curso 2000. **Cursos Profissionalizantes Ensaios de Materiais**. Disponível em: <<http://www.futuro.usp.br/bibvirt/acervo/matdidat/tc2000/tecnico/ensaios.html>>. acesso em: 20 out. 2011.

ABENDE. Associação **Brasileira De Ensaios Não Destrutivos**. Disponível em: <<http://www.metalmat.ufij.br/abende/oqueend.html>>. acesso em: 30 out. 2011.

NOÇÕES Básicas Sobre Metalurgia, Processos de Fabricação, Ensaios Mecânicos e Ensaios Não Destrutivos. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/52358864/65-/Ensaio-Radiografico>>. Acesso em: 27 set. 2011.

POLLOCK, A. A. **Acoustic Emission Inspection: Metals Handbook**. 9. ed. [S.l.: s.n., s.d.].

Tele Curso 2000. **Cursos Profissionalizantes Ensaios de Materiais**. Disponível em: <<http://www.futuro.usp.br/bibvirt/acervo/matdidat/tc2000/tecnico/ensaios-/ensaios.html>>. acesso em: 30 set. 2011.