Jurandir Primo

Ensaios Não Destrutivos - END
Fundamentos – Parte 1

Jurandir Primo
Copyright @ 2019
1ª edição – janeiro de 2023

Capa: Jurandir Primo – Sorocaba/SP

Primotech - Engineering Manuals

Primo, Jurandir

Sistemas Industriais, Inspeção e Testes;

Índice para pesquisas: Inspeção Industrial, Automação, Sistemas Industriais.

ISBN:

Livro no sistema de auto-publicação cuja edição, revisão, diagramação e capa foram selecionadas pelo próprio autor, para diminuir custos e facilitar a todos os interessados em engenharia e tecnologia.

O autor permite que todas as partes do livro possam ser copiadas ou reproduzidas para fundamentos educacionais, instrutivos e treinamento técnico.

Para adquirir esta ou outras publicações do autor, enviar solicitação para:

primotechcourses@hotmail.com

Ensaios Não Destrutivos – END
Fundamentos – Parte 1











INDICE:

Introdução:

1. Inspeção Visual de Solda:

2. Inspeção por Liquido Penetrante:

A. Etapas para Inspeção por LP:
B. Usos Comuns da Inspeção por Líquido Penetrante:
C. Vantagens e Desvantagens:
D. Condições para os Testes com LP:
E. Materiais de Inspeção com LP:
F. Capacidade de Umedecimento da Superfície:
G. Cor e Brilho Fluorescente:
H. Estabilidade Ultravioleta e Térmica:
I. Seleção de Técnicas de LP:

3. Inspeção por Partículas Magnéticas:

1. Princípios Básicos:
2. História do Teste por Partículas Magnéticas:
3. Princípios do Magnetismo:
4. Detecção de Falhas por Fluxo Magnético:
5. Materiais Magnéticos:
6. Desmagnetização:
7. Indicadores de Campo:
8. Instrumentos de PM:
9. Luzes para Inspeção por PM:
10. Partículas Magnéticas Secas e Úmidas:
9. Técnicas de Magnetização:
10. Normas e Procedimentos para Partículas Magnéticas:
11. Conceitos de Magnetismo:
12. Exemplos Práticos:

4. Inspeção por Ultrassom:

1. História do Ultrassom:
2. Propagação de Ondas Sonoras:
3. Comprimento de Onda, Frequência e Velocidade:
4. Detecção de Defeitos:
5. Coeficientes de Reflexão e Transmissão:4. Detecção de Defeitos:
5. Coeficientes de Reflexão e Transmissão:
6. Refração e Lei de Snell:
7. Transdutores Piezoelétricos:
8. Transdutores Piezoelétricos:
9. Frequência do Transdutor:
10. Irradiação de Transdutores:
11. Propagação de Ondas do Transdutor:
12. Tipos de Transdutores:
13. Técnicas dos Transdutores:
14. Acoplantes:
15. Receptores de Pulso-Eco:
16. Difração de uma Trinca:
17. Varredura Ultrassônica Automatizada:
18. Métodos de Calibração:
19. Blocos de Calibração:
20. Inspeção de Juntas Soldadas:
21. Inspeções Ferroviárias:
22. Padrões para Ensaios de Ultrassom:
23. Exemplos de Inspeção Ultrassônica:

5. Inspeção Radiográfica (RX):

1. História da Radiografia:
2. Estado Atual da Radiografia:
3. Geradores de Raios-X:
4. Filmes Radiográficos:
5. Descontinuidades Radiográficas:
6. Radiação e Segurança:
7. Resumo dos Métodos de END:
8. Exemplos de Inspeções Radiográficas:

Introdução:

Os métodos de **Ensaios Não Destrutivos** (END) são usados para verificar a conformidade com os padrões de qualidade de fabricação, examinando a superfície e a sub-superfície de **componentes em geral** para fins de construção mecânica. Os **5 métodos** mais comuns de inspeção estão aqui descritos na **Parte 1** desse manual: Visual, Líquido Penetrante, Partícula Magnética, Ultrassônico e Radiográfico. No manual **Parte 2** estão descritos os testes menos comuns e **especiais** que são: Ensaios Visuais, Correntes Parasitas (Eddy Current), Emissão Acústica, Infravermelho, Teste Remoto (RFT), Phased Array, Difração do Tempo de Voo, Inspeção Rotativa Interna (IRIS) e outros métodos bem específicos.

1. Inspeção Visual de Solda (EVS):

A inspeção visual é o método mais econômico, e deve ser realizada antes, durante e após a soldagem. Muitas normas exigem seu uso **antes** de outros métodos, porque não faz sentido submeter uma **solda obviamente ruim** a técnicas sofisticadas de inspeção. O ANSI/AWS D1.1, The "*Structural Welding Code Steel*", afirma: "As s*oldas sujeitas a inspeção não destrutiva são aceitáveis apenas por inspeção visual*". Na inspeção visual basta uma trena, uma lupa, uma régua e um esquadro para verificar a retilineidade, alinhamento e perpendicularidade.

Antes do primeiro arco de soldagem ser iniciado, os **materiais devem ser examinados** para atender às especificações de qualidade, tipo, tamanho, limpeza e ausência de defeitos. Graxa, tinta, óleo, película de óxido ou incrustações pesadas devem ser removidas. As peças a serem unidas devem ser verificadas quanto à planicidade, retilineidade e precisão dimensional. Finalmente, as variáveis do processo e procedimento devem ser verificadas, incluindo tamanho e tipo de eletrodo, configurações do equipamento e provisões para pré-aquecimento ou pós-aquecimento.

Durante a fabricação, o exame visual de um cordão de solda e da cratera final pode revelar problemas como rachaduras, penetração inadequada e inclusões de gás ou escória. Entre os sinais de solda detectados visualmente estão trincas, escória superficial em inclusões, porosidade superficial e rebaixos. Em soldas simples, a inspeção no início de cada operação e periodicamente à medida que o trabalho avança pode ser adequada.

O passe de raiz é o mais crítico e especialmente suscetível a rachaduras e, como solidifica rapidamente, pode reter gases e escórias. Em passes subsequentes, as condições causadas pelo formato do cordão de solda ou alterações na configuração da junta podem causar mais fissuras, bem como aprisionamento de escória. Os custos de reparo são minimizados se a **inspeção visual** deve detectar essas falhas antes do progresso da soldagem. A EVS só consegue localizar defeitos na **superfície** da solda.

A EVS no estágio inicial da produção pode evitar soldagem insuficiente e excessiva. Cordões muito grandes aumentam os custos desnecessariamente e podem causar distorção devido a tensão adicional de contração. Após a soldagem, a inspeção visual pode detectar uma variedade de falhas superficiais, incluindo rachaduras, porosidade e crateras não preenchidas, independentemente dos procedimentos de inspeção subsequentes. Variações dimensionais, empenamentos e falhas de aparência, bem como características de tamanho da solda, podem ser avaliadas.

Antes de fazer todas as avalições se há falhas na superfície, as soldas devem ser limpas de escória. O jateamento não deve ser feito antes do exame, pois a ação do jateamento pode selar fissuras finas e torná-las invisíveis. O Código de Soldagem Estrutural **AWS D1.1**, por exemplo, não permite martelamento "*na raiz da solda ou no metal-base da solda*".

2. Inspeção por Líquido Penetrante (LP):

A inspeção por líquido penetrante (LP ou LPI) é um método usado para revelar falhas de ruptura de superfície de soldas através de um corante colorido ou fluorescente. A técnica é baseada por um líquido que é aspirado em uma superfície de soldagem “limpa”, rompendo a falha por ação capilar. Após um período de tempo denominado “*permanência*”, o excesso de penetrante da superfície é removido, e um revelador é aplicado.

Isso funciona como um mata-borrão. Retirar o penetrante para revelar a presença de uma falha na solda. Os penetrantes coloridos (de contraste) requerem boa luz branca, enquanto os penetrantes fluorescentes precisam ser usados em condições escuras com uma "*luz negra*" ultravioleta. Após a remoção e limpeza cuidadosa, a superfície da solda é então revestida com uma fina suspensão de pó branco em álcool, de modo que se forma uma camada superficial branca após a evaporação do álcool.

O líquido penetrante proporciona um fundo contrastante e retira o óleo das falhas superficiais, permitindo que sejam interpretadas e avaliadas. Esse método de inspeção está relacionado a fluidos, pressão, visibilidade, tensão superficial e viscosidade que são constantes e tão relevantes hoje, como eram durante o desenvolvimento inicial deste valioso processo de inspeção.



Uma técnica de inspeção de solda muito antiga envolvia a fricção de **negro de fumo** em cerâmica esmaltada, por meio da qual o negro de fumo se depositava nas rachaduras superficiais, tornando-as visíveis. Mais tarde, tornou-se prática nas oficinas ferroviárias examinar componentes de ferro e aço pelo método "*óleo e branqueamento*". Neste método, o óleo pesado comumente disponível nas oficinas ferroviárias era **diluído com querosene** em grandes tanques para que as peças da locomotiva, como as rodas, pudessem ser submersas.

O teste de líquido penetrante começou a ser usado a partir de **1940**, quando o método de **partículas magnéticas** também foi introduzido e considerado mais sensível para ferro e aços ferromagnéticos. A superfície examinada era revestida **com laca** e, após a secagem, a amostra era vibrada pela batida de um martelo. A vibração fazia com que a frágil camada de laca quebrasse geralmente em torno dos defeitos superficiais. A laca frágil foi usada principalmente para mostrar a distribuição de tensões em uma peça e não para encontrar defeitos.

Em 1942, a Magnaflux introduziu o sistema Zyglo de inspeção por líquido penetrante (LP), onde corantes fluorescentes eram adicionados ao líquido penetrante. Esses corantes apresentavam fluorescência quando expostos à luz ultravioleta (também chamada de "*luz negra*"), tornando as indicações de rachaduras e outras falhas superficiais mais facilmente visíveis aos inspetores. Muitos desses desenvolvimentos foram realizados pela Magnaflux em Chicago (EUA), em associação com a Switzer Bros. em Cleveland, Ohio. Mais tarde, óleos penetrantes mais eficazes contendo corantes visíveis (geralmente vermelhos) foram desenvolvidos pela Magnaflux para melhorar a capacidade de detecção de falhas. Este método, conhecido como método do corante penetrante, ainda é amplamente utilizado hoje.

1. Detecção de Falhas: A vantagem da inspeção por **líquido penetrante** (LPI) auxiliada com uma **inspeção visual** torna os defeitos de fabricação mais fáceis de serem vistos pelo inspetor. Existem basicamente duas maneiras pelas quais um processo de inspeção por penetrante torna as falhas mais facilmente vistas. Primeiro, o LP produz uma indicação de falha que é muito maior e mais fácil de ser detectada pelo olho do que a própria falha. Muitas falhas são tão pequenas ou estreitas que são indetectáveis a olho nu. Devido às características físicas do olho, existe um limite abaixo do qual os objetos não podem ser resolvidos. Este limiar de acuidade visual é de cerca de **0,003 polegadas** (0,00012 mm) para uma pessoa com visão **20/20**.

O LP melhora a detectabilidade de uma falha quando produz um alto nível de contraste, ajudando também a tornar a indicação mais facilmente visualizada. O **revelador** serve como um pó fundo de alto contraste, bem como um mata-borrão para retirar o penetrante preso na falha. Quando uma inspeção com líquido penetrante fluorescente é realizada, os materiais penetrantes são formulados para brilhar intensamente e emitir luz em um comprimento de onda ao qual o olho é mais sensível sob condições de pouca iluminação.

A. Etapas para Inspeção por LP:

a) Preparação da Superfície: É uma das etapas mais críticas de uma inspeção por líquido penetrante. A superfície deve estar livre de óleo, graxa, água ou outros contaminantes para possibilitar que o **penetrante entre nas falhas**. A peça também pode exigir limpeza química se operações mecânicas, como usinagem, lixamento ou jateamento forem realizadas. Algumas operações mecânicas podem manchar o metal sobre a abertura da falha e impedir a entrada do penetrante.

b) Aplicação do Penetrante: Depois que a superfície estiver completamente limpa e seca, o material penetrante é aplicado por pulverização, pincel ou imersão em banho de penetrante.

c) Permanência do Penetrante: O líquido é deixado na superfície por um tempo suficiente para permitir que o máximo de penetrante possível penetre no defeito. Os tempos mínimos de permanência variam de **5 a 60 minutos**. Os tempos de permanência são recomendados pelos **fabricantes** ou exigidos por uma especificação definida. O tempo de permanência ideal é determinado por experimentação e pode ser muito específico para uma aplicação.

d) Remoção do Excesso de Penetrante: É a parte mais delicada do procedimento de inspeção, pois o excesso de penetrante deve ser limpado da superfície do metal, **retirando** o mínimo possível de penetrante dos defeitos. Dependendo do penetrante utilizado, esta etapa pode envolver limpeza com solvente, enxágue direto com água ou tratamento da peça com um emulsificante e depois enxágue com água.

e) Aplicação do Revelador: Uma fina camada, geralmente de pó revelador é aplicada via spray para atrair o penetrante preso nas falhas de volta à superfície onde será visível. Os reveladores vêm em uma variedade de formas que podem ser aplicadas por pó (pó seco), imersão ou pulverização (reveladores úmidos).

f) Desenvolvimento da Inspeção: O revelador pode permanecer na superfície da peça por um período de tempo suficiente para permitir a visão do penetrante preso em quaisquer falhas superficiais. Esse tempo de desenvolvimento geralmente é de no **mínimo 10 minutos**. Tempos significativamente mais longos para inspeção podem ser necessários para fissuras apertadas.

g) Inspeção: A **inspeção** é então realizada sob iluminação apropriada para detectar indicações de quaisquer falhas que possam estar presentes.



h) Limpar Superfície: A etapa final do processo é limpar completamente a superfície da peça para remover o revelador das peças que foram consideradas aceitáveis.

B. Usos Comuns da Inspeção por Líquido Penetrante:

A inspeção por líquido penetrante (LPI) é um dos métodos de ensaio não destrutivo (END) mais utilizados. Sua popularidade é atribuída a dois fatores principais: sua relativa **facilidade de uso** e sua flexibilidade. O LPI pode ser usado para inspecionar praticamente **qualquer material**, desde que sua superfície não seja extremamente áspera ou porosa. Os materiais que são comumente inspecionados usando LPI incluem o seguinte: Metais (alumínio, cobre, aço, titânio, etc.); Vidro; Cerâmica; Borracha; Plástico.

O LPI oferece flexibilidade na realização de inspeções porque pode ser aplicado em uma grande variedade de aplicações, desde velas de ignição automotivas até **componentes críticos** de aeronaves. Os materiais penetrantes podem ser aplicados com uma lata de spray ou um cotonete para inspecionar falhas que ocorrem em uma área específica ou podem ser aplicados por imersão ou pulverização para inspecionar rapidamente grandes áreas.

A inspeção por líquido penetrante só pode ser usada para inspecionar falhas que quebram a superfície da amostra. Como mencionado acima, uma das principais limitações de uma inspeção por penetrante é que as falhas devem estar expostas à superfície. Algumas dessas falhas são: Fissuras por fadiga; Esmerilhamento; Fraturas por impacto; Porosidade; Soldas; Furos; Falta de fusão.

C. Vantagens e Desvantagens:

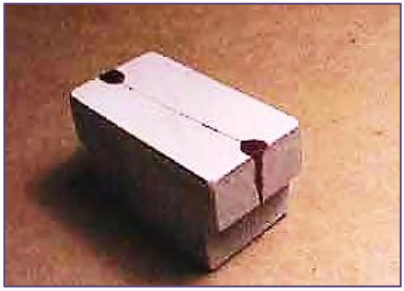
a) Vantagens: Alta sensibilidade a pequenas descontinuidades superficiais; Materiais metálicos e não metálicos, magnéticos e não magnéticos, e materiais condutores e não condutores podem ser inspecionados; Grandes áreas e grandes volumes de materiais podem ser inspecionados rapidamente e com baixo custo. Formas geométricas complexas são inspecionadas rotineiramente; Indicações de falhas são produzidas diretamente na superfície da peça e constituem uma representação visual do defeito; Sprays de aerosol tornam os materiais penetrantes portáteis; Materiais penetrantes e equipamentos são relativamente baratos.

b) Desvantagens: Somente defeitos de falha superficial podem ser detectados; Somente materiais com superfície não porosa podem ser inspecionados; A pré-limpeza é crítica, pois os contaminantes podem mascarar defeitos; As manchas resultantes de usinagem, retificação e jateamento com granalha ou água devem ser removidas antes do LP; O acabamento superficial e a rugosidade afetam a sensibilidade da inspeção; É necessária a pós-limpeza de peças com materiais aceitáveis; É necessário o manuseio de produtos químicos e o descarte adequado.

D. Condições para os Testes com LP:

Os materiais penetrantes utilizados hoje são muito mais sofisticados que o querosene e o badejo, utilizados pela primeira vez pelos inspetores ferroviários perto do século XX. Os penetrantes atuais são cuidadosamente formulados para produzir o nível de sensibilidade desejado pelo inspetor. Para ter um bom desempenho, um penetrante deve possuir uma série de características importantes. Um penetrante deve:

•. Espalhar facilmente sobre a superfície do material a ser inspecionado para proporcionar uma cobertura completa e uniforme;
•. Ser arrastado para defeitos superficiais por ação capilar;
•. Permanecer fluido para que possa retornar à superfície da peça durante as etapas de secagem e revelação;
•. Permanecer no defeito e sair facilmente da superfície da peça;
•. Ser altamente visíveis ou apresentar fluorescência intensa para produzir indicações fáceis de ver;
•. Não ser prejudicial ao material sob teste ou ao inspetor.





Muitos tipos de líquidos penetrantes **não apresentam** o mesmo desempenho. Os fabricantes de penetrantes desenvolveram diferentes formulações para atender a uma variedade de aplicações de inspeção. Algumas aplicações exigem a detecção dos menores defeitos possíveis e possuem superfícies lisas onde o penetrante é fácil de remover. Em outras aplicações, o tamanho do defeito rejeitável pode ser maior e um penetrante formulado para encontrar falhas maiores pode ser usado.

Os penetrantes fluorescentes contêm um **corante ou vários corantes** que fluorescem quando expostos à radiação ultravioleta. Os penetrantes visíveis contêm um **corante vermelho** que proporciona alto contraste contra o fundo branco do revelador. Os sistemas penetrantes fluorescentes são mais sensíveis que os

sistemas penetrantes visíveis porque o olho é atraído pelo brilho da indicação fluorescente.

Historicamente, o **Padrão Militar 25135**, Materiais para Inspeção, com Líquidos Penetrantes, tem sido o documento principal para especificar penetrantes, mas este documento está foi substituído pelo **AMS 2644**. Outras especificações, como **ASTM 1417**, Prática Padrão para Exames de Penetrantes de Líquidos, também têm informações sobre a classificação de materiais penetrantes, mas geralmente são referidos como **MIL-I-25135** ou **AMS 2644**.

As principais especificações da indústria dos EUA atualmente dependem do Laboratório de Materiais da Força Aérea, na Base Aérea de Wright-Patterson, para classificar os penetrantes em um dos cinco níveis de sensibilidade. Este procedimento utiliza amostras de **Titânio e Inconel** com pequenas trincas superficiais produzidas em flexão por fadiga de baixo ciclo para classificar sistemas penetrantes. O brilho da indicação produzida é medido utilizando um **fotômetro**. Os níveis de sensibilidade e o procedimento de teste utilizado podem ser encontrados na Especificação Militar **MIL-I-25135** e na Especificação de Material Aeroespacial **2644**.

Os materiais líquidos penetrantes são classificados na indústria e no governo por suas características físicas e desempenho. Os penetrantes usados para detectar o **menor defeito** também produzem a maior quantidade de indicações irrelevantes. A Especificação de Material Aeroespacial (AMS) 2644, Material de Inspeção, é agora a principal especificação usada nos EUA para controlar materiais. Os materiais penetrantes vêm em dois tipos básicos. Esses tipos estão listados abaixo:

- **Tipo 1** - Penetrantes Fluorescentes;
- **Tipo 2** - Penetrantes Visíveis.

Classificação: Os penetrantes são classificados com base na resistência ou detectabilidade da falha de indicação produzida por trincas de fadiga muito pequenas e compactas. Os cinco níveis de sensibilidade são mostrados abaixo:

• Nível ½ - Sensibilidade Ultra Baixa;
• Nível 1 - Baixa Sensibilidade;
• Nível 2 - Média Sensibilidade;
• Nível 3 - Alta Sensibilidade;
• Nível 4 - Sensibilidade Ultra Alta.

Os penetrantes visíveis **não necessitam** de área escurecida e luz ultravioleta para serem inspecionados. Os penetrantes visíveis também são menos vulneráveis à contaminação por produtos como fluidos de limpeza, que podem reduzir significativamente a intensidade de uma indicação fluorescente. Os penetrantes são classificados pelo método utilizado para remover o excesso de penetrante. Os quatro métodos comuns estão listados abaixo:

• **Método A** - Lavável com Água;
• **Método B** - Pós-Emulsionável, Lipófilo;
• **Método C** - Removível por Solvente;
• **Método D** - Pós-Emulsionável, Hidrofílico.

a) Método A: Consiste em penetrantes laváveis com água que podem ser removidos da peça enxaguando somente com água. Esses penetrantes contêm um agente emulsificante (detergente) que permite lavar o penetrante da superfície da peça somente com água. Os penetrantes laváveis com água são às vezes chamados de sistemas auto emulsificantes.

b) Método B: Consiste em penetrantes pós-emulsionáveis em duas variedades, **lipofílicos e hidrofílicos**. Em pós-emulsificantes, sistemas lipofílicos, o penetrante é solúvel em óleo e interage com o emulsificante à base de óleo para possibilitar a remoção.