



**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
SÃO PAULO
Campus Salto

Ensaio Mecânicos de Materiais

Aula 15 – Ensaio de Partículas Magnéticas

Prof. MSc. Luiz Eduardo Miranda J. Rodrigues

Finalidade

O ensaio por partículas magnéticas é utilizado na localização de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos e pode ser aplicado tanto a peças acabadas quanto semi-acabadas e durante as etapas de fabricação.

Principio de funcionamento

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.



Siglas que identificam este ensaio

PM- Ensaio por partículas magnéticas

MPI - Magnetic Particles Inspection

MPT/MT - Magnetic Particle Testing

Algumas etapas básicas para este ensaio

- ✓ Estudar os documentos aplicáveis;
- ✓ Efetuar um 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; e
- ✓ Elaborar um relatório com os resultados obtidos.

Vantagem para este ensaio

- ✓ 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 tem pouca ou nenhuma influência no resultado.

Limitação para o ensaio

- ✓ é aplicável apenas aos materiais ferromagnéticos, ou seja, principalmente os aços estruturais ao carbono, de baixa e média liga, feros fundidos ligas a base de cobalto;
- ✓ a forma e a orientação das descontinuidades 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;

Limitação para o ensaio

- ✓ 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.

Regulamentação para o ensaio

Norma técnica, manual do fabricante da aeronave ou peça, boletins de serviço, procedimento de ensaio e etc. Nestes documentos podem ser encontradas as especificações do ensaio ou seja, a técnica de ensaio, onde são estabelecidas as regras para a execução do ensaio, as descrições de cada etapa, bem como os critérios de aceitação e rejeição, onde são descritos os limites quanto aos tipos, tamanho, quantidade e localização das descontinuidades aceitáveis.

O que é Magnetismo?

Materiais ferromagnéticos colocados nas proximidades de um ímã são atraídos ou repelidos por ele. Este fenômeno é chamado magnetismo. Os ímãs podem ser naturais ou artificiais, fabricados a partir de aços com propriedades magnéticas específicas para esse fim, neste caso chamados de ímãs permanentes.

Linhas de campo magnético

A presença de um ímã numa região do espaço modifica este espaço, e diz-se que ele está sob a ação de um campo magnético. O campo magnético pode ser visualizado quando limalhas de um material ferromagnético são pulverizadas nesta região, por exemplo sobre uma folha de papel colocada sobre um ímã, como mostra a figura 1. As extremidades de um ímã são chamadas de pólos magnéticos, Norte e Sul e, por convenção, as linhas de campo externas ao ímã se dirigem do pólo Norte ao pólo Sul.

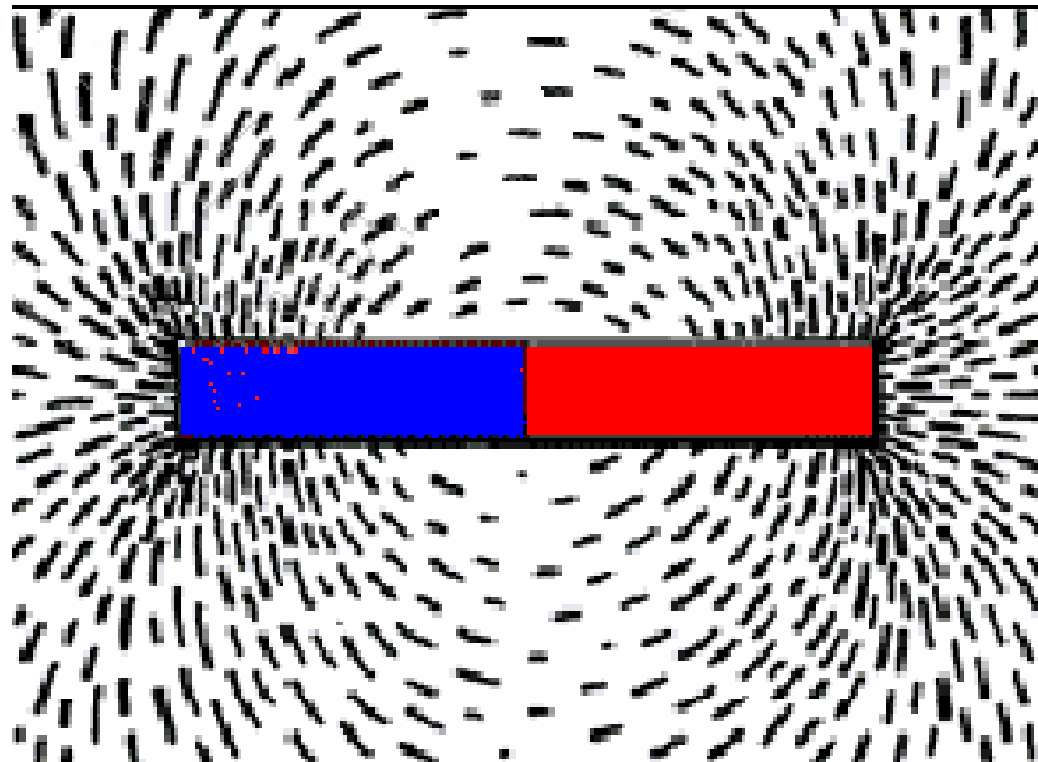
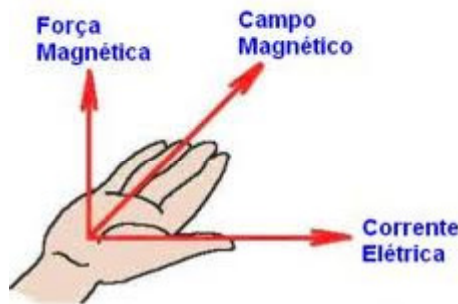


Figura 1 – Visualização de linhas de campo magnético.

Regra da mão direita



Com o polegar da mão direita indicando o sentido da corrente os dedos envolvendo o condutor indicam o sentido das linhas de indução magnética que envolvem o condutor.

Permeabilidade Magnética

A permeabilidade magnética pode ser entendida como sendo a facilidade com que um material pode ser magnetizado e é representada pela letra grega μ . A permeabilidade magnética de um material é a relação entre a condutividade magnética do material e a condutividade magnética do ar, ou, em outras palavras, a relação entre o magnetismo adquirido pelo material (**B**) na presença de uma força de magnetização externa (**H**).

Materiais que influenciam o campo magnético

- ✓ Materiais Ferromagnéticos;
- ✓ Materiais Paramagnéticos, e
- ✓ Materiais Diamagnéticos.

Materiais Ferromagnéticos

Ferromagnéticos: $\mu > 1$

São materiais que são fortemente atraídos por um ímã, como o ferro, cobalto e quase todos os tipos de aço e são ideais para serem submetidos à inspeção pelo método das partículas magnéticas (PM).

Materiais Paramagnéticos

Paramagnéticos: $\mu = 1$

São materiais que são levemente atraídos por um ímã, como a platina, o alumínio, o cromo, o estanho e o potássio. Não são recomendados para inspeção por PM.

Materiais Diamagnéticos

Diamagnéticos: $\mu < 1$

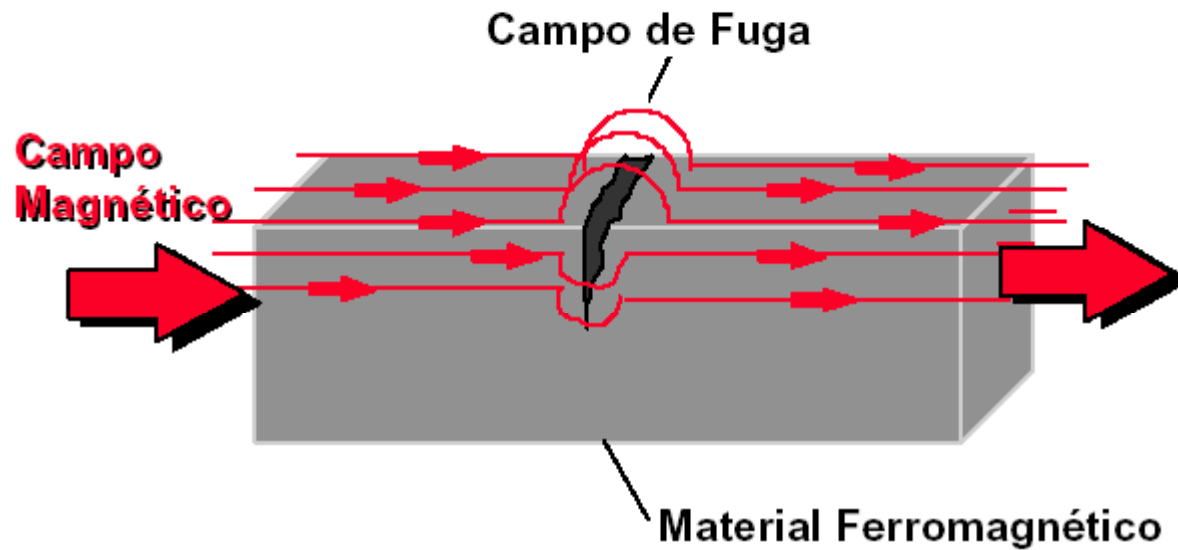
São materiais que são levemente repelidos por um ímã, como a prata, o zinco, o chumbo, o cobre e o mercúrio. O ensaio por PM não é aplicável a estes materiais.

Campo de Fuga

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 90º em relação à direção do campo magnético.



Peça contendo uma trinca superficial, dando origem ao campo de fuga

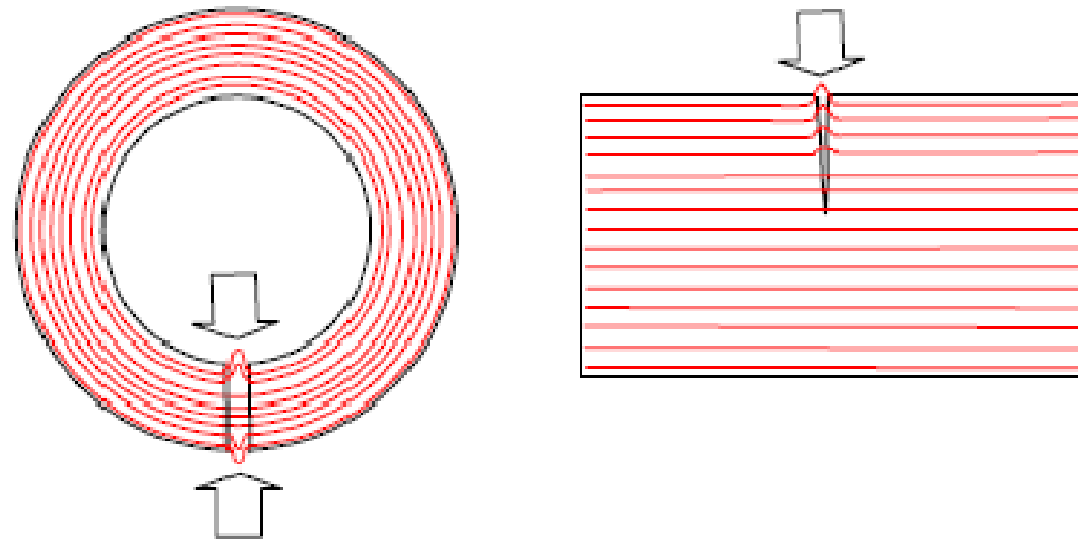


Figura 5 – Campos de fuga, capazes de atrair material magnetizável.

Tipos de corrente 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).

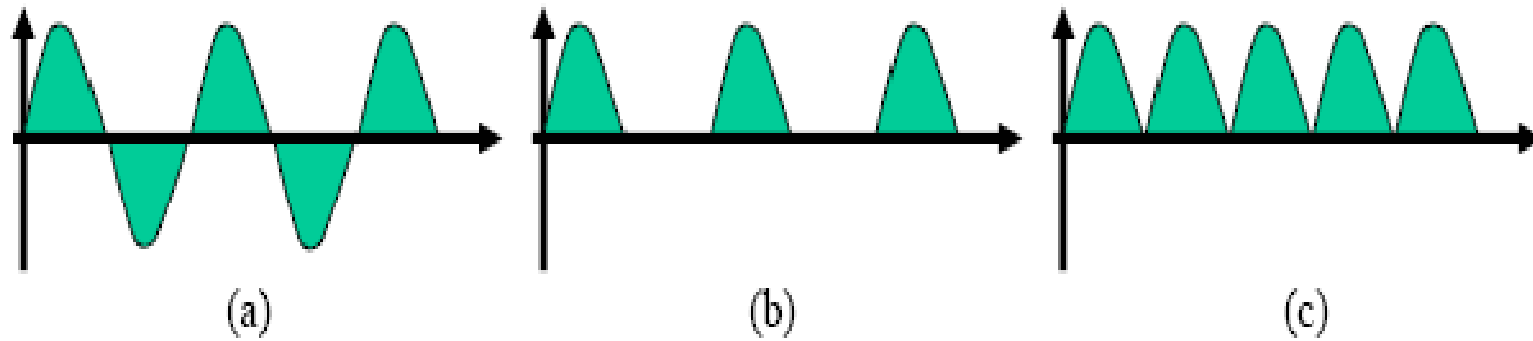


Figura 16 – Tipos de corrente (a) alternada, (b) retificada em meia onda e (c) retificada em onda completa

Curva de Histerese

Esta curva mostra a magnetização e desmagnetização de um material, indicando algumas propriedades, tais como:

- ✓ Permeabilidade:
- ✓ Relutância:
- ✓ Magnetismo Residual:
- ✓ Magnetismo Remanente:
- ✓ Retentividade;
- ✓ Força Coercitiva.

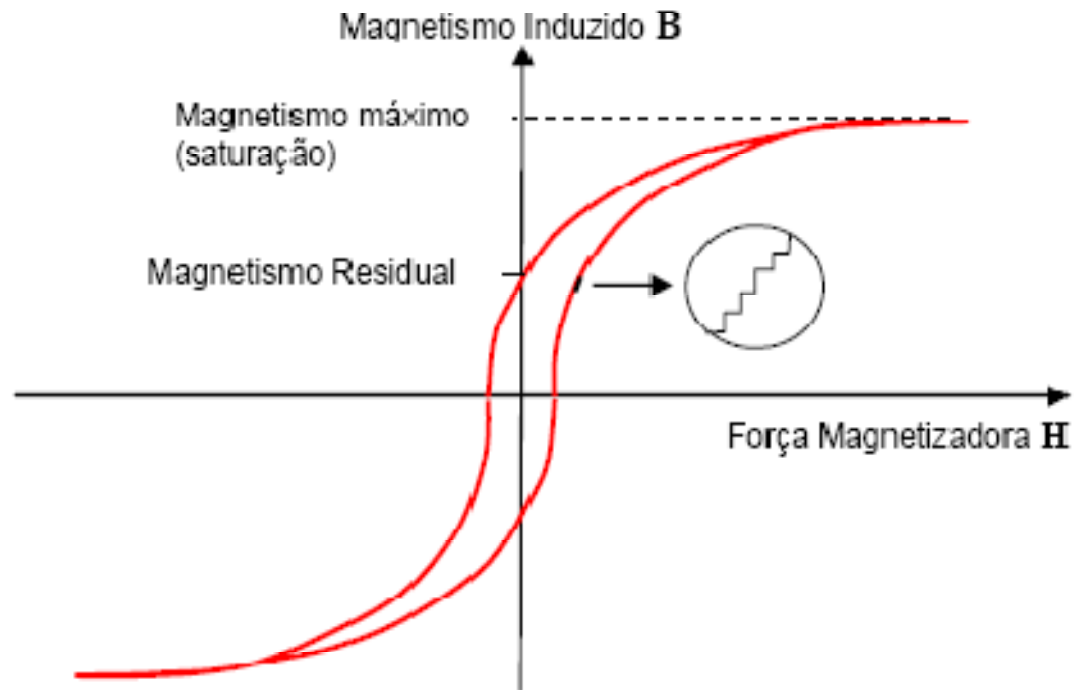


Figura 2 – Histerese magnética (esquemática)

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.

Preparação da Superfície

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.

Preparação da Superfície

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.

Preparação da Superfície

Toda camada isolante deve ser removida das regiões de contato elétrico.

O tipo de preparação e os materiais a serem utilizados devem ser devidamente autorizados e constarem de um documento escrito e aprovado.

Preparação da Superfície

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 uma outra solução inibidora e logo em seguida, lavar com água em abundância.

Preparação da Superfície

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.

As 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.

Podem ser visíveis (com luz branca), nas cores: vermelha, preta, cinza e etc., ou fluorescentes (com luz negra).

As partículas fluorescentes são as mais sensíveis e devem ser adotadas para peças aeronáuticas



Figura 10 – Partículas magnéticas coloridas vistas a olho nu e ao microscópio eletrônico.

Formas de Aplicação

O meio 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 e via úmida.

- ✓ **Via Seca** : Veículo "ar"
- ✓ **Via Úmida**: Veículos "água, destilados de petróleo e óleos especiais".
A via úmida é a adotada para uso aeronáutico
Nota:
A norma ASTM 1444 e outras normas militares não permitem a utilização de partículas fluorescentes e visíveis juntas.

As partículas secas são aplicadas, em geral, por aspersores de borracha, como os mostrados na figura 11.



Figura 11 – Aspersores de borracha para aplicação de partículas magnéticas secas,



Concentração das partículas em suspensão

De acordo com a norma ASTM 1444, as concentrações são:

Partículas fluorescentes: de 0,1 a 0,4 ml em 100 ml

Partículas visíveis: de 1,2 a 2,4 ml em 100 ml

A concentração de partículas em suspensão líquida deve ser bem controlada e tubos centrifugadores como o mostrado na figura 12 são necessários para se determinar a concentração de uma suspensão após sua preparação ou durante a sua utilização quando contínua, em equipamentos estacionários.



Figura 12 – Tubo centrifugador.

Métodos de ensaio

Método contínuo

É mais rápido e eficiente que o residual e não limita-se 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.

Métodos de ensaio

Método residual

Consiste em aplicar as partículas magnéticas após a força de magnetização ter sido removida.

***Para peças aeronáuticas, utiliza-se o método contínuo úmido fluorescente.**

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.

As etapas de realização do ensaio são mostradas na figura 17 e são:

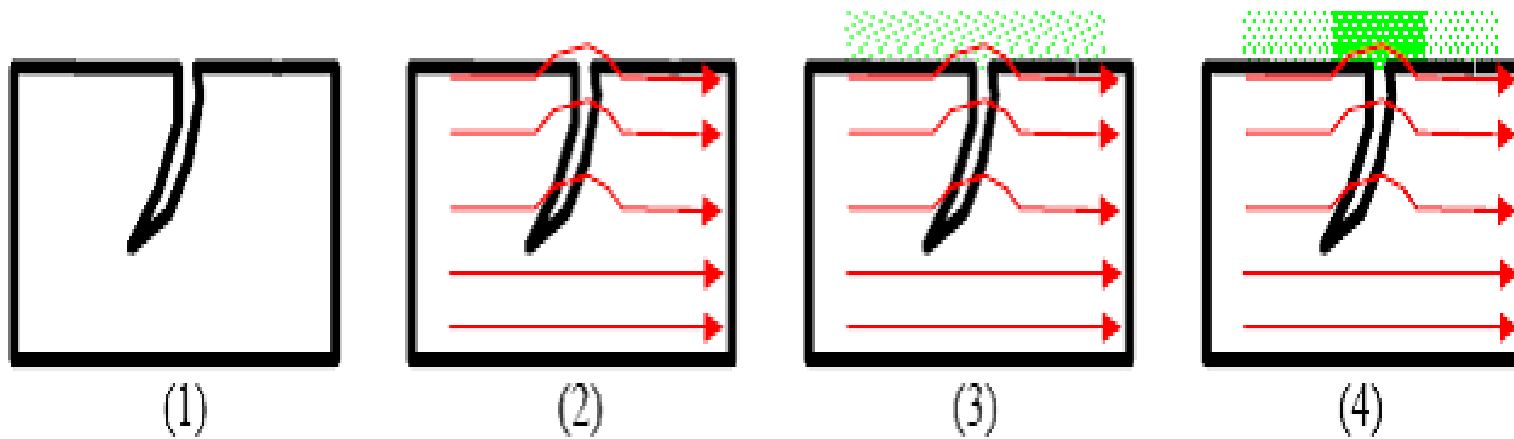


Figura 17 – Etapas de realização do ensaio com partículas magnéticas.

Magnetização

A magnetização total ou parcial vai depender do tamanho das peças ou da área a ser examinada e dos equipamentos disponíveis. A figura 13 mostra estas técnicas, usando um equipamento estacionário e barras de contato, respectivamente. Em ambos os casos a magnetização é obtida pela passagem de corrente elétrica pelas peças em exame.



(a)



(b)

Figura 13 – Magnetização total (a) usando uma bobina e local (b) usando barras de contato para inspeção com partículas magnéticas.

Magnetização Longitudinal

A magnetização longitudinal é indicada para detecção de descontinuidades perpendiculares ao eixo principal da peça e em geral pode ser feita com o uso de bobinas ou de um “yoke”, como mostra a figura 14.

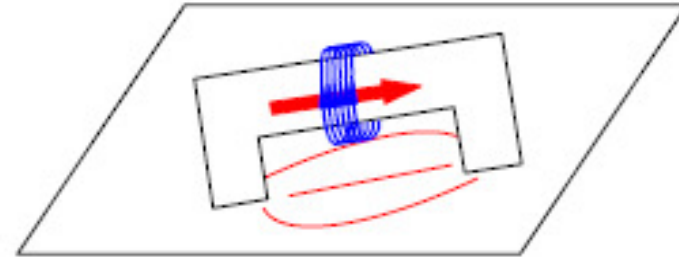
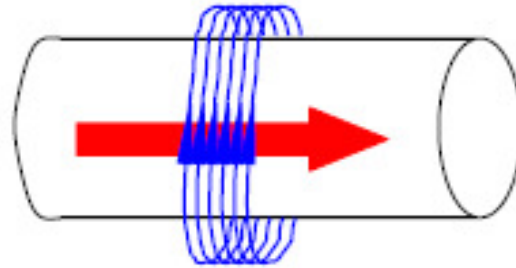


Figura 14 – Magnetização longitudinal.

Magnetização Transversal

A magnetização transversal ou circular é indicada para detecção de descontinuidades paralelas ao eixo principal da peça e em geral pode ser feita com o uso de barras de contato ou de um condutor central, como mostra a figura 15.

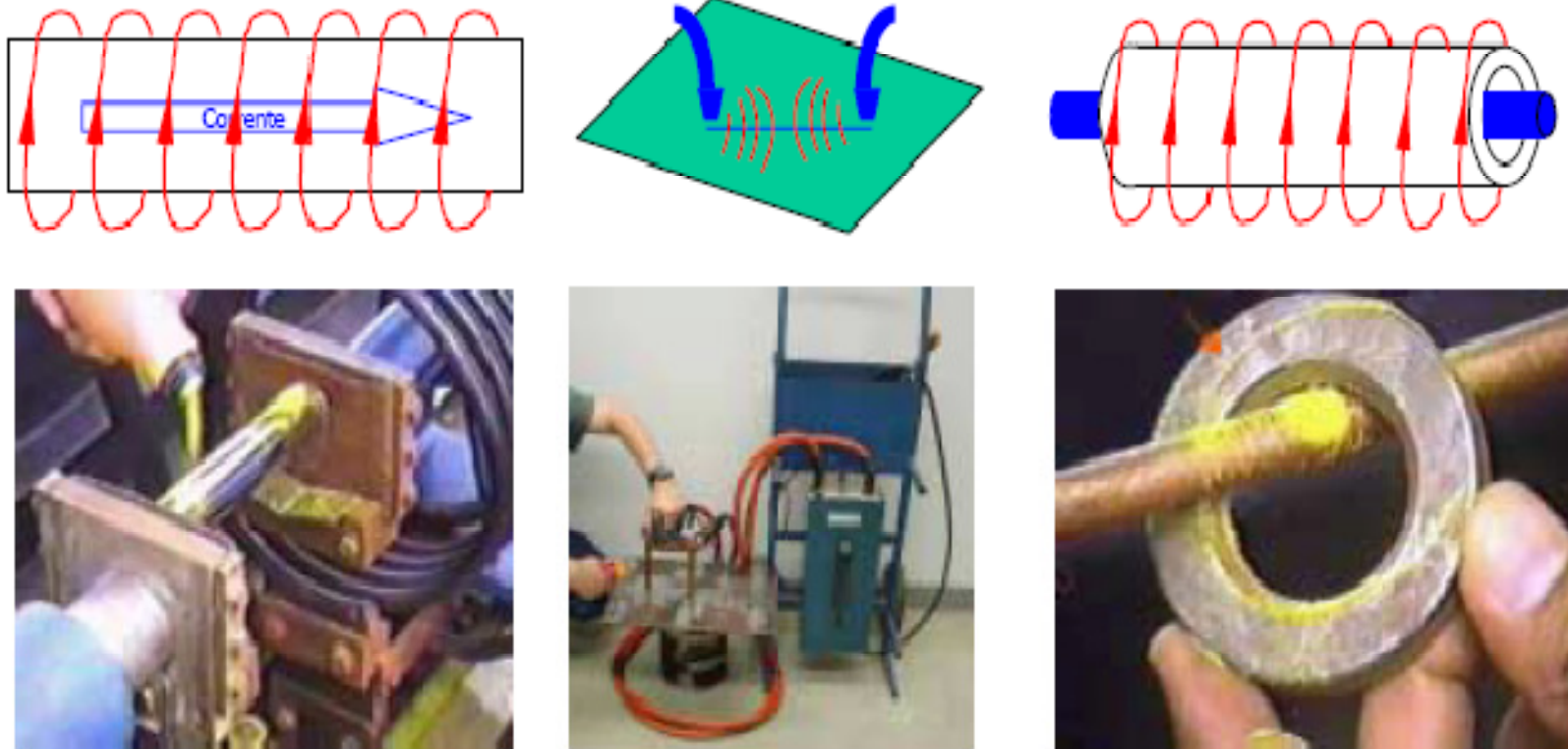


Figura 15 – Magnetização transversal.

Inspeção/ Análise

Uma vez estando a peça corretamente magnetizada e as partículas aplicadas, a peça estará pronta para ser inspecionada sob luz negra. O operador, para sua segurança, não deve olhar diretamente para o foco de luz ultravioleta.

Fazer incidir sobre a área a ser inspecionada, o fecho 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 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.

Permanência do Operador

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/cm²

A luz branca dentro da área de inspeção com partículas fluorescentes, não pode ultrapassar 20 lux.

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. ou quando as peças são aprovadas após a fabricação, são montadas em um conjunto de uma aeronave, onde estão sujeitas a esforços estáticos e dinâmicos bem como variações de temperatura, corrosão 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.

Critérios de Aceitação

Antes de se avaliar as indicações na superfície ensaiada, o inspetor deve ter em mãos e conhecer o critério de aceitação e rejeição que rege o ensaio. Este critério é fornecido por uma norma técnica, manual, boletim ou ordem de serviço elaborada pelo requerente.

Descontinuidades Registráveis

Todas as descontinuidades reprovadas devem ser registradas.

Todas as descontinuidades aprovadas mas que estão no limite de aprovação

Todas as descontinuidades mesmo que aprovadas mas que localizadas em regiões críticas (mudança de geometria, próxima de furos, bordas, regiões com início de corrosão, próximas a marcas de ferramenta e etc..)

Todas as descontinuidades que de alguma forma ofereça algum risco com o decorrer do tempo, mesmo que abaixo do limite de rejeição.

O registro é importante por vários motivos, um deles é permitir que qualquer operador e pessoal da engenharia saiba que existe naquela peça, um motivo de atenção, auxiliando no estudo de evolução de descontinuidades.

Desmagnetização

Em muitas situações é necessária a desmagnetização da peça após a inspeção com partículas magnéticas, pois o magnetismo residual pode ser prejudicial ao funcionamento ou ao uso posterior do material ensaiado. Por exemplo, se a peça vai ser usinada após o ensaio, cavacos de usinagem podem ficar grudados na peça, prejudicando ou até mesmo impedindo a operação.

Desmagnetização

A desmagnetização, em geral, é feita usando-se um campo magnético alternado decrescente com o uso de bobinas de desmagnetização. O campo decrescente pode ser obtido usando-se uma corrente elétrica decrescente ou aumentando-se a distância entre a peça e a bobina, através da movimentação de um ou outro.

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.

Identificação

Depois da limpeza após ensaio, a peça deve ser devidamente identificada através de etiquetas ou por cores que indiquem se ela está aprovada ou rejeitada. O tipo de identificação deve estar descrito no procedimento de ensaio e o operador ou inspetor deverá encaminhar a peça para a operação subsequente, seja a montagem no sistema da aeronave ou uma outra etapa do processo de fabricação.

Nunca esquecer de preencher a ficha de acompanhamento da peça ou lote de peças.

Registrar uma descontinuidade

Quando é necessário registrar uma descontinuidade, adotar o hábito de desenhar as descontinuidades uma a uma, torna-se demorado e impreciso. Pode-se utilizar o desenho da peça para indicar a região das descontinuidades.

Pode-se adotar alguns meios de registro:

- ✓ Líquidos registradores;
- ✓ Fitas adesivas transparentes
- ✓ Fotografias digitais, e
- ✓ Fotografias convencionais.

Elaboração do registro de ensaio

Esta etapa deve ser cumprida, registrando em formulário padronizado, no mínimo estas informações: os documentos aplicáveis; a técnica de ensaio; a identificação do peça; número do lote; ou identificação da aeronave; método e técnica utilizados, tipo e valores da corrente de magnetização, direções de magnetização, resultados obtidos, quantificando, localizando e indicando as dimensões das descontinuidades detectadas; se a peça está aprovada ou rejeitada; o tipo de identificação utilizada na peça; nome do operador, nome do inspetor e datas.

Em se tratando de peça acabada e aprovada, depois da limpeza estará pronta para uso. Quando, porém, tratar-se de peça semi-acabada ou bruta, depois da limpeza estará liberada para o prosseguimento do seu processo de fabricação.

Calibração e Controles

Para assegurar que o ensaio será realizado dentro das condições ideais, deveremos manter alguns controles que garantam a eficiência dos produtos, isoladamente, bem como a eficiência de um sistema de ensaio.

Verificação da performance do sistema

A performance do sistema inclui os equipamento, materiais e iluminação, a serem utilizados, que devem ser verificados antes do início do ensaio ou em intervalos estabelecidos.

Todas as normas utilizadas exigem que todo o sistema de ensaio seja verificado (calibrado) em períodos regulares, e seus resultados mantidos em arquivo.

Segurança



Óculos

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.

Segurança

Luvas



O inspetor deve utilizar durante todo o ensaio, luvas que não interfiram com a facilidade de manuseio do material em ensaio. Mas que protejam da pele do operador contra os produtos utilizados e aos efeitos nocivos da radiação ultravioleta.

Segurança

Lençol de Borracha



Deve-se instalar um tapete de borracha em frente das máquinas, por onde o operador se posiciona durante a magnetização ou inspeção. Isso evita o risco de choques elétricos e danos à peça em caso de queda.

Segurança

Luz Negra



É recomendado que a intensidade de luz negra que incidir sobre a pele não protegida ou olhos não exceda muito o valor de 1.000 m w/cm^2 .

Lâmpadas danificadas ou quebradas devem ser substituídas imediatamente, pois continuam a emitir energia de radiação ultravioleta.

Segurança

Choques Elétricos

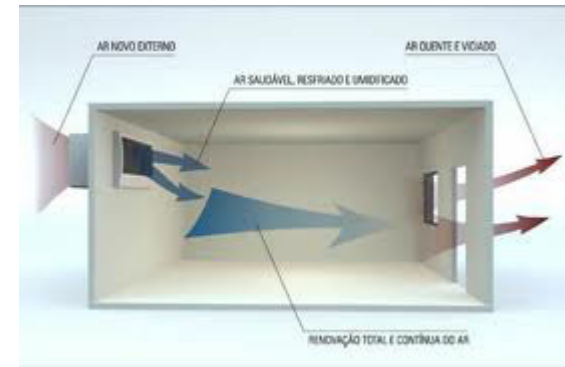


O operador não deve tomar a iniciativa ou ser indicado para a realização de manutenções preventivas ou corretivas na parte elétrica (cabos, fios, conectores, retificadores, fusíveis, etc..), sem antes passar por um treinamento específico.

A manutenção do equipamento deve ser feita por pessoal habilitado, visando evitar ao máximo os perigos de acidentes contra o operador.

Segurança

Renovação de ar



As cabines de inspeção ou máquinas estacionárias envolvidas com tecidos ou plásticos para tornar o ambiente ideal para luz negra, devem contar com ventilação e exaustão para uma perfeita renovação de ar.

Qualificação funcional

Para a realização do ensaio o operador deve ser qualificado. A norma utilizada para a qualificação na área aeronáutica é a NAS 410.

É de responsabilidade da empresa que somente operadores qualificados de acordo com a norma exigida pelo requerente, venham a realizar os ensaios por partículas magnéticas.

Os operadores qualificados devem ter uma ficha de registros, na qual deve constar o nível de qualificação com as datas de validade e dos exames de acuidade visual, assim como os respectivos registros que atestem estes requisitos.

A validade de qualificação para Níveis I e II é de 36 meses.

Próxima Aula

- Ensaio de Ultra-som.