

Rubens Fontana

**Controle Estatístico de Defeitos em Peças Hidráulicas Fundidas**  
**Utilizando Ensaio Não destrutivos como Método Avaliativo**

Trabalho de formatura para  
Graduação na Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

Orientador: Jorge Alberto Soares Tenório

São Paulo

2005

## **Agradecimentos**

Agradeço a todos colaboradores da empresa Voith Siemens Hydro de São Paulo que me orientaram para o desenvolvimento deste trabalho, agregando muito conhecimento durante o período de realização desta etapa da minha vida profissional e acadêmica.

A minha família que sempre me incentivou a seguir em frente mesmo quando os desafios pareciam insuperáveis.

# Índice

1. Introdução.....	1
2. Objetivos do Trabalho.....	2
3. Revisão Bibliográfica.....	2
3.1 Ensaio por Líquido Penetrante .....	3
3.1.1 Generalidades.....	3
3.1.2 Propriedades do Produto e princípios físicos.....	8
3.2 Ensaio por Partículas Magnéticas.....	17
3.2.1 Generalidades.....	17
3.2.2 Propriedades físicas e métodos de magnetização.....	19
3.2.3 Magnetização por passagem de Corrente Elétrica na Peça.....	26
3.2.4 Magnetização por Indução de Campo Magnético.....	29
3.2.5 Desmagnetização.....	31
3.3 Ensaio por Ultra Som <sup>[2]</sup> .....	34
3.3.1 Generalidades.....	34
3.3.2 Princípios Físicos do ensaio por Ultra-som.....	37
3.3.3 Técnicas de Inspeção.....	47
4. Materiais e Métodos .....	49
4.1 Materiais.....	49
4.2 Métodos de Inspeção .....	50
4.2.1 Inspeção por ensaio de líquido penetrante .....	50
4.1.2 Avaliação e aparência das indicações em ensaio por líquido penetrante .....	56
4.1.3 Critérios de Aceitação para ensaio de líquido penetrante .....	58
4.2.4 Método de Inspeção por ensaio de Partículas Magnéticas.....	58
4.2.5 Métodos de Inspeção por ensaio de Ultra-Som.....	65
5 Resultados .....	73
5.1 Apresentação de Resultados.....	73
6- Conclusão.....	79
7- Bibliografia.....	80

## 1. Introdução

Os Ensaios Não Destrutivos - END são ensaios realizados em materiais, acabados ou semi acabados, para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, através de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior.

São utilizadas na fabricação, construções, montagem, inspeção em serviço e manutenção, sendo largamente aplicados em soldas, fundidos, forjados, laminados, plásticos, concreto, entre outros, nos setores petróleo/petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, ferroviário, naval, eletromecânico e automotivo.

Os END incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas.

Os métodos mais usuais de END são: ensaio visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultra-som, radiografia (Raios X e Gama), correntes parasitas, análise de vibrações, termografia, emissão acústica, estanqueidade e análise de deformações.

Comparativamente, podemos afirmar que o "controle da qualidade" que o médico faz de um corpo humano na avaliação da saúde ou da patologia de um paciente, é o mesmo aplicado na indústria, só que para materiais e produtos.

## 2. Objetivos do Trabalho

- 1 – Aprendizado do funcionamento e compreensão dos métodos de ensaios não destrutivos
- 2 – Avaliação dos tipos de defeitos ocorrentes em peças hidráulicas fundidas através dos ensaios não destrutivos
- 3 – Levantamento estatístico da incidência de defeitos nas regiões divididas teoricamente nas peças

## 3. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados os principais testes de ensaios não destrutivos utilizados durante o processo de fabricação de componentes fundidos peças hidráulicas de uma usina hidrelétrica. Os principais testes utilizados na Voith para avaliação de qualidade são: Ensaio por líquido penetrante, ensaio por Partículas Magnéticas e Ensaio de Ultra Som. Os critérios de avaliação de tipo de defeitos e normas internacionais de aceitação serão apresentados também.

## 3.1 Ensaio por Líquido Penetrante

### 3.1.1 Generalidades

#### 3.1.1.1 Introdução

O ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido especialmente para a detecção de descontinuidades essencialmente superficiais, e ainda que estejam abertas na superfície do material. O ensaio por líquidos penetrantes presta-se a detectar descontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, etc. Podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira.

É muito usado em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de titânio, e zircônio, além dos materiais magnéticos. É também aplicado em cerâmica vitrificada, vidro e plásticos.

#### 3.1.1.2 Princípios Básicos

O método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, faz-se sair da descontinuidade o líquido retido através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada sobre a superfície. Podemos descrever o método em seis etapas principais no ensaio, quais sejam:

### a) Preparação da superfície - Limpeza inicial

Antes de se iniciar o ensaio, a superfície deve ser limpa e seca. Não devem existir água, óleo ou outro contaminante. Contaminantes ou excesso de rugosidade, ferrugem, etc, tornam o ensaio não confiável.

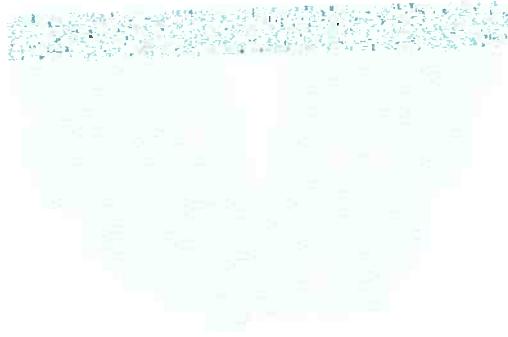


Figura 1-Preparação e limpeza inicial da superfície

### b) Aplicação do Penetrante:

Consiste na aplicação de um líquido chamado penetrante, geralmente de cor vermelha, de tal maneira que forme um filme sobre a superfície e que por ação do fenômeno chamado capilaridade penetre na descontinuidade. Deve ser dado um certo tempo para que a penetração se complete.



Figura 2- Tempo de penetração do líquido na abertura

c) Remoção do excesso de penetrante.

Consiste na remoção do excesso do penetrante da superfície, através de produtos adequados, condizentes com o tipo de líquido penetrante aplicado, devendo a superfície ficar isenta de qualquer resíduo na superfície.

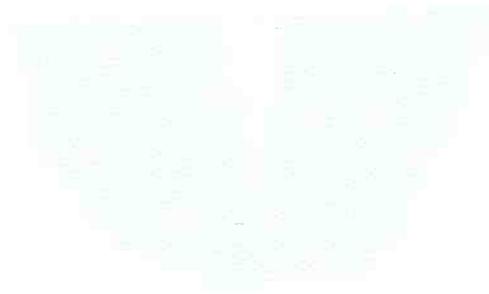


Figura 3 -Remoção do excesso de líquido da superfície

d) Revelação

Consiste na aplicação de um filme uniforme de revelador sobre a superfície. O revelador é usualmente um pó fino (talco) branco. Pode ser aplicado seco ou em suspensão, em algum líquido. O revelador age absorvendo o penetrante das descontinuidades e revelando-as. Deve ser previsto um determinado tempo de revelação para sucesso do ensaio.

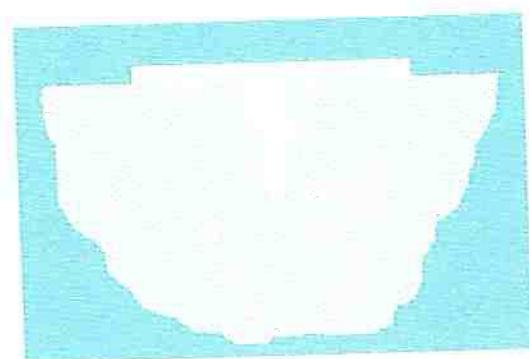


Figura 4- Aplicação do revelador e observação da indicação

#### e) Avaliação e Inspeção

Após a aplicação do revelador, as indicações começam a serem observadas, através da mancha causada pela absorção do penetrante contido nas aberturas, e que serão objetos de avaliação. A inspeção deve ser feita sob boas condições de luminosidade, se o penetrante é do tipo visível (cor contrastante com o revelador) ou sob luz negra, em área escurecida, caso o penetrante seja fluorescente. A interpretação dos resultados deve ser baseada no Código de fabricação da peça ou norma aplicável ou ainda na especificação técnica do Cliente. Nesta etapa deve ser preparado um relatório escrito que mostre as condições do ensaio, tipo e identificação da peça ensaiada, resultado da inspeção e condição de aprovação ou rejeição da peça. Em geral a etapa de registro das indicações é bastante demorada e complexa, quando a peça mostra muitos defeitos. Portanto, o reparo imediato das indicações rejeitadas com posterior reteste, é mais recomendável.

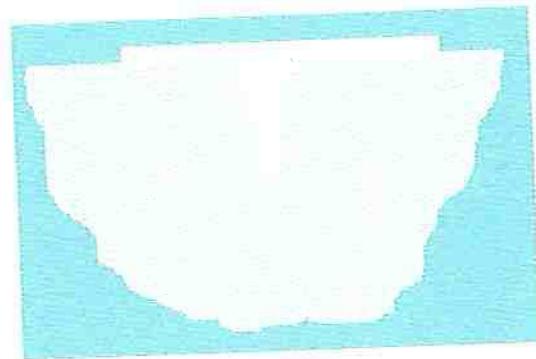


Figura 5 - Absorção do líquido, pelo revelador, de dentro da abertura

#### f) Limpeza pós-ensaio

A última etapa, geralmente obrigatória, é a limpeza de todos os resíduos de produtos, que podem prejudicar uma etapa posterior de trabalho da peça (soldagem, usinagem, etc...).

### 3.1.1.3 Vantagens e Limitações do Ensaio, em Comparaçāo a outros métodos.

#### Vantagens.

Poderíamos dizer que a principal vantagem do método é a sua simplicidade. É fácil de fazer de interpretar os resultados. O aprendizado é simples, requer pouco tempo de treinamento do inspetor. Como a indicação assemelha-se a uma fotografia do defeito, é muito fácil de avaliar os resultados. Em contrapartida o inspetor deve estar ciente dos cuidados básicos a serem tomados (limpeza, tempo de penetração, etc), pois a simplicidade pode se tornar uma faca de dois gumes. Não há limitação para o tamanho e forma das peças a ensaiar, nem tipo de material; por outro lado, as peças devem ser susceptíveis à limpeza e sua superfície não pode ser muito rugosa e nem porosa. O método pode revelar descontinuidades (trincas) extremamente finas (da ordem de 0,001 mm de abertura).

#### Limitações.

Só detecta descontinuidades abertas para a superfície, já que o penetrante tem que entrar na descontinuidade para ser posteriormente revelado. Por esta razão, a descontinuidade não deve estar preenchida com material estranho.

A superfície do material não pode ser porosa ou absorvente já que não haveria possibilidade de remover totalmente o excesso de penetrante, causando mascaramento de resultados.

A aplicāo do penetrante deve ser feita numa determinada faixa de temperatura. Superfícies muito frias (abaixo de 10 °C) ou muito quentes (acima de 52 °C) não são recomendáveis ao ensaio.

Algumas aplicações das peças em inspeção fazem com que a limpeza seja efetuada da maneira mais completa possível após o ensaio (caso de maquinaria para indústria alimentícia, material a ser soldado posteriormente, etc). Este fato pode tornar-se limitativo ao exame, especialmente quando esta limpeza for difícil de fazer.

### **3.1.2 Propriedades do Produto e princípios físicos**

#### **3.1.2.1 Propriedades Físicas do Penetrante**

O nome “penetrante” vem da propriedade essencial que este produto deve ter, ou seja, sua habilidade de penetrar em aberturas finas. Um produto penetrante com boas características deve:

- a) ter habilidade para rapidamente penetrar em aberturas finas;
- b) ter habilidade de permanecer em aberturas relativamente grandes;
- c) não evaporar ou secar rapidamente;
- d) ser facilmente limpo da superfície onde for aplicado;
- e) em pouco tempo, quando aplicado o revelador, sair das descontinuidades onde tinha penetrado;
- f) ter habilidade em espalhar-se nas superfícies, formando camadas finas;
- g) ter um forte brilho (cor ou fluorescente);
- h) a cor ou a fluorescência deve permanecer quando exposto ao calor, luz ou luz negra;
- i) não reagir com sua embalagem nem com o material a ser testado;
- j) não ser facilmente inflamável;

- k) ser estável quando estocado ou em uso;
- l) não ser demasiadamente tóxico;
- m) ter baixo custo.

Para que o penetrante tenha as qualidades acima, é necessário que certas propriedades estejam presentes. Dentre elas destacam-se:

a) Viscosidade.

Esta propriedade por si só não define um bom ou mal penetrante (quando falamos em bom ou mal penetrante nos referimos a sua habilidade em penetrar nas descontinuidades). A intuição nos diz que um líquido menos viscoso seria melhor penetrante que um mais viscoso. Isto nem sempre é verdadeiro, pois a água que tem baixa viscosidade não é um bom penetrante. Todavia, a viscosidade tem efeito em alguns aspectos práticos do uso do penetrante. Ele é importante na velocidade com que o penetrante entra num defeito. Penetrantes mais viscosos demoram mais a penetrar nas descontinuidades. Penetrantes pouco viscosos têm a tendência de não permanecerem muito tempo sobre a superfície da peça, o que pode ocasionar tempo insuficiente para penetração.

b) Tensão superficial.

A força que existe na superfície de líquidos em repouso é denominada tensão superficial. Esta tensão superficial é devida às fortes ligações intermoleculares, as quais dependem das diferenças elétricas entre as moléculas, e pode ser definida como a força por unidade de comprimento ( N/m) que duas camadas superficiais exercem uma sobre a outra. Este efeito é bem intenso na água e no mercúrio, por exemplo, e pode ser percebido

também com a ajuda de outro fenômeno: a capilaridade. Quando um líquido é colocado em um tubo capilar (tubo muito fino), a atração entre as moléculas do líquido e as moléculas do material do tubo podem ser maiores ou menores do que a força de coesão interna do líquido, ocasionando desta forma a formação de uma concavidade (a) ou uma convexidade (b) na superfície do líquido, forma que apenas pode ser obtida devido ao efeito de tensão superficial nos líquidos.

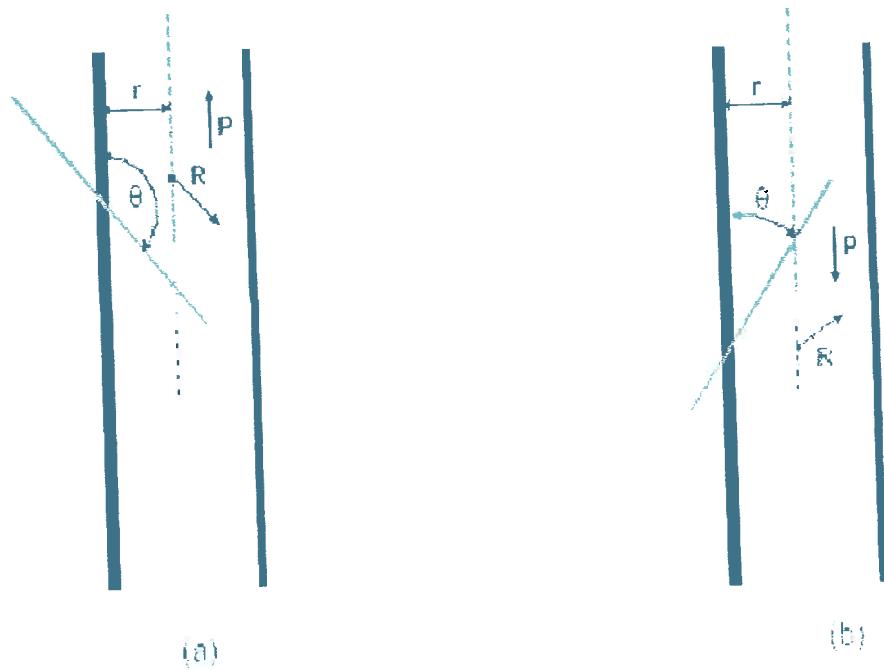


Figura 7- Concavidade e convexidade na superfície do líquido

As forças que envolvem o efeito da tensão superficial são aquelas associadas com a ação de capilaridade ou *pressão de superfície* ( $P$ ) dada pela fórmula:

$$P = \frac{2\gamma}{R} \text{, onde } \gamma \text{ é a tensão superficial}$$

Observem que na figura acima ( $\alpha$ ) o líquido penetra no tubo capilar mostrando uma forma côncava formando um ângulo “ $\theta$ ” de contato com as paredes do tubo maior que 90° e no caso da figura ( $\beta$ ) o líquido penetra no tubo capilar mostrando uma forma convexa formando um ângulo “ $\theta$ ” de contato com as paredes do tubo menor que 90°. Como o  $\cos(\theta) = r/R$ , podemos reescrever a equação da pressão na seguinte forma:

$$P = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\theta)}{r}$$

Podemos observar que a pressão de capilaridade (P) aumenta diretamente com a tensão superficial ( $\gamma$ ) do penetrante e inversamente proporcional ao raio do tubo capilar (r). Portanto, quanto maior a tensão superficial, melhor a propriedade de capilaridade do líquido penetrante

Tensão Superficial $\gamma$ (N.m <sup>-1</sup> )	Raio do Tubo Capilar r	Pressão Capilar - P (Pa)
0.025	1,0 mm	50
0.035	1,0 mm	70
0.025	0,1 mm	500
0.035	0,1 mm	700
0.025	0,01 mm	5000
0.035	0,01 mm	7000
0.025	1 um	50000
0.035	1 um	70000

Fonte: Handbook - Liquid Penetrant Testing, Part 1

Tabela1- Variação da Pressão Capilar e a Tensão Superficial

### c) Molhabilidade

É a propriedade que um líquido tem em se espalhar por toda a superfície, não se juntando em porções ou gotas. Melhor a molhabilidade, melhor o penetrante. Essa característica também está associada à tensão superficial e é por isso que agentes tensoativos são incluídos na formulação do penetrante.

### d) Volatilidade

Podemos dizer, como regra geral, que um penetrante não deve ser volátil, porém devemos considerar que para derivados de petróleo, quanto maior a volatilidade, maior a viscosidade. Como é desejável uma viscosidade média, os penetrantes são mediamente voláteis. A desvantagem é que quanto mais volátil o penetrante, menos tempo de penetração pode ser dado. Por outro lado, ele tende a se volatilizar quando no interior do defeito.

### e) Ponto de fulgor

Ponto de fulgor é a temperatura na qual há uma quantidade tal de vapor na superfície do líquido que a presença de uma chama pode inflamá-lo. Um penetrante bom deve ter um alto ponto de fulgor (acima de 200°C). A tabela 2 mostra os pontos de fulgor de alguns líquidos, para comparação. Esta propriedade é importante quando considerações sobre a segurança estão relacionadas à utilização do produto.

LÍQUIDO	Ponto de Fulgor
Acetona	-18°C
Nafta	-1°C
Álcool metílico	12°C
Álcool etílico	14°C
Glicerina	160°C

Tabela 2 - Pontos de fulgor de alguns líquidos

#### f) Inércia química

É óbvio que um penetrante deve ser inerte e não corrosivo com o material a ser ensaiado ou com sua embalagem quanto possível. Os produtos oleosos não apresentam perigo. A exceção é quando existem emulsificantes alcalinos. Quando em contato com água vai se formar uma mistura alcalina. Numa inspeção de alumínio ou magnésio, caso a limpeza final não seja bem executada, pode haver aparecimento após um certo período de corrosão na forma de “pitting”. Quando se trabalha com ligas à base de níquel, requer-se um penetrante com baixos teores de alguns elementos prejudiciais.

#### g) Habilidade de dissolução

Os penetrantes incorporam o produto corante ou fluorescente que deve estar o mais possível dissolvido. Portanto, um bom penetrante deve ter a habilidade de manter dissolvidos estes agentes.

#### h) Toxidez

Evidentemente um bom penetrante não pode ser tóxico, possuir odor exagerado e nem causar irritação na pele.

### 3.1.2.2 Sensibilidade do Penetrante

Sensibilidade do penetrante é sua capacidade de detectar descontinuidades. Podemos dizer que um penetrante é mais sensível que outro quando, para aquelas descontinuidades em particular, o primeiro detecta melhor os defeitos que o segundo.

Os fatores que afetam a sensibilidade são:

- a) Capacidade de penetrar na descontinuidade
- b) Capacidade de ser removido da superfície, mas não do defeito
- c) Capacidade de ser absorvido pelo revelador
- d) Capacidade de ser visualizado quando absorvido pelo revelador, mesmo em pequenas quantidades.

Os líquidos penetrantes devem se analisados quanto aos teores de contaminantes, tais como enxofre, flúor e cloro quando sua aplicação for efetuada em materiais inoxidáveis austeníticos, titânio e ligas a base de níquel. O procedimento e os limites aceitáveis para estas análises, devem ser de acordo com a norma aplicável de inspeção do material nsaiado.



Figura 8- Tipos usuais de penetrantes

### 3.1.2.3 Propriedades do Revelador

Um revelador com boas características , deve:

- a) ter ação de absorver o penetrante da descontinuidade ;
- b) servir com uma base por onde o penetrante se espalhe - granulação fina ;
- c) servir para cobrir a superfície evitando confusão com a imagem do defeito formando uma camada fina e uniforme;
- d) deve ser facilmente removível;
- e) não deve conter elementos prejudiciais ao operador e ao material que esteja sendo inspecionado;

Classificam-se os reveladores conforme segue:

- a) pós secos.

Foram os primeiros e continuam a ser usados com penetrantes fluorescentes. Os primeiros usados compunham-se de talco ou giz. Atualmente os melhores reveladores consistem de uma combinação cuidadosamente selecionada de pós.

Os pós devem ser leves e fofos. Devem aderir em superfícies metálicas numa camada fina, se bem que não devem aderir em excesso, já que seriam de difícil remoção. Por outro lado, não podem flutuar no ar, formando uma poeira. Os cuidados devem ser tomados para proteger o operador. A falta de confiabilidade deste tipo de revelador, torna o seu uso muito restrito.

### b) Suspensão aquosa de pó

Geralmente usado em inspeção pelo método fluorescente. A suspensão aumenta a velocidade de aplicação quando pelo tamanho da peça pode-se mergulha-la na suspensão. Após aplicação a peça é seca em estufa, o que diminui o tempo de secagem. É um método que pode se aplicar quando usa-se inspeção automática. A suspensão deve conter agentes dispersantes, inibidores de corrosão, agentes que facilitam a remoção posterior.

### c) Solução aquosa

A solução elimina os problemas que eventualmente possam existir com a suspensão (dispersão, etc). Porém, materiais solúveis em água geralmente não são bons reveladores. Deve ser adicionado à solução inibidor de corrosão e a concentração deve ser controlada, pois há evaporação. Sua aplicação , deve ser feita através de pulverização.

### d) Suspensão do pó revelador em solvente

É um método muito efetivo para se conseguir uma camada adequada (fina e uniforme) sobre a superfície. Como os solventes volatilizam rapidamente, existe pouca possibilidade de escorrimento do revelador até em superfícies em posição vertical. Sua aplicação, deve ser feita através de pulverização. Os solventes devem evaporar rapidamente e ajudar a retirar o penetrante das descontinuidades dando mais mobilidade a ele. Exemplos de solventes são: álcool, solventes clorados (não inflamáveis). O pó tem normalmente as mesmas características do método de pó seco. Os reveladores ,devem se analisados quanto aos teores de contaminantes, tais como enxofre, flúor e cloro , quando sua aplicação for efetuada em materiais inoxidáveis austeníticos, titânio e ligas a base de níquel. O

procedimento e os limites aceitáveis para estas análises, devem ser de acordo com a norma aplicável de inspeção do material ensaiado.



Figura 9 - Resultado do ensaio por líquidos penetrantes de uma peça fundida

## 3.2 Ensaio por Partículas Magnéticas

### 3.2.1 Generalidades

#### 3.2.1.1 Introdução

O método de ensaio está baseado na geração de um campo magnético que percorre toda a superfície do material ferromagnético. As linhas magnéticas do fluxo induzido no material desviam-se de sua trajetória ao encontrar uma descontinuidade superficial ou sub-superficial, criando assim uma região com polaridade magnética, altamente atrativa à partículas magnéticas. No momento em que se provoca esta magnetização na peça, aplica-

se as partículas magnéticas por sobre a peça que serão atraídas à localidade da superfície que conter uma descontinuidade formando assim uma clara indicação de defeito

### 3.2.1.2 Descrição e aplicabilidade do método

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

O processo consiste em submeter a peça, ou parte desta, a um campo magnético. Na região magnetizada da peça, as descontinuidades existentes, ou seja a falta de continuidade das propriedades magnéticas do material, irão causar um campo de fuga do fluxo magnético. Com a aplicação das partículas ferromagnéticas, ocorrerá a aglomeração destas nos campos de fuga, uma vez que serão por eles atraídas devido ao surgimento de pólos magnéticos. A aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão da extensão da descontinuidade.

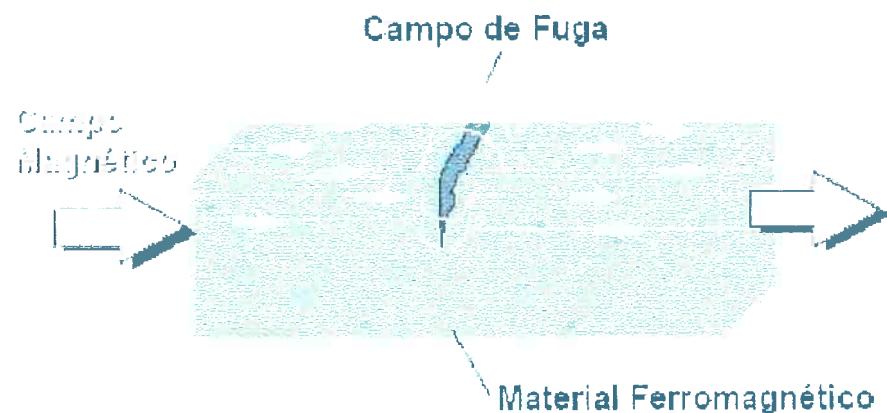


Figura 10- Campo de fuga em materiais ferromagnéticos

Verificamos na prática que, para ocorrer um campo de fuga adequado na região das descontinuidades, a intensidade de campo, deve atingir valores adequados e as linhas de força devem ser o mais perpendicular possível ao plano da descontinuidade, caso contrário não será possível o acúmulo das partículas de forma nítida.

Alguns exemplos típicos de aplicações são fundidos de aço ferrítico, forjados, laminados, extrudados, soldas, peças que sofreram usinagem ou tratamento térmico (porcas e parafusos), trincas por retífica e muitas outras aplicações em materiais ferrosos

### 3.2.2 Propriedades físicas e métodos de magnetização

#### 3.2.2.1 Magnetização Longitudinal

É assim denominado o método de magnetização que produz um campo magnético longitudinal da peça e fechando o circuito através do ar. Portanto, recomendamos para a detecção de descontinuidades transversais na peça. A magnetização longitudinal é obtida por indução de campo por bobinas ou eletroimãs.

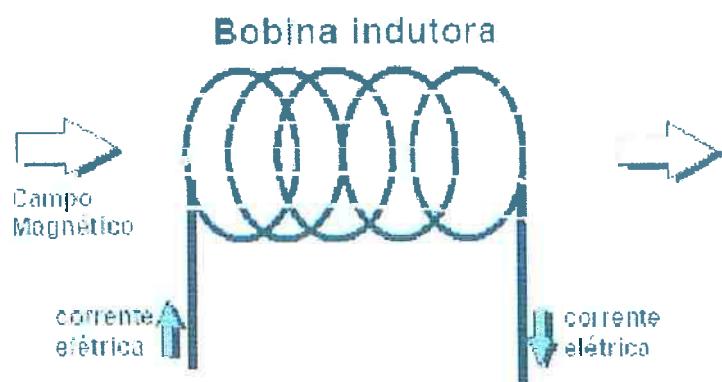


Figura 11 – Passagem d campo magnético em bobinas indutoras

### 3.1.1.2 Magnetização Circular

Neste método, que pode ser tanto por indução quanto por passagem de corrente elétrica através da peça, as linhas de força que formam o campo magnético circulam através da peça em circuito fechado, não fazendo uma “ponte” através do ar. É usada para a detecção de descontinuidades longitudinais.

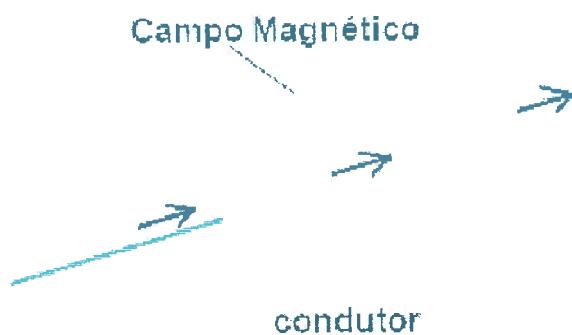


Figura 12- Método de magnetização circular, por passagem de corrente elétrica por um condutor

### 3.2.2.3 Magnetização Multidirecional:

Também conhecida como combinada ou vetorial, é um método em que simultaneamente são aplicados na peça dois ou mais campos magnéticos: um pelo método longitudinal e o outro pelo método circular ou ainda campos circulares em várias direções. É portanto a combinação de duas técnicas que produzem um vetor rotativo, que permite observar, de uma só vez, as descontinuidades com diversas orientações. Algumas normas recomendam o uso de corrente trifásica retificada de onda completa para magnetização nesta técnica.

As vantagens dessa técnica são:

- Na inspeção de componentes seriados onde se reduz substancialmente o tempo de inspeção;
- Economia de partículas magnéticas;
- Cada peça ou componente é manuseado apenas uma vez;
- Menor possibilidade de erros por parte do inspetor, uma vez que, observa-se ao mesmo tempo, tanto as descontinuidades longitudinais quanto as transversais.
- Rapidez no ensaio por partículas magnéticas
- Grande produtividade

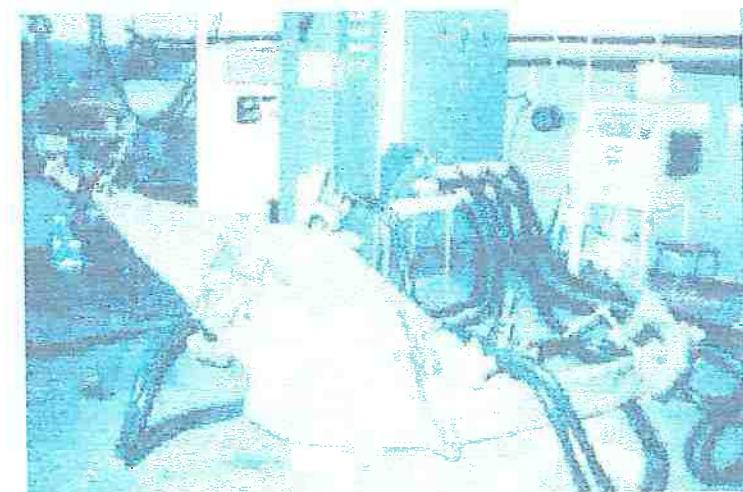


Figura 13 - Máquina para ensaio por partículas magnéticas de uma peça fundida para indústria hidrelétrica, usando a técnica multidirecional.

Podemos concluir que a magnetização simultânea possibilita menor tempo de execução trazendo como benefício maior produção. Contudo, é limitada pelo ajuste da intensidade dos campos magnéticos que é necessário para obtenção de uma resultante capaz de detectar adequadamente as descontinuidades nas duas direções da peça em ensaio, descontinuidades longitudinais e transversais.

Na prática este ajuste é conseguido realizando testes com peças ou corpos de prova contendo defeitos conhecidos. No entanto, ressaltamos que a magnetização simultânea apresenta resultados mais confiáveis na detecção de descontinuidades de diferentes direções. A sua desvantagem é que aumenta mais uma etapa no ensaio.



Figura 14 -Ensaio de uma peça pela técnica de magnetização multidirecional

#### 3.2.2.4 Técnicas de Magnetização

Mencionamos que podemos obter campos magnéticos por diversas técnicas, contudo, o processo de magnetização só é obtido através de indução de campo magnético ou por indução de corrente elétrica. Dizemos que há indução de campo quando o campo magnético gerado na peça é induzido externamente. Já no processo de magnetização por passagem de corrente, a peça em inspeção faz parte do circuito elétrico do equipamento de magnetização, isto é, a corrente de magnetização, circula pela própria peça. É por esta razão que recomenda-se bastante cuidado na utilização da técnica de magnetização por passagem de corrente, pois poderá ocorrer a abertura de um arco elétrico nos pontos de entrada e saída de corrente, queimando a peça nesta região, o que, em se tratando de peça acabada, pode ser inaceitável, ou mesmo poderá representar risco de explosão ou incêndio se no ambiente houver gases ou vapores inflamáveis.

### 3.2.2.5 Tipos de Corrente Elétrica Utilizada:

As correntes elétricas utilizadas na magnetização para inspeção por partículas magnéticas poderão ser das mais variadas fontes existentes, como segue:

- corrente contínua (CC): somente obtida através de baterias, e que na prática não é aplicável em processos industriais

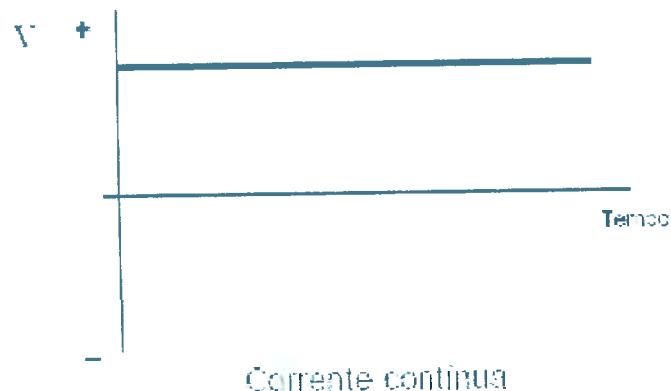


Figura 15 – corrente x tempo em corrente contínua

- corrente alternada (AC): usada para detecção de descontinuidades superficiais. A corrente alternada, devido ao ciclo alternado da corrente, promove maior mobilidade às partículas, tem pouca penetração, as linhas de força são mais concentradas na superfície e portanto é mais recomendada para a detecção de descontinuidades superficiais;

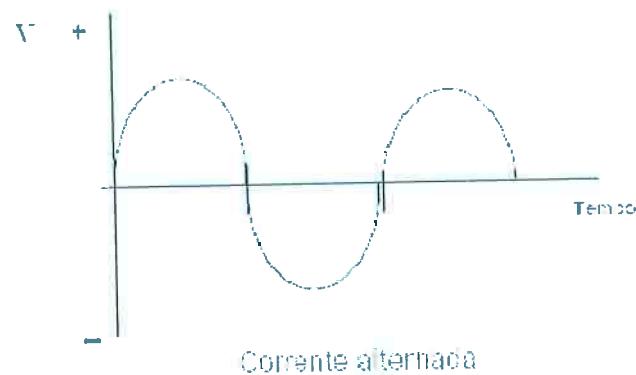


Figura 16- Corrente x tempo em corrente alternada

- corrente alternada retificada de meia onda: usada para detecção de descontinuidades sub-superficiais, o que na prática representa poucos milímetros de profundidade. O uso de algumas técnicas pode representar até 6 a 10 mm de profundidade .

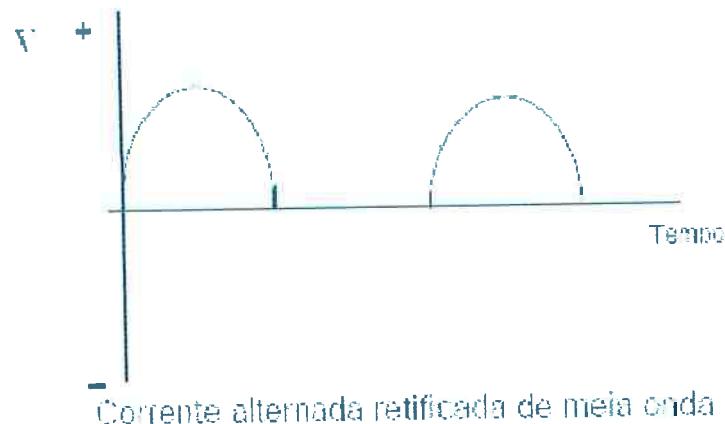


Figura 17- Corrente x tempo em corrente alternada retificada de meia onda

- Corrente Alternada Retificada de Onda Completa : usada para detecção de descontinuidades sub-superficiais, o que na prática representa poucos milímetros de profundidade. O uso de algumas técnicas pode representar até 12 mm de profundidade .

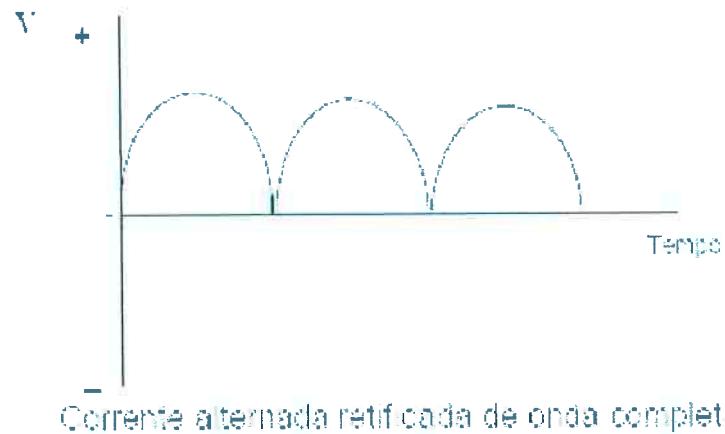
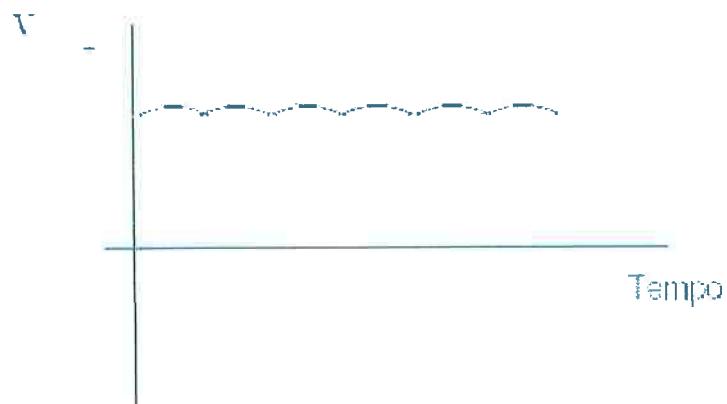


Figura 18- Corrente x tempo em corrente alternada retificada de meia completa

- Corrente trifásica : pode ser utilizada na forma retificada de meia onda ou onda completa. A corrente elétrica trifásica retificada de onda completa é a que mais se aproxima às características de uma corrente contínua.



Corrente Alternada trifásica retificada de onda completa

Figura 19- Corrente x tempo em corrente alternada trifásica retificada onda completa

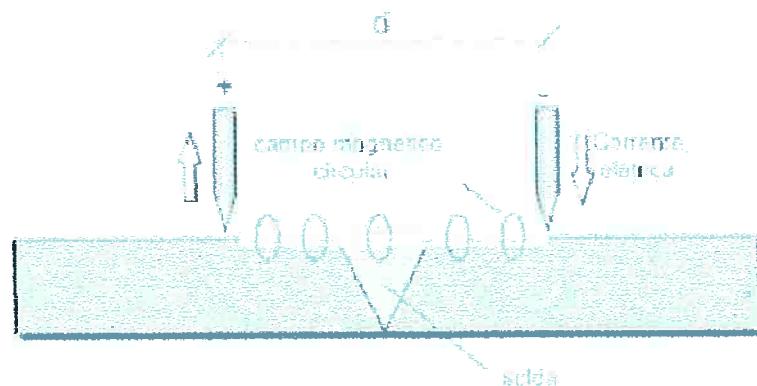
As correntes elétricas alternadas, anteriormente mencionadas, poderão ser ainda obtida na forma monofásica ou trifásica o que representa diferenças no rendimento do sistema de inspeção.

### 3.2.3 Magnetização por passagem de Corrente Elétrica na Peça

É a técnica de magnetização, em que a corrente circula pela peça, onde temos as técnicas de eletrodos e de contato direto.

#### 3.2.3.1 Técnica dos Eletrodos

É a técnica de magnetização pela utilização de eletrodos, também conhecidas como pontas que quando apoiadas na superfície da peça, permitem a passagem de corrente elétrica pela peça. O campo magnético criado é circular. Esta técnica é geralmente aplicada em peças brutas fundidas, em soldas, nas indústrias de siderurgia, caldeiraria e outros



Técnica de inspeção por Eletrodos

Figura 20 – Técnicas de inspeção por eletrodo

A técnica dos eletrodos induz um campo magnético que é dependente da distância entre os eletrodos e a corrente elétrica que circula por eles. Em geral estes valores são tabelados e disponíveis nas normas técnicas de inspeção aplicáveis ao produto ensaiado.

Como referência, podemos citar que para o Código ASME Sec.V Art.7, os valores de corrente elétrica a ser aplicada na peça devem estar entre os valores seguintes:

#### Limitação da Corrente Elétrica na Técnica de Eletrodos

Espessura da peça	Corrente Elétrica aplicada por polegada de espaçamento entre os eletrodos
< 1 pol. (19 mm)	mínimo de 90 até 110 A/pol.
≥ 3 pol	mínimo de 100 até 125 A/pol.

Fonte: Código ASME Sec. V Art. 7

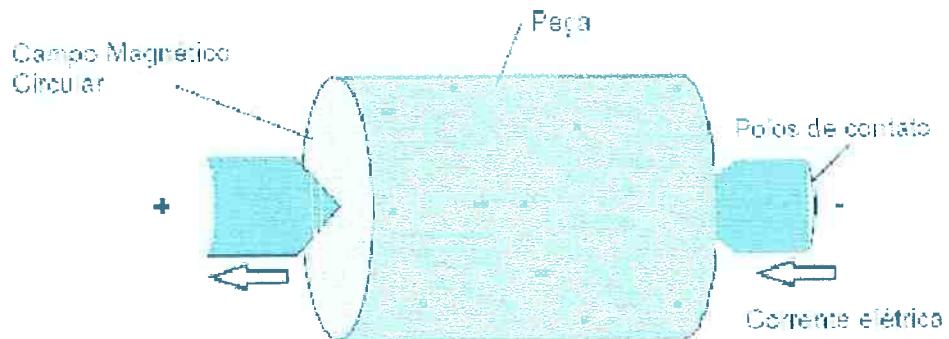
Tabela 3- Limitação de Corrente elétrica da Técnica de Eletrodos

O espaçamento entre os eletrodos não deve ultrapassar a 8 polegadas. Espaçamentos menores podem ser utilizados para acomodar limitações geométricas na área que está sendo examinada, porém espaçamentos menores que 3 polegadas devem ser evitados. Os pólos de contato dos eletrodos devem estar limpos.

#### 3.2.3.2 Técnica de Contato Direto

Também conhecida como magnetização por placas ou cabeçotes de contato. Devido sua aplicação maior ser através de máquinas estacionárias, é definida como sendo a técnica de magnetização pela passagem de corrente elétrica de extremidade a extremidade da peça. O campo magnético formado é circular. Esta técnica se difere da técnica por eletrodos

descrita, pois é aplicável em sistemas de inspeção automáticos ou semi-automáticos, para inspecionar barras, eixos, parafusos, principalmente nas indústrias automobilísticas ou em fabricas de produtos seriados de pequeno porte.



Técnica de inspeção por Contato Direto

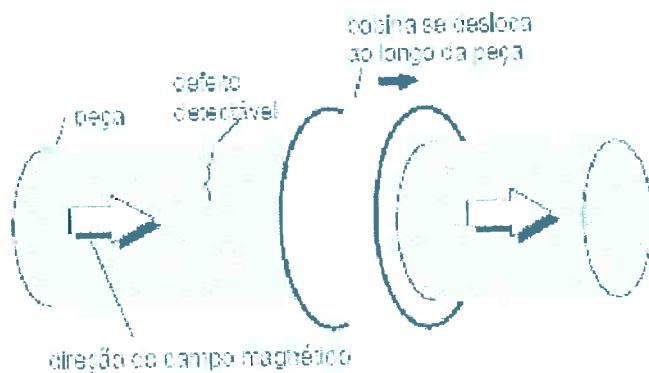
Figura 21- Técnica de Inspeção por contato direto

Nesta técnica, corrente elétrica contínua ou alternada poderão ser utilizadas, sendo recomendado pelo Código ASME Sec.V Art.7 uma limitação de 300 até 800 Ampéres/ pol. de diâmetro externo quando a geometria for redonda. Outras limitações de corrente elétrica podem ser requeridas, dependendo da norma ou especificação aplicáveis na inspeção. Para peças outras que não redondas, a corrente elétrica pode ser determinada pelo diâmetro maior da peça na seção perpendicular ao fluxo da corrente elétrica. Se os níveis de corrente elétrica não podem ser obtidos por limitações técnicas dos equipamentos utilizados, então deve ser empregado o padrão indicativo de campo magnético para certificação de que a máxima corrente elétrica aplicada é satisfatória.

### 3.2.4 Magnetização por Indução de Campo Magnético

#### 3.2.4.1 Técnica da Bobina:

Nessa técnica a peça é colocada no interior de uma bobina ou solenóide, ocorrendo um campo longitudinal na peça. A bobina ou solenóide é formada por um enrolamento de fios condutores da corrente elétrica alternada ou contínua, que originam o campo magnético de intensidade que dependerá da corrente elétrica que passa pela bobina e o número de voltas que o enrolamento da bobina foi formado (ampères-volta)



Técnica de inspeção por Bobina ou Solenóide

Figura 22- Técnica de Inspeção por bobina solenoide

Para peças onde a razão  $L/D$ , onde  $L$  é o comprimento da peça sendo no máximo 18 polegadas e  $D$  o seu diâmetro, for maior ou igual a 4 , a intensidade do campo pode ser calculada através da fórmula:

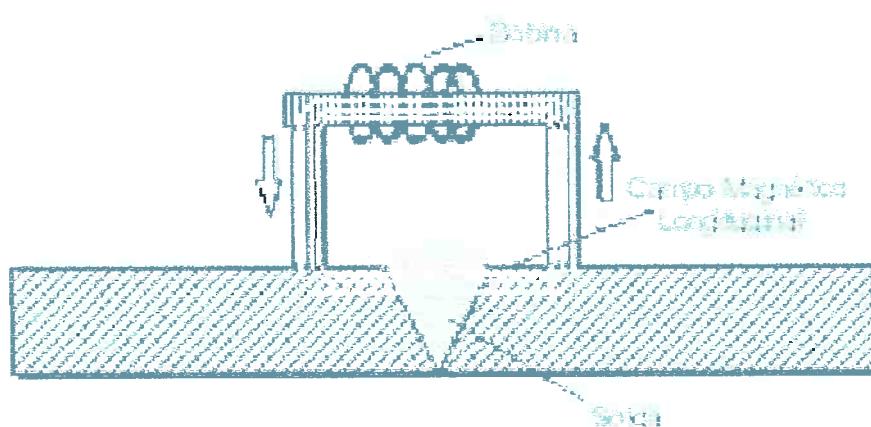
$$\text{Ampére-volta} = 35000 / (L/D) + 2 (+ 10\%)$$

(fonte: ASME Sec.V Art.7 )

(Para peças não cilíndricas, D deve ser a máxima seção transversal da peça.)

### 3.2.4.2 Técnica do Ioque ou Yoke

É a técnica de magnetização pela indução em campo magnético, gerado por um eletroimã, em forma de "U" invertido, que é apoiado na peça a ser examinado. Pelo eletroimã circula a corrente elétrica alternada ou contínua. É gerada na peça um campo magnético paralelo a linha imaginária que une as duas pernas do Yoke .



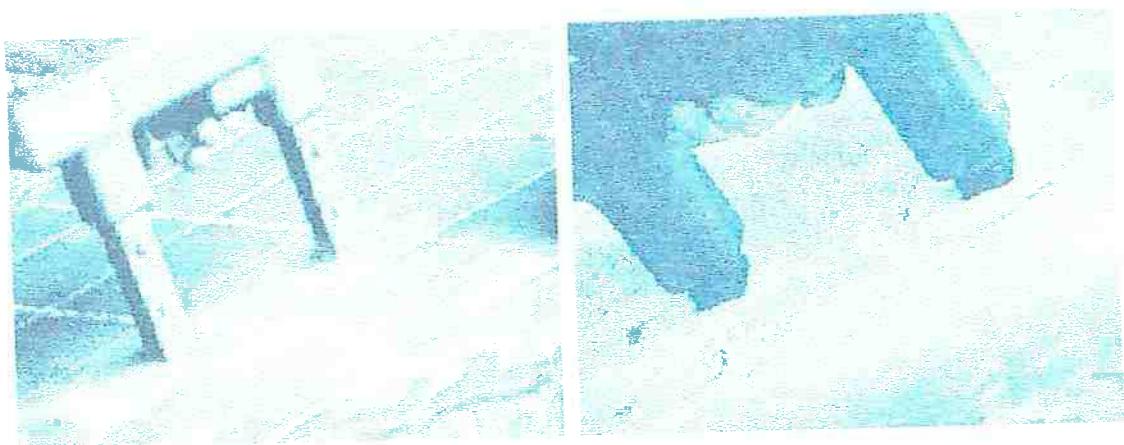
Técnica de inspeção por Yoke eletromagnético.

Figura 23- Técnica de Inspeção por Yoke eletromagnético

Os ioques produzem campos magnéticos longitudinais, podendo ser de pernas fixas ou de pernas articuláveis, conhecidos como Ioques de pernas articuladas. Os de pernas articuláveis são mais eficientes por permitirem uma série de posições de trabalho com garantia de um bom acoplamento dos pólos magnéticos. A sua vantagem está em não aquecer os pontos de contato, já que a técnica usa corrente elétrica magnetizante que flui pelo enrolamento da bobina do Ioque, e não pela peça.

A recomendação básica de algumas normas para calibração deste equipamento é que o campo magnético formado na região de interesse definida como área útil, esteja entre

os valores de 17 a 65 A/cm. Para simplificar e permitir a comprovação periódica da intensidade do campo magnético durante os trabalhos de campo é estabelecido nas normas, que a verificação da força de magnetização do Yoke pode ser comprovada através de sua capacidade mínima de levantamento de massa calibrada equivalente a 4,5 kg (10 lb) de aço, no máximo espaçamento entre os pólos a ser utilizado em corrente alternada e de 18,1 kg (40 lb) em corrente elétrica contínua ( fonte: ASME Sec. V Art.7) . Estes limites apresentados para o teste de levantamento de peso pode ser alterado dependendo da especificação ou norma aplicável. Por exemplo a norma ASTM E-709 estabelece outros limites, assim como a norma Petrobras N-1598



Magnetização utilizando o YOKE

Figura 24- Inspeção através de magnetização por Yoke eletromagnético

### 3.2.5 Desmagnetização

Verificamos que alguns materiais, devido as suas propriedades magnéticas, são capazes de reter parte do magnetismo após a interrupção da força magnetizante. Conforme a aplicação subsequente destes materiais, o magnetismo residual ou remanescente poderá criar problemas, sendo necessário a desmagnetização da peça. <sup>[6]</sup>

Podemos resumir as razões para desmagnetização de uma peça como sendo:

· Interferência nos processos de Usinagem:

Uma peça com magnetismo residual poderá interferir nos processos futuros de usinagem, pois o magnetismo da peça induzirá a magnetização das ferramentas de corte afetando o acabamento da peça. A retenção de limalha e partículas contribuirá para a perda do fio de corte da ferramenta.

· Interferência nos processos de Soldagem:

A interferência em operação de soldagem se faz sentir com a deflexão do arco elétrico, desviando-o da região de soldagem, interferência conhecida como sopro magnético, que prejudicará em muito o rendimento e a qualidade da solda.

· Interferência com Instrumentos de Medição:

O mecanismo residual interfere com instrumentos sensíveis de medição ou navegação, colocando em risco a operação dos equipamentos uma vez que, as leituras obtidas não correspondem à realidade. Há registros de acidentes aéreos por interferências de campos magnéticos de trens de pouso nos instrumentos de navegação da aeronave.

Portanto, em razão destas interferências acima descritas, em alguns casos existem necessidades de desmagnetização das peças através da passagem destas por campos magnéticos alternados e decrescentes. Geralmente a passagem das peças por bobinas magnetizadas, são suficientes. Quando peças ou equipamentos serão submetidos a tratamento térmico, estas não necessitam de serem desmagnetizadas, pois a temperatura elevada será capaz de remover o magnetismo residual. Esta temperatura é denominada **ponto Curie**, a tabela abaixo mostra este valor de temperatura para alguns materiais:

Material	Ponto Curie °C
Níquel	372
Ferro ouro	774
Cobalto	1.131

Fonte: ABM - Aços Duros e Aços Liga - Chaveiro

Tabela 4 – Ponto de Curie em alguns materiais

Quando elevamos a temperatura de um material acima da temperatura Curie, o comportamento destes passam a ser paramagnético. A temperatura Curie depende da liga do material.

A desmagnetização é dispensável quando:

- a) Os materiais possuem baixa retentividade;
- b) As peças forem submetidas a tratamento térmico. As peças de aço que estiverem magnetizadas, ao atingir a temperatura de 750° C, chamado ponto Curie, perdem a magnetização;
- c) As peças forem novamente magnetizadas.

### 3.2.5.1 Técnicas de desmagnetização <sup>[4]</sup>

São várias as técnicas de desmagnetização sendo que todas são baseadas no princípio de que, submetendo a peça a um campo magnético que é continuamente invertido e gradualmente reduzindo a zero, após um determinado período e um número de ciclos, a peça será desmagnetizada. Isto pode ser obtido fazendo a peça passar pelo interior de bobinas percorridas por corrente alternada.

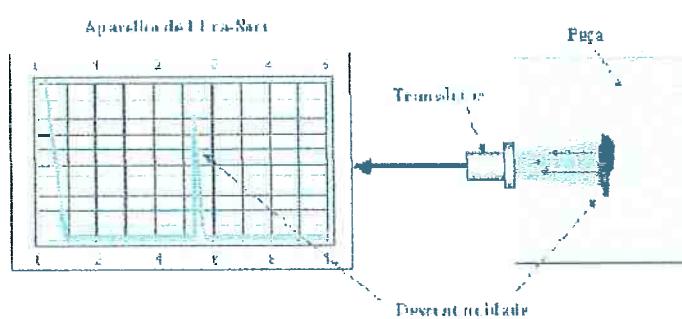
### 3.3 Ensaio por Ultra Som [2]

#### 3.3.1 Generalidades

##### 3.3.1.1 Introdução

Como sabemos, os sons produzidos em um ambiente qualquer, refletem-se ou reverberam nas paredes que consistem o mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes. Fenômenos como este apesar de simples e serem freqüentes em nossa vida cotidiana constituem os fundamentos do ensaio ultra-sônico de materiais. No passado, testes de eixos ferroviários, ou mesmos sinos, eram executados através de testes com martelo, em que o som produzido pela peça, denunciava a presença de rachaduras ou trincas grosseiras pelo som característico.

Assim como uma onda sonora reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico refletirá da mesma forma, ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou 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 especiais, detectamos as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades.



Princípio Básico da Inspeção de Materiais por ultra som

Figura 25- Inspeção por ensaio de ultra-som

### 3.3.1.2 Princípios Básicos

Detecta descontinuidades internas em materiais, baseando-se no fenômeno de reflexão de ondas acústicas quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material.

Um pulso ultra-sônico é gerado e transmitido através de um transdutor especial, encostado ou acoplado ao material. Os pulsos ultra-sônicos refletidos por uma descontinuidade, ou pela superfície oposta da peça, são captados pelo transdutor, convertidos em sinais eletrônicos e mostrados na tela LCD ou em um tubo de raios catódicos (TRC) do aparelho.

Os ultra-sons são ondas acústicas com freqüências acima do limite audível. Normalmente, as freqüências ultra-sônicas situam-se na faixa de 0,5 a 25 MHz.

Geralmente, as dimensões reais de um defeito interno podem ser estimadas com uma razoável precisão, fornecendo meios para que a peça ou componente em questão possa ser aceito, ou rejeitado, baseando-se em critérios de aceitação da certa norma aplicável. Utiliza-se ultra-som também para medir espessura e determinar corrosão com extrema facilidade e precisão.

As aplicações deste ensaio são inúmeras: soldas, laminados, forjados, fundidos, ferrosos e não ferrosos, ligas metálicas, vidro, borracha, materiais compostos, tudo permite ser analisado por ultra-som. Industria de base (usinas siderúrgicas) e de transformação (mecânicas pesadas), industria automobilística, transporte marítimo, ferroviário, rodoviário, aéreo e aeroespacial: todos utilizam ultra-som.

Modernamente o ultra-som é utilizado na manutenção industrial, na detecção preventiva de vazamentos de líquidos ou gases, falhas operacionais em sistemas elétricos (efeito corona), vibrações em mancais e rolamentos, etc.<sup>[2]</sup>

### 3.3.1.3 Vantagens e Limitações em relação a outros Ensaios

#### a) Vantagens:<sup>[3]</sup>

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

#### b) Limitações:

- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor.
- O registro permanente do teste não é facilmente obtido.

- Faixas de espessuras muito finas, constituem uma dificuldade para aplicação do método.
  - Requer o preparo da superfície para sua aplicação. Em alguns casos de inspeção de solda, existe a necessidade da remoção total do reforço da solda, que demanda tempo de fábrica.

### 3.3.2 Princípios Físicos do ensaio por Ultra-som

### 3.3.2.1 Freqüência:

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

Assim sendo se tivermos um som com 280 Hz, significa que por segundo passam 280 ciclos ou ondas por nossos ouvidos. Note que freqüências acima de 20.000 Hz são inaudíveis denominadas freqüência ultra-sônica

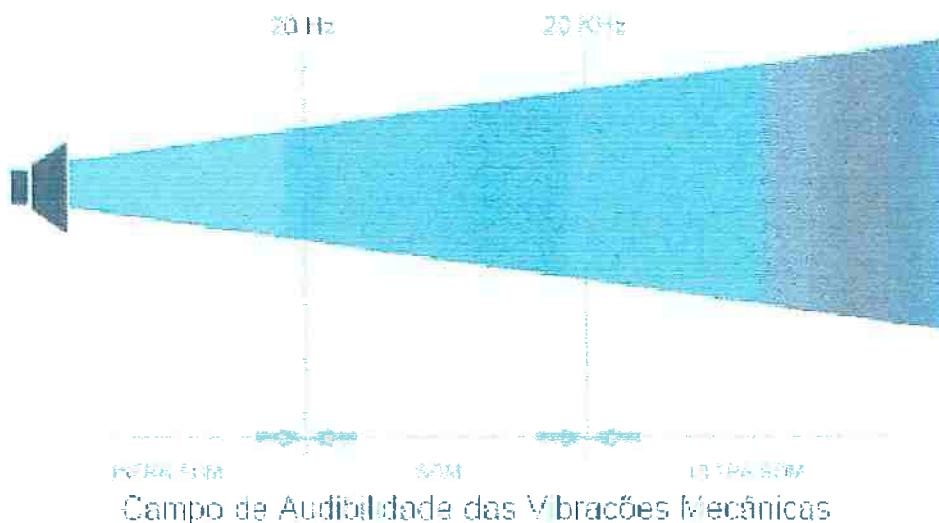


Figura 26- Campo de audibilidade das Vibrações Mecânicas

### 3.3.2.2 Velocidade de propagação.

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

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

### 3.3.2.3 Comprimento de onda.

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

### 3.3.2.4 Relações entre velocidade, comprimento de onda e freqüência.

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

$$V = \lambda \cdot F$$

### 3.3.2.5 Definições de Bell , Decibell e Ganho

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

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

Onde  $I$  e  $I_0$  são duas intensidades sonoras medidas em Watts por centímetros quadrados ( $W/cm^2$ ).

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

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

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

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

Portanto:

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

### 3.3.2.6 Propagação das Ondas Acústicas no Material

- Campo Próximo ou Zona de Fresnel:

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

Tal qual uma pedra que caindo num lago de águas calmas produzirá ondas circulares na superfície, cada ponto do cristal também se comportará da mesma forma, ou

seja produzir ondas esféricas no meio de propagação, como mostra a figura seguinte. Os pontos selecionados 1, 2 e 3 do cristal emitem ondas esféricas que se propagam no meio.

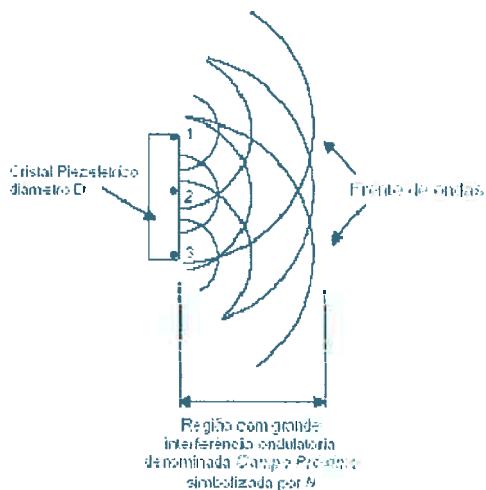


Figura 28- Campo sônico nas proximidades do cristal

Nas proximidades do cristal existe uma interferência ondulatória muito grande entre as ondas provenientes dos pontos 1, 2 e 3 do cristal. A medida que nos afastamos do cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, tornando uma só frente de onda. À região próxima do cristal onde os fenômenos acima se manifestam denomina-se **Campo Próximo** com uma extensão  $N$  que depende do diâmetro do cristal, e do comprimento de onda  $\lambda$  da vibração, podendo ser calculado pela fórmula:

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

onde:

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

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

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

$f$  = frequência ultra-sônica

$\lambda$  = comprimento de onda

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

- Campo Longínquo ou Distante ou Zona de Fraunhofer:

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

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

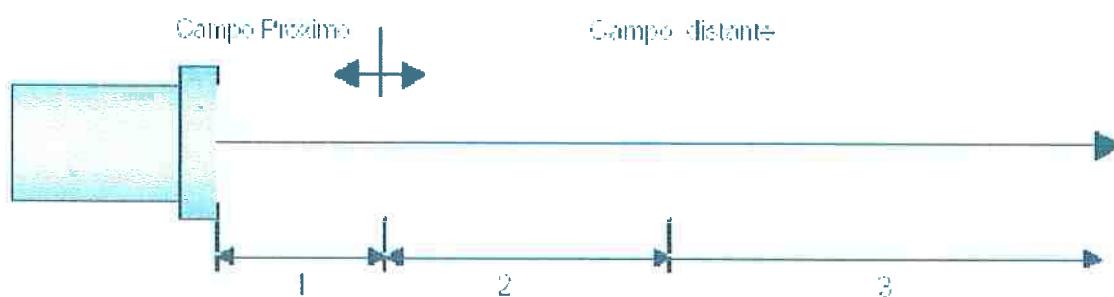


Figura 29- Classificação teórica das zonas dos campos sônicos

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

- Atenuação Sônica:

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

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

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

A tabela abaixo , apresenta alguns valores de atenuação.

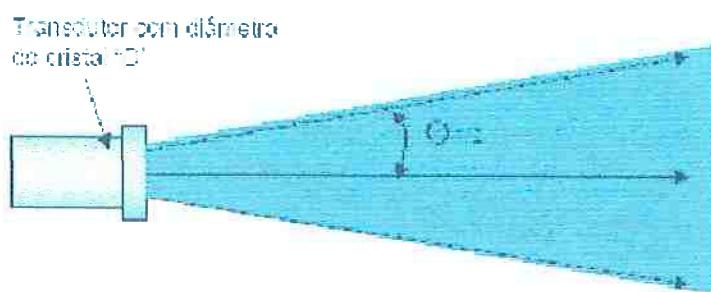
Material aço Cr-Ni	Atenuação Sônica em (dB/mm)
Forjados	0,009 a 0,010
Laminados	0,018
Fundidos	0,040 a 0,080

Tabela 5- Atenuação sônica

- Divergência do Feixe Sônico<sup>[12]</sup>

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

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



$$\operatorname{Sen} \frac{1}{2} Q = k \cdot \text{Velocidade / frequência} \times \text{diâmetro}$$

Figura 30 - Valores de k em função da redução da intensidade sônica

### 3.3.2.7 Geração das Ondas ultra-sônicas

- Efeito Piezelétrico [2]:

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

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

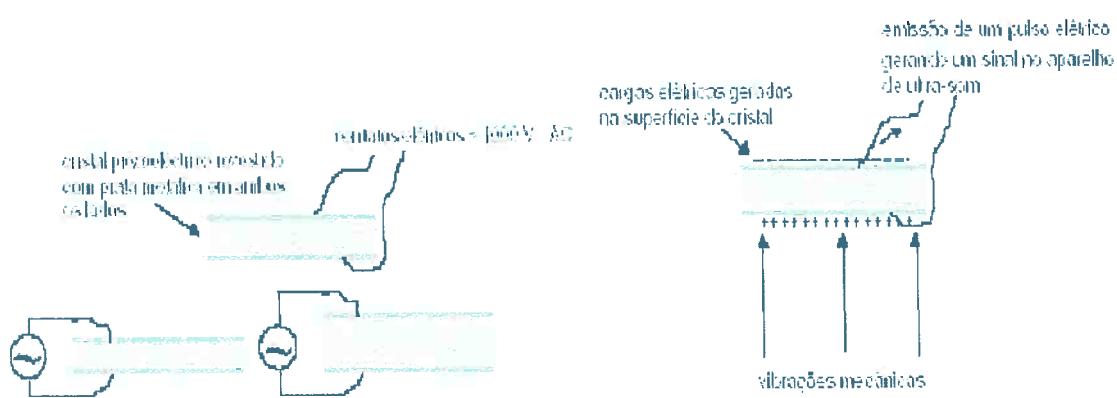


Figura 31- Processo de transformação de energia elétrica em energia mecânica

Tal fenômeno é obtido aplicando-se eletrodos no cristal piezelétrico com tensão elétrica alternada da ordem de 1000 V, de maneira que o mesmo se contrai e se estende ciclicamente. Se tentarmos impedir esse movimento a placa transmite esforços de compressão as zonas adjacentes, emitindo uma onda longitudinal, cuja forma depende da freqüência de excitação e das dimensões do cristal.

- Tipos de Cristais:

Materiais piezelétricos são: o quartzo, o sulfato de lítio, o titanato de bário, o metaniobato de chumbo. Quartzo é um material piezelétrico mais antigo, translúcido e duro como o vidro sendo cortado a partir de cristais originários no Brasil. Sulfato de Lítio é um cristal sensível a temperatura e pouco resistente. Titanato de Bário e metaniobato de chumbo são materiais cerâmicos que recebem o efeito piezelétrico através de polarização.

Esses dois cristais são os melhores emissores, produzindo impulsos ou ondas de grande energia, se comparadas com aquelas produzidas por cristais de quartzo. Para a inspeção ultra-sônica, interessa não só a potência de emissão, mas também a sensibilidade da recepção (resolução). A freqüência ultra-sônica gerada pelo cristal dependerá da sua espessura, cerca de 1 mm para 4 MHz e 2 mm para 2 MHz.

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

- Acoplantes

Ao acoplarmos o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente estabelece uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça. Esta

camada ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em razão das características acústicas (impedância acústica) muito diferente do material a inspecionar.

A impedância acústica "Z" é definida como sendo o produto da densidade do meio (  $\rho$  ) pela velocidade de propagação neste meio (  $V$  ), (  $Z = \rho \times V$  ) e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio. Como exemplo podemos citar que a interface água e aço , apenas transmite 12% e reflete 88% da energia ultra-sônica.

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

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

Acoplante	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade da onda long. (m/s)	Impedância Acústica (g/cm <sup>2</sup> .s)
Oleo ( SAE 30)	0,8	1700	$1,3 \times 10^3$
Água	1,0	1450	$1,48 \times 10^3$
Glicerina	1,26	1920	$2,4 \times 10^3$
Carbox Metyl Celulose (15g/l)	1,20	2300	$2,76 \times 10^3$
Aço	7,8	5.900	$46 \times 10^3$
Ar ou gas	0,0013	330	$0,00043 \times 10^3$
Aço inoxidável	7,8	5.900	$45,4 \times 10^3$
Alumínio	2,7	6.300	$17,1 \times 10^3$
Acrílico	1,18	2.700	$3,1 \times 10^3$

Fonte: SCN C Instruments – catálogo de fórmulas e dados

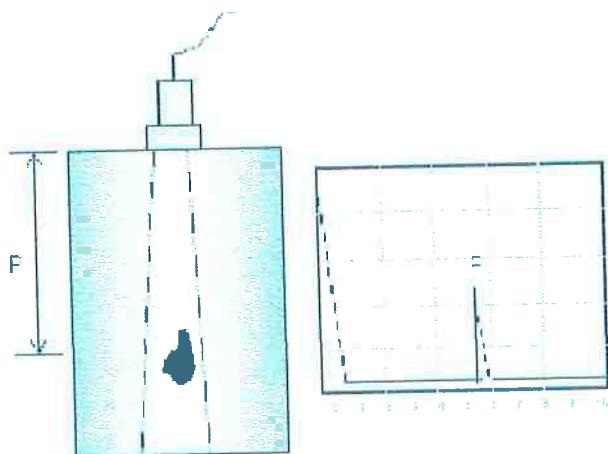
Tabela 6- Impedância Acústica de Alguns Materiais e Acoplantes

### 3.3.3 Técnicas de Inspeção

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

#### 3.3.3.1 Técnica de Impulso-Eco ou Pulso-Eco

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



Técnica Impulso-Eco

Figura 32 – Técnica Impulso-eco

#### 3.3.3.2 Técnica de Transparência

É uma técnica onde é utilizado dois transdutores separados, um transmitindo e outro recebendo as ondas ultra-sônicas. Neste caso é necessário acoplar os transdutores nos dois

lados da peça, de forma que estes estejam perfeitamente alinhados. Este tipo de inspeção, não se pode determinar a posição da descontinuidade, sua extensão, ou localização na peça, é somente um ensaio do tipo passa-não passa.

A técnica de transparência pode ser aplicada para chapas, juntas soldadas, barras e o intuito destes ensaios é estabelecer um critério comparativo de avaliação do sinal recebido ou seja da altura do eco na tela. A altura do sinal recebido na técnica de transparência varia em função da quantidade e tamanho das descontinuidades presentes no percurso das vibrações ultra-sônicas. Sendo assim o inspetor não sabe analisar as características das indicações porém compara a queda do eco com uma peça sem descontinuidades podendo assim estabelecer critérios de aceitação do material fabricado

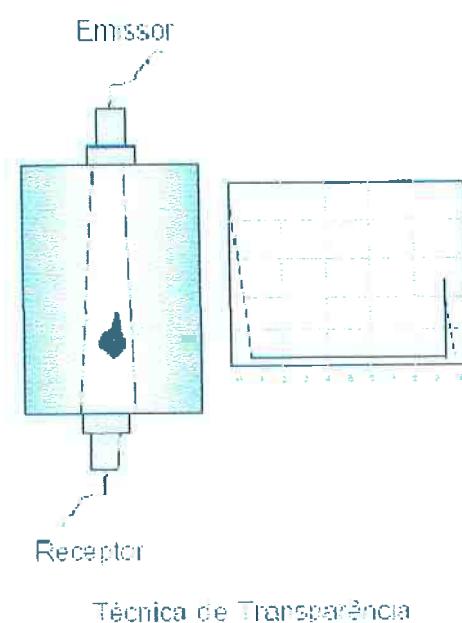


Figura 33- Técnica da Transparência

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

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1 Materiais

A máquina para o ensaio de partículas magnéticas é a de corrente multidirecional do fabricante Foerster Imaiden, com corrente de 12000 Amperes.

A partícula magnética utilizada é da marca Magna Flux de coloração fluorescente

Os produtos utilizados para o ensaio de por líquido penetrante são :

Líquido Penetrante Visível da marca Metal Check

Revelador a base de talco em suspensão aquosa

O instrumento utilizado para o ensaio ensaio de ultra-som foi o aparelho digital marca Krautkramer Mod. USN-50/52, conforme figura abaixo

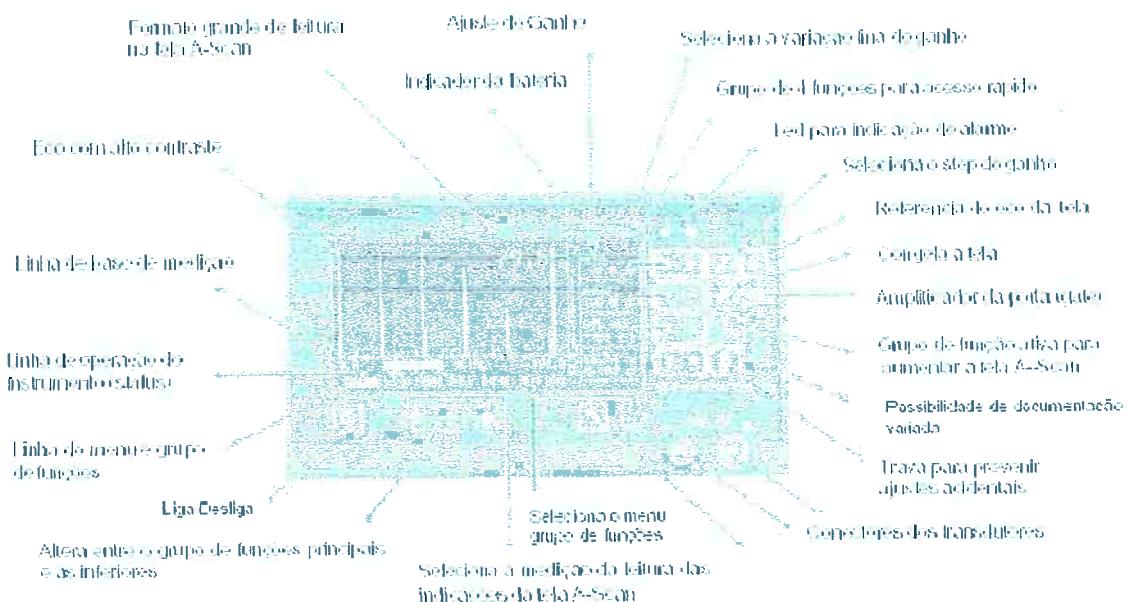


Figura 34 - aparelho digital marca Krautkramer Mod. USN-50/52

As peças mapeadas nos ensaios não destrutivos são turbinas para hidrogeração de energia do modelo Francis, fabricadas em aço inoxidável ASTM 304L conforme figura abaixo



Figura 35- Turbina Francis

## 4.2 Métodos de Inspeção

### 4.2.1 Inspeção por ensaio de líquido penetrante

Neste capítulo em detalhes as etapas básicas do ensaio, a influência da temperatura, as correções de deficiências de execução do ensaio e a maneira de registrar os dados do mesmo. É importante salientar , que a aplicação do método de inspeção por líquidos penetrantes deve sempre ser feita através de um procedimento préviamente elaborado e aprovado, contendo todos os parâmetros essenciais do ensaio baseado na norma ou especificação aplicável ao produto a ser inspecionado.

As informações técnicas a seguir estão baseadas no Código ASME Sec. V Artigo 6.

#### 4.2.1.1 Preparação da superfície

A primeira etapa a ser seguida na realização do ensaio é verificação das condições superficiais da peça. Deverá estar isenta de resíduos, sujeiras, óleo, graxa e qualquer outro contaminante que possa obstruir as aberturas a serem detectadas. Caso a superfície seja lisa, preparação prévia será facilitada. É o caso de peças usinadas, lixadas, etc.. Este fator é inerente ao processo de fabricação. Superfícies excessivamente rugosas requerem uma preparação prévia mais eficaz, pois as irregularidades superficiais certamente prejudicarão a perfeita aplicação do penetrante, a remoção do excesso e, portanto, o resultado final.

As irregularidades irão dificultar a remoção, principalmente no método manual. Além do mascaramento dos resultados, há a possibilidade de que partes dos produtos de limpeza fiquem aderidas à peça (fiapos de pano).

Numa operação de esmerilhamento, um cuidado adicional deve estar presente. Deve-se evitar causar, por exemplo, sulcos sobre a peça, erro muito comum na preparação de soldas.

#### 4.2.1.2 Métodos de limpeza da superfície

O sucesso do método depende dos defeitos estarem abertos à superfície. A limpeza, portanto, é de fundamental importância. Todo produto de corrosão, escória, pinturas, óleo, graxa, etc... deve estar removido da superfície. Pode-se utilizar o solvente que faz parte dos “kits” de ensaio ou solventes disponíveis no mercado, tal como thinner, ou ainda outro produto qualificado. Neste caso, deve-se dar suficiente tempo para que o solvente utilizado evapore-se das descontinuidades, pois sua presença pode prejudicar o teste. Dependendo da temperatura ambiente e do método utilizado, este tempo pode variar. Pode-se utilizar o desengraxamento por vapor, para remoção de óleo, graxa ; ou ainda limpeza química,

solução ácida ou alcalina, escovamento manual ou rotativo, removedores de pintura, ultrasom, detergentes.

Peças limpas com produtos a base de água, a secagem posterior é muito importante. Cuidados também são importantes para evitar corrosão das superfícies. Os processos de jateamento, lixamento e aqueles que removem metal (esmerilhamento), devem ser evitados, pois tais processos podem bloquear as aberturas da superfície e impedir a penetração do produto penetrante. Entretanto, tais métodos de limpeza podem em alguns processos de fabricação do material a ensaiar, serem inevitáveis e inerentes a estes processos. Esta etapa é muito importante e o operador deve ter consciência de que o material na área de interesse esteje aparente, sem óxidos ou qualquer sujeira que possa mascarar a observação da descontinuidade.

#### **4.2.1.3 Temperatura da superfície e do líquido penetrante:**

Poderíamos dizer que a temperatura ótima de aplicação do penetrante é de 20 °C e as superfícies não devem estar abaixo de 10 °C. Temperaturas ambientes mais altas (acima de 52 °C) aumentam a evaporação dos constituintes voláteis do penetrante, tornando-o insuficiente. Acima de certo valor (> 100° C) há o risco de inflamar.

A título de ilustração podemos citar que o Código ASME Sec.V Art.6 recomenda temperaturas padrão de 10 a 52 °C e o ASTM E-165 recomenda temperaturas de 10 a 38oC para penetrantes fluorescentes e de 10 a 52 oC para penetrantes visíveis com luz normal.

A observação e controle da temperatura é um fator de grande importância, que deve estar claramente mencionado no procedimento de ensaio. Caso seja necessário aplicar o ensaio por líquidos penetrantes fora da temperatura padrão, os produtos penetrantes devem ser verificados contra um padrão contendo trincas conhecidas. O desenho abaixo ilustra o padrão recomendado pelo Código ASME Sec. V Art. 6, fabricado em alumínio ASTM

B209 tipo 2024. O bloco de alumínio deve ser aquecidos entre 510 °C a 524 °C e resfriados com água, produzindo assim trincas superficiais no bloco. Após, deve ser cortado e as partes identificadas como "A" e "B".

#### 4.2.1.4 Aplicação do penetrante.

O penetrante pode ser aplicado em “spray”, por pincelamento, com rolo de pintura ou mergulhando-se as peças em tanques. Este último processo é válido para pequenas. Neste caso as peças são colocadas em cestos. Deve-se escolher um processo de aplicação do penetrante, condizente com as dimensões das peças e com o meio ambiente em que será aplicado o ensaio. Por exemplo : peças grandes, e ambientes fechados, em que o inspetor escolha o método de aplicação do penetrante por pulverização, certamente isto será um transtorno tanto para as pessoas que trabalhem próximo ao local, assim como para o próprio inspetor.



Aplicação do penetrante com pincel

Figura 36- Aplicação de líquido penetrante em peças de grande porte

#### 4.2.1.5 Tempo de Penetração

É o tempo necessário para que o penetrante entre dentro das descontinuidades. Este tempo varia em função do tipo do penetrante, material a ser ensaiado, temperatura, e deve estar de acordo com a norma aplicável de inspeção do produto a ser ensaiado.

#### 4.2.1.6 Remoção do excesso de penetrante

Os penetrantes não laváveis em água são quase sempre utilizados para inspeções locais e estes são melhor removidos com panos secos ou umedecidos com solvente. Papel eco ou pano seco é satisfatório para superfícies lisas. A superfície deve estar completamente livre de penetrante, senão haverá mascaramento dos resultados.

Deve-se tomar o cuidado para não usar solvente em excesso, já que isto pode causar a retirada do penetrante das descontinuidades. Geralmente uma limpeza grosseira com pano e papel levemente embebido em solvente, seguido de uma limpeza feita com pano ou papel seco ou com pouco de solvente é satisfatória.

Quando as peças são inteiramente umedecidas com solvente a limpeza manual é demorada e difícil. Neste caso pode-se mergulhar a peça em banho de solvente, com o inconveniente de que algum penetrante pode ser removido das descontinuidades. Este método só deve ser usado com muito cuidado e levando-se em conta esta limitação.

Quando se usa o tipo lavável em água, a lavagem com jato de água é satisfatória. O jato deve ser grosso para aumentar sua eficiência ou por spray. Após lavagem com água, a peça deve ser seca com, por exemplo, ar comprimido. A remoção usando solvente a secagem pode ser feita por evaporação natural.

#### 4.2.1.7 Revelação

A camada de revelador deve ser fina e uniforme. Pode ser aplicada com spray, no caso de inspeção manual. Peças que foram totalmente revestidas com penetrante são mais difíceis para se manter uma camada uniforme de revelador.

Material	Forma	Tipo de Descontinuidade	Tempo de Espera <sup>A</sup> min.	
			Penetrante	Revelador
Alumínio, Magnésio, aço, bronze, titânio, altas ligas	Fundidos e Soldas	porosidade, trincas, (todas as formas), falta de fusão, gota fixa	5	10
Plásticos	todas as formas	trincas	5	10
Vidros	todas as formas	trincas	5	10
Cerâmicas	todas as formas	trincas, porosidade	5	10

A - Para temperaturas de 10 a 52 °C

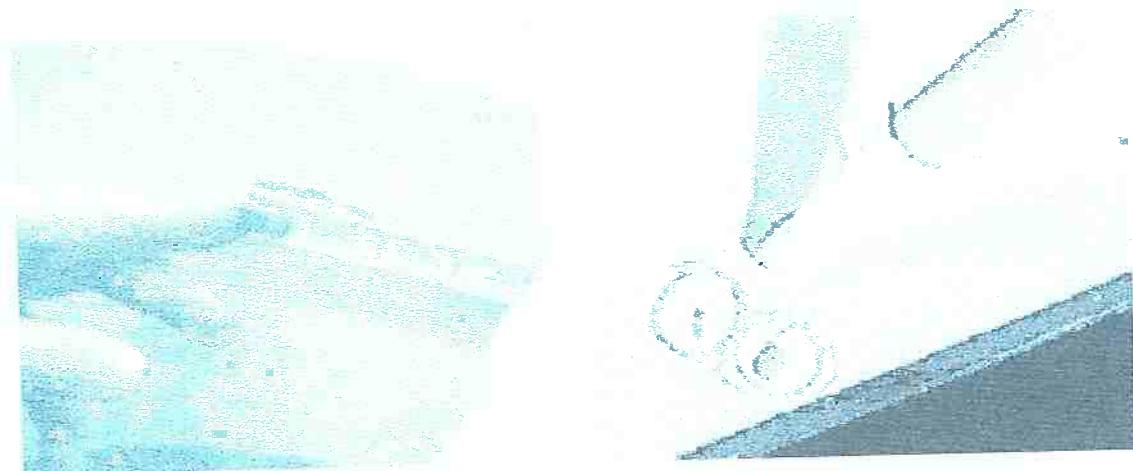
Tabela 7- Tempo Mínimo de penetração recomendado em END por LP

#### 4.2.1.8 Secagem e inspeção

Deve ser dado um tempo suficiente para que a peça esteja seca antes de efetuar a inspeção. Logo após o início da secagem, deve-se acompanhar a evolução das indicações no sentido de definir e caracterizar o tipo de descontinuidade e diferencialas entre linear ou arredondadas.

O tempo de revelação é variável de acordo com o tipo da peça, tipo de defeito a ser detectado e temperatura ambiente. As descontinuidades finas e rasas, demoram mais tempo para serem observadas, ao contrário daquelas maiores e que rapidamente mancham o revelador.

O tamanho da indicação a ser avaliada, é o tamanho da mancha observada no revelador, após o tempo máximo de avaliação permitida pelo procedimento. Em geral tempos de avaliação entre 10 a 60 minutos são recomendados.



Registro dos resultados

Figura 37 – Registro de resultados em ensaio por líquido penetrante

#### 4.1.2 Avaliação e aparência das indicações em ensaio por líquido penetrante

##### 4.1.2.1 Categorias de indicações verdadeiras

- a) Indicações em linha contínua: Podem ser causadas por trincas, dobras, riscos ou marcas de ferramentas. Trincas geralmente aparecerem como linhas sinuosas, dobras de forjamento como tem a aparência de linha finas.
- b) Linha intermitente: Podem ser causadas pelas mesmas descontinuidades acima. Quando a peça é retrabalhada por esmerilhamento, martelamento, forjamento, usinagem, etc., porções das descontinuidades abertas à superfície podem ficar fechadas.
- c) Arredondadas: Causadas por porosidade ou por trinca muito profunda, resultante da grande quantidade de penetrante que é absorvida pelo revelador.

d) Interrompidas finas e pequenas: Causadas pela natureza porosa da peça ou por grãos excessivamente grosseiros de um produto fundido.

e) Defeituosas: Normalmente não são definidas tornando-se necessário re-ensaiar a peça. As vezes provém de porosidade superficial. Podem ser causadas por lavagem insuficiente (falsas).

#### 4.1.2.2 Tipos e aparências das indicações por processo de fabricação.

##### a) Fundidos

Os principais defeitos que podem aparecer nos produtos fundidos são:

- trincas de solidificação (rechupes)
  - micro rechupes
  - porosidade
  - gota fria
- 
- inclusão de areia na superfície
  - bolhas de gás

##### b) Soldas

Soldas podem apresentar:

- trincas superficiais;
- porosidade superficial;
- falta de penetração;
- mordeduras.

#### **4.1.3 Critérios de Aceitação para ensaio de líquido penetrante**

Especificação técnica para Líquidos Penetrantes - CCH-70 / PT 70-2 :

Esta norma é geralmente utilizada na inspeção de fundidos para aplicação em componentes hidráulicos, na condição acabado, ou ainda para inspeção de áreas abertas para reparos.

#### **4.2.4 Método de Inspeção por ensaio de Partículas Magnéticas**

##### **4.2.4.1 Preparação da Superfície:**

De acordo com a seqüência de execução do ensaio, o ensaio por Partículas magnéticas, começa pela limpeza e/ou preparação da superfície. O método de preparação da superfície depende do tipo de peça, tamanho e quantidade.

São métodos de limpeza:

- Jato de areia ou granalha,
- Escova de aço,
- Solvente e panos umedecidos em solventes ou secos;
- Limpeza química ;
- Vapor desengraxante;
- Esmerilhamento.

O objetivo desses métodos de limpeza é de retirar da superfície em exame toda a sujeira, oxidação, carepas, respingos ou inclusões superficiais que prejudiquem o ensaio com a formação de campos de fuga falsos, ou que, contaminem a suspensão, caso o ensaio seja executado com via úmida , ou ainda que dificultem a mobilidade das partículas sobre a superfície.

O jato de areia ou granalha é comumente utilizados na preparação de peças automotivas ou componentes de máquinas, que, são colocados em cabines para jateamento. Escovas de aço que tanto podem ser rotativas, ou manuais são mais utilizadas na preparação de peças soldadas.

O solvente é empregado como uma complementação aos métodos de limpeza anteriores, com o objetivo de promover na região a ser inspecionada uma superfície isenta de graxas, óleo ou outro tipo de contaminante que impeça ou prejudique o ensaio, mascarando os resultados.

É necessário garantir uma boa mobilidade das partículas. Caso as partículas sejam aplicadas dispersas em água, a superfície deve estar isenta de óleo ou graxa, caso contrário a peça não ficará “molhada”

#### **4.2.4.2 Seleção do Equipamento , Técnica para Magnetização e das Partículas magnéticas:**

Como vimos, a escolha do equipamento para magnetização e do tipo de partículas magnéticas, dependerá da forma da peça a ser ensaiada, do local para execução do ensaio, do acabamento superficial da peça, e da especificação técnica para inspeção. O ensaio por partículas magnéticas deve ser sempre executado com base a um procedimento qualificado e aprovado, com finalidade de estabelecer e fixar as variáveis essenciais do ensaio. Assim, a técnica de magnetização, o método de ensaio, e outros, não necessitam serem determinadas pelo inspetor responsável, no momento do ensaio.



Inspecção por Partículas Magnéticas, pela Técnica do Yoke, de um chanfro preparado para soldagem, em uma Pá tipo "Francis" fundida em aço carbono, para usina hidroelétrica.  
(Foto cedida pela empresa VOLTA SIEMENS)

Figura 34 – Inspecção por partículas magnéticas

#### -Técnica do Campo Contínuo:

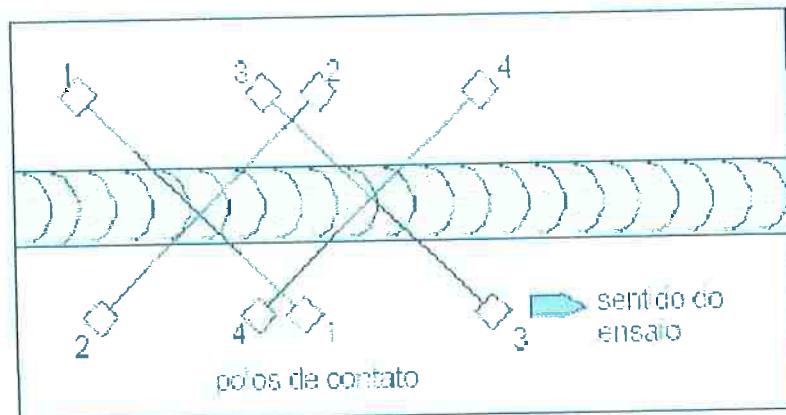
É uma técnica utilizada na maioria dos casos em materiais com baixa retentividade, onde a magnetização, aplicação do pó magnético, remoção do excesso de pó, e a observação das descontinuidades são realizadas seqüencialmente e simultaneamente, ou seja de forma contínua.

#### -Técnica do Campo Residual:

Nesta técnica, o material a ser inspecionado deve obrigatoriamente ter características de alta retentividade, pois as operações de magnetização, aplicação do pó magnético, remoção do excesso de pó, e a observação das descontinuidades são efetuadas de forma separadas e sucessivas. Em geral, apenas a técnica de contato direto para magnetização produz resultados satisfatórios com campos residuais acima de 70 A/m.

### -Planejamento do Ensaio e Magnetização da Peça:

Escolhida a técnica de magnetização a ser empregada ou disponível para o ensaio, é importante que o Inspetor procure visualizar ou esquematizar a peça, como será o campo magnético formado, se longitudinal ou circular. Essa visualização é importante pois como não conhecemos a orientação das descontinuidades vamos começar a fazer o ensaio por um ponto e, para garantirmos que a inspeção foi adequada, capaz de detectar qualquer descontinuidade em qualquer orientação, é preciso que, de acordo com a técnica de magnetização utilizada, uma outra varredura, defasada de mais ou menos 90 do eixo da anterior, seja realizada na mesma região



Esquema seqüencial opcional para ensaio de soldas, pela técnica de Eletrodos e Yoke.

Figura 39-Esquema seqüencial para ensaio de soldas, pela técnica de Eletrodos

A técnica de varredura descrita anteriormente é empregada na inspeção de peças utilizando-se de um Ioque ou através da técnica de eletrodos, onde recomenda-se, para garantir uma varredura perfeita e com sobreposição adequada entre uma e outra varredura, que o inspetor trace com giz de cera na peça os pontos onde serão apoiadas as pernas do

loque ou eletrodos, obtendo-se assim, uma varredura seqüencial e com garantia de inspeção em 100% da região de interesse, a posição dos pólos de contato 1-1 e 4-4 ou 2-2 e 3-3.

Já nas máquinas estacionárias, onde as peças a serem inspecionadas, como por exemplo: pinos, bielas, engrenagens, disco, virabreguins, são submetidas, na maioria das vezes, a dois campos magnéticos aplicados simultaneamente, sendo um por corrente alternada - CA e outro, por corrente alternada retificada, ou ambos por correntes alternadas defasadas, é necessário garantir a varredura de toda a peça ou de uma região de interesse. Nesse caso, é importante verificar se a intensidade do campo é adequada para se fazer a inspeção de toda a peça de uma vez só. Caso isso não seja possível, é necessário inspecionar a peça em partes, ou seções.

Portanto, de acordo com o equipamento disponível, em função de seus recursos e capacidade, fazemos os ajustes nos campos de modo a obter um valor adequado. O valor adequado para o campo magnético poderá, em alguns casos, ser verificado através de padrões indicativos de campo magnético, ou padrão para verificação do sistema de inspeção por partículas magnéticas citado pelo ASTM-E-1444

#### Influência do tipo de Corrente Elétrica Selecionada

A Corrente Elétrica Alternada: este tipo de corrente elétrica promove uma maior mobilidade das partículas, o que atribui uma maior sensibilidade para descontinuidades superficiais, com pouca penetração no material.

A Corrente Elétrica Contínua promovem pouca mobilidade das partículas, porém atribuem ao ensaio uma profundidade maior de detecção , sendo portanto mais indicada para descontinuidades subsuperficiais.

#### **. Aplicação das Partículas e Observação das Indicações:**

A aplicação das partículas ferromagnéticas deve ser feita de forma que seja coberta toda a área de interesse, quer seja por via seca ou úmida. A remoção do excesso de partículas sobre a superfície deve ser feita de modo a não eliminar as indicações que se formam. Se as partículas forem por via seca, um leve sopro deve ser aplicado. Se as partículas forem via úmida, o próprio veículo promove o arrasto do excesso das partículas. A observação das indicações se dará pela visualização dos pontos de acúmulo do pó ferromagnético. Esta fase não é tão fácil, pois o inspetor pode confundir um acúmulo de pó devido a uma ranhura ou mordedura, com uma descontinuidade, levando a erros no julgamento dos resultados. Para facilitar a visualização das indicações, pode ser aplicado uma fina camada de tinta branca especial sobre a região a ser inspecionada, antes da aplicação das partículas ferromagnéticas.

#### **4.2.4.3 Critério de Aceitação das Indicações:**

Descontinuidades próximas à superfície são indicadas pela retenção das partículas ferromagnéticas na posição da descontinuidade, entretanto marcas de usinagem, e irregularidades superficiais podem produzir falsas indicações, devendo ser limpas ou reinspecionadas para saber se descontinuidades inaceitáveis estão presentes. O critério para análise das indicações deve estar baseado no Código de projeto e construção do componente inspecionado.

### Critério de Aceitação conforme o Código ASME

O critério de aceitação que segue abaixo, é uma tradução do Código ASME Séc VIII Div.1 Apêndice 6, é aplicável para superfícies inspecionadas por partículas magnéticas, projetadas conforme este Código.

#### Avaliação das indicações:

Uma indicação é uma evidência de uma imperfeição mecânica. Somente indicações com dimensões maiores que 1/16 pol. (1,6 mm) deve ser considerada como relevante.

- (a) Uma indicação linear é aquela tendo um comprimento maior que três vezes a largura.
- (b) Uma indicação arredondada é aquela na forma circular ou elíptica com comprimento igual ou menor que três vezes a largura.
- (c) Qualquer indicação questionável ou duvidosa, deve ser reinspecionada para determinar se indicações relevantes estão ou não presentes.

#### Aceitação:

Toda as superfícies devem estar livres de:

- (a) indicações relevantes lineares;
- (b) indicações relevantes arredondadas maiores que 3/16 pol. (4,5 mm);
- (c) quatro ou mais indicações relevantes arredondadas em linha separadas por 1/16 pol. (1,6 mm) ou menos (de borda a borda);
- (d) uma indicação de uma imperfeição pode ser maior que a imperfeição, entretanto, o tamanho da indicação é a base para a avaliação da aceitação.

## Critério de Aceitação de Soldas Conforme o Código AWS D1. 1

O critério de aceitação conforme AWS D1. 1 é o mesmo para inspeção visual e que

### **4.2.5 Métodos de Inspeção por ensaio de Ultra-Som**

#### **4.2.5.1 Procedimento para Inspeção de Soldas:**

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

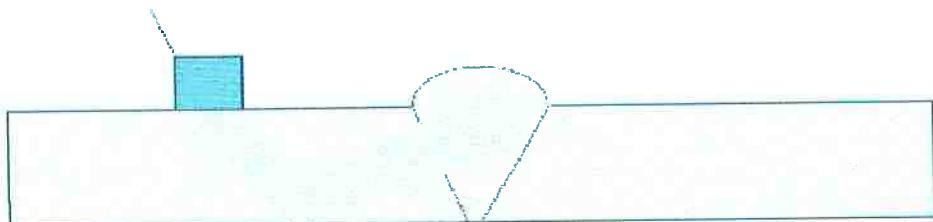
Os procedimentos para inspeção de soldas descritas pelas Normas ou Códigos de fabricação variam em função dos ajustes de sensibilidade do ensaio , dimensionamento das indicações , critérios de aceitação das descontinuidades encontradas , e outras particularidades técnicas. Portanto , descrevemos a seguir a técnica básica para inspeção de soldas por ultra-som , entretanto o inspetor deve consultar o procedimento aprovado de sua empresa para o ensaio específico, ou ainda na falta deste , elaborá-lo segundo a norma aplicável ao produto a ser ensaiado.

#### **4.2.5.2 Preparação das Superfícies de Varredura:**

A inspeção da solda se processará através da superfície do metal base adjacente à solda , numa área que se estenderá paralelamente ao cordão de solda , que denominamos área ou superfície de varredura <sup>[5]</sup> .

O resultado do ensaio por ultra-som é dependente da preparação das superfícies, assim devemos remover carepas, tintas, óxidos, pó, graxa e tudo que possa mascarar, ou

impedir a penetração do feixe sônico na peça a ensaiar. Limitação de temperatura da peça deve ser levado em conta e está associado ao modelo e tipo do transdutor , pois altas temperaturas ( acima de 60 oC ) podem danificar os transdutores.



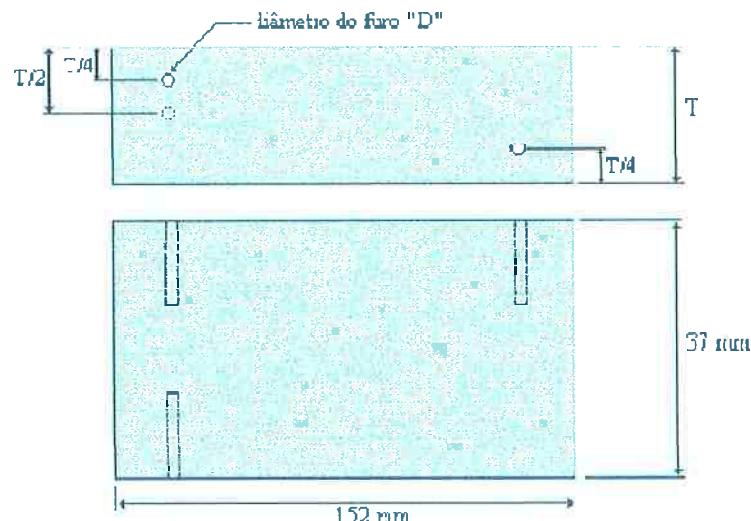
Técnica geral para inspeção de soldas de topo , por ultra-som

Figura 40- Técnica geral para inspeção de soldas de topo por ultra-som

#### 4.2.5.3 Calibração da Sensibilidade do Aparelho [7]

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

A figura abaixo descreve o bloco de calibração recomendado pela norma ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.V Artigo 5 usado para estabelecer a sensibilidade do ensaio pelo ajuste do controle de ganho do aparelho , que deve ser fabricado com mesmo acabamento superficial da área de varredura.



Bloco Básico de Calibração da Sensibilidade do Ensaio de Soldas, conforme o Código ASME Sec. V Art. 5

Figura 41- Bloco Básico de Calibração de ensaio de Soldas

#### Seleção do Bloco de Calibração para superfícies planas

Espessura da solda "t" (mm)	Espessura "T" do bloco (mm) *	Diâmetro "D" do furo de referência (mm)
até 25,4	19 ou t	2,38
acima de 25,4 até 50,8	38 ou t	3,18
de 50,8 até 101,6	76,2 ou t	4,76
de 101,6 até 152,4	127 ou t	6,35
de 152,4 até 203,2	177 ou t	7,93

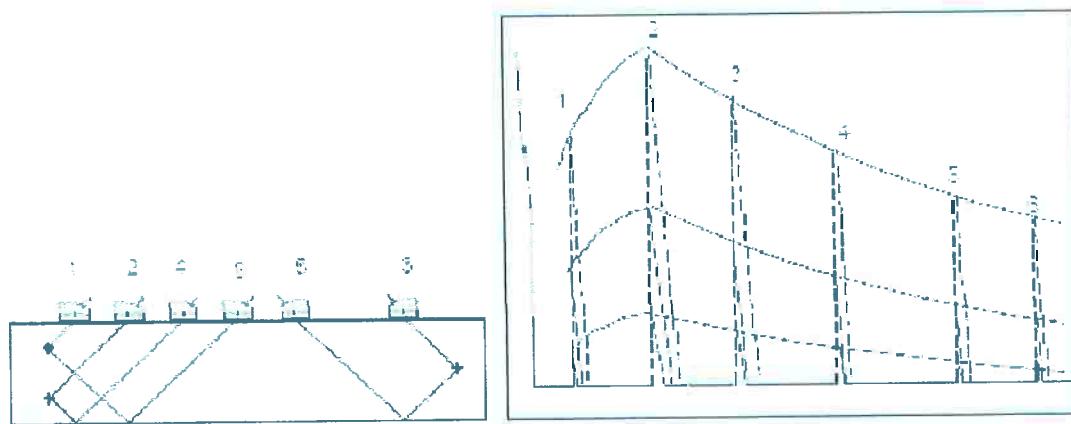
Fonte: Código ASME Sec. V Art. 5

\* Bloco de calibração válido para superfícies planas ou com curvaturas maiores que 20 polegadas de diâmetro.

Tabela 8 Seleção do bloco de calibração para superfícies planas

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

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



Traçagem da Curva de Referência ou Curva DAC

Figura 42- Traçagem da Curva de referencia DAC (1)

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

#### 4.5.2.6 Determinação do Fator de Correção da Transferência

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

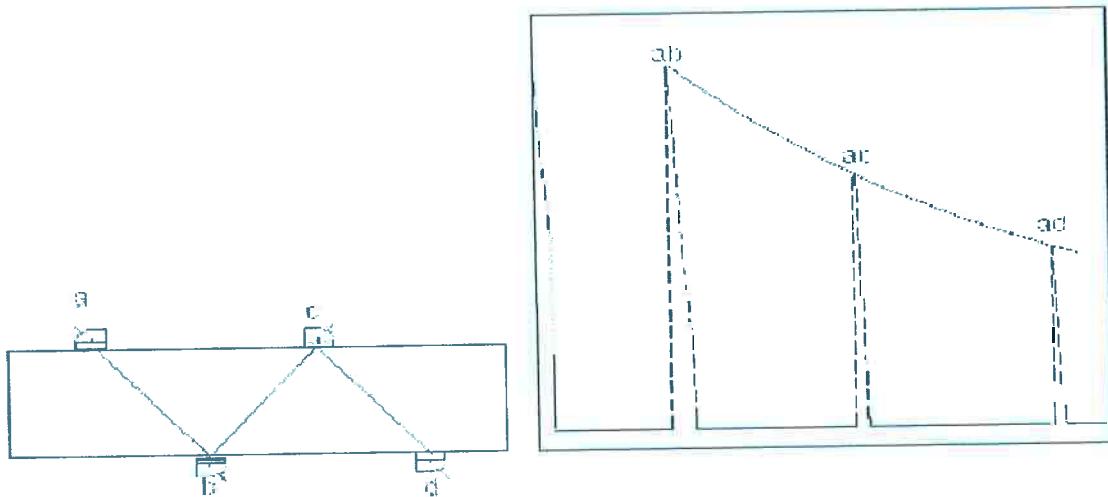


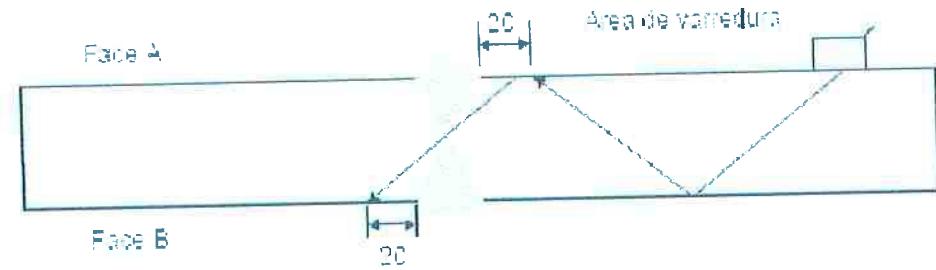
Figura 43- Técnica geral para inspeção de soldas de topo por ultra-som (2)

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

#### 4.2.5.7 Realização da Inspeção

Para garantir a passagem do feixe sônico para a peça é necessário usar um líquido acoplante que se adapte à situação. Em geral, óleo, água, ou soluções de metil-celulose, podem ser utilizadas para esta finalidade. É recomendado efetuar algumas medidas no mesmo local, pois variações de acabamento superficial, pressão do transdutor sobre a superfície e outros, podem variar os resultados. O transdutor deve ser deslizado sobre a superfície de varredura com o feixe ultra-sônico voltado perpendicularmente à solda, de modo que as ondas atravessem totalmente o volume da solda. Caso houver alguma descontinuidade no volume de solda, haverá reflexão nesta interface, retornando ao transdutor parte da energia ultra-sônica, e consequentemente a indicação na tela do aparelho em forma de eco ou pulso.

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



Delimitação da Área de Varredura para juntas soldadas de Topo

Figura 44 – Delimitação da área de varredura para juntas soldadas de topo

#### 4.2.5.8 Avaliação e critérios de Aceitação

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

Em geral, as descontinuidades são julgadas pelo seu comprimento , e amplitude do eco de reflexão , que são quantidades mensuráveis pelo inspetor de ultra-som. Entretanto, algumas normas, estabelecem que o tipo da descontinuidade encontrada também deve ser avaliada e decisiva na aceitação ou rejeição da junta soldada. Por exemplo: se o inspetor interpretou uma indicação como trinca, falta de fusão ou falta de penetração, a junta soldada deve ser rejeitada, independente do seu comprimento ou amplitude de eco na tela do aparelho , de acordo com o Código ASME Sec.VIII Div.1 UW-53. Mas nem sempre a identificação do tipo da descontinuidade é fácil ou possível de ser avaliada , pois isto dependerá da complexidade da junta , experiência e conhecimento do inspetor.

#### 4.2.5.8 Critério de Aceitação de Juntas Soldadas. (*Tradução livre*)

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

- (a) Indicações caracterizadas como trincas, falta de fusão ou penetração incompleta são inaceitáveis independente do comprimento;
- (b) Outras imperfeições são inaceitáveis se indicações excedem o em amplitude o nível de referência e tenha um comprimento que exceda:
  1.  $\frac{1}{4}$  pol. para  $t$  até  $\frac{3}{4}$  pol;
  2.  $1/3.t$  para  $t$  de  $\frac{3}{4}$  até  $2.1/4$ ;
  3.  $\frac{3}{4}$  pol. para  $t$  acima de  $2.1/4$  pol.

Onde  $t$  é a espessura da solda excluindo qualquer reforço permitido. Para juntas soldadas de topo onde dois membros tendo diferentes espessuras de solda,  $t$  é a mais fina dessas duas espessuras. Se uma solda de penetração total inclue uma solda de filete, a espessura da garganta do filete deve ser incluída em  $t$ <sup>[3]</sup>

## 5 Resultados

Os diversos tipos de defeitos mais comumente encontrados foram divididos em duas classes, a de defeitos dimensionais, que consiste em falhas na peça ocasionadas por erros durante alguma etapa do processo de fabricação. Outra classe de defeitos classificadas para efeito do levantamento estatístico é a de defeitos de materiais, que consiste em erros ocorridos durante o processo de fundição e/ou solda, quando for o caso, das peças hidráulicas fundidas

DEFEITOS DIMENSIONAIS	
Na fundição	Durante o processo de fabricação
1.1.1 - Falta de Material	
1.1.2 – Corte de Massalote	1.2.2 – Esmerilhagem
1.1.3 – Deformação	1.2.3 – Erro de pos. da chapelona
1.1.4 – Excesso de Material	1.2.4 – Erro de Usinagem
1.2.1 – Grafitagem	1.2.5 – Deformação por soldagem

DEFEITOS DE MATERIAL	
Na fundição	Em reparo por solda
2.1.1 – Inclusões	2.2.1 – Inclusões
2.1.2 – Porosidade	2.2.2 – Porosidade
2.1.3 – Rechupes	2.2.3 – Falha de fusão
2.1.4 – Bolha de gás	2.2.4 – Mordeduras
2.1.5 – Trincas	2.2.5 – Trincas
2.1.6 – Gota fria	2.2.6 – Falta de penetração

Tabela 9- Defeitos ocorrentes na fabricação de peças na Voith

### 5.1 Apresentação de Resultados

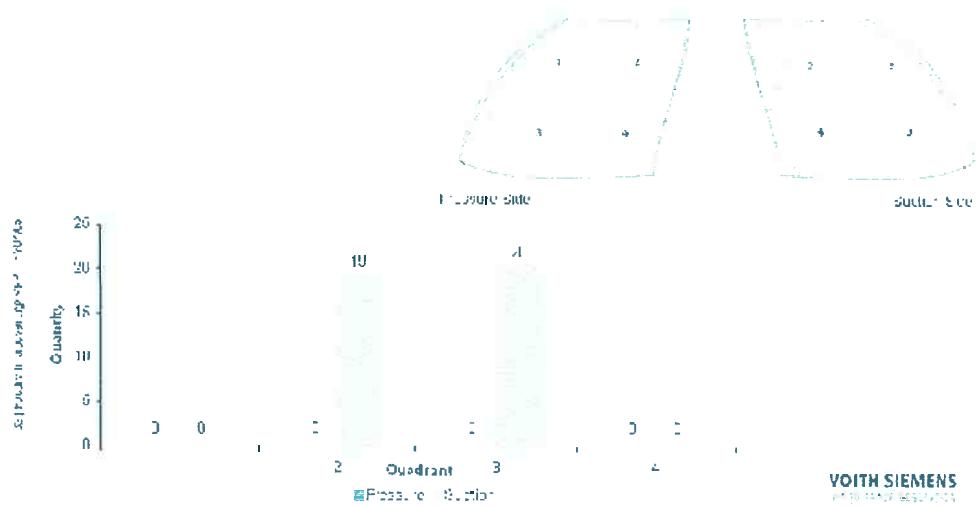
Os resultados serão apresentados divididos em tipos de defeitos, analisados com os diversos métodos de ensaios não destrutivos apresentados anteriormente, divididos por regiões teóricas a fim de facilitar as possíveis causas dos defeitos nesse mapeamento estatístico.

As regiões teóricas são:

1-Aresta de entrada do lado da coroa; 2- Aresta de entrada do lado do cubo; 3-Aresta de saída do lado da coroa; 4 -Aresta de saída do lado do cubo

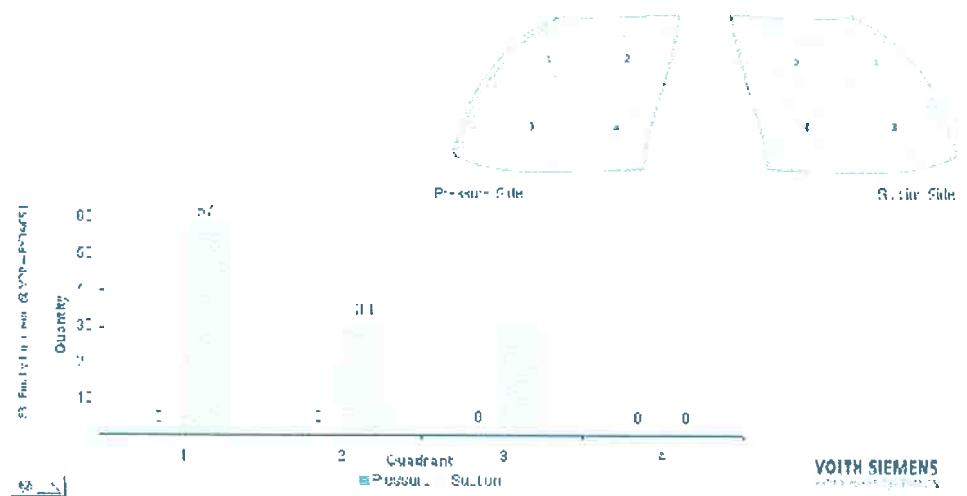
## Pás de Turbina Francis

### 1.1.1 -Defeitos Dimensionais- Falta de Material



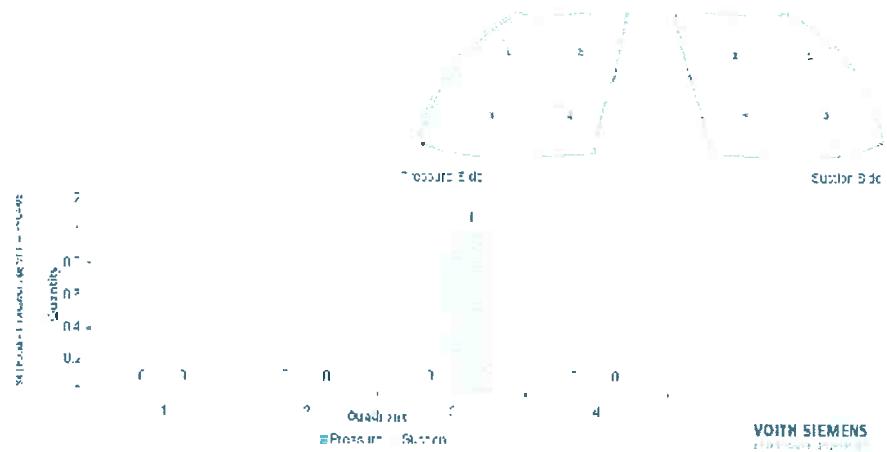
## Pás de Turbinas Francis

### 1.2.1 -Defeitos Dimensionais- Grafitagem



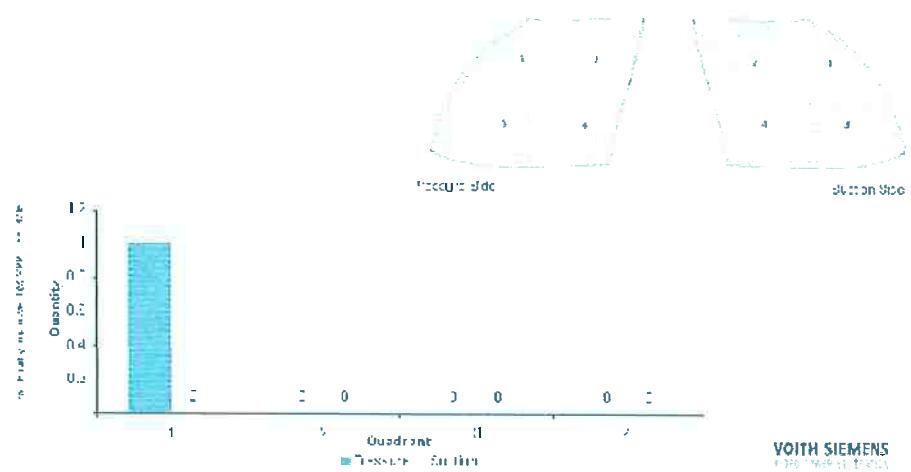
## Pás de Turbinas Francis

### 1.2.2 – Defeitos Dimensionais- Esmerilhagem



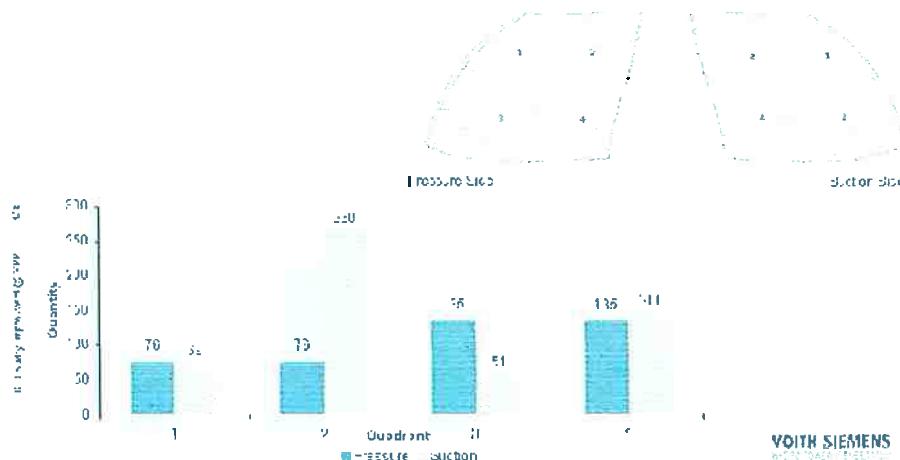
## Pás de Turbinas Francis

### 1.2.4 – Defeitos Dimensionais-erro de Usinagem



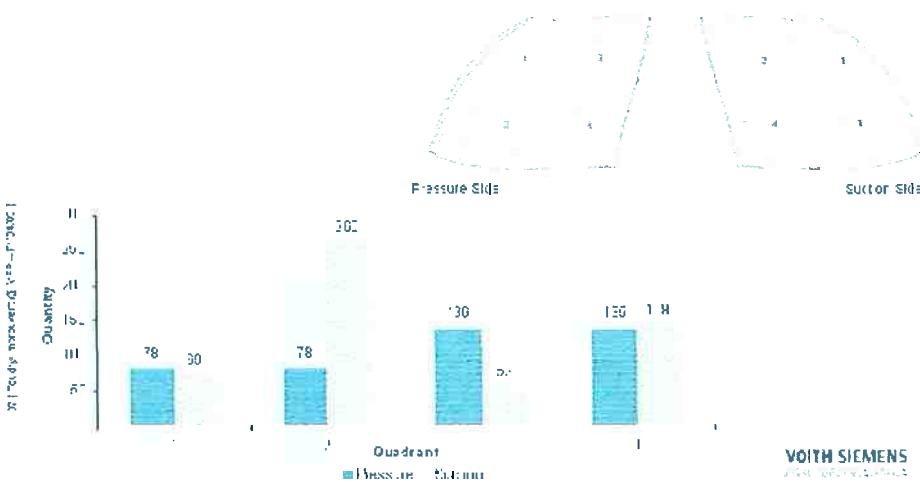
## Pás de Turbinas Francis

### 2.1.1 – Defeitos de Materiais- Inclusões



## Pás de Turbinas Francis

### 2.1.2 – Defeitos de Materiais- Porosidade



## Dimensionais X Defeitos de Materiais Pás de Turbinas Francis

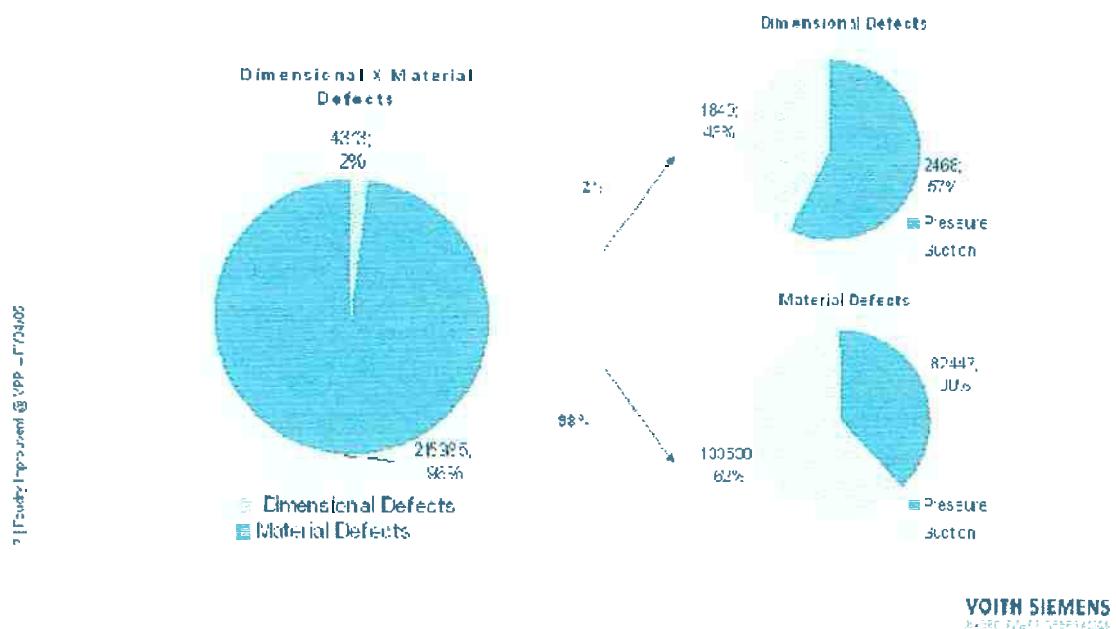


Figura 46- Defeitos de Matérias x Defeitos Dimensionais em pás de turbinas Francis

## 6- Conclusão

Os ensaios não destrutivos constituem em uma das principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos, contribuindo para garantir a qualidade, reduzir os custos e aumentar a confiabilidade da inspeção.

Para obter resultados satisfatórios e válidos, os seguintes itens devem ser considerados como elementos fundamentais para os resultados destes ensaios:

- Pessoal treinado e qualificado;
- Procedimento de execução de ensaios qualificados com base nas normas e critérios de aceitação perfeitamente definidos;
- Equipamentos devidamente calibrados

O levantamento estatístico visou demonstrar, através dos resultados obtidos pelos ensaios não destrutivos, as regiões mais críticas da peça analisada em questão, assim como definir qualitativamente os diversos tipos de defeitos ocasionados. Com essa base de dados e informações futuramente o processo de produção da Voith poderá ser otimizado e pontos falhos solucionados antes de necessitar haver reparo, com isso a produção de peças terá seu custo diminuído, sendo muito importante para a lucratividade da empresa.

## 7- Bibliografia

- [1]. American Society of Mechanical Engineers - ASME Boiler and Pressure Vessel Code , Section V , 1998 Edition ;
- [2]. LEITE, P.G.P , “Curso de Ensaios Não Destrutivos” ,8a. edição , Associação Brasileira de Metais-ABM , 1966 ;
- [3]. American Society of Mechanical Engineers - ASME Boiler and Pressure Vessel Code , Section VIII Div.1, 1998 Edition ;
- [4]. CHIAVERINI, V. – Aços Carbono e Aços Liga – Publicação da Associação Brasileira de Metais, 1965
- [5]. STEGMANN, D. - Fundamentos do Método de Correntes Parasitas , Scientific Series of the International Bureau , Hannover, Alemanha 1990
- [6]. BETZ,C.E - Principles of Magnetic Particles , Magnaflux Corporation, Fev./67, Illinois , USA
- [7]. SENAI , "Soldagem" , São Paulo , SP , 1997
- [8]. Krautkramer, "Ultrasonic Testing of Materials", Alemanha, second edition
- [9]. American Society of Mechanical Engineers - ASME Boiler and Pressure Vessel Code , Section VIII Div. 2
- [10]. MAC MASTER R ; "Non Destructive Testing Handbook, N.York , Ronald Press, 1959 Vol. 1
- [11] SAKAMOTO, A , "Ensaio por Líquidos Penetrantes", ABENDE
- [12] LEVENTHAL, F: Transdutor de ultra-som capacitivo : desenvolvimento do produto e seu processo de fabricação,