SENAI

*Departamento Regional de São Paulo*

# *Ensaios de materiais*

*Escola SENAI"Luiz Scavone"*

**MÓDULOS ESPECIAIS**

**MECÂNICA**

TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE

# Apresentação

Quando se adquire um produto qualquer, há sempre uma preocupação com a sua **qualidade**. Como consumidores conscientes, é nosso dever exigir do fabricante a garantia do produto, pois quem fabrica deve assumir a responsabilidade pelo perfeito funcionamento do objeto que produziu, uma vez que este seja usado de acordo com as condições recomendadas.

Para poder dar esta garantia, o fabricante precisa ter certeza de que seu produto foi produzido com materiais adequados, em conformidade com as normas técnicas estabelecidas, e que apresenta, portanto, características apropriadas ao uso que lhe será dado.

É por isso que o fabricante deve realizar testes, tanto dos produtos como de seus componentes, antes de lançá-los no mercado. É o que acontece, por exemplo, com os automóveis, que têm todos os seus componentes testados, seguindo normas estabelecidas para isto. Desde a pintura até o ruído do motor, tudo deve satisfazer aos padrões internacionais de qualidade.

Esses testes, que são realizados em condições rigidamente controladas, são chamados de ensaios de materiais, assunto que será tratado neste módulo.

Este módulo compreende 25 aulas. A primeira aula apresenta uma visão geral sobre ensaios tecnológicos e destaca as principais propriedades dos materiais que podem ser avaliadas por meio de ensaios. As demais aulas aparecem organizadas em dois blocos - **ensaios destrutivos** e **ensaios não destrutivos** - e tratam das características dos principais ensaios de materiais.

Os assuntos são relacionados a situações práticas, que fazem parte do dia-a-dia dos profissionais da área de Mecânica, e são apresentados em linguagem simples, sem comprometer o aspecto técnico.

Além do livro, você tem também as aulas apresentadas na televisão. Cada aula do livro corresponde a um programa de tevê. Procure assistir à aula pela tevê e depois estude o assunto correspondente neste livro. Assim você terá mais facilidade para entender o conteúdo, realizar os exercícios propostos e assimilar novos conhecimentos ou reforçar os que já possui.

Ao chegar ao final do estudo deste módulo, você terá adquirido uma série de conhecimentos sobre os procedimentos de vários tipos de ensaios de materiais, e compreenderá melhor o universo da mecânica ao qual os ensaios estão intimamente ligados.

**Autores**
Ivan Cozaciuc
Luís Rodrigues da Silva
Marcos Antonio Togni

**Texto**
Regina Maria Silva

**Colaboração**
Antonio Raimundo
Arnaldo Abray Castrioto
Joel Ferreira
José Soares de Andrade

AULA

1

# Ensaiar é preciso!

## Introdução

Como você se sentiria se a chave que acabou de mandar fazer quebrasse ao dar a primeira volta na fechadura? Ou se a jarra de vidro refratário que a propaganda diz que pode ir do fogão ao freezer trincasse ao ser enchida com água fervente? Ou ainda, se o seu guarda-chuva virasse ao contrário em meio a um temporal?

É. Hoje em dia ninguém se contenta com objetos que apresentem esses resultados. Mas por longo tempo essa foi a única forma de avaliar a qualidade de um produto!

Nos séculos passados, como a construção dos objetos era essencialmente artesanal, não havia um controle de qualidade regular dos produtos fabricados.

Avaliava-se a qualidade de uma lâmina de aço, a dureza de um prego, a pintura de um objeto simplesmente pelo próprio uso.

Um desgaste prematuro que conduzisse à rápida quebra da ferramenta era o método racional que qualquer um aceitava para determinar a qualidade das peças, ou seja, a análise da qualidade era baseada no comportamento do objeto depois de pronto.

O acesso a novas matérias-primas e o desenvolvimento dos processos de fabricação obrigaram à criação de métodos padronizados de produção, em todo o mundo. Ao mesmo tempo, desenvolveram-se processos e métodos de controle de qualidade dos produtos.

Atualmente, entende-se que o controle de qualidade precisa começar pela **matéria-prima** e deve ocorrer **durante** todo o processo de produção, incluindo a inspeção e os ensaios finais nos produtos acabados.

Nesse quadro, é fácil perceber a importância dos ensaios de materiais: é por meio deles que se verifica se os materiais apresentam as **propriedades** que os tornarão adequados ao seu uso.

Que propriedades são essas, que podem ser verificadas nos ensaios? É possível que você já tenha analisado algumas delas ao estudar o módulo **Materiais** ou mesmo em outra oportunidade.

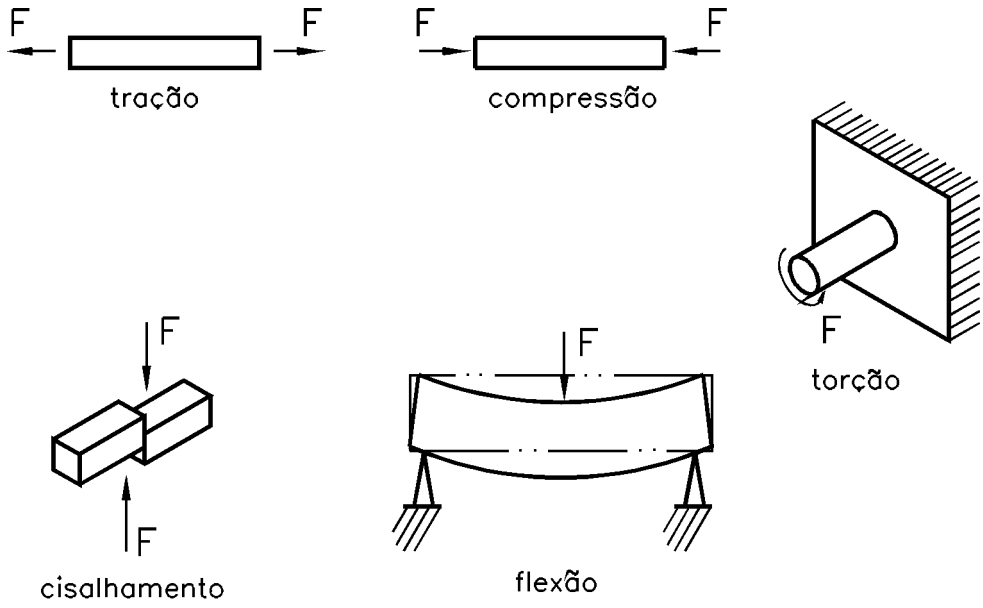
Mesmo assim, é bom refrescar a memória, para entender com mais facilidade os assuntos que virão. Ao terminar o estudo desta aula, você conhecerá algumas propriedades físicas e químicas que os materiais precisam ter para resistirem às solicitações a que serão submetidos durante seu tempo de vida útil. Saberá quais são os tipos de ensaios simples que podem ser realizados na própria oficina, sem aparatos especiais. E ficará conhecendo também como se classificam os ensaios em função dos efeitos que causam nos materiais testados.

## Para que servem os ensaios



Se você parar para observar crianças brincando de cabo-de-guerra, ou uma dona de casa torcendo um pano de chão, ou ainda um ginasta fazendo acrobacias numa cama elástica, verá alguns exemplos de esforços a que os materiais estão sujeitos durante o uso.

Veja a seguir a representação esquemática de alguns tipos de esforços que afetam os materiais.

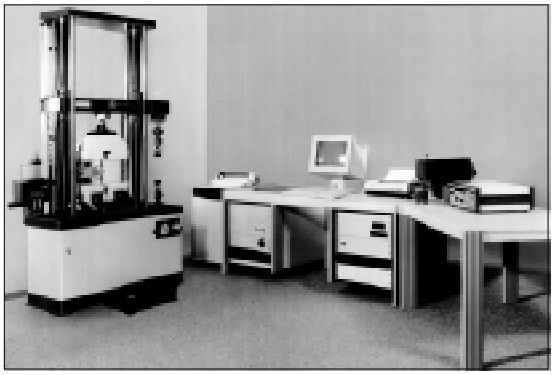



É evidente que os produtos têm de ser fabricados com as características necessárias para suportar esses esforços. Mas como saber se os materiais apresentam tais características?

Realizando ensaios mecânicos! Os ensaios mecânicos dos materiais são procedimentos padronizados que compreendem testes, cálculos, gráficos e consultas a tabelas, tudo isso em conformidade com normas técnicas. Realizar um ensaio consiste em submeter um objeto já fabricado ou um material que vai ser processado industrialmente a situações que simulam os esforços que eles vão sofrer nas condições reais de uso, chegando a limites extremos de solicitação.

## Onde são feitos os ensaios

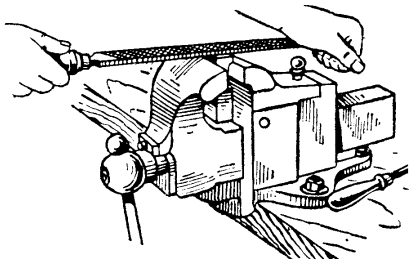
Os ensaios podem ser realizados na própria oficina ou em ambientes especialmente equipados para essa finalidade: os laboratórios de ensaios.



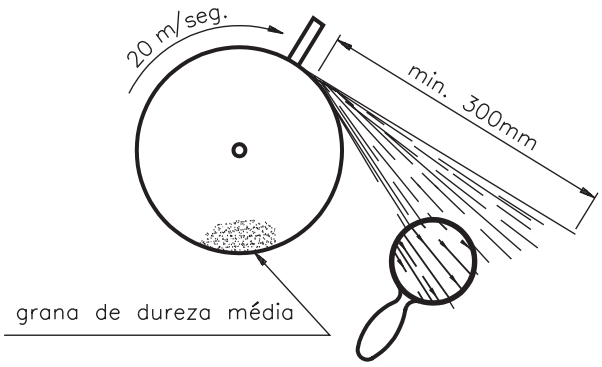
Os ensaios fornecem resultados gerais, que são aplicados a diversos casos, e devem poder ser repetidos em qualquer local que apresente as condições adequadas.

São exemplos de ensaios que podem ser realizados na oficina:

**Ensaio por lima** – É utilizado para verificar a dureza por meio do corte do cavaco. Quanto mais fácil é retirar o cavaco, mais mole o material. Se a ferramenta desliza e não corta, podemos dizer que o material é duro.



**Ensaio pela análise da centelha** – É utilizado para fazer a classificação do teor de carbono de um aço, em função da forma das centelhas que o material emite ao ser atritado num esmeril.




Por meio desses tipos de ensaios não se obtêm valores precisos, apenas conhecimentos de características específicas dos materiais.

Os ensaios podem ser realizados em **protótipos**, no próprio **produto final** ou em **corpos de prova** e, para serem confiáveis, devem seguir as normas técnicas estabelecidas.

Imagine que uma empresa resolva produzir um novo tipo de tesoura, com lâmina de aço especial. Antes de lançar comercialmente o novo produto, o fabricante quer saber, com segurança, como será seu comportamento na prática.

Para isso, ele ensaia as matérias-primas, controla o processo de fabricação e produz uma pequena quantidade dessas tesouras, que passam a ser os protótipos. Cada uma dessas tesouras será submetida a uma série de testes que procurarão reproduzir todas as situações de uso cotidiano. Por exemplo, o corte da tesoura pode ser testado em materiais diversos, ou sobre o mesmo material por horas seguidas. Os resultados são analisados e servem como base para o aperfeiçoamento do produto.

Os ensaios de protótipos são muito importantes, pois permitem avaliar se o produto testado apresenta características adequadas à sua função. Os resultados obtidos nesses testes não podem ser generalizados, mas podem servir de base para outros objetos que sejam semelhantes ou diferentes.

Já os ensaios em corpos de provas, realizados de acordo com as normas técnicas estabelecidas, em condições padronizadas, permitem obter resultados de aplicação mais geral, que podem ser utilizados e reproduzidos em qualquer lugar.

**Protótipo** é a versão preliminar de um produto, produzida em pequena quantidade, e utilizada durante a fase de testes.

**Corpo de prova** é uma amostra do material que se deseja testar, com dimensões e forma especificadas em normas técnicas.

## Propriedades dos materiais

Todos os campos da tecnologia, especialmente aqueles referentes à construção de máquinas e estruturas, estão intimamente ligados aos materiais e às suas propriedades.

Tomando como base as mudanças que ocorrem nos materiais, essas propriedades podem ser classificadas em dois grupos:

- físicas;
- químicas.

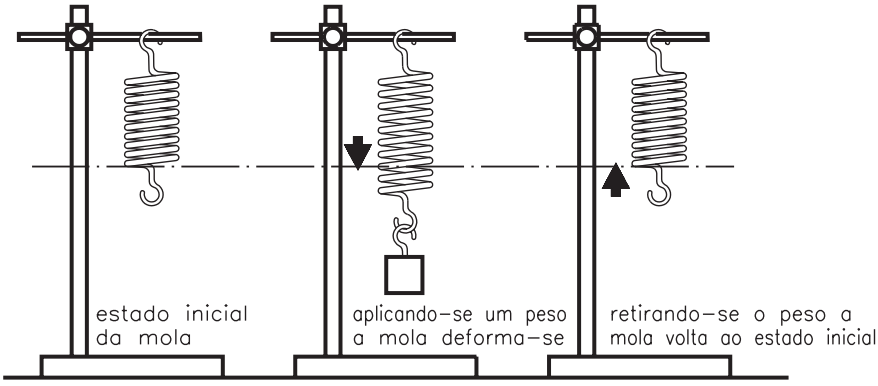
Se colocamos água fervente num copo descartável de plástico, o plástico amolece e muda sua forma. Mesmo mole, o plástico continua com sua composição química inalterada. A propriedade de sofrer deformação sem sofrer mudança na composição química é uma propriedade física.

Por outro lado, se deixarmos uma barra de aço-carbono (ferro + carbono) exposta ao tempo, observaremos a formação de ferrugem (óxido de ferro: ferro + oxigênio). O aço-carbono, em contato com o ar, sofre corrosão, com mudança na sua composição química. A resistência à corrosão é uma propriedade química.

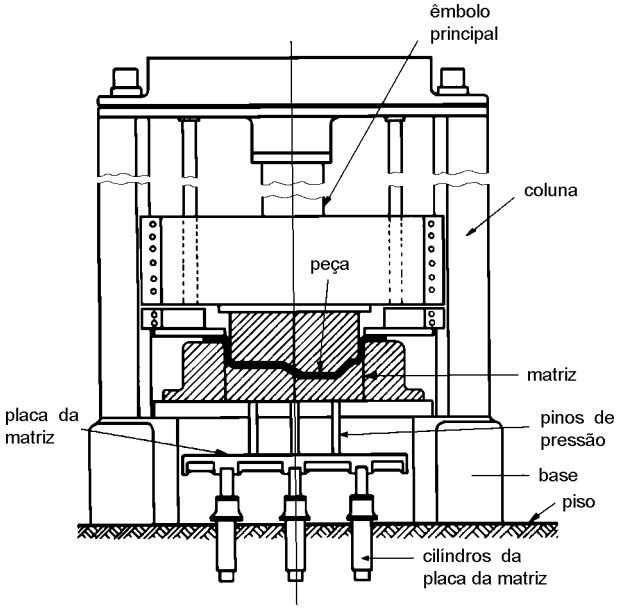
Entre as propriedades físicas, destacam-se as **propriedades mecânicas**, que se referem à forma como os materiais reagem aos esforços externos, apresentando deformação ou ruptura.

Quando você solta o pedal da embreagem do carro, ele volta à posição de origem graças à elasticidade da mola ligada ao sistema acionador do pedal.

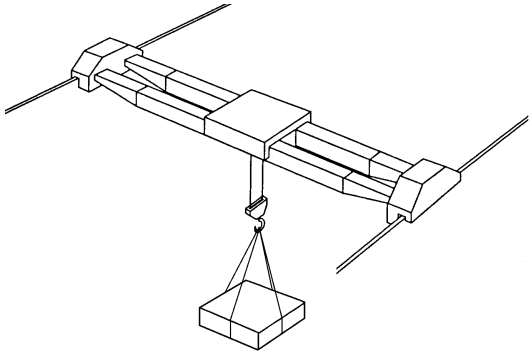
A **elasticidade** é um exemplo de propriedade mecânica. Pode ser definida como a capacidade que um material tem de retornar à sua forma e dimensões originais quando cessa o esforço que o deformava.




A estampagem de uma chapa de aço para fabricação de um capô de automóvel, por exemplo, só é possível em materiais que apresentem plasticidade suficiente. **Plasticidade** é a capacidade que um material tem de apresentar deformação permanente apreciável, sem se romper.




Uma viga de uma ponte rolante deve suportar esforços de flexão sem se romper. Para tanto, é necessário que ela apresente resistência mecânica suficiente. **Resistência mecânica** é a capacidade que um material tem de suportar esforços externos (tração, compressão, flexão etc.) sem se romper.



Para determinar qualquer dessas propriedades é necessário realizar um ensaio específico.

## Tipos de ensaios mecânicos

Existem vários critérios para classificar os ensaios mecânicos. A classificação que adotaremos neste módulo agrupa os ensaios em dois blocos:

- ensaios destrutivos;
- ensaios não destrutivos.

**Ensaios destrutivos** são aqueles que deixam algum sinal na peça ou corpo de prova submetido ao ensaio, mesmo que estes não fiquem inutilizados.

Os ensaios destrutivos abordados nas próximas aulas deste módulo são:

- tração
- compressão
- cisalhamento
- dobramento
- flexão
- embutimento
- torção
- dureza
- fluência
- fadiga
- impacto

**Ensaios não destrutivos** são aqueles que após sua realização não deixam nenhuma marca ou sinal e, por conseqüência, nunca inutilizam a peça ou corpo de prova. Por essa razão, podem ser usados para detectar falhas em produtos acabados e semi-acabados.

Os ensaios não destrutivos tratados nas aulas deste módulo são:

- visual
- líquido penetrante
- partículas magnéticas
- ultra-som
- radiografia industrial

Nas próximas aulas você receberá informações detalhadas sobre cada um desses tipos de ensaio. Por ora, resolva os exercícios a seguir, para verificar se os assuntos aqui tratados ficaram bem entendidos.

## Exercícios

**Exercício 1**

Complete as frases com a alternativa que as torna corretas:

**a)** A propriedade física ..... mudança na composição química do material.
- acarreta
- não acarreta

**b)** Resistência mecânica é uma propriedade .....
- física
- química

**c)** Resistência à corrosão é uma propriedade .....
- química
- mecânica

**d)** À forma como os materiais reagem aos esforços externos chamamos de propriedade .....
- química
- mecânica

**Exercício 2**

Marque com um X a resposta correta.

Cessando o esforço, o material volta à sua forma original. Dizemos que esta propriedade mecânica se chama:

( ) resistência mecânica;
( ) elasticidade;
( ) plasticidade.

**Exercício 3**

Você estudou que os ensaios podem ser: destrutivos e não destrutivos. Relacione corretamente os exemplos com os ensaios:

| | |
|---|---|
| Ensaio destrutivo | **1** |
| Ensaio não destrutivo | **2** |

| | |
|---|---|
| Ensaio por ultra-som | |
| Ensaio visual | |
| Ensaio de tração | |
| Ensaio por lima | |
| Ensaio de dureza | |

AULA

2

# Ensaio de tração: cálculo da tensão

## Introdução

Você com certeza já andou de elevador, já observou uma carga sendo elevada por um guindaste ou viu, na sua empresa, uma ponte rolante transportando grandes cargas pra lá e pra cá. Além das grandes cargas movimentadas nessas situações, um outro fato certamente chama a sua atenção: são os cabos de aço usados nesses equipamentos!

Você faz idéia do esforço que esses cabos têm de agüentar ao deslocar estas cargas? Sabe como se chama esse esforço e como ele é calculado? Sabe que a determinação deste tipo de esforço e a especificação das dimensões de cabos estão entre os problemas mais freqüentemente encontrados no campo da Mecânica?

Tanto o superdimensionamento como o subdimensionamento de produtos podem trazer conseqüências graves: o primeiro porque gera desperdício de material, maior consumo de energia e baixo desempenho; o segundo porque o produto vai falhar e, além do prejuízo, pode causar sérios acidentes, com danos irreparáveis.

Essas considerações servem para ilustrar o quanto é importante conhecer a **resistência** dos materiais, que pode ser avaliada pela realização de ensaios mecânicos. O ensaio mecânico mais importante para a determinação da resistência dos materiais é o **ensaio de tração**.

Se você está interessado em aprofundar seus conhecimentos sobre esses assuntos, está no caminho certo. Nesta aula você terá oportunidade de conhecer as unidades de medida usadas nos ensaios mecânicos de tração. Ficará sabendo o que se entende por tensão e deformação. E aprenderá a fórmula para calcular a tensão a que estão submetidos os materiais durante o uso. Fique com a gente!

## Nossa aula

### Para que servem os ensaios de tração

Como você já sabe, as propriedades mecânicas constituem uma das características mais importantes dos metais em suas várias aplicações na engenharia, visto que o projeto e a fabricação de produtos se baseiam principalmente no comportamento destas propriedades.

A determinação das propriedades mecânicas dos materiais é obtida por meio de ensaios mecânicos, realizados no próprio produto ou em corpos de prova de dimensões e formas especificadas, segundo procedimentos padronizados por normas brasileiras e estrangeiras.

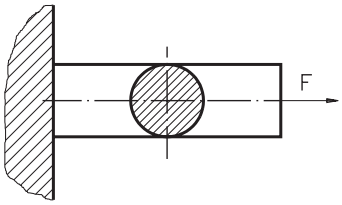
**Fique por dentro**

O corpo de prova é preferencialmente utilizado quando o resultado do ensaio precisa ser comparado com especificações de normas internacionais.

O **ensaio de tração** consiste em submeter o material a um esforço que tende a alongá-lo até a ruptura. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio.

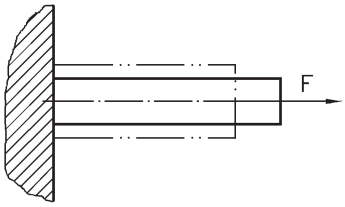
No ensaio de tração o corpo é deformado por alongamento, até o momento em que se rompe. Os ensaios de tração permitem conhecer como os materiais reagem aos esforços de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompem.

## Antes da ruptura, a deformação



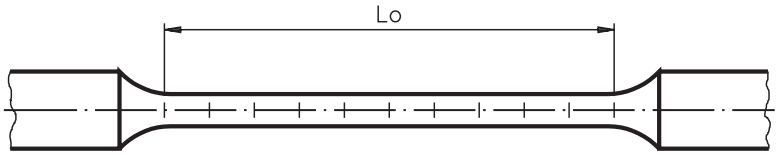

Imagine um corpo preso numa das extremidades, submetido a uma força, como na ilustração ao lado. Quando esta força é aplicada na direção do **eixo longitudinal**, dizemos que se trata de uma **força axial**. Ao mesmo tempo, a força axial é perpendicular à seção transversal do corpo.

Observe novamente a ilustração anterior. Repare que a força axial está dirigida para fora do corpo sobre o qual foi aplicada. Quando a força axial está dirigida para fora do corpo, trata-se de uma **força axial de tração**.

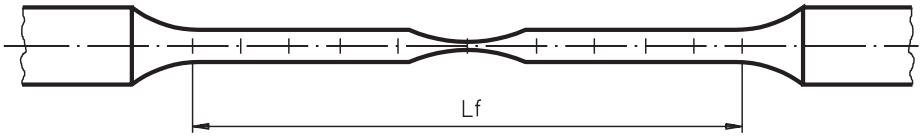



A aplicação de uma força axial de tração num corpo preso produz uma **deformação** no corpo, isto é, um aumento no seu comprimento com diminuição da área da seção transversal.

Este aumento de comprimento recebe o nome de **alongamento**. Veja o efeito do alongamento num corpo submetido a um ensaio de tração.




corpo de prova antes do ensaio de tração




corpo de prova depois do ensaio de tração

Na norma brasileira, o alongamento é representado pela letra **A** e é calculado subtraindo-se o comprimento inicial do comprimento final e dividindo-se o resultado pelo comprimento inicial.

Em linguagem matemática, esta afirmação pode ser expressa pela seguinte igualdade:

$$A = \frac{Lf - Lo}{Lo}$$

sendo que Lo representa o comprimento inicial antes do ensaio e Lf representa o comprimento final após o ensaio.

Suponha que você quer saber qual o alongamento sofrido por um corpo de 12 mm que, submetido a uma força axial de tração, ficou com 13,2 mm de comprimento.

Aplicando a fórmula anterior, você fica sabendo que:

$$A = \frac{Lf - Lo}{Lo} \Rightarrow A = \frac{13{,}2 - 12}{12} \Rightarrow A = \frac{1{,}2}{12} = 0{,}1 \text{ mm/mm}$$

A unidade mm/mm indica que ocorre uma deformação de 0,1 mm por 1 mm de dimensão do material.

Pode-se também indicar a deformação de maneira percentual. Para obter a deformação expressa em porcentagem, basta multiplicar o resultado anterior por 100.

No nosso exemplo: $A = 0{,}1 \text{ mm/mm} \times 100 = 10\%$.

E agora, que tal você tentar?

**Verificando o entendimento**

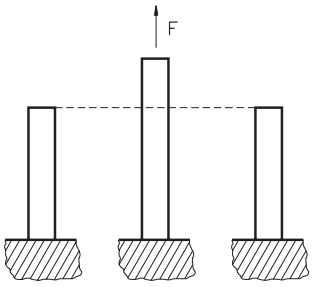
Escreva na forma percentual o valor da deformação correspondente a 0,2 cm/cm.

Resposta: .....

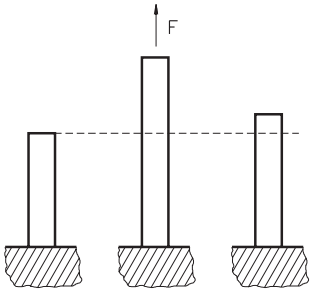
A resposta correta é 20%. Você deve ter chegado a este valor multiplicando 0,2 por 100.

Há dois tipos de deformação, que se sucedem quando o material é submetido a uma força de tração: a elástica e a plástica.

- **Deformação elástica:** não é permanente. Uma vez cessados os esforços, o material volta à sua forma original.




- **Deformação plástica:** é permanente. Uma vez cessados os esforços, o material recupera a deformação elástica, mas fica com uma deformação residual plástica, não voltando mais à sua forma original.




## Tensão de tração: o que é e como é medida

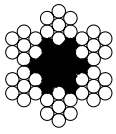
A força de tração atua sobre a área da seção transversal do material. Tem-se assim uma relação entre essa força aplicada e a área do material que está sendo exigida, denominada **tensão**. Neste módulo, a tensão será representada pela letra **T**.

**Em outras palavras:**

Tensão (T) é a relação entre uma força (F) e uma unidade de área (S):

$$T = \frac{F}{S}$$

**Dica**



Para efeito de cálculo da tensão suportada por um material, considera-se como área útil da seção deste material a soma das áreas de suas partes maciças. Por exemplo: um cabo metálico para elevação de pesos, cuja área da seção é de 132,73 $mm^2$, composto por 42 espiras de 1,2 $mm^2$, tem como área útil 50,4 $mm^2$.

A unidade de medida de força adotada pelo Sistema Internacional de Unidades (SI) é o **newton** (**N**).

**Fique por dentro**

A unidade **quilograma-força** (**kgf**) ainda é usada no Brasil porque a maioria das máquinas disponíveis possui escalas nesta unidade. Porém, após a realização dos ensaios, os valores de força devem ser convertidos para **newton (N)**.

A unidade de medida de área é o metro quadrado ($m^2$). No caso da medida de tensão, é mais freqüentemente usado seu submúltiplo, o milímetro quadrado ($mm^2$).

Assim, a tensão é expressa matematicamente como:

$$T = \frac{N}{mm^2}$$

**Fique por dentro**

Durante muito tempo, a tensão foi medida em **kgf/mm²** ou em **psi** (*pound square inch*, que quer dizer: libra por polegada quadrada).

Com adoção do **Sistema Internacional** de Unidades **(SI)** pelo Brasil, em 1978, essas unidades foram substituídas pelo **pascal (Pa)**. Um múltiplo dessa unidade, o **megapascal (MPa)**, vem sendo utilizado por um número crescente de países, inclusive o Brasil.

Veja no quadro de conversões a seguir a correspondência entre essas unidades de medida.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 N | = 0,102 kgf | | |
| 1 kgf | = 0,454 lb | = 9,807 N | |
| 1 MPa | = 1 N/mm² | = 0,102 kgf/mm² | |
| 1 kgf/mm² | = 1422,27 psi | = 9,807 MPa | = 9,807 N/mm² |

Que tal parar e aplicar o que foi visto? Então, resolva o exercício a seguir.

**Verificando o entendimento**

Sabendo que a tensão sofrida por um corpo é de 20 $N/mm^2$, como você expressa esta mesma medida em MPa?

Para dar sua resposta, consulte o quadro de conversões, se achar necessário.

Resposta: .....

Se você interpretou corretamente o quadro de conversões, sua resposta deve ter sido 20 MPa.

Para matar a curiosidade, veja a conversão desta mesma medida para:

**kgf/mm²** → se 1 MPa = 0,102 kgf/mm², então: 20 MPa = 2,04 kgf/mm²

e para:

**psi** → se 1 kgf/mm² = 1422,27 psi, então 2,04 kgf/mm² = 2901,4308 psi

## Calculando a tensão

Um amigo, que está montando uma oficina de manutenção mecânica, pediu sua ajuda para calcular a tensão que deve ser suportada por um tirante de aço de 4 mm² de seção, sabendo que o material estará exposto a uma força de 40 N.

Simples, não é mesmo? Sabendo qual a força aplicada (F = 40 N) e qual a área da seção do tirante (S = 4 mm²), basta aplicar a fórmula:

$$T = \frac{F}{S} \Rightarrow T = \frac{40\ N}{4\ mm^2} \Rightarrow T = \frac{10\ N}{mm^2}$$

Portanto, a tensão que o cabo deverá suportar é de 10 N/mm². Mas, se seu amigo quiser saber a resposta em megapascal, o resultado será 10 MPa.

Muito bem! Por ora, se todos os assuntos apresentados ficaram claros, já está mais que bom. Antes de passar para o estudo da próxima aula, resolva os exercícios a seguir para ter certeza de que tudo que foi visto nesta aula não apresenta mais mistérios para você.

## Exercícios

**Exercício 1**

Assinale com um X a(s) resposta(s) que completa(m) a frase corretamente:
O ensaio de tração tem por finalidade(s) determinar:

**a)** ( ) o limite de resistência à tração;
**b)** ( ) a impressão causada por um penetrador;
**c)** ( ) o diâmetro do material ensaiado;
**d)** ( ) o alongamento do corpo ensaiado.

**Exercício 2**

Quando se realiza ensaio de tração, podem ocorrer duas deformações. Assinale com um X quais são elas, **na seqüência** em que os fenômenos ocorrem no material.

**a)** ( ) plástica e elástica;
**b)** ( ) plástica e normal;
**c)** ( ) plástica e regular;
**d)** ( ) elástica e plástica.

**Exercício 3**

Calcule a deformação sofrida por um corpo de 15 cm, que após um ensaio de tração passou a apresentar 16 cm de comprimento. Expresse a resposta de forma percentual.

**Exercício 4**

Sabendo que a tensão de um corpo é igual a 12 $N/mm^2$, a quanto corresponde essa tensão em $kgf/mm^2$? (Consulte o quadro de conversões, se necessário).

**Exercício 5**

Qual a tensão, em MPa, sofrida por um corpo com 35 $mm^2$ que está sob efeito de uma força de 200 kgf? (Consulte o quadro de conversões, se necessário).

AULA

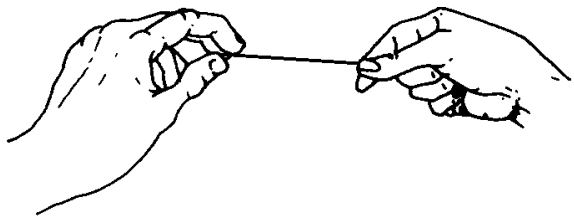
3

# Ensaio de tração: propriedades mecânicas avaliadas

## Introdução

Nos tempos em que moleque que era moleque brincava com estilingue, qualquer um sabia, na prática, como escolher o material para fazer a atiradeira. Mas se você não for daquela época, arranje um elástico, desses comuns, e siga os procedimentos sugeridos a seguir.

Segure o elástico com as duas mãos, uma em cada ponta, como mostra a ilustração.



Depois, mantendo um dos lados fixos, vá aplicando, vagarosamente, uma força de tração do lado oposto. Pare de aplicar a força por um instante. Observe como o elástico tende a retornar à sua forma original quando a força é aliviada. Volte a tracionar um dos lados. Veja que, ao mesmo tempo em que o elástico vai se alongando, sua seção se estreita. Agora não tem mais jeito! Mesmo que você pare de tracionar, o elástico não volta mais à forma original. Continue tracionando mais um pouco. Epa! O elástico se rompeu. Você está com dois pedaços, um em cada mão. Juntando os dois pedaços você notará que eles estão maiores que o pedaço original.

Isso que você acabou de fazer pode ser considerado uma forma rudimentar de ensaio de tração. Quando o ensaio de tração é realizado num laboratório, com equipamento adequado, ele permite registrar informações importantes para o cálculo de resistência dos materiais a esforços de tração e, conseqüentemente, para projetos e cálculos de estruturas. Algumas informações são registradas durante a realização do ensaio e outras são obtidas pela análise das características do corpo de prova após o ensaio.

Os dados relativos às forças aplicadas e deformações sofridas pelo corpo de prova até a ruptura permitem traçar o gráfico conhecido como diagrama **tensão-deformação**.

Nesta aula você aprenderá a interpretar o diagrama tensão-deformação e ficará sabendo quais as propriedades determinadas no ensaio de tração: limite elástico ou de proporcionalidade, limite de escoamento, limite de resistência, limite de ruptura e estricção.

Esqueça o estilingue. Jogue fora seu elástico, se é que já não o fez, e estique o olho nesta aula. Você vai ficar sabendo muita coisa interessante!

## Nossa aula

### Diagrama tensão-deformação

Quando um corpo de prova é submetido a um ensaio de tração, a máquina de ensaio fornece um gráfico que mostra as relações entre a força aplicada e as deformações ocorridas durante o ensaio.

Mas o que nos interessa para a determinação das propriedades do material ensaiado é a relação entre **tensão** e **deformação.**

Você já sabe que a tensão (T) corresponde à força (F) dividida pela área da seção (S) sobre a qual a força é aplicada. No ensaio de tração convencionou-se que a área da seção utilizada para os cálculos é a da seção inicial (So).

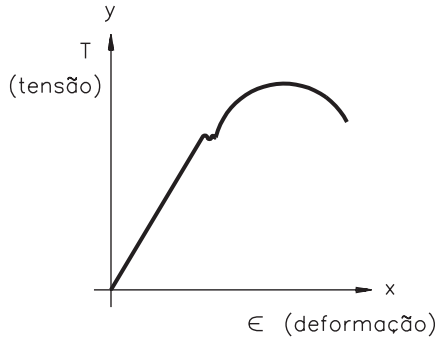
Assim, aplicando a fórmula $T = \frac{F}{So}$,

podemos obter os valores de tensão para montar um gráfico que mostre as relações entre tensão e deformação.

Este gráfico é conhecido por **diagrama tensão-deformação**.

Os valores de deformação, representados pela letra grega minúscula ε (epsílon), são indicados no eixo das abscissas (x) e os valores de tensão são indicados no eixo das ordenadas (y).

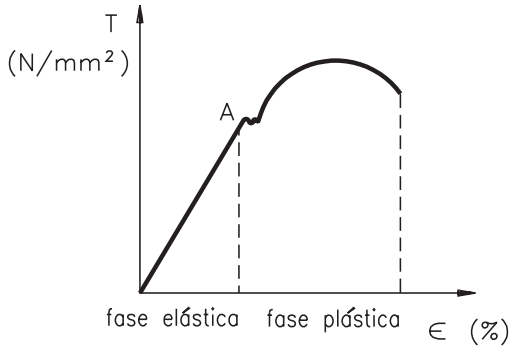
A curva resultante apresenta certas características que são comuns a diversos tipos de materiais usados na área da Mecânica.




Analisando o diagrama tensão-deformação passo a passo, você vai ficar conhecendo cada uma das propriedades que ele permite determinar. A primeira delas é o limite elástico.

## Limite elástico

Observe o diagrama a seguir. Note que foi marcado um ponto A no final da parte reta do gráfico. Este ponto representa o **limite elástico**.




O **limite elástico** recebe este nome porque, se o ensaio for interrompido antes deste ponto e a força de tração for retirada, o corpo volta à sua forma original, como faz um elástico.

Na fase elástica os metais obedecem à lei de Hooke. Suas deformações são diretamente proporcionais às tensões aplicadas.

Exemplificando: se aplicarmos uma tensão de 10 $N/mm^2$ e o corpo de prova se alongar 0,1%, ao aplicarmos uma força de 100 $N/mm^2$ o corpo de prova se alongará 1%.

**Dica**

Em 1678, sir Robert Hooke descobriu que uma mola tem sempre a deformação ($\varepsilon$) proporcional à tensão aplicada (T), desenvolvendo assim a constante da mola (K), ou lei de Hooke, onde $K = T/\varepsilon$.

## Módulo de elasticidade

Na fase elástica, se dividirmos a tensão pela deformação, em qualquer ponto, obteremos sempre um valor constante.

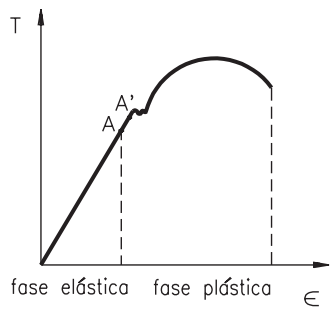
Este valor constante é chamado **módulo de elasticidade**.

A expressão matemática dessa relação é: $E = \frac{T}{\varepsilon}$, onde E é a constante que representa o **módulo de elasticidade**.

O módulo de elasticidade é a medida da rigidez do material. Quanto maior for o módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão e mais rígido será o material. Esta propriedade é muito importante na seleção de materiais para fabricação de molas.

## Limite de proporcionalidade

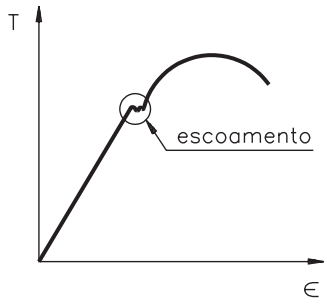
Porém, a lei de Hooke só vale até um determinado valor de tensão, denominado **limite de proporcionalidade**, que é o ponto representado no gráfico a seguir por A', a partir do qual a deformação deixa de ser proporcional à carga aplicada.




Na prática, considera-se que o limite de proporcionalidade e o limite de elasticidade são coincidentes.

## Escoamento

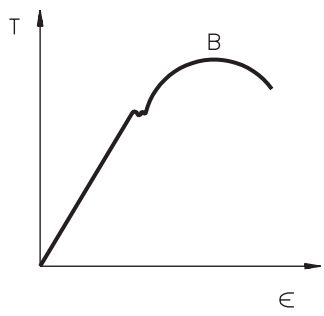
Terminada a fase elástica, tem início a **fase plástica**, na qual ocorre uma deformação permanente no material, mesmo que se retire a força de tração.




No início da fase plástica ocorre um fenômeno chamado **escoamento**. O escoamento caracteriza-se por uma deformação permanente do material sem que haja aumento de carga, mas com aumento da velocidade de deformação. Durante o escoamento a carga oscila entre valores muito próximos uns dos outros.

## Limite de resistência

Após o escoamento ocorre o **encruamento**, que é um endurecimento causado pela quebra dos grãos que compõem o material quando deformados a frio. O material resiste cada vez mais à tração externa, exigindo uma tensão cada vez maior para se deformar.



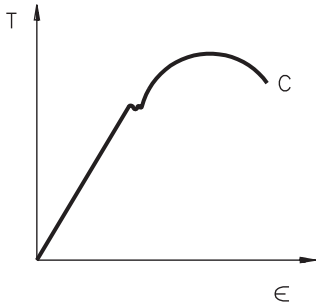

Nessa fase, a tensão recomeça a subir, até atingir um valor máximo num ponto chamado de **limite de resistência** (B).

Para calcular o valor do limite de resistência (LR), basta aplicar a fórmula:

$$LR = \frac{F_{max}}{So}$$

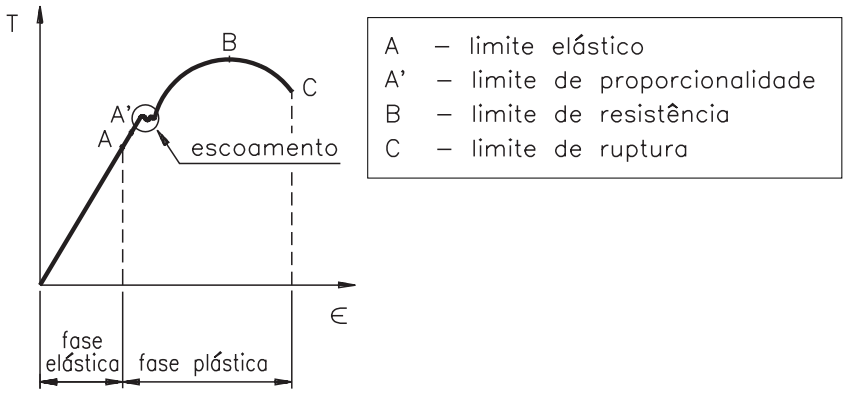
## Limite de ruptura

Continuando a tração, chega-se à ruptura do material, que ocorre num ponto chamado **limite de ruptura** (C).




Note que a tensão no limite de ruptura é menor que no limite de resistência, devido à diminuição da área que ocorre no corpo de prova depois que se atinge a carga máxima.

Agora você já tem condições de analisar todos esses elementos representados num mesmo diagrama de tensão-deformação, como na figura a seguir.




## Estricção

É a redução percentual da área da seção transversal do corpo de prova na região onde vai se localizar a ruptura.

A estricção determina a ductilidade do material. Quanto maior for a porcentagem de estricção, mais dúctil será o material.

Por ora é suficiente. Que tal descansar um pouco para assentar as idéias e depois retomar o estudo resolvendo os exercícios propostos a seguir? Se tiver alguma dificuldade, faça uma revisão dos assuntos tratados nesta aula antes de prosseguir.

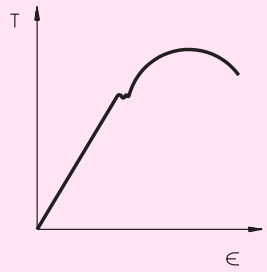
## Exercícios

**Exercício 1**

Analise o diagrama de tensão-deformação de um corpo de prova de aço e indique:

**a)** o ponto A, que representa o limite de elasticidade

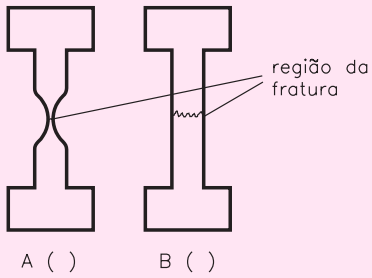
**b)** o ponto B, que representa o limite de resistência




Marque com um X a resposta correta.

**Exercício 2**

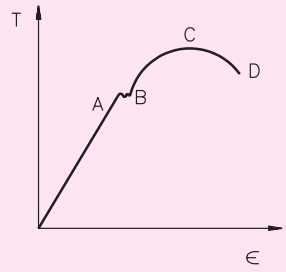
Compare as regiões das fraturas dos corpos de prova A e B, apresentados a seguir. Depois responda: qual corpo de prova representa material dúctil?




**Exercício 3**

Analise o diagrama tensão-deformação abaixo e assinale qual a letra que representa a região de escoamento.

**A** ( )
**B** ( )
**C** ( )
**D** ( )



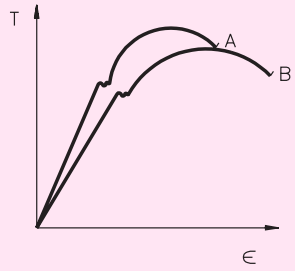

**Exercício 4**

A fórmula $LR = \frac{F_{max}}{So}$ permite calcular:

**a)** ( ) o limite de escoamento;
**b)** ( ) a estricção;
**c)** ( ) o limite de resistência;
**d)** ( ) o limite de ruptura.

**Exercício 5**

Dois materiais (A e B) foram submetidos a um ensaio de tração e apresentaram as seguintes curvas de tensão-deformação:




Qual dos materiais apresenta maior deformação permanente?

**A** ( )
**B** ( )

AULA

4

# Ensaio de tração: procedimentos normalizados

## Introdução

Hoje em dia é comum encontrar uma grande variedade de artigos importados em qualquer supermercado e até mesmo em pequenas lojas de bairro: são produtos eletrônicos japoneses, panelas antiaderentes francesas, utilidades domésticas com o inconfundível *design* italiano e uma infinidade de quinquilharias fabricadas pelos chineses. Isso sem contar os veículos americanos, coreanos, russos etc., que de uma hora para outra invadiram nossas ruas e estradas. Por outro lado, os setores exportadores brasileiros também vêm conquistando espaço no comércio internacional.

A crescente internacionalização do comércio de produtos põe em destaque a importância da **normalização** dos ensaios de materiais. Qualquer que seja a procedência do produto, os testes pelos quais ele passou em seu país de origem devem poder ser repetidos, nas mesmas condições, em qualquer lugar do mundo.

É por isso que essa aula será dedicada ao estudo da normalização direcionada para o ensaio de tração. Você ficará sabendo quais são as principais entidades internacionais e nacionais que produzem e divulgam as normas técnicas mais utilizadas pelos laboratórios de ensaios. E saberá também o que dizem algumas normas que fornecem especificações sobre corpos de prova.

## Nossa aula

### Confiabilidade dos ensaios

Os ensaios não indicam propriedades de uma maneira absoluta, porque não reproduzem totalmente os esforços a que uma peça é submetida, em serviço.

Quando realizados no próprio produto, os ensaios têm maior significado pois procuram simular as condições de funcionamento do mesmo. Mas na prática isso nem sempre é realizável. Além disso, os resultados assim obtidos teriam apenas uma importância particular para aquele produto.

Para determinarmos as propriedades dos materiais, independentemente das estruturas em que serão utilizados, é necessário recorrer à confecção de corpos de prova.

Os resultados obtidos dependem do formato do corpo de prova e do método de ensaio adotado. Por exemplo, no ensaio de tração de um corpo de prova de aço, o alongamento é uma medida da sua ductilidade. Este valor é afetado pelo comprimento do corpo de prova, pelo seu formato, pela velocidade de aplicação da carga e pelas imprecisões do método de análise dos resultados do ensaio.

Portanto, os resultados dos ensaios, quando não são suficientemente representativos dos comportamentos em serviço, exigem na fase de projeto das estruturas a introdução de um fator multiplicativo chamado **coeficiente de segurança**, o qual leva em consideração as incertezas, não só provenientes da determinação das propriedades dos materiais, mas também da precisão das hipóteses teóricas referentes à existência e ao cálculo das tensões em toda a estrutura.

## Normas técnicas voltadas para ensaios de tração

Quando se trata de realizar ensaios mecânicos, as normas mais utilizadas são as referentes à especificação de materiais e ao método de ensaio.

Um método descreve o correto procedimento para se efetuar um determinado ensaio mecânico.

Desse modo, seguindo-se sempre o mesmo método, os resultados obtidos para um mesmo material são semelhantes e reprodutíveis onde quer que o ensaio seja executado.

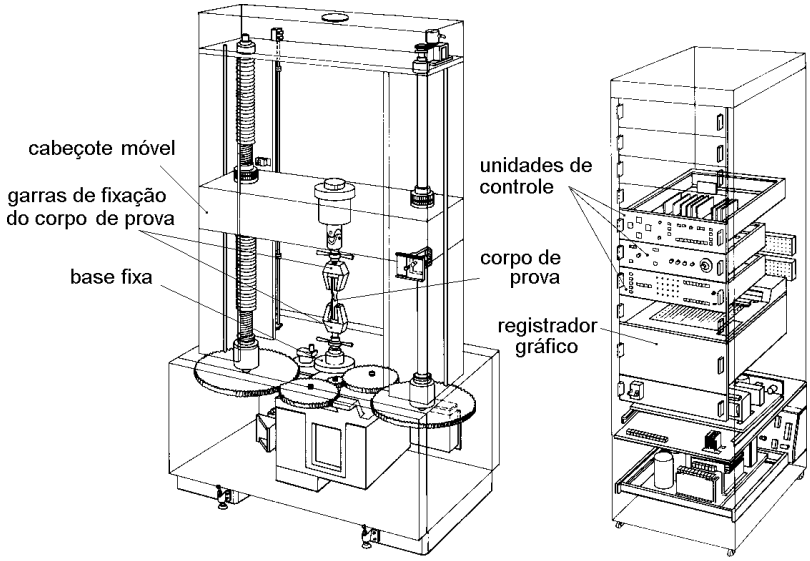
As normas técnicas mais utilizadas pelos laboratórios de ensaios provêm das seguintes instituições:

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
DIN – Deutsches Institut für Normung
AFNOR – Association Française de Normalisation
BSI – British Standards Institution
ASME – American Society of Mechanical Engineer
ISO – International Organization for Standardization
JIS – Japanese Industrial Standards
SAE – Society of Automotive Engineers
COPANT – Comissão Panamericana de Normas Técnicas

Além dessas, são também utilizadas normas particulares de indústrias ou companhias governamentais.

## Equipamento para o ensaio de tração

O ensaio de tração geralmente é realizado na **máquina universal**, que tem este nome porque se presta à realização de diversos tipos de ensaios. Analise cuidadosamente a ilustração a seguir, que mostra os componentes básicos de uma máquina universal de ensaios.




Fixa-se o corpo de prova na máquina por suas extremidades, numa posição que permite ao equipamento aplicar-lhe uma força axial para fora, de modo a aumentar seu comprimento.

A máquina de tração é hidráulica, movida pela pressão de óleo, e está ligada a um **dinamômetro** que mede a força aplicada ao corpo de prova.

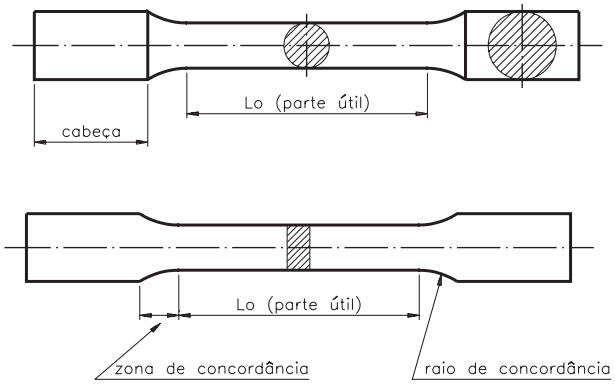
**Dinâmometro** é um equipamento utilizado para medir forças.

A máquina de ensaio possui um registrador gráfico que vai traçando o diagrama de força e deformação, em papel milimetrado, à medida em que o ensaio é realizado.

## Corpos de prova

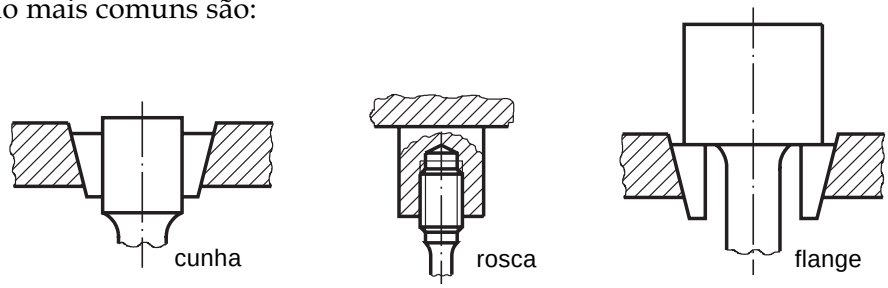
O ensaio de tração é feito em corpos de prova com características especificadas de acordo com normas técnicas. Suas dimensões devem ser adequadas à capacidade da máquina de ensaio.

Normalmente utilizam-se corpos de prova de seção circular ou de seção retangular, dependendo da forma e tamanho do produto acabado do qual foram retirados, como mostram as ilustrações a seguir.




A **parte útil** do corpo de prova, identificada no desenho anterior por Lo, é a região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas do material.

As **cabeças** são as regiões extremas, que servem para fixar o corpo de prova à máquina de modo que a força de tração atuante seja axial. Devem ter seção maior do que a parte útil para que a ruptura do corpo de prova não ocorra nelas. Suas dimensões e formas dependem do tipo de fixação à máquina. Os tipos de fixação mais comuns são:




Entre as cabeças e a parte útil há um raio de concordância para evitar que a ruptura ocorra fora da parte util do corpo de prova (Lo).

Segundo a **ABNT**, o comprimento da parte útil dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração deve corresponder a 5 vezes o diâmetro da seção da parte útil.

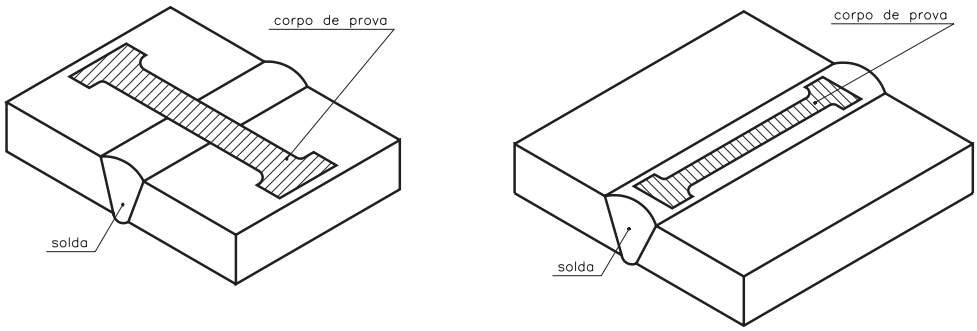
Por acordo internacional, sempre que possível um corpo de prova deve ter 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento inicial. Não sendo possível a retirada de um corpo de prova deste tipo, deve-se adotar um corpo com dimensões proporcionais a essas.

Corpos de prova com seção retangular são geralmente retirados de placas, chapas ou lâminas. Suas dimensões e tolerâncias de usinagem são normalizadas pela ISO/R377 enquanto não existir norma brasileira correspondente. A norma brasileira (NBR 6152, dez./1980) somente indica que os corpos de prova devem apresentar bom acabamento de superficie e ausência de trincas.

**Dica**

Para obter informações mais detalhadas sobre corpos de provas, consulte a norma técnica específica.

Em materiais soldados, podem ser retirados corpos de prova com a solda no meio ou no sentido longitudinal da solda, como você pode observar nas figuras a seguir.



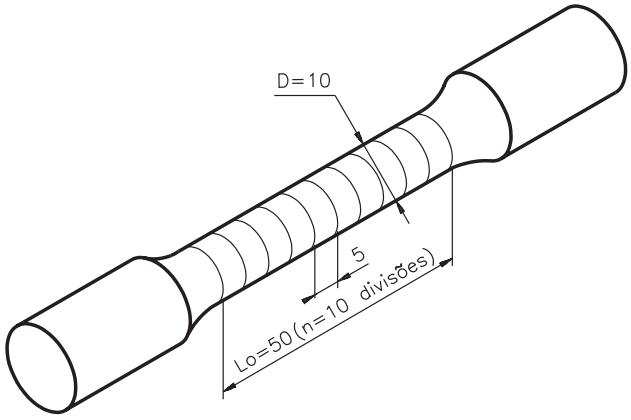
Os ensaios dos corpos de prova soldados normalmente determinam apenas o limite de resistência à tração. Isso porque, ao efetuar o ensaio de tração de um corpo de prova com solda, tensiona-se simultaneamente dois materiais de propriedades diferentes (metal de base e metal de solda). Os valores obtidos no ensaio não representam as propriedades nem de um nem de outro material, pois umas são afetadas pelas outras. O limite de resistência à tração também é afetado por esta interação, mas é determinado mesmo assim para finalidades práticas.

## Preparação do corpo de prova para o ensaio de tração

O primeiro procedimento consiste em identificar o material do corpo de prova. Corpos de prova podem ser obtidos a partir da matéria-prima ou de partes específicas do produto acabado.

Depois, deve-se medir o diâmetro do corpo de prova em dois pontos no comprimento da parte útil, utilizando um micrômetro, e calcular a média.

Por fim, deve-se riscar o corpo de prova, isto é, traçar as divisões no comprimento útil. Num corpo de prova de 50 mm de comprimento, as marcações devem ser feitas de 5 em 5 milímetros.




Assim preparado, o corpo de prova estará pronto para ser fixado à máquina de ensaio. E você deve estar igualmente preparado para resolver os exercícios apresentados a seguir.

**Exercício 1**

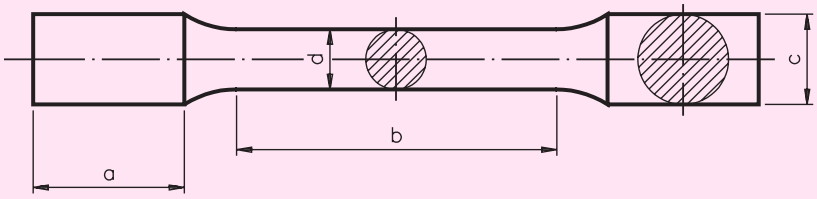
Escreva **V** se a frase for verdadeira ou **F** se for falsa:

( ) O formato do corpo de prova e o método adotado afetam os resultados do ensaio de tração.

**Exercício 2**

Analise o desenho a seguir e assinale com um X a letra que identifica a parte útil do corpo de prova.

**a)** ( )
**b)** ( )
**c)** ( )
**d)** ( )



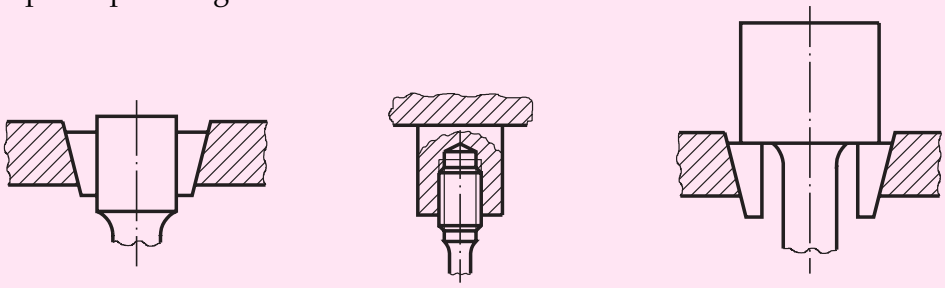

**Exercício 3**

Assinale com um X a alternativa que completa a frase corretamente:
Segundo a ABNT, o comprimento da parte útil dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração deve ser:

**a)** ( ) 5 vezes maior que o diâmetro;
**b)** ( ) 6 vezes maior que o diâmetro;
**c)** ( ) 8 vezes maior que o diâmetro;
**d)** ( ) o dobro do diâmetro.

**Exercício 4**

Analise as figuras abaixo e assinale com um X a que mostra fixação do corpo de prova por flange.



**a)** ( ) **b)** ( ) **c)** ( )

**Exercício 5**

Assinale com um X a **única** frase **falsa** sobre ensaios de corpos de prova com solda.

**a)** ( ) É possível retirar corpos de prova de materiais soldados para ensaios de tração;
**b)** ( ) Nos ensaios de corpos de prova de materiais soldados são tensionados, ao mesmo tempo, dois materiais com propriedades diferentes;
**c)** ( ) Os valores obtidos nos ensaios de tração de materiais soldados são válidos apenas para o metal de base;
**d)** ( ) O limite de resistência à tração, nos ensaios de tração de materiais soldados, é afetado pela interação do metal de base e do metal de solda.

AULA

5

# Ensaio de tração: análise dos resultados

## Introdução

A máquina de ensaio está pronta para começar seu trabalho: o corpo de prova fixado, a velocidade de aplicação da força ajustada, a escala selecionada! Só falta ligar o equipamento e acompanhar seu funcionamento.

Terminado o ensaio, vem uma etapa muito importante: a análise dos resultados.

Nesta etapa determinam-se as principais propriedades que podem ser obtidas no ensaio de tração.

Nesta aula você ficará sabendo **como** são determinadas essas propriedades e qual a sua importância no dia-a-dia e nas aplicações na área de mecânica.

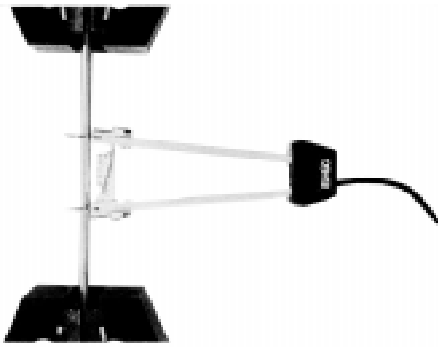
## Nossa aula

### Como calcular o alongamento

Imagine que você vá produzir uma peça por estamparia ou dobramento, por exemplo. Você precisará obter uma deformação maior que a desejada, porque após aliviar a força aplicada o material sofrerá uma recuperação nas suas dimensões, igual ao alongamento elástico.

Se o alongamento elástico for conhecido, isto será fácil. Se não, só na tentativa e aí imagine o prejuízo em retrabalhar as ferramentas.

O alongamento elástico pode ser medido de forma direta por meio de um aparelho chamado extensômetro, que é acoplado ao corpo de prova.



Você já viu que o alongamento plástico define a ductilidade do material: quanto maior o alongamento plástico, maior a facilidade de deformar o material. Pelo alongamento, podemos saber para que tipo de processo de produção um material é indicado (forja a frio, laminação, estamparia profunda, etc.).

A fórmula para calcular o alongamento você já aprendeu na Aula 2 deste módulo:

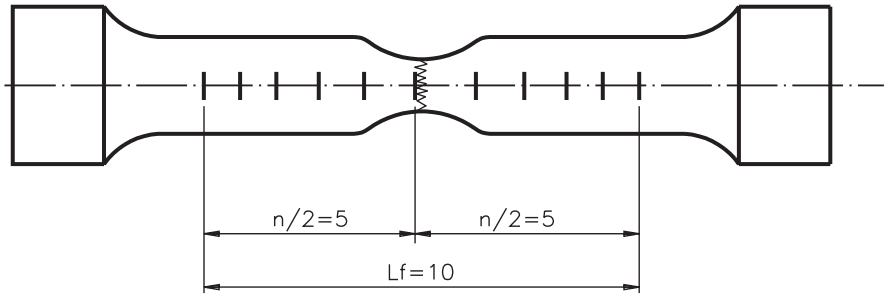
$$A = \frac{Lf - Lo}{Lo}$$

O comprimento inicial (Lo) foi medido antes de se submeter o corpo de prova ao ensaio. Portanto, para calcular o alongamento, resta saber qual o comprimento final (Lf).

Você está lembrado daqueles riscos transversais que foram feitos na preparação do corpo de prova? Pois é! A parte útil do corpo de prova ficou dividida em certo número (n) de partes iguais. Agora você vai saber para que serve essa marcação.

A primeira coisa a fazer é juntar, da melhor forma possível, as duas partes do corpo de prova.

Depois, procura-se o risco mais próximo da ruptura e conta-se a metade das divisões (n/2) para cada lado. Mede-se então o comprimento final, que corresponde à distância entre os dois extremos dessa contagem.

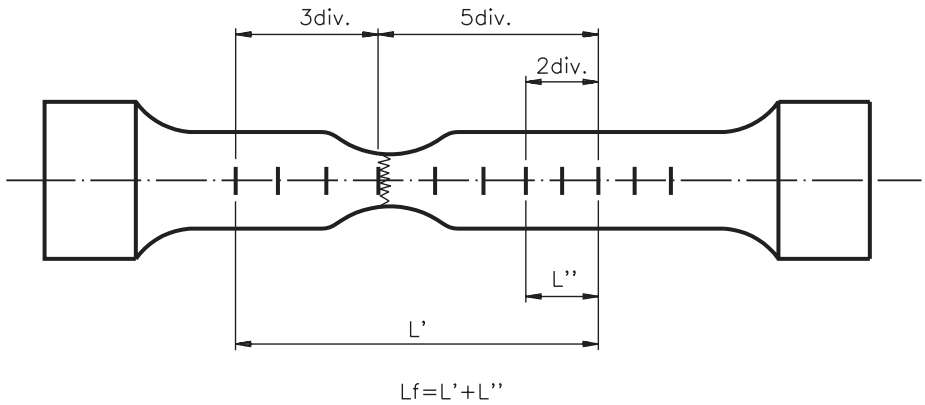



Este é o método para determinar o comprimento final quando a ruptura ocorre no centro da parte útil do corpo de prova.

Mas, se a ruptura ocorrer fora do centro, de modo a não permitir a contagem de n/2 divisões de cada lado, deve-se adotar o seguinte procedimento normalizado:

- Toma-se o risco mais próximo da ruptura.
- Conta-se n/2 divisões de um dos lados.
- Acrescentam-se ao comprimento do lado oposto quantas divisões forem necessárias para completar as n/2 divisões.

A medida de Lf será a somatória de L′ + L″, conforme mostra a figura a seguir.




## Determinação do limite elástico ou de proporcionalidade

Para sentir a importância desta propriedade, imagine-se dentro de um elevador, que funciona preso por um cabo de aço. O que aconteceria se o cabo se alongasse um pouquinho toda vez que o elevador subisse ou descesse?

O cabo de aço iria ficar cada vez mais fino, até que a sua espessura se tornasse tal que não suportaria mais o peso da cabine (e com você lá dentro!).

Não seria nada agradável uma queda do vigésimo andar. É, mas isto aconteceria se a solicitação ultrapassasse o limite elástico, porque qualquer solicitação acima do limite elástico causa deformação permanente.

Portanto, o limite elástico é a máxima tensão a que uma peça pode ser submetida. Por isso, o conhecimento de seu valor é fundamental para qualquer aplicação.

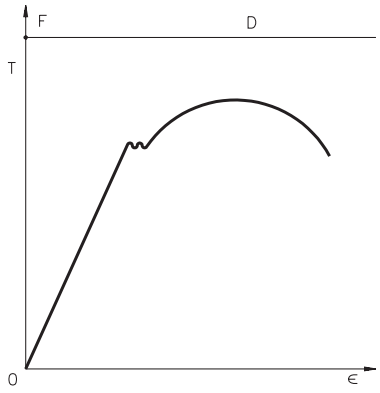
A rigor, a determinação do limite elástico deveria ser feita por carregamentos e descarregamentos sucessivos, até que se alcançasse uma tensão que mostrasse, com precisão, uma deformação permanente.

Este processo é muito trabalhoso e não faz parte dos ensaios de rotina. Porém, devido à importância de se conhecer o limite elástico, em 1939 um cientista chamado Johnson propôs um método para determinar um **limite elástico aparente**, que ficou conhecido como **limite Johnson**.

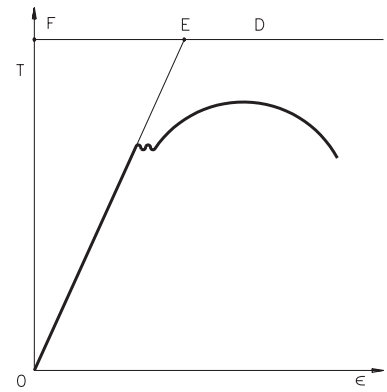
O limite Johnson corresponde à tensão na qual a velocidade de deformação é 50% maior que na origem.

Veja como determinar o limite Johnson na prática, acompanhando os passos explicados a seguir.

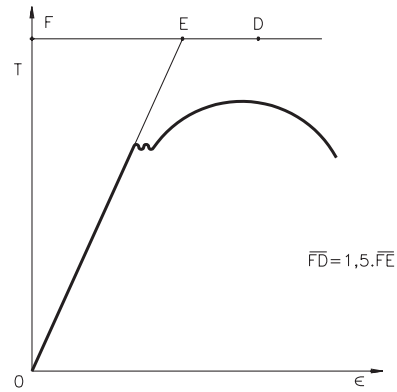
**1.** Trace uma reta perpendicular ao eixo das tensões, fora da região da curva tensão-deformação (F-D).



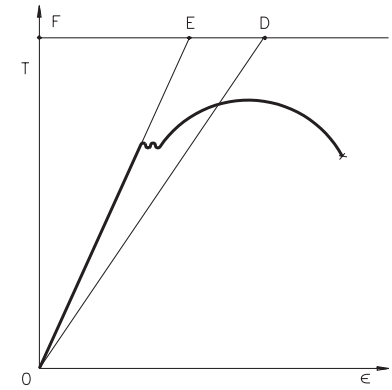
**2.** Prolongue a reta da zona elástica, a partir do ponto O, até que ela corte a reta FD no ponto E.



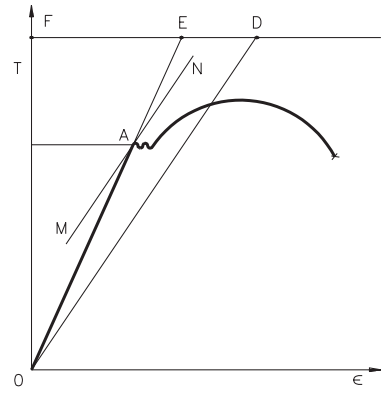

**3.** Remarque o ponto D de modo que a medida do segmento FD seja igual a uma vez e meia o segmento FE.




**4.** Trace a reta OD.




**5.** Trace a reta MN paralela a OD, tangenciando a curva tensão-deformação.



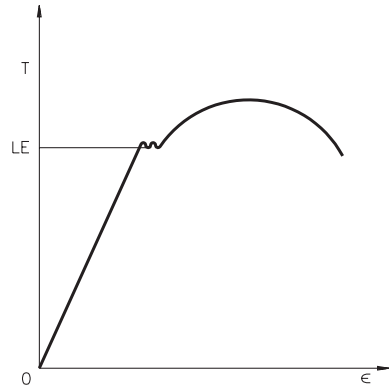

O limite Johnson é o valor de tensão do ponto tangencial (A).

## Limite de escoamento: valores convencionais

O **limite de escoamento** é, em algumas situações, alternativa ao limite elástico, pois também delimita o início da deformação permanente (um pouco acima).

Ele é obtido verificando-se a parada do ponteiro na escala da força durante o ensaio e o patamar formado no gráfico exibido pela máquina. Com esse dado é possível calcular o limite de escoamento do material.

Entretanto, vários metais não apresentam escoamento, e mesmo nas ligas em que ocorre ele não pode ser observado, na maioria dos casos, porque acontece muito rápido e não é possível detectá-lo.

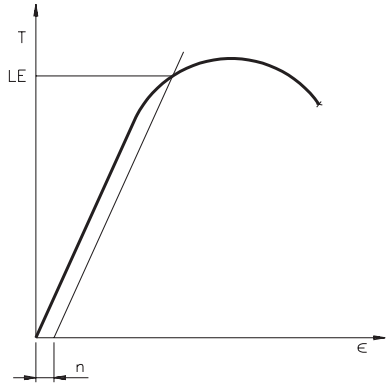



Por essas razões, foram convencionados alguns valores para determinar este limite.

O valor convencionado (n) corresponde a um alongamento percentual. Os valores de uso mais freqüente são:

- n = 0,2%, para metais e ligas metálicas em geral;
- n = 0,1%, para aços ou ligas não ferrosas mais duras;
- n = 0,01%, para aços-mola.

Graficamente, o limite de escoamento dos materiais citados pode ser determinado pelo traçado de uma linha paralela ao trecho reto do diagrama tensão-deformação, a partir do ponto *n*. Quando essa linha interceptar a curva, o limite de escoamento estará determinado, como mostra a figura ao lado.




## Tensão no limite de resistência

Este valor de tensão é utilizado para a especificação dos materiais nas normas, pois é o unico resultado preciso que se pode obter no ensaio de tração e é utilizado como base de cálculo de todas as outras tensões determinadas neste ensaio.

Por exemplo, um aço 1080 apresenta um limite de resistência de aproximadamente 700 MPa. Ao produzirmos novos lotes desse aço, devemos executar seu ensaio para verificar se ele realmente possui esta resistência. Ou seja, esta especificação é utilizada para comparar a resistência de um aço produzido com o valor referencial da norma.

Conhecer o limite de resistência também é útil para comparar materiais. Por exemplo, um aço 1020 apresenta aproximadamente 400 MPa de resistência à tração. Este valor nos demonstra que o aço 1080 tem uma resistência 300 MPa maior que o 1020. Apesar de não se utilizar este valor para dimensionar estruturas, ele servirá de base para o controle de qualidade dessas ligas.

## Dificuldades com a tensão de ruptura

É difícil determinar com precisão o limite de ruptura, pois não há forma de parar o ponteiro da força no instante exato da ruptura. Além disso, o limite de ruptura não serve para caracterizar o material, pois quanto mais dúctil ele é, mais se deforma antes de romper-se.

## Calculando a estricção

Como você já estudou na Aula 3 deste módulo, a estricção também é uma medida da ductilidade do material. É representada pela letra Z, e calculada pela seguinte fórmula:

$$Z = \frac{So - Sf}{So}$$

onde So é a área de seção transversal inicial e Sf a área de seção final, conhecida pela medição da região fraturada.

## Exemplo de relatório de ensaio de tração

Interessado(a): JJA
Data: 22/12/95
Material ensaiado (descrição): Aço 1020
Equipamento: Máquina universal
Norma(s) seguida(s): ABNT – NBR 6152

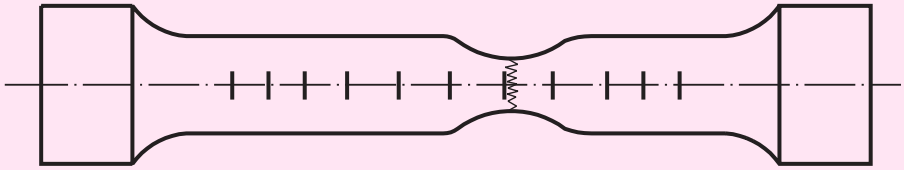
| C.P. nº | ∅ Médio mm | Comprimento útil mm | Área da seção inicial mm² | Limite de escoamento | | Limite de resistência | | Alongamento | | Estricção | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | N | MPa | N | MPa | mm Lf | % | mm Df | % |
| 1 | 10 | 50 | 78,54 | 21991 | 280 | 32987 | 420 | 62 | 24 | 6 | 64 |
| Executante: | | | | | | | Visto: | | | | |

E então? Com todos os conceitos já aprendidos, a interpretação do relatório é relativamente simples, não é mesmo? Para cada corpo de prova ensaiado são registrados os dados iniciais e depois o comportamento da força de tração durante o ensaio. É assim que se obtêm os dados necessários para oferecer maior segurança ao consumidor, desde o projeto ao produto final.

## Exercícios

**Exercício 1**

Sabendo que o número de divisões (n) do corpo de prova a seguir é 10, represente o comprimento final (Lf).



**Exercício 2**

Que propriedade é mais importante determinar na prática: o limite elástico ou o limite de ruptura? Justifique sua resposta.

**Exercício 3**

O limite Johnson serve para determinar:

**a)** ( ) o limite de resistência efetiva;
**b)** ( ) o limite elástico aparente;
**c)** ( ) o limite de ruptura;
**d)** ( ) o limite de escoamento.

**Exercício 4**

Escreva **V** se a frase a seguir for verdadeira ou **F** se for falsa:

( ) Em alguns casos, em vez de determinar o limite elástico, podemos recorrer ao limite de escoamento para saber qual a carga máxima suportada por um corpo.

**Exercício 5**

Complete a frase com a alternativa que a torna verdadeira:

O conhecimento do limite de resistência é importante porque .....

**a)** é o valor utilizado para dimensionar estruturas.
**b)** é o único resultado preciso que se pode obter no ensaio de tração.

AULA

6

# Ensaio de compressão

## Introdução

Podemos observar o esforço de compressão na construção mecânica, principalmente em estruturas e em equipamentos como suportes, bases de máquinas, barramentos etc.

Às vezes, a grande exigência requerida para um projeto é a resistência à compressão. Nesses casos, o projetista deve especificar um material que possua boa resistência à compressão, que não se deforme facilmente e que assegure boa precisão dimensional quando solicitado por esforços de compressão.

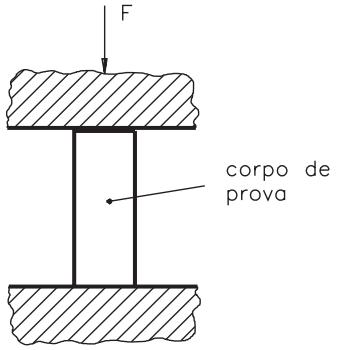
O ensaio de compressão é o mais indicado para avaliar essas características, principalmente quando se trata de materiais frágeis, como ferro fundido, madeira, pedra e concreto. É também recomendado para produtos acabados, como molas e tubos.

Porém, não se costuma utilizar ensaios de compressão para os metais. Estudando os assuntos desta aula, você ficará sabendo quais as razões que explicam o pouco uso dos ensaios de compressão na área da mecânica, analisará as semelhanças entre o esforço de compressão e o esforço de tração, já estudado nas aulas anteriores, e ficará a par dos procedimentos para a realização do ensaio de compressão.

## Nossa aula

### O que a compressão e a tração têm em comum

De modo geral, podemos dizer que a compressão é um esforço axial, que tende a provocar um encurtamento do corpo submetido a este esforço.

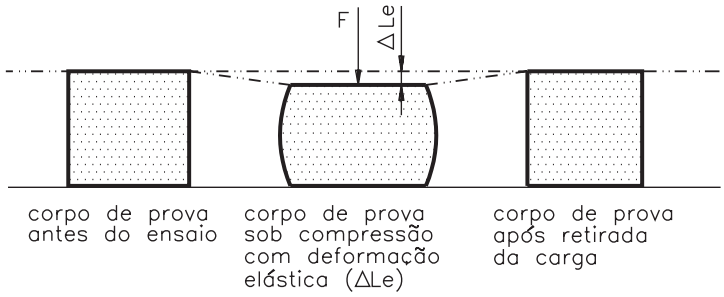



Nos ensaios de compressão, os corpos de prova são submetidos a uma força axial para dentro, distribuída de modo uniforme em toda a seção transversal do corpo de prova.

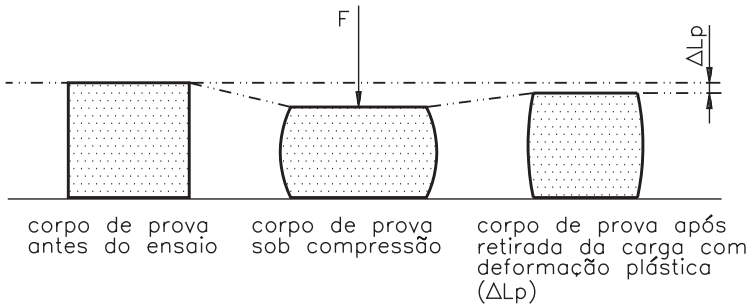
Do mesmo modo que o ensaio de tração, o ensaio de compressão pode ser executado na máquina universal de ensaios, com a adaptação de duas placas lisas – uma fixa e outra móvel. É entre elas que o corpo de prova é apoiado e mantido firme durante a compressão.

As relações que valem para a tração valem também para a compressão. Isso significa que um corpo submetido a compressão também sofre uma deformação elástica e a seguir uma deformação plástica.

Na fase de deformação elástica, o corpo volta ao tamanho original quando se retira a carga de compressão.




Na fase de deformação plástica, o corpo retém uma deformação residual depois de ser descarregado.




Nos ensaios de compressão, a lei de Hooke também vale para a fase elástica da deformação, e é possível determinar o módulo de elasticidade para diferentes materiais.

Na compressão, as fórmulas para cálculo da tensão, da deformação e do módulo de elasticidade são semelhantes às que já foram demonstradas em aulas anteriores para a tensão de tração. Por isso, serão mostradas de maneira resumida, no quadro a seguir.

| RELAÇÕES VÁLIDAS PARA OS ESFORÇOS DE COMPRESSÃO | |
|---|---|
| FÓRMULA | SIGNIFICADO |
| $T = \frac{F}{S}$ | T → tensão de compressão<br>F → força de compressão<br>S → área da seção do corpo |
| $\varepsilon = \frac{Lo - Lf}{Lo}$ | ε → deformação<br>Lo – Lf → variação do comprimento do corpo<br>Lo → comprimento inicial do corpo |
| $E = \frac{T}{\varepsilon}$ | E → módulo de elasticidade<br>T → tensão<br>ε → deformação |

Está na hora de resolver um exercício para testar seu entendimento do assunto. Consulte as fórmulas, se necessário.

### Verificando o entendimento

Um corpo de prova de aço com diâmetro d = 20 mm e comprimento L = 60 mm será submetido a um ensaio de compressão. Se for aplicada uma força F de 100.000 N, qual a tensão absorvida pelo corpo de prova (T) e qual a deformação do mesmo (ε)? O módulo de elasticidade do aço (E) é igual a 210.000 MPa.

Respostas: T = ..... e ε = .....

Que tal conferir? Compare seus procedimentos com os apresentados a seguir.

Em primeiro lugar, você deve ter calculado a área da seção do corpo de prova aplicando a fórmula:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow S = \frac{3{,}14\ (20)^2}{4} = \frac{3{,}14 \times 400}{4} = 3{,}14 \times 100 = 314\ mm^2$$

Conhecendo a área da seção, é possível calcular a tensão de compressão aplicando a fórmula:

$$T = \frac{F}{S} \rightarrow T = \frac{100.000\ N}{314\ mm^2} \rightarrow 318{,}47\ N/mm^2 = 318{,}47\ MPa$$

Para calcular a deformação sofrida pelo corpo de prova aplicando a fórmula,

$$\varepsilon = \frac{Lo - Lf}{Lo}$$

precisamos do comprimento inicial (60 mm) e do comprimento final, que ainda não conhecemos.

Mas sabemos que o módulo de elasticidade deste aço é de 210.000 MPa. Então podemos calcular a deformação isolando esta variável na fórmula do módulo de elasticidade:

$$E = \frac{T}{\varepsilon} \rightarrow \varepsilon = \frac{T}{E} \rightarrow \varepsilon = \frac{318{,}47\ MPa}{210.000\ MPa} = 0{,}0015165$$

Para obter a deformação em valor percentual, basta multiplicar o resultado anterior por 100, ou seja: $0{,}0015165 \times 100 = 0{,}15165\%$.

Isso significa que o corpo sofrerá uma deformação de 0,15165% em seu comprimento, ou seja, de 0,09099 mm. Como se trata de um ensaio de compressão, esta variação será no sentido do encurtamento. Portanto, o comprimento final do corpo de prova será de 59,909 mm.

Muito bem! Agora que você já viu as semelhanças entre os esforços de tração e de compressão, que tal ir mais fundo para saber por que este tipo de ensaio nem sempre é recomendável?

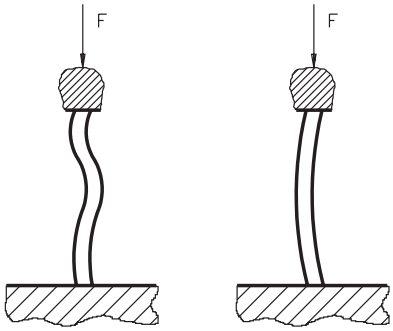
## Limitações do ensaio de compressão

O ensaio de compressão não é muito utilizado para os metais em razão das dificuldades para medir as propriedades avaliadas neste tipo de ensaio. Os valores numéricos são de difícil verificação, podendo levar a erros.

Um problema que sempre ocorre no ensaio de compressão é o **atrito** entre o corpo de prova e as placas da máquina de ensaio.

A deformação lateral do corpo de prova é barrada pelo atrito entre as superfícies do corpo de prova e da máquina. Para diminuir esse problema, é necessário revestir as faces superior e inferior do corpo de prova com materiais de baixo atrito (parafina, teflon etc).

Outro problema é a possível ocorrência de **flambagem**, isto é, encurvamento do corpo de prova. Isso decorre da instabilidade na compressão do metal dúctil. Dependendo das formas de fixação do corpo de prova, há diversas possibilidades de encurvamento, conforme mostra a figura ao lado.

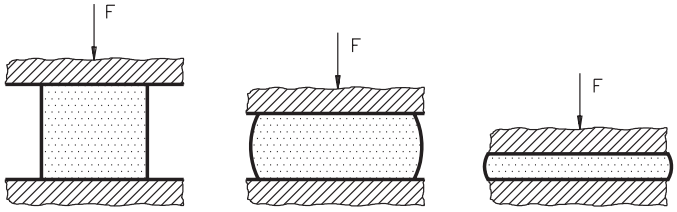



A flambagem ocorre principalmente em corpos de prova com comprimento maior em relação ao diâmetro. Por esse motivo, dependendo do grau de ductilidade do material, é necessário limitar o comprimento dos corpos de prova, que devem ter de 3 a 8 vezes o valor de seu diâmetro. Em alguns materiais muito dúcteis esta relação pode chegar a 1:1 (um por um).

Outro cuidado a ser tomado para evitar a flambagem é o de garantir o perfeito paralelismo entre as placas do equipamento utilizado no ensaio de compressão. Deve-se centrar o corpo de prova no equipamento de teste, para garantir que o esforço de compressão se distribua uniformemente.

## Ensaio de compressão em materiais dúcteis

Nos materiais dúcteis a compressão vai provocando uma deformação lateral apreciável. Essa deformação lateral prossegue com o ensaio até o corpo de prova se transformar num disco, sem que ocorra a ruptura.




É por isso que o ensaio de compressão de materiais dúcteis fornece apenas as propriedades mecânicas referentes à zona elástica.

As propriedades mecânicas mais avaliadas por meio do ensaio são: **limite de proporcionalidade**, **limite de escoamento** e **módulo de elasticidade**.

## Ensaio de compressão em materiais frágeis

O ensaio de compressão é mais utilizado para materiais frágeis. Uma vez que nesses materiais a fase elástica é muito pequena, não é possível determinar com precisão as propriedades relativas a esta fase.

A única propriedade mecânica que é avaliada nos ensaios de compressão de materiais frágeis é o seu limite de resistência à compressão.

Do mesmo modo que nos ensaios de tração, o limite de resistência à compressão é calculado pela carga máxima dividida pela seção original do corpo de prova.

**Relembrando**

Fórmula matemática para cálculo do limite de resistência:

$$LR = \frac{F_{max}}{So}$$

onde $F_{max}$ corresponde à carga máxima atingida após o escoamento e So corresponde à área inicial da seção.

Com essa informação, fica fácil resolver o próximo exercício. Vamos tentar?

### Verificando o entendimento

Qual o limite de resistência à compressão (LR) de um material que tem 400 $mm^2$ de área da seção transversal e que se rompeu com uma carga de 760 kN?

Resposta: LR = .....

Confira. Sabendo que a fórmula para cálculo do limite de resistência à tensão de compressão é:

$$LR = \frac{F_{max}}{So}$$

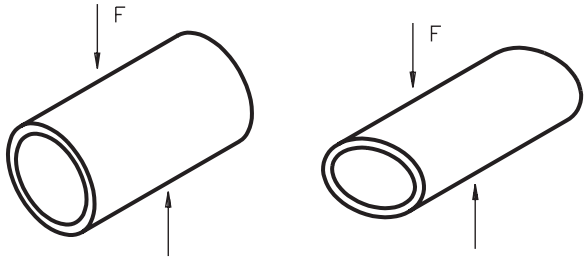
basta substituir os termos da fórmula pelos valores conhecidos:

$$LR = \frac{760.000\ N}{400\ mm^2} = 1.900\ N/mm^2 = 1.900\ MPa$$

Na prática, considera-se que o limite de resistência à compressão é cerca de 8 vezes maior que o limite de resistência à tração. Não sendo viável a realização do ensaio de compressão, esta relação é tomada como base para o cálculo da resistência à compressão.

## Ensaio de compressão em produtos acabados

**Ensaios de achatamento em tubos** – Consiste em colocar uma amostra de um segmento de tubo deitada entre as placas da máquina de compressão e aplicar carga até achatar a amostra.



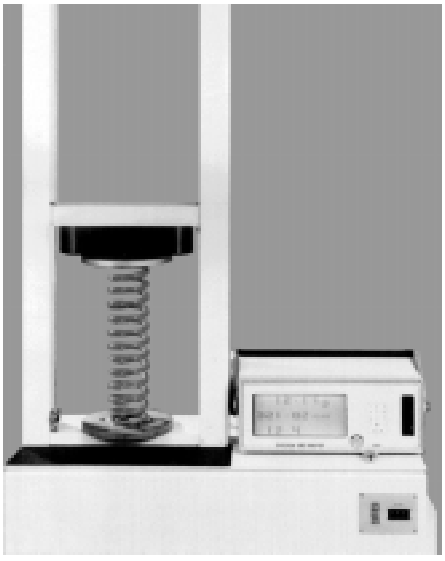

A distância final entre as placas, que varia conforme a dimensão do tubo, deve ser registrada. O resultado é avaliado pelo aparecimento ou não de fissuras, ou seja, rachaduras, sem levar em conta a carga aplicada.

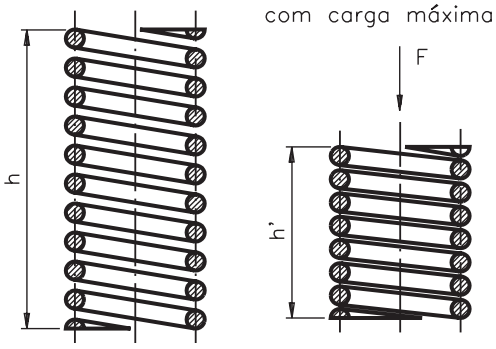
Este ensaio permite avaliar qualitativamente a ductilidade do material, do tubo e do cordão de solda do mesmo, pois quanto mais o tubo se deformar sem trincas, mais dúctil será o material.

**Ensaios em molas** – Para determinar a constante elástica de uma mola, ou para verificar sua resistência, faz-se o ensaio de compressão.

Para determinar a constante da mola, constrói-se um gráfico tensão-deformação, obtendo-se um coeficiente angular que é a constante da mola, ou seja, o módulo de elasticidade.

Por outro lado, para verificar a resistência da mola, aplicam-se cargas predeterminadas e mede-se a altura da mola após cada carga.






Fim da aula! Hora de rever a matéria e se preparar para resolver os exercícios apresentados a seguir. Pelos resultados, você terá uma medida do seu progresso.

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 1**

Garantir o paralelismo entre as placas da máquina de ensaio e limitar o comprimento dos corpos de prova, nos ensaios de compressão, são cuidados necessários para evitar ..... .

**a)** ( ) a flambagem;
**b)** ( ) o atrito;
**c)** ( ) a ruptura;
**d)** ( ) o achatamento.

**Exercício 2**

Na compressão de metais dúcteis **não** é possível determinar:

**a)** ( ) o limite elástico;
**b)** ( ) o limite de escoamento;
**c)** ( ) a deformação;
**d)** ( ) o limite de ruptura.

**Exercício 3**

Nos ensaios de compressão de materiais frágeis, a propriedade mecânica avaliada é:

**a)** ( ) limite de proporcionalidade;
**b)** ( ) limite de elasticidade;
**c)** ( ) limite de resistência;
**d)** ( ) limite de escoamento.

**Exercício 4**

Ensaios de compressão costumam ser realizados em produtos acabados, tais como:

**a)** ( ) barras e chapas;
**b)** ( ) tubos e molas;
**c)** ( ) molas e mancais;
**d)** ( ) tubos e discos.

**Exercício 5**

Sabendo que um ferro fundido apresenta 200 MPa de resistência à tração, qual o valor aproximado da resistência à compressão deste material?

AULA

7

# Ensaio de cisalhamento

## Introdução

Pode ser que você não tenha se dado conta, mas já praticou o cisalhamento muitas vezes em sua vida. Afinal, ao cortar um tecido, ao fatiar um pedaço de queijo ou cortar aparas do papel com uma guilhotina, estamos fazendo o cisalhamento.

No caso de metais, podemos praticar o cisalhamento com tesouras, prensas de corte, dispositivos especiais ou simplesmente aplicando esforços que resultem em forças cortantes. Ao ocorrer o corte, as partes se movimentam paralelamente, por escorregamento, uma sobre a outra, separando-se. A esse fenômeno damos o nome de **cisalhamento**.

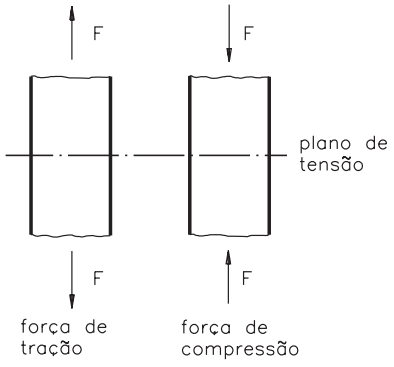
Todo material apresenta certa resistência ao cisalhamento. Saber até onde vai esta resistência é muito importante, principalmente na estamparia, que envolve corte de chapas, ou nas uniões de chapas por solda, por rebites ou por parafusos, onde a força cortante é o principal esforço que as uniões vão ter de suportar.

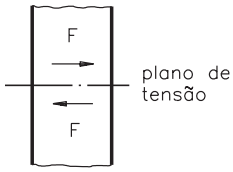
Nesta aula você ficará conhecendo dois modos de calcular a tensão de cisalhamento: realizando o ensaio de cisalhamento e utilizando o valor de resistência à tração do material. E ficará sabendo como são feitos os ensaios de cisalhamento de alguns componentes mais sujeitos aos esforços cortantes.

## Nossa aula

### A força que produz o cisalhamento

Ao estudar os ensaios de tração e de compressão, você ficou sabendo que, nos dois casos, a força aplicada sobre os corpos de prova atua ao longo do eixo longitudinal do corpo.






No caso do cisalhamento, a força é aplicada ao corpo na direção **perpendicular** ao seu eixo longitudinal.

Esta força cortante, aplicada no plano da seção transversal (plano de tensão), provoca o **cisalhamento**.

Como resposta ao esforço cortante, o material desenvolve em cada um dos pontos de sua seção transversal uma reação chamada **resistência ao cisalhamento**.

A resistência de um material ao cisalhamento, dentro de uma determinada situação de uso, pode ser determinada por meio do ensaio de cisalhamento.

## Como é feito o ensaio de cisalhamento

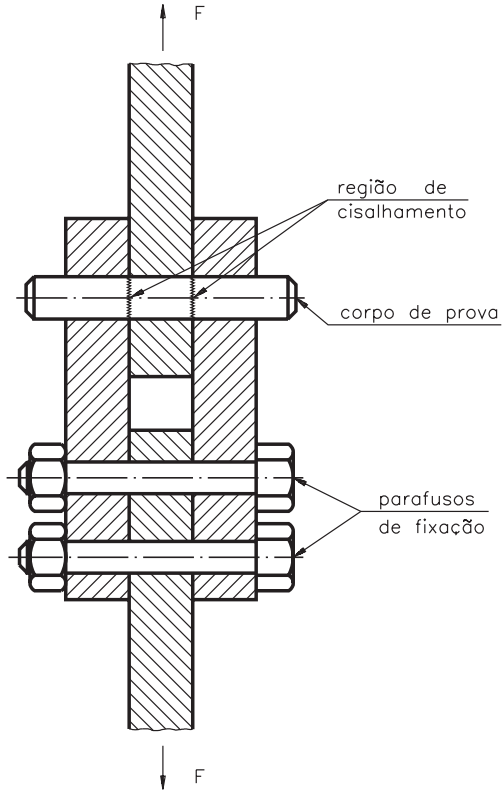
A forma do produto final afeta sua resistência ao cisalhamento. É por essa razão que o ensaio de cisalhamento é mais freqüentemente feito em produtos acabados, tais como pinos, rebites, parafusos, cordões de solda, barras e chapas.

É também por isso que não existem normas para especificação dos corpos de prova. Quando é o caso, cada empresa desenvolve seus próprios modelos, em função das necessidades.

Do mesmo modo que nos ensaios de tração e de compressão, a velocidade de aplicação da carga deve ser lenta, para não afetar os resultados do ensaio.

Normalmente o ensaio é realizado na máquina universal de ensaios, à qual se adaptam alguns dispositivos, dependendo do tipo de produto a ser ensaiado.

Para ensaios de pinos, rebites e parafusos utiliza-se um dispositivo como o que está representado simplificadamente na figura a seguir.

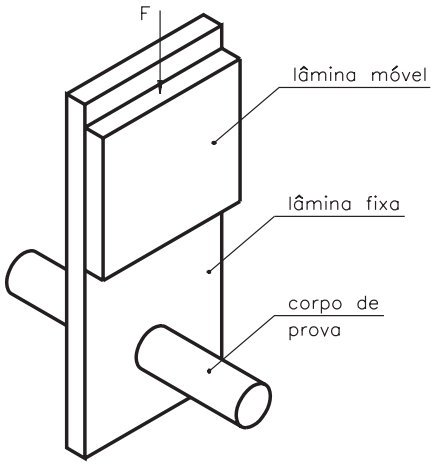


O dispositivo é fixado na máquina de ensaio e os rebites, parafusos ou pinos são inseridos entre as duas partes móveis.

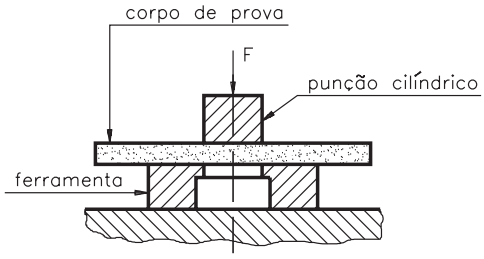
Ao se aplicar uma tensão de tração ou compressão no dispositivo, transmite-se uma força cortante à seção transversal do produto ensaiado. No decorrer do ensaio, esta força será elevada até que ocorra a ruptura do corpo.

No caso de ensaio de solda, utilizam-se corpos de prova semelhantes aos empregados em ensaios de pinos. Só que, em vez dos pinos, utilizam-se junções soldadas.

Para ensaiar barras, presas ao longo de seu comprimento, com uma extremidade livre, utiliza-se o dispositivo abaixo:




No caso de ensaio de chapas, emprega-se um estampo para corte, como o que é mostrado a seguir.




Neste ensaio normalmente determina-se somente a tensão de cisalhamento, isto é, o valor da força que provoca a ruptura da seção transversal do corpo ensaiado. Quer saber mais sobre a tensão de cisalhamento? Então, estude o próximo tópico.

## Tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento será aqui identificada por TC. Para calcular a tensão de cisalhamento, usamos a fórmula:

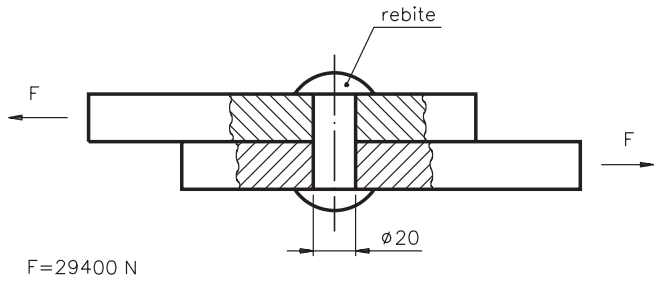
$$TC = \frac{F}{S}$$

onde F representa a força cortante e S representa a área do corpo.

Esta fórmula permite resolver o problema a seguir. Vamos tentar?

## Verificando o entendimento

Observe o desenho a seguir. Ele mostra um rebite de 20 mm de diâmetro que será usado para unir duas chapas de aço, devendo suportar um esforço cortante de 29400 N. Qual a tensão de cisalhamento sobre a seção transversal do rebite?




Resposta: .....

Vamos conferir?

O primeiro passo consiste em calcular a área da seção transversal do rebite, que é dada pela fórmula:

$$S = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

Então, a área da seção do rebite é:

$$S = \frac{3{,}14 \times 20^2}{4} = \frac{1.256 \text{ mm}^2}{4} = 314 \text{ mm}^2$$

Agora, basta aplicar a fórmula para o cálculo da tensão de cisalhamento:

$$TC = \frac{F}{S}$$

Deste modo:

$$TC = \frac{29400 \text{ N}}{314 \text{ mm}^2} = 93{,}63 \text{ MPa}$$

A realização de sucessivos ensaios mostrou que existe uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e a tensão de tração. Na prática, considera-se a tensão de cisalhamento (TC) equivalente a 75% da tensão de tração (T).

Em linguagem matemática isto é o mesmo que: TC = 0,75 T.

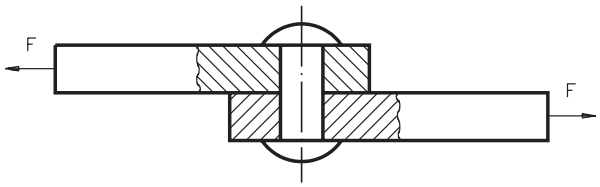
É por isso que, em muitos casos, em vez de realizar o ensaio de cisalhamento, que exige os dispositivos já vistos, utilizam-se os dados do ensaio de tração, mais facilmente disponíveis.

## Uma aplicação prática

O conhecimento da relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão de tração permite resolver inúmeros problemas práticos, como o cálculo do número de rebites necessários para unir duas chapas, sem necessidade de recorrer ao ensaio de cisalhamento.

Como fazer isso? Preste atenção.

Imagine que precisemos unir duas chapas, como mostra a ilustração a seguir.




Sabemos que a tensão de cisalhamento que cada rebite suporta é igual a:

$$TC = \frac{F}{S}$$

Ainda não sabemos qual é o número de rebites necessários, por isso vamos chamá-lo de n. A tensão de cisalhamento será então distribuída pela área de cada rebite, multiplicada pelo número de rebites ($S \times n$).

Conseqüentemente, a fórmula para cálculo da tensão de cisalhamento sobre as chapas será expressa por:

$$TC = \frac{F}{S \times n}$$

Isolando o n, que é o fator que nos interessa descobrir, chegamos à fórmula para o cálculo do número de rebites:

$$n = \frac{F}{TC \times S}$$

No exemplo que estamos analisando, sabemos que:

- as chapas suportarão uma força cortante (F) de 20.000 N
- o diâmetro (D) de cada rebite é de 4 mm
- a tensão de tração (T) suportada por cada rebite é 650 MPa

Portanto, já temos todos os dados necessários para o cálculo do número de rebites que deverão unir as chapas. Basta organizar as informações disponíveis.

Não temos o valor da tensão de cisalhamento dos rebites, mas sabemos que ela equivale a 75% da tensão de tração, que é conhecida. Então, podemos calcular:

$$TC = 0{,}75\ T \Rightarrow TC = 0{,}75 \times 650 \Rightarrow TC = 487{,}5\ MPa$$

Conhecendo o diâmetro de cada rebite, podemos calcular a área da sua seção transversal:

$$S = \frac{\pi \times D^2}{4} \Rightarrow S = \frac{3{,}14 \times 4^2}{4} \Rightarrow S = \frac{50{,}24\ mm^2}{4} \Rightarrow S = 12{,}56\ mm^2$$

Agora, basta transportar os valores conhecidos para a fórmula:

$$n = \frac{F}{TC \times S} \Rightarrow n = \frac{20.000\ N}{487{,}5\ MPa \times 12{,}56\ mm^2} \Rightarrow n = \frac{20.000\ N}{6.123\ MPa \times mm^2}$$

Como $\frac{N}{mm^2}$ é igual a MPa, podemos cancelar estas unidades.

Então, o número de rebites será:

$$n = 3{,}266 \text{ rebites}$$

Por uma questão de segurança, sempre aproximamos o resultado para maior. Assim, podemos concluir que precisamos de 4 rebites para unir as duas chapas anteriores.

Muito bem! É hora de dar uma paradinha, rever o que foi estudado e fazer mais alguns exercícios para reforçar o aprendizado.

## Exercícios

**Exercício 1**

No cisalhamento, as partes a serem cortadas se movimentam paralelamente por ..... uma sobre a outra.

**Exercício 2**

A força que faz com que ocorra o cisalhamento é chamada de força .....

**Exercício 3**

Os dispositivos utilizados no ensaio de cisalhamento, normalmente são adaptados na máquina .....

**Exercício 4**

Um rebite é usado para unir duas chapas de aço. O diâmetro do rebite é de 6 mm e o esforço cortante é de 10.000 N. Qual a tensão de cisalhamento no rebite?

**Exercício 5**

Duas chapas de aço deverão ser unidas por meio de rebites. Sabendo que essas chapas deverão resistir a uma força cortante de 30.000 N e que o número máximo de rebites que podemos colocar na junção é 3, qual deverá ser o diâmetro de cada rebite? (A tensão de tração do material do rebite é de 650 MPa).

AULA

8

# Dobramento e flexão

## Introdução

Imagine-se sentado à beira de uma piscina, numa bela tarde ensolarada, completamente relaxado, apenas observando o movimento. De repente, você vê alguém dando um salto do trampolim.

Se você prestar atenção, vai observar que a prancha se deforma sob o peso do atleta e depois volta à sua forma original. Sem dúvida, um dos fatores que contribuem para a beleza do salto é a capacidade da prancha do trampolim de suportar o esforço aplicado.

Agora, pense no que aconteceria se a prancha do trampolim se dobrasse em vez de voltar à sua forma original. Seria catastrófico!

Neste caso e em muitos outros, é importante conhecer o comportamento dos materiais frente a esse tipo de esforço.

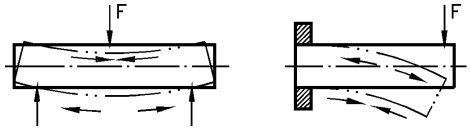
Por exemplo, já lhe aconteceu de estar parado sobre uma ponte, num congestionamento, sentindo o chão tremer sob as rodas do seu carro enquanto os veículos ao seu lado se movem? Sorte sua o fato de a ponte balançar. Isso significa que a estrutura estava suportando o esforço produzido pelo peso dos veículos.

São situações como essas que mostram a importância de saber como os corpos reagem aos esforços de flexão e dobramento, assuntos que serão tratados nesta aula. Além disso, você ficará conhecendo os procedimentos para a realização dos ensaios de dobramento e flexão e saberá identificar as propriedades avaliadas em cada caso.

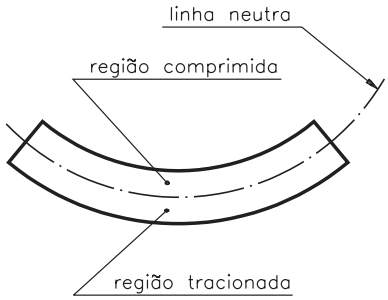
## Nossa aula

### Da flexão ao dobramento

Observe as duas figuras a seguir: a da esquerda mostra um corpo apoiado em suas duas extremidades e a da direita mostra um corpo preso de um lado, com a extremidade oposta livre. Os dois corpos estão sofrendo a ação de uma força F, que age na direção perpendicular aos eixos dos corpos.



A força *F* leva uma região dos corpos a se contrair, devido à compressão, enquanto que outra região se alonga, devido à tração. Entre a região que se contrai e a que se alonga fica uma linha que mantém sua dimensão inalterada - a chamada **linha neutra**. Em materiais homogêneos, costuma-se considerar que a linha neutra fica a igual distância das superfícies externas inferior e superior do corpo ensaiado.




Quando esta força provoca somente uma deformação elástica no material, dizemos que se trata de um esforço de **flexão**. Quando produz uma deformação plástica, temos um esforço de **dobramento**.

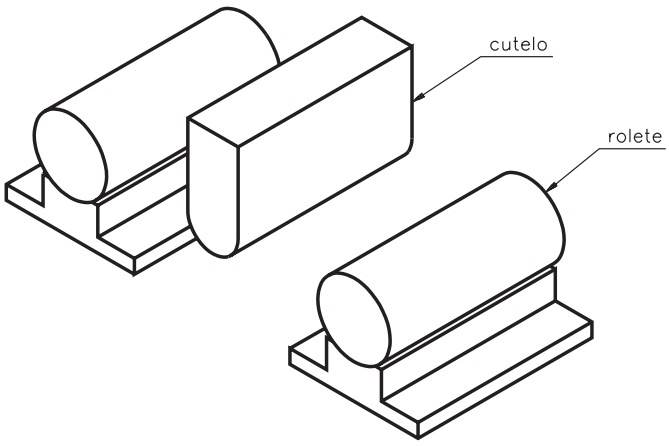
Isso quer dizer que, no fundo, flexão e dobramento são etapas diferentes da aplicação de um mesmo esforço, sendo a **flexão** associada à **fase elástica** e o **dobramento** à **fase plástica**.

Em algumas aplicações industriais, envolvendo materiais de alta resistência, é muito importante conhecer o comportamento do material quando submetido a esforços de flexão. Nesses casos, o ensaio é interrompido no final da fase elástica e são avaliadas as propriedades mecânicas dessa fase.

Quando se trata de materiais dúcteis, é mais importante conhecer como o material suporta o dobramento. Nesses casos, é feito diretamente o ensaio de dobramento, que fornece apenas dados qualitativos.

O ensaio de flexão e o ensaio de dobramento utilizam praticamente a mesma montagem, adaptada à máquina universal de ensaios:

- dois roletes, com diâmetros determinados em função do corpo de prova, que funcionam como apoios, afastados entre si a uma distância preestabelecida;
- um cutelo semicilíndrico, ajustado à parte superior da máquina de ensaios.



Esses ensaios podem ser feitos em corpos de prova ou em produtos, preparados de acordo com normas técnicas específicas.

Embora possam ser feitos no mesmo equipamento, na prática esses dois ensaios não costumam ser feitos juntos. É por isso que, nesta aula, abordaremos cada um deles separadamente. Que tal começar pelo ensaio de dobramento, que é menos complicado?

## O ensaio de dobramento

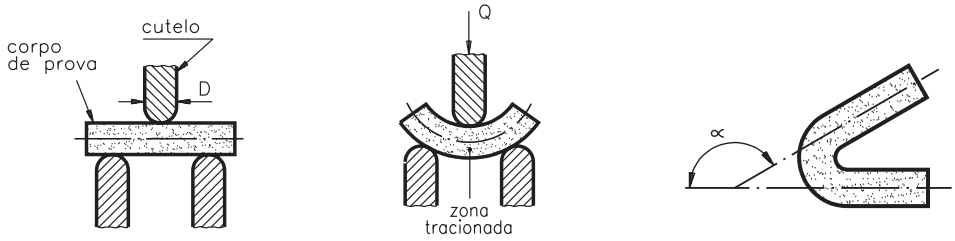
Experimente dobrar duas barras de um metal: por exemplo, uma de alumínio recozido e outra de alumínio encruado.

Você vai observar que a de alumínio recozido dobra-se totalmente, até uma ponta encostar na outra. A de alumínio encruado, ao ser dobrada, apresentará trincas e provavelmente quebrará antes de se atingir o dobramento total.

O ensaio de dobramento é isso: ele nos fornece somente uma indicação qualitativa da ductilidade do material. Normalmente os valores numéricos obtidos não têm qualquer importância.

### Como é feito o ensaio de dobramento

O ensaio consiste em dobrar um corpo de prova de eixo retilíneo e seção circular (maciça ou tubular), retangular ou quadrada, assentado em dois apoios afastados a uma distância especificada, de acordo com o tamanho do corpo de prova, por meio de um cutelo, que aplica um esforço perpendicular ao eixo do corpo de prova, até que seja atingido um ângulo desejado.

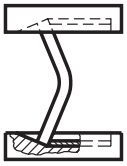



O valor da carga, na maioria das vezes, não importa. O ângulo determina a severidade do ensaio e é geralmente de 90, 120 ou 180º.

Ao se atingir o ângulo especificado, examina-se a olho nu a zona tracionada, que não deve apresentar trincas, fissuras ou fendas. Caso contrário, o material não terá passado no ensaio.

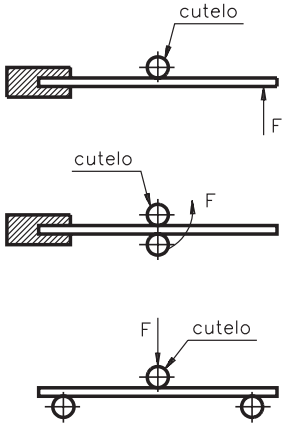
## Processos de dobramento

Há dois processos de dobramento: o dobramento livre e o dobramento semiguiado. Veja, a seguir, as características de cada um.



**Dobramento livre** – É obtido pela aplicação de força nas extremidades do corpo de prova, sem aplicação de força no ponto máximo de dobramento.

**Dobramento semiguiado** – O dobramento vai ocorrer numa região determinada pela posição do cutelo.




### Ensaio de dobramento em barras para construção civil

Barras de aço usadas na construção civil são exemplos de materiais que, além de apresentarem resistência mecânica, devem suportar dobramentos severos durante sua utilização, e por isso são submetidos a ensaio de dobramento. Esta característica é tão importante que é normalizada e classificada em normas técnicas.

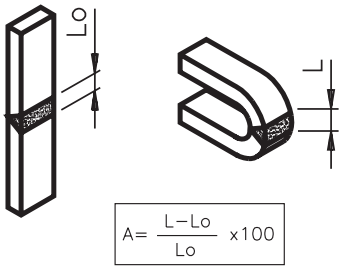
Neste caso, o ensaio consiste em dobrar a barra até se atingir um ângulo de 180º com um cutelo de dimensão especificada de acordo com o tipo de aço da barra – quanto maior a resistência do aço, maior o cutelo. O dobramento normalmente é do tipo semiguiado.

A aprovação da barra é dada pela ausência de fissuras ou fendas na zona tracionada do corpo de prova.

### Ensaio de dobramento em corpos de provas soldados

O ensaio de dobramento em corpos de prova soldados, retirados de chapas ou tubos soldados, é realizado geralmente para a qualificação de profissionais que fazem solda (soldadores) e para avaliação de processos de solda.

Na avaliação da qualidade da solda costuma-se medir o alongamento da face da solda. O resultado serve para determinar se a solda é apropriada ou não para uma determinada aplicação.



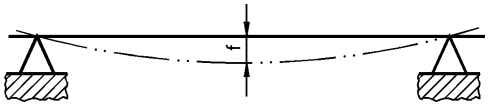

Agora que você já aprendeu algumas noções sobre o ensaio de dobramento, que tal conhecer algumas características do ensaio de flexão? Este é o assunto que será tratado a seguir.

## O ensaio de flexão

O ensaio de flexão é realizado em materiais frágeis e em materiais resistentes, como o ferro fundido, alguns aços, estruturas de concreto e outros materiais que em seu uso são submetidos a situações onde o principal esforço é o de flexão.

Como já foi dito, a montagem do corpo de prova para o ensaio de flexão é semelhante à do ensaio de dobramento.

A novidade é que se coloca um extensômetro no centro e embaixo do corpo de prova para fornecer a medida da deformação que chamamos de **flexa**, correspondente à posição de **flexão máxima**.




Nos materiais frágeis, as flexas medidas são muito pequenas. Conseqüentemente, para determinar a tensão de flexão, utilizamos a carga que provoca a fratura do corpo de prova.

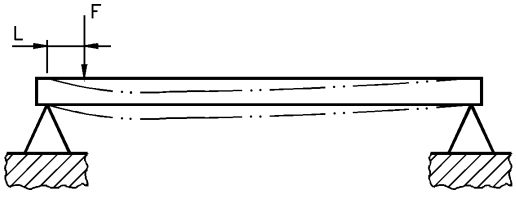
## Propriedades mecânicas avaliadas

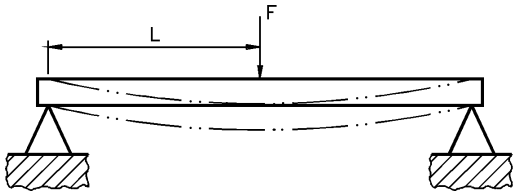
O ensaio de flexão fornece dados que permitem avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais.

Uma dessas propriedades é a **tensão de flexão**.

Mas, para entender como é calculada a tensão de flexão, é necessário saber o que vem a ser **momento fletor**. Isso não será difícil se você acompanhar o exemplo a seguir.

Imagine uma barra apoiada em dois pontos. Se aplicarmos um esforço próximo a um dos apoios, a flexão da barra será pequena. Mas, se aplicarmos o mesmo esforço no ponto central da barra, a flexão será máxima.



Logo, verificamos que a flexão da barra não depende só da força, mas também da distância entre o ponto onde a força é aplicada e o ponto de apoio.

O produto da força pela distância do ponto de aplicação da força ao ponto de apoio origina o que chamamos de **momento**, que no caso da flexão é o **momento fletor** (Mf).

Nos ensaios de flexão, a força é sempre aplicada na região média do corpo de prova e se distribui uniformemente pelo corpo. Na fórmula para calcular o momento fletor, considera-se a metade do valor da força

$$\frac{F}{2}$$

e a metade do comprimento útil do corpo de prova

$$\frac{L}{2}$$

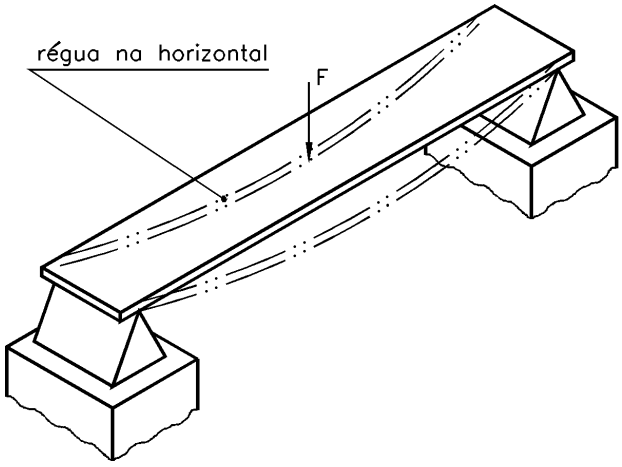
A fórmula matemática para calcular o momento fletor é:

$$M_f = \frac{F}{2} \times \frac{L}{2} \Rightarrow M_f = \frac{FL}{4}$$

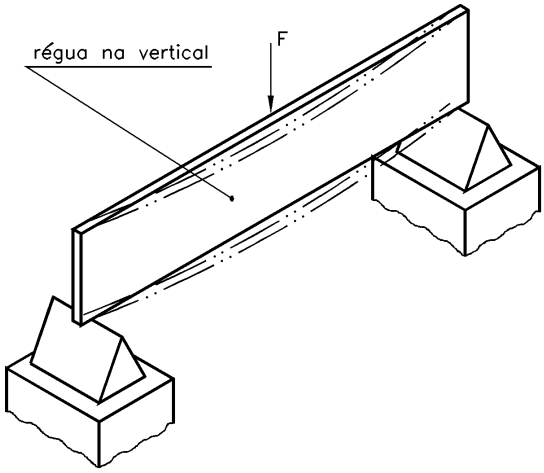
Outro elemento que você precisa conhecer é o **momento de inércia** da seção transversal. Um exemplo o ajudará a entender do que estamos falando.

A forma do material influencia muito sua resistência à flexão. Você pode comprovar isso fazendo a seguinte experiência:

- arranje uma régua de plástico ou de madeira, coloque-a deitada sobre dois pontos de apoio e aplique uma força sobre a régua, como mostra a figura a seguir.



- coloque a mesma régua sobre os dois apoios, só que em pé, como mostra a figura seguinte, e aplique uma força equivalente à aplicada antes.




E então? O que aconteceu? No primeiro caso, ocorreu uma grande flexão. No segundo, a flexão foi quase nula. Isso tudo só porque você mudou a forma da superfície sobre a qual estava aplicando a força. Para cada formato existirá um **momento de inércia** diferente.

O momento de inércia (J) é calculado por fórmulas matemáticas:

- momento de inércia para corpos de **seção circular**: $J = \frac{\pi D^4}{64}$
- momento de inércia para corpos de **seção retangular**: $J = \frac{b \times h^3}{12}$

Falta ainda um elemento para entender a fórmula de cálculo da tensão de flexão: é o **módulo de resistência da seção transversal**, representado convencionalmente pela letra W. Trata-se de uma medida de resistência em relação a um momento. Este módulo significa para a flexão o mesmo que a área da seção transversal significa para a tração.

O valor deste módulo é conhecido dividindo-se o valor do momento de inércia (J) pela distância da linha neutra à superfície do corpo de prova (c).

Em linguagem matemática: $W = \frac{J}{c}$

Nos corpos de prova de seção circular, de materiais homogêneos, a distância *c* equivale à metade do diâmetro. Em corpos de seção retangular ou quadrada, considera-se a metade do valor da altura.

Agora sim, já podemos apresentar a fórmula para o cálculo da tensão de flexão (TF):

$$TF = \frac{M_f}{W}$$

Uma vez realizado o ensaio, para calcular a tensão de flexão basta substituir as variáveis da fórmula pelos valores conhecidos. A combinação das fórmulas anteriores, demonstrada a seguir, permite trabalhar diretamente com esses valores.

$$TF = \frac{M_f}{W},\ M_f = \frac{FL}{4}\ \text{e}\ W = \frac{J}{c} \Rightarrow TF = \frac{\frac{FL}{4}}{\frac{J}{c}} \Rightarrow TF = \frac{FL}{4} \times \frac{c}{J} \Rightarrow TF = \frac{FLc}{4J}$$

O valor da carga obtido no ensaio varia conforme o material seja dúctil ou frágil. No caso de materiais dúcteis, considera-se a força obtida no limite de elasticidade. Quando se trata de materiais frágeis, considera-se a força registrada no limite de ruptura.

Outras propriedades que podem ser avaliadas no ensaio de flexão são a **flexa máxima** e o **módulo de elasticidade**.

Pode-se medir a flexa máxima diretamente pelo extensômetro, ou calculá-la por meio de fórmula.

A fórmula para o cálculo da **flexa máxima** (f) é:

$$f = \frac{1}{48} \times \frac{FL^3}{E \times J}$$

A fórmula para o cálculo do **módulo de elasticidade** (E) é:

$$E = \frac{1}{48} \times \frac{FL^3}{f \times J}$$

Acompanhe um exemplo prático de aplicação das fórmulas anteriores, participando da resolução do próximo problema:

- Efetuado um ensaio de flexão num corpo de prova de seção circular, com 50 mm de diâmetro e 685 mm de comprimento, registrou-se uma flexa de 1,66 mm e a carga aplicada ao ser atingido o limite elástico era de 1.600 N.

  Conhecendo estes dados, vamos calcular:

  **1** – tensão de flexão
  **2** – módulo de elasticidade

Vamos determinar primeiro a tensão de flexão. Para isso devemos recorrer à fórmula:

$$TF = \frac{FLc}{4J}$$

Conhecemos o valor de F (1.600 N), o valor de L (685 mm) e o valor de c (25 mm). Mas só poderemos aplicar esta fórmula depois de descobrir o valor de J, que pode ser obtido pela fórmula de cálculo do momento de inércia para corpos de seção circular:

$$J = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{\pi \times 50^4}{64} = 306.640{,}62 \text{ mm}^4$$

Agora sim, podemos calcular a tensão de flexão pela fórmula anterior. Para isso, basta substituir as variáveis da fórmula pelos valores conhecidos e fazer os cálculos. Tente resolver e depois confira suas contas, para ver se chegou ao mesmo resultado apresentado a seguir.

$$TF = \frac{1.600 \times 685 \times 25}{4 \times 306.640{,}62} = 22{,}34 \text{ MPa}$$

A próxima tarefa é calcular o módulo de elasticidade. Uma vez que todos os valores são conhecidos, podemos partir diretamente para a aplicação da fórmula. Tente fazer isso sozinho, na sua calculadora, e depois confira com a resolução apresentada a seguir.

$$E = \frac{1}{48} \times \frac{FL^3}{f \times J} \Rightarrow E = \frac{1}{48} \times \frac{1.600 \times 685^3}{1{,}66 \times 306.640{,}62} = 21.048 \text{ MPa}$$

Não se preocupe em decorar as fórmulas. Consulte-as sempre que necessário. O importante é que você consiga identificar, em cada caso, a fórmula mais adequada para resolver o problema apresentado. Para isso, é necessário analisar bem os dados do problema e verificar quais são os valores conhecidos e qual o valor procurado. O resto pode ficar por conta da calculadora, sob seu comando, é claro!

## Exercícios

**Exercício 1**

O esforço de flexão age na direção ..... ao eixo de corpo de prova.

**a)** paralela;
**b)** angular;
**c)** radial;
**d)** perpendicular.

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 2**

No ensaio de dobramento podemos avaliar qualitativamente:

**a)** ( ) o limite de proporcionalidade;
**b)** ( ) o limite de resistência ao dobramento;
**c)** ( ) a ductilidade do material ensaiado;
**d)** ( ) tensão máxima no dobramento.

**Exercício 3**

No ensaio de dobramento de corpos soldados costuma-se medir:

**a)** ( ) o alongamento da face da solda;
**b)** ( ) o alongamento do corpo de prova;
**c)** ( ) o comprimento do cordão de solda;
**d)** ( ) o ângulo da solda.

**Exercício 4**

No ensaio de flexão, o extensômetro é utilizado para medir ..... .

**a)** a tensão aplicada;
**b)** o tamanho do corpo de prova;
**c)** a deformação do corpo de prova;
**d)** o alongamento do corpo de prova.

**Exercício 5**

Um corpo de prova de 30 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento foi submetido a um ensaio de flexão, apresentando uma flexa de 2 mm sob uma carga de 360 N. Determine:

**a)** a tensão de flexão;
**b)** o módulo de elasticidade.

AULA

9

# Ensaio de embutimento

## Introdução

É na estamparia que o ensaio de embutimento encontra sua principal aplicação. E você sabe por quê?

É fácil encontrar resposta a esta pergunta: basta observar alguns objetos de uso diário, como uma panela, a lataria dos automóveis e outras tantas peças produzidas a partir de chapas metálicas, por processos de estampagem.

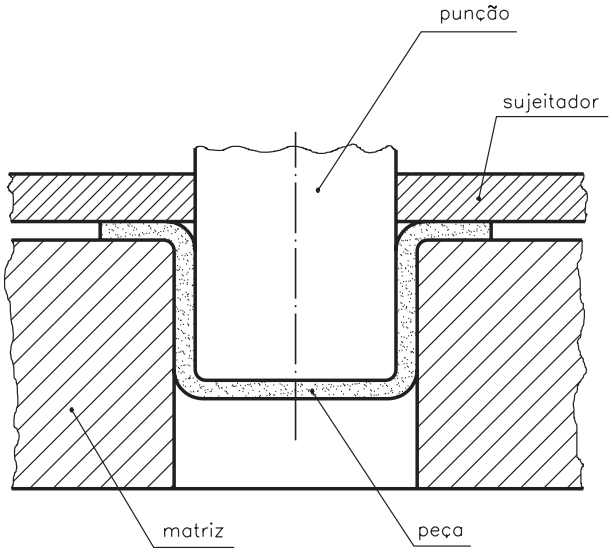
A estampagem é o processo de converter finas chapas metálicas em peças ou produtos, sem fratura ou concentração de microtrincas. As chapas utilizadas neste processo devem ser bastante dúcteis.

Nesta aula, você ficará sabendo como é feito o ensaio de embutimento em chapas, para avaliar sua adequação à operação de estampagem. E conhecerá os dois principais métodos de ensaio de embutimento.

## Nossa aula

### Ductilidade de chapas

A operação de estampagem envolve dois tipos de deformações: o **estiramento**, que é o afinamento da chapa, e a **estampagem** propriamente dita, que consiste no arrastamento da chapa para dentro da cavidade da matriz por meio de um punção. Nessa operação, a chapa fica presa por um sujeitador que serve como guia para o arrastamento.



A ductilidade é a característica básica para que o produto possa ser estampado. E já estudamos diversos ensaios que podem avaliar esta característica – tração, compressão, dobramento etc.

Então, por que fazer um ensaio específico para avaliar a ductilidade?

Existe uma razão para isso: uma chapa pode apresentar diversas pequenas heterogeneidades, que não afetariam o resultado de ductilidade obtido no ensaio de tração. Mas, ao ser deformada a frio, a chapa pode apresentar pequenas trincas em conseqüência dessas heterogeneidades.

Além de trincas, uma peça estampada pode apresentar diversos outros problemas, como enrugamento, distorção, textura superficial rugosa, fazendo lembrar uma casca de laranja etc. A ocorrência destes problemas está relacionada com a matéria-prima utilizada.

Nenhum dos ensaios que estudamos anteriormente fornece todas as informações sobre a chapa, necessárias para que se possa prever estes problemas.

Para evitar surpresas indesejáveis, como só descobrir que a chapa é inadequada ao processo de estampagem após a produção da peça, foi desenvolvido o ensaio de embutimento. Este ensaio reproduz, em condições controladas, a estampagem de uma cavidade previamente estabelecida.

Os ensaios de embutimento permitem deformar o material quase nas mesmas condições obtidas na operação de produção propriamente dita, só que de maneira controlada, para minimizar a variação nos resultados.

Existem ensaios padronizados para avaliar a capacidade de estampagem de chapas. Os mais usados são os ensaios de embutimento **Erichsen** e **Olsen**, que você vai estudar detalhadamente depois de adquirir uma visão geral sobre a realização dos ensaios de embutimento.

Esses ensaios são qualitativos e, por essa razão, os resultados obtidos constituem apenas uma indicação do comportamento que o material apresentará durante o processo de fabricação.

## Descrição do ensaio

Os ensaios de embutimento são realizados por meio de dispositivos acoplados a um equipamento que transmite força. Podem ser feitos na já conhecida máquina universal de ensaios, adaptada com os dispositivos próprios, ou numa máquina específica para este ensaio, como a que mostramos ao lado.

A chapa a ser ensaiada é presa entre uma matriz e um anel de fixação, que tem por finalidade impedir que o material deslize para dentro da matriz.

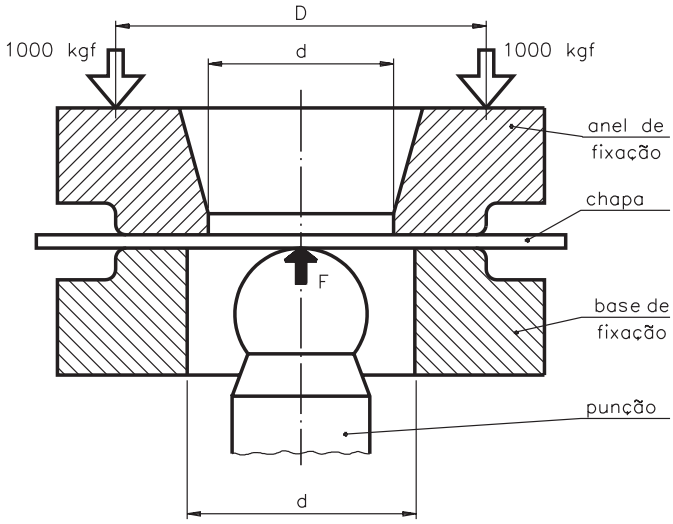
Depois que a chapa é fixada, um punção aplica uma carga que força a chapa a se abaular até que a ruptura aconteça.

Um relógio medidor de curso, graduado em décimos de milímetro, fornece a medida da penetração do punção na chapa. O resultado do ensaio é a medida da profundidade do copo formado pelo punção no momento da ruptura.

Além disso, o exame da superfície externa da chapa permite verificar se ela é perfeita ou se ficou rugosa devido à granulação, por ter sido usado um material inadequado.

## Ensaio Erichsen

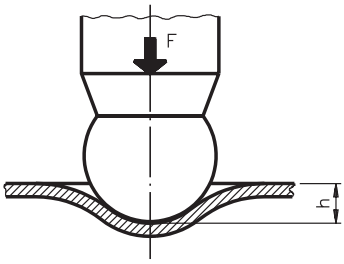
No caso do ensaio de embutimento Erichsen o punção tem cabeça esférica de 20 mm de diâmetro e a carga aplicada no anel de fixação que prende a chapa é de cerca de 1.000 kgf.




O atrito entre o punção e a chapa poderia afetar o resultado do ensaio. Por isso, o punção deve ser lubrificado com graxa grafitada, de composição determinada em norma técnica, para que o nível de lubrificação seja sempre o mesmo.

O momento em que ocorre a ruptura pode ser acompanhado a olho nu ou pelo estalo característico de ruptura. Se a máquina for dotada de um dinamômetro que meça a força aplicada, pode-se determinar o final do ensaio pela queda brusca da carga que ocorre no momento da ruptura.

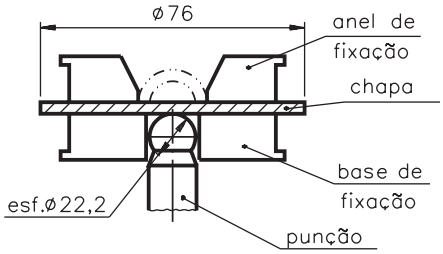
A altura **h** do copo é o **índice Erichsen** de embutimento.



Existem diversas especificações de chapas para conformação a frio, que estabelecem um valor mínimo para o índice Erichsen, de acordo com a espessura da chapa ou de acordo com o tipo de estampagem para o qual a chapa foi produzida (média, profunda ou extraprofunda).

## Ensaio Olsen

Outro ensaio de embutimento bastante utilizado é o ensaio Olsen. Ele se diferencia do ensaio Erichsen pelo fato de utilizar um punção esférico de 22,2 mm de diâmetro e pelos corpos de prova, que são discos de 76 mm de diâmetro.




Olsen verificou que duas chapas supostamente semelhantes, pois deram a mesma medida de copo quando ensaiadas, precisavam de cargas diferentes para serem deformadas: uma delas necessitava do dobro de carga aplicado à outra, para fornecer o mesmo resultado de deformação.

Por isso, Olsen determinou a necessidade de medir o valor da carga no instante da trinca.

Isso é importante porque numa operação de estampagem deve-se dar preferência à chapa que se deforma sob a ação de menor carga, de modo a não sobrecarregar e danificar o equipamento de prensagem.

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta.

**Exercício 1**

O ensaio de embutimento serve para avaliar:

**a)** ( ) a ductilidade de uma barra;
**b)** ( ) a ductilidade de uma chapa;
**c)** ( ) a dureza de uma chapa;
**d)** ( ) a resistência de uma chapa.

**Exercício 2**

O ensaio de embutimento é aplicado no processo de:

**a)** ( ) fundição;
**b)** ( ) forjaria;
**c)** ( ) estamparia;
**d)** ( ) usinagem.

**Exercício 3**

No ensaio Erichsen, o único resultado numérico obtido é:

**a)** ( ) a profundidade do copo;
**b)** ( ) o limite de escoamento;
**c)** ( ) a carga de ruptura;
**d)** ( ) diâmetro do copo.

**Exercício 4**

A principal **diferença** entre os ensaios Erichsen e Olsen é que:

**a)** ( ) O Erichsen leva em conta a carga de ruptura e o Olsen, não;
**b)** ( ) O Erichsen não leva em conta a carga de ruptura e o Olsen, sim;
**c)** ( ) O Erichsen usa um punção esférico e o Olsen, não;
**d)** ( ) O Erichsen usa um anel de fixação e o Olsen, não.

**Exercício 5**

De acordo com o ensaio Olsen, entre duas chapas que dêem a mesma medida de copo, será melhor para estampar aquela que apresentar:

**a)** ( ) mais alta carga de ruptura;
**b)** ( ) menor ductilidade;
**c)** ( ) maior ductilidade;
**d)** ( ) menor carga de ruptura.

AULA

10

# Ensaio de torção

## Introdução

Diz o ditado popular: "É de pequenino que se torce o pepino!" E quanto aos metais e outros materiais tão usados no nosso dia-a-dia: o que dizer sobre seu comportamento quando submetidos ao esforço de torção?

Este é um assunto que interessa muito mais do que pode parecer à primeira vista, porque vivemos rodeados por situações em que os esforços de torção estão presentes.

Já lhe aconteceu de estar apertando um parafuso e, de repente, ficar com dois pedaços de parafuso nas mãos? O esforço de torção é o responsável por estragos como esse.

E o que dizer de um virabrequim de automóvel, dos eixos de máquinas, polias, molas helicoidais e brocas? Em todos estes produtos, o maior esforço mecânico é o de torção, ou seja, quando esses produtos quebram é porque não resistiram ao esforço de torção.

A torção é diferente da compressão, da tração e do cisalhamento porque nestes casos o esforço é aplicado no sentido longitudinal ou transversal, e na torção o esforço é aplicado no sentido de rotação.

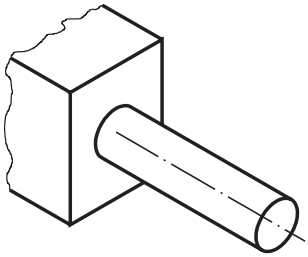
O ensaio de torção é de execução relativamente simples, porém para obter as propriedades do material ensaiado são necessários cálculos matemáticos complexos.

Como na torção uma parte do material está sendo tracionada e outra parte comprimida, em casos de rotina podemos usar os dados do ensaio de tração para prever como o material ensaiado se comportará quando sujeito a torção.

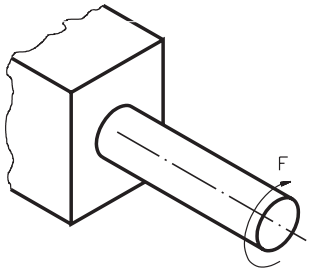
Estudando os assuntos desta aula, você ficará sabendo que tipo de força provoca a torção, o que é momento torsor e qual a sua importância, e que tipo de deformação ocorre nos corpos sujeitos a esforços de torção. Conhecerá as especificações dos corpos de prova para este ensaio e as fraturas típicas resultantes do ensaio.

## Rotação e torção

Pense num corpo cilíndrico, preso por uma de suas extremidades, como na ilustração ao lado.



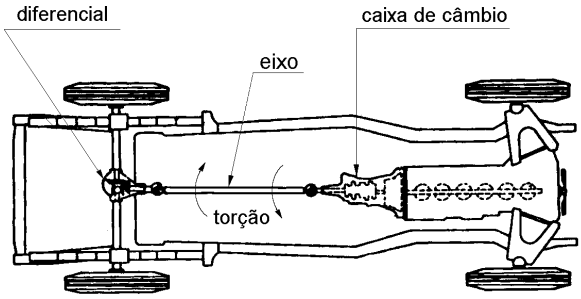
Imagine que este corpo passe a sofrer a ação de uma força no sentido de rotação, aplicada na extremidade solta do corpo.




O corpo tenderá a girar no sentido da força e, como a outra extremidade está engastada, ele sofrerá uma torção sobre seu próprio eixo. Se um certo limite de torção for ultrapassado, o corpo se romperá.

Você está curioso para saber por que este esforço é importante? Quem sabe uma situação concreta o ajude a visualizar melhor. O eixo de transmissão dos caminhões é um ótimo exemplo para ilustrar como atua este esforço.

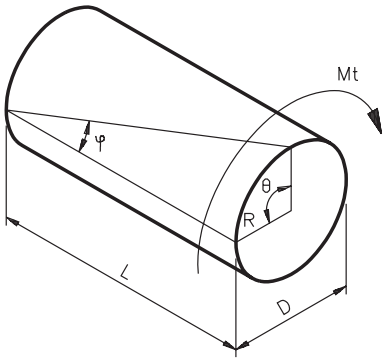
Uma ponta do eixo está ligada à roda, por meio do diferencial traseiro. A outra ponta está ligada ao motor, por intermédio da caixa de câmbio.




O motor transmite uma força de rotação a uma extremidade do eixo. Na outra extremidade, as rodas oferecem resistência ao movimento.

Como a força que o motor transmite é maior que a força resistente da roda, o eixo tende a girar e, por conseqüência, a movimentar a roda.

Esse esforço provoca uma deformação elástica no eixo, como mostra a ilustração ao lado.



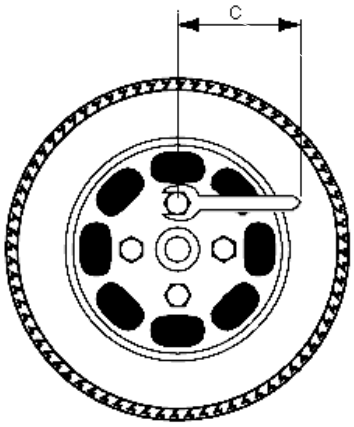
Analise com atenção o desenho anterior e observe que:

- **D** é o diâmetro do eixo e **L**, seu comprimento;
- a letra grega minúscula φ (fi) é o ângulo de deformação longitudinal;
- a letra grega minúscula θ (teta) é o ângulo de torção, medido na seção transversal do eixo;
- no lugar da força de rotação, aparece um elemento novo: Mt, que representa o momento torsor.

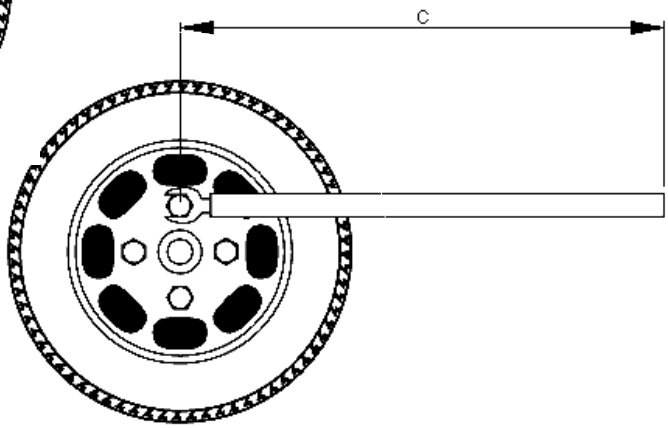
Veja a seguir o que é momento torsor e como ele age nos esforços de torção.

## Momento torsor

Não existe coisa mais chata que um pneu furar na hora errada. E os pneus sempre furam em hora errada! Se já lhe aconteceu de ter de trocar um pneu com uma chave de boca de braço curto, você é capaz de avaliar a dificuldade que representa soltar os parafusos da roda com aquele tipo de chave.




Um artifício simples ajuda a reduzir bastante a dificuldade de realizar esta tarefa: basta encaixar um cano na haste da chave, de modo a alongar o comprimento do braço.




Fica claro que o alongamento do braço da chave é o fator que facilita o afrouxamento dos parafusos, sob efeito do **momento da força** aplicada.

Momento de uma força é o produto da intensidade da força (F) pela distância do ponto de aplicação ao eixo do corpo sobre o qual a força está sendo aplicada (C).

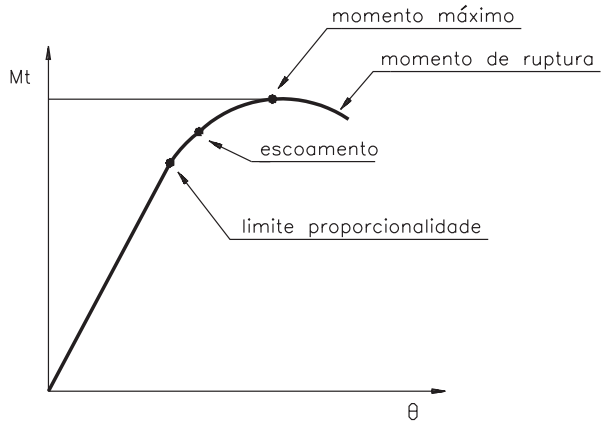
Em linguagem matemática, o momento de uma força (Mf) pode ser expresso pela fórmula: $Mf = F \times C$.

De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de momento é o newton metro (Nm).

Quando se trata de um esforço de torção, o momento de torção, ou momento torsor, é também chamado de **torque**.

## Propriedades avaliadas no ensaio de torção

A partir do momento torsor e do ângulo de torção pode-se elaborar um gráfico semelhante ao obtido no ensaio de tração, que permite analisar as seguintes propriedades:




Estas propriedades são determinadas do mesmo modo que no ensaio de tração e têm a mesma importância, só que são relativas a esforços de torção.

Isso significa que, na especificação dos materiais que serão submetidos a esforços de torção, é necessário levar em conta que o máximo torque que deve ser aplicado a um eixo tem de ser inferior ao momento torsor no limite de proporcionalidade.

## Corpo de prova para ensaio de torção

Este ensaio é bastante utilizado para verificar o comportamento de eixos de transmissão, barras de torção, partes de motor e outros sistemas sujeitos a esforços de torção. Nesses casos, ensaiam-se os próprios produtos.

Quando é necessário verificar o comportamento de materiais, utilizam-se corpos de prova.

Para melhor precisão do ensaio, empregam-se corpos de prova de seção circular cheia ou vazada, isto é, barras ou tubos. Estes últimos devem ter um mandril interno para impedir amassamentos pelas garras do aparelho de ensaio.

Em casos especiais pode-se usar outras seções.

Normalmente as dimensões não são padronizadas, pois raramente se escolhe este ensaio como critério de qualidade de um material, a não ser em situações especiais, como para verificar os efeitos de vários tipos de tratamentos térmicos em aços, principalmente naqueles em que a superfície do corpo de prova ou da peça é a mais atingida.

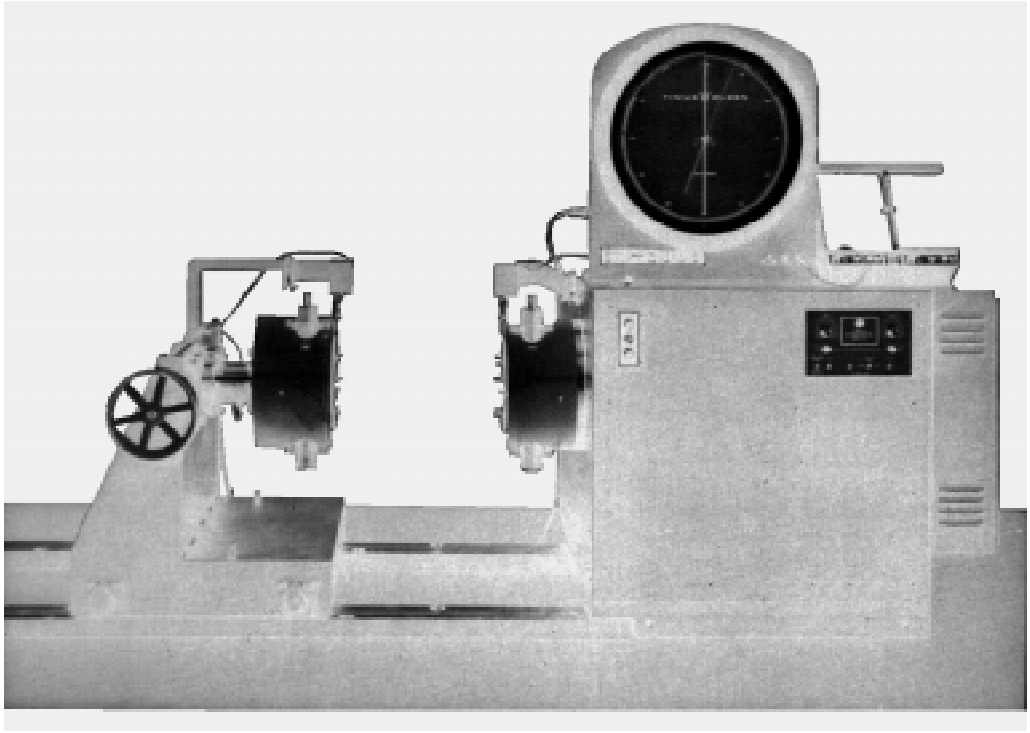
Entretanto, o comprimento e o diâmetro do corpo de prova devem ser tais que permitam as medições de momentos e ângulos de torção com precisão e também que não dificultem o engastamento nas garras da máquina de ensaio.

Por outro lado, também é muito importante uma centragem precisa do corpo de prova na máquina de ensaio, porque a força deve ser aplicada no centro do corpo de prova.

## Equipamento para o ensaio de torção

O ensaio de torção é realizado em equipamento específico: a máquina de torção.

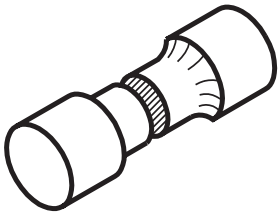
Esta máquina possui duas cabeças às quais o corpo de prova é fixado. Uma das cabeças é giratória e aplica ao corpo de prova o momento de torção. A outra está ligada a um pêndulo que indica, numa escala, o valor do momento aplicado ao corpo de prova.

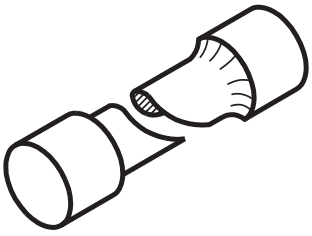


## Fraturas típicas

O aspecto das fraturas varia conforme o corpo de prova seja feito de material dúctil ou frágil.

Os corpos de provas de materiais dúcteis apresentam uma fratura segundo um plano perpendicular ao seu eixo longitudinal.





Para materiais frágeis, a fratura se dá segundo uma superfície não plana, mas que corta o eixo longitudinal segundo uma linha que, projetada num plano paralelo ao eixo, forma 45º aproximadamente com o mesmo (fratura helicoidal).

Certamente os assuntos que você acabou de estudar estão longe de esgotar a literatura disponível sobre este tipo de ensaio. Dependendo de sua área de trabalho e especialidade, será necessário um aprofundamento. Por ora, resolva os exercícios a seguir, para verificar se os conceitos gerais foram bem entendidos.

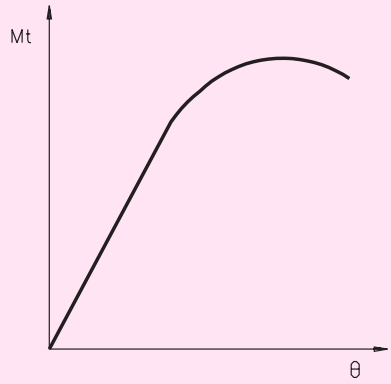
## Exercícios

**Exercício 1**

Um corpo cilíndrico está sob ação de uma força de torção de 20 N, aplicada num ponto situado a 10 mm do centro da sua seção transversal. Calcule o torque que está atuando sobre este corpo.

**Exercício 2**

No diagrama abaixo, escreva:
A no ponto que representa o limite de escoamento;
B no ponto que representa o limite de proporcionalidade;
C no ponto que representa o momento de ruptura;
D no ponto que representa o momento máximo.




**Exercício 3**

O material frágil, ao ser fraturado na torção, apresenta:

**a)** ( ) fratura idêntica ao material dúctil;
**b)** ( ) fratura perpendicular ao eixo do corpo de prova;
**c)** ( ) fratura formando ângulo aproximado de 45ºcom o eixo do corpo de prova;
**d)** ( ) fratura em ângulo diferente de 45º com o eixo do corpo de prova.

**Exercício 4**

O ensaio de torção é realizado ..... .

**a)** ( ) na máquina universal de ensaios;
**b)** ( ) na prensa hidráulica;
**c)** ( ) em equipamento especial para o ensaio;
**d)** ( ) em dispositivo idêntico ao do ensaio de tração.

**Exercício 5**

Observe seu ambiente de trabalho e cite três exemplos de equipamentos ou produtos onde o esforço de torção é o principal.

AULA

11

# Dureza Brinell

## Introdução

Ao escrever a lápis ou lapiseira, você sente com facilidade a diferença entre uma grafite macia, que desliza suavemente sobre o papel, e uma grafite dura, que deixa o papel marcado.

Entretanto, a dureza de um material é um conceito relativamente complexo de definir, originando diversas interpretações.

Num bom dicionário, você encontra que dureza é "qualidade ou estado de duro, rijeza". Duro, por sua vez, é definido como "difícil de penetrar ou de riscar, consistente, sólido".

Essas definições não caracterizam o que é dureza para todas as situações, pois ela assume um significado diferente conforme o contexto em que é empregada:

- Na área da **metalurgia**, considera-se dureza como a **resistência à deformação plástica permanente**. Isso porque uma grande parte da metalurgia consiste em deformar plasticamente os metais.

- Na área da **mecânica**, é a **resistência à penetração de um material duro no outro**, pois esta é uma característica que pode ser facilmente medida.

- Para um **projetista**, é uma **base de medida**, que serve para conhecer a resistência mecânica e o efeito do tratamento térmico ou mecânico em um metal. Além disso, permite avaliar a resistência do material ao desgaste.

- Para um **técnico em usinagem**, é a **resistência ao corte do metal**, pois este profissional atua com corte de metais, e a maior ou menor dificuldade de usinar um metal é caracterizada como maior ou menor dureza.

- Para um mineralogista é a resistência ao risco que um material pode produzir em outro. E esse é um dos critérios usados para classificar minerais.

Ou seja, a dureza não é uma propriedade absoluta. Só tem sentido falar em dureza quando se comparam materiais, isto é, só existe um material duro se houver outro mole.

É importante destacar que, apesar das diversas definições, um material com grande resistência à deformação plástica permanente também terá alta resistência ao desgaste, alta resistência ao corte e será difícil de ser riscado, ou seja, será duro em qualquer uma dessas situações.

Nesta aula você vai conhecer um dos métodos de ensaio de dureza mais amplamente utilizados: o ensaio de dureza Brinell. Saberá quais são suas vantagens e limitações e como é calculada a dureza de um material a partir deste tipo de ensaio.

Vai ser duro? Nem tanto! Estude com atenção e faça os exercícios sugeridos.

## Nossa aula

### Avaliação da dureza: como tudo começou

Há registros de que no século XVII já se avaliava a dureza de pedras preciosas, esfregando-as com uma lima.

No século XVIII desenvolveu-se um método para determinar a dureza do aço, riscando-o com minerais diferentes.

Mas o primeiro método padronizado de ensaio de dureza do qual se tem notícia, baseado no processo de riscagem, foi desenvolvido por Mohs, em 1822.

Este método deu origem à escala de dureza Mohs, que apresenta dez minérios-padrões, ordenados numa escala crescente do grau 1 ao 10, de acordo com sua capacidade de riscar ou ser riscado.

**Curiosidade**
**Escala Mohs** (1822)

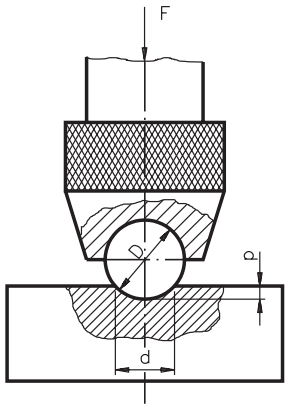
**1** – Talco
**2** – Gipsita
**3** – Calcita
**4** – Fluorita
**5** – Apatita
**6** – Feldspato (ortóssio)
**7** – Quartzo
**8** – Topázio
**9** – Safira e corindo
**10** – Diamante

Esta escala não é conveniente para os metais, porque a maioria deles apresenta durezas Mohs 4 e 8, e pequenas diferenças de dureza não são acusadas por este método. Por exemplo, um aço dúctil corresponde a uma dureza de 6 Mohs, a mesma dureza Mohs de um aço temperado.

As limitações da escala Mohs levaram ao desenvolvimento de outros métodos de determinação de dureza, mais condizentes com o controle do aço e de outros metais. Um deles é o ensaio de dureza Brinell, que você vai estudar a seguir.

## Ensaio de dureza Brinell

Em 1900, **J. A. Brinell** divulgou este ensaio, que passou a ser largamente aceito e padronizado, devido à relação existente entre os valores obtidos no ensaio e os resultados de resistência à tração.




O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço temperado, de diâmetro *D*, sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga *F*, durante um tempo *t*, produzindo uma calota esférica de diâmetro *d*.

A dureza Brinell é representada pelas letras HB. Esta representação vem do inglês *Hardness Brinell*, que quer dizer "dureza Brinell".

A dureza Brinell (HB) é a relação entre a carga aplicada (F) e a área da calota esférica impressa no material ensaiado (Ac).

Em linguagem matemática: $HB = \dfrac{F}{A_c}$

A área da calota esférica é dada pela fórmula: πDp, onde **p** é a profundidade da calota.

Substituindo Ac pela fórmula para cálculo da área da calota, temos:

$$HB = \frac{F}{\pi D p}$$

Devido à dificuldade técnica de medição da profundidade (p), que é um valor muito pequeno, utiliza-se uma relação matemática entre a profundidade (p) e o diâmetro da calota (d) para chegar à fórmula matemática que permite o cálculo da dureza HB, representada a seguir:

$$HB = \frac{2\,F}{\pi D\,(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Acompanhe um exemplo de aplicação desta fórmula:

- Uma amostra foi submetida a um ensaio de dureza Brinell no qual se usou uma esfera de 2,5 mm de diâmetro e aplicou-se uma carga de 187,5 kgf. As medidas dos diâmetros de impressão foram de 1 mm. Qual a dureza do material ensaiado?

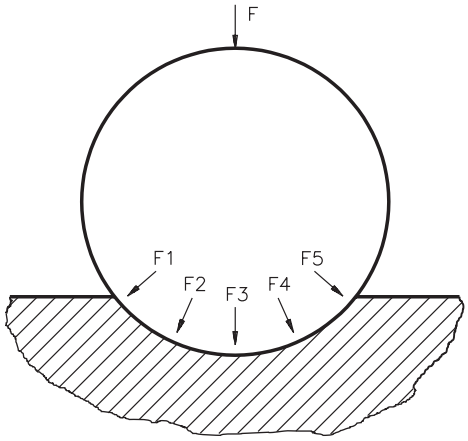
Uma vez que todos os valores necessários para calcular a dureza HB são conhecidos, podemos partir diretamente para a aplicação da fórmula:

$$HB = \frac{2F}{\pi\,D\,(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \Rightarrow HB = \frac{2 \times 187{,}5}{\pi \times 2{,}5\,(2{,}5 - \sqrt{2{,}5^2 - 1^2})} \Rightarrow$$

$$HB = \frac{375}{3{,}14 \times 2{,}5\left(2{,}5 - \sqrt{6{,}25 - 1}\right)} \Rightarrow HB = \frac{375}{7{,}85\,(2{,}5 - 2{,}29)} \Rightarrow$$

$$HB = \frac{375}{7{,}85 \times 0{,}21} \Rightarrow HB = \frac{375}{1{,}6485} \Rightarrow HB = 227$$

A unidade kgf/mm$^2$, que deveria ser sempre colocada após o valor de HB, é omitida, uma vez que a dureza Brinell não é um conceito físico satisfatório, pois a força aplicada no material tem valores diferentes em cada ponto da calota.




Os cálculos anteriores são dispensáveis, se você dispuser de uma tabela apropriada.

Veja a seguir um exemplo de tabela que fornece os valores de dureza Brinell normal, em função de um diâmetro de impressão **d**.

| DUREZA BRINELL EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA IMPRESSÃO (DIÂMETRO DA ESFERA DO PENETRADOR: 10 MM) | | | |
|---|---|---|---|
| **d (mm)** | **HB (F = 3000 kgf)** | **d (mm)** | **HB (F = 3000 kgf)** |
| 2,75 | (495) | 4,05 | 223 |
| 2,80 | (477) | 4,10 | 217 |
| 2,85 | (461) | 4,15 | 212 |
| 2,90 | 444 | 4,20 | 207 |
| 2,95 | 429 | 4,25 | 201 |
| 3,00 | 415 | 4,30 | 197 |
| 3,05 | 401 | 4,35 | 192 |
| 3,10 | 388 | 4,40 | 187 |
| 3,15 | 375 | 4,45 | 183 |
| 3,20 | 363 | 4,50 | 179 |
| 3,25 | 352 | 4,55 | 174 |
| 3,30 | 341 | 4,60 | 170 |
| 3,35 | 331 | 4,65 | 167 |
| 3,40 | 321 | 4,70 | 163 |
| 3,45 | 311 | 4,75 | 159 |
| 3,50 | 302 | 4,80 | 156 |
| 3,55 | 293 | 4,85 | 152 |
| 3,60 | 285 | 4,90 | 149 |
| 3,65 | 277 | 4,95 | 146 |
| 3,70 | 269 | 5,00 | 143 |
| 3,75 | 262 | 5,10 | 137 |
| 3,80 | 255 | 5,20 | 131 |
| 3,85 | 248 | 5,30 | 126 |
| 3,90 | 241 | 5,40 | 121 |
| 3,95 | 235 | 5,50 | 116 |
| 4,00 | 229 | 5,60 | 111 |

Os valores indicados entre parênteses são somente referenciais, pois estão além da faixa normal do ensaio Brinell.

## Verificando o entendimento

Tente localizar na tabela da página anterior o valor de dureza para um material que deixou um diâmetro de impressão de 3,55 mm.

Resposta: .....

Para encontrar o valor de HB solicitado você deve ter procurado na primeira coluna da tabela a linha correspondente ao valor de diâmetro de impressão 3,55 mm. Este valor está associado à dureza HB 293, que aparece na mesma linha, na segunda coluna.

É possível que os valores de dureza encontrados por cálculos, com aplicação da fórmula matemática, apresentem pequenas diferenças em relação aos valores correspondentes encontrados em tabelas. Não se preocupe. Essas diferenças se devem aos arredondamentos utilizados nos cálculos.

## Escolha das condições de ensaio

O ensaio padronizado, proposto por Brinell, é realizado com carga de 3.000 kgf e esfera de 10 mm de diâmetro, de aço temperado.

Porém, usando cargas e esferas diferentes, é possível chegar ao mesmo valor de dureza, desde que se observem algumas condições:

- A carga será determinada de tal modo que o diâmetro de impressão *d* se situe no intervalo de 0,25 a 0,5 do diâmetro da esfera **D**. A impressão será considerada ideal se o valor de *d* ficar na média entre os dois valores anteriores, ou seja, 0,375 mm.

- Para obter um diâmetro de impressão dentro do intervalo citado no item anterior, deve-se manter constante a relação entre a carga (F) e o diâmetro ao quadrado da esfera do penetrador ($D^2$), ou seja, a relação

$\frac{F}{D^2}$ é igual a uma constante chamada **fator de carga**.

Para padronizar o ensaio, foram fixados valores de fatores de carga de acordo com a faixa de dureza e o tipo de material. O quadro a seguir mostra os principais fatores de carga utilizados e respectivas faixas de dureza e indicações.

| $\frac{F}{D^2}$ | DUREZA | MATERIAIS |
|---|---|---|
| 30 | 90 a 415 HB | Aços e ferros fundidos |
| 10 | 30 a 140 HB | Cobre, alumínio e suas ligas mais duras |
| 5 | 15 a 70 HB | Ligas antifricção, cobre, alumínio e suas ligas mais moles |
| 2,5 | até 30 HB | Chumbo, estanho, antimônio e metais-patente |

O diâmetro da esfera é determinado em função da espessura do corpo de prova ensaiado. A espessura mínima é indicada em normas técnicas de método de ensaio. No caso da norma brasileira, a espessura mínima do material ensaiado deve ser 17 vezes a profundidade da calota.

O quadro a seguir mostra os diâmetros de esfera mais usados e os valores de carga para cada caso, em função do fator de carga escolhido.

| DIÂMETRO DA ESFERA (mm) | F (kgf) = 30 $D^2$ | F (kgf) = 10 $D^2$ | F (kgf) = 5 $D^2$ | F (kgf) = 2,5 $D^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 10 | 3.000 | 1.000 | 500 | 250 |
| 5 | 750 | 250 | 125 | 62,5 |
| 2,5 | 187.5 | 62,5 | 31.25 | 15.625 |

Observe que, no quadro anterior, os valores de carga foram determinados a partir das relações entre F e $D^2$ indicadas no primeiro quadro.

Exemplificando: $\frac{F}{D^2} = 30 \Rightarrow F = 30\ D^2$

Veja como todas essas informações são úteis para resolver um problema prático.

## Verificando o entendimento

Uma empresa comprou um lote de chapas de aço carbono com a seguinte especificação:

- espessura: 4 mm
- dureza Brinell (HB): 180

Essas chapas devem ser submetidas ao ensaio de dureza Brinell para confirmar se estão de acordo com as especificações.

Nosso problema consiste em saber se essas chapas podem ser ensaiadas com a esfera de 10 mm.

Para resolver esse problema, precisamos das informações contidas nos dois quadros anteriores.

Observando o primeiro quadro, você fica sabendo que a relação $\frac{F}{D^2}$ para este material (aço carbono) é igual a 30.

O segundo quadro mostra que, para uma esfera de 10 mm e um fator de carga igual a 30, a carga de ensaio é de 3.000 kgf.

Com esses dados, é possível calcular a profundidade de impressão da calota, aplicando a fórmula:

$$HB = \frac{F}{\pi Dp}$$

Isolando **p**, temos:

$$p = \frac{F}{\pi Dp} \Rightarrow p = \frac{3.000}{3{,}14 \times 10 \times 180} \Rightarrow p = \frac{3.000}{5.652} \Rightarrow p = 0{,}53$$

Portanto, a profundidade da impressão é de 0,53 mm. Sabemos que a espessura do material ensaiado deve ser, no mínimo, 17 vezes a profundidade da calota. Multiplicando a profundidade da impressão por 17, obtemos: 9,01 mm.

Conclusão: as chapas de 4 mm não podem ser ensaiadas com a esfera de 10 mm. Devem ser usadas esferas menores.

A esfera de 10 mm produz grandes calotas na peça. Por isso é a mais adequada para medir materiais que têm a estrutura formada por duas ou mais fases de dureza muito discrepantes.

Em casos assim, a dureza é determinada pela média entre as fases, como acontece com os ferros fundidos, bronzes etc.

A utilização de esferas diferentes de 10 mm só é válida para materiais homogêneos. Esferas de diâmetros menores produziriam calotas menores e, no caso de materiais heterogêneos, poderia ocorrer de se estar medindo a dureza de apenas uma das fases. Com isso, o valor de dureza seria diferente do esperado para o material.

## Representação dos resultados obtidos

O número de dureza Brinell deve ser seguido pelo símbolo HB, sem qualquer sufixo, sempre que se tratar do ensaio padronizado, com aplicação da carga durante 15 segundos.

Em outras condições, o símbolo HB recebe um sufixo formado por números que indicam as condições específicas do teste, na seguinte ordem: diâmetro da esfera, carga e tempo de aplicação da carga.

Exemplificando: Um valor de dureza Brinell 85, medido com uma esfera de 10 mm de diâmetro e uma carga de 1.000 kgf, aplicada por 30 segundos, é representado da seguinte forma:

85HB 10/1000/30

Agora, tente você!

### Verificando o entendimento

Interprete a seguinte representação de dureza Brinell: 120HB 5/250/30.

Resposta:
dureza Brinell: .....
diâmetro da esfera: .....
carga: .....
duração do ensaio: .....

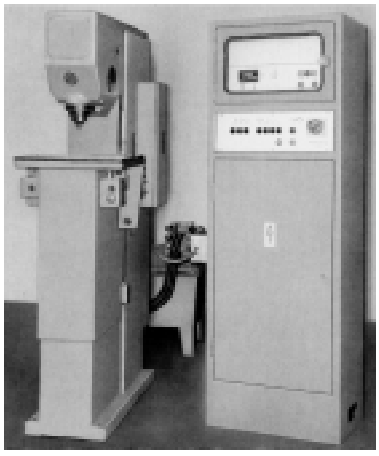
Confira: a dureza Brinell é de 120 HB; o diâmetro da esfera é de 5 mm; a carga aplicada foi de 250 kgf e a duração do ensaio foi de 30 segundos.

O tempo de aplicação da carga varia de 15 a 60 segundos: é de 15 segundos para metais com dureza Brinell maior que 300; de 60 segundos para metais moles, como o chumbo, estanho, metais-patente etc., e de 30 segundos para os demais casos.

A medida do diâmetro da calota (d) deve ser obtida pela média de duas leituras obtidas a 90º uma da outra, e de maneira geral não pode haver diferença maior que 0,06 mm entre as duas leituras, para esferas de 10 mm.

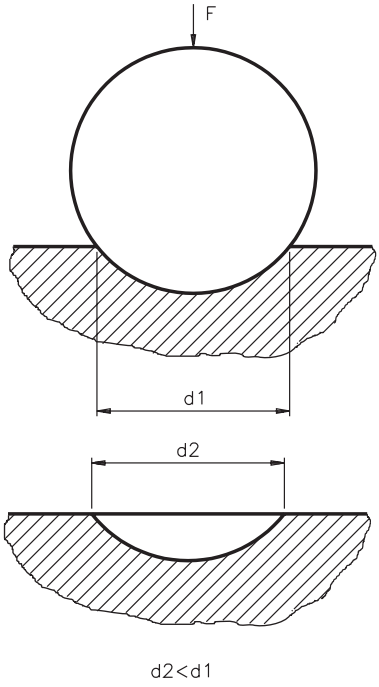
## Vantagens e limitações do ensaio Brinell

O ensaio Brinell é usado especialmente para avaliação de dureza de metais não ferrosos, ferro fundido, aço, produtos siderúrgicos em geral e de peças não temperadas. É o único ensaio utilizado e aceito para ensaios em metais que não tenham estrutura internauniforme.


Durômetro Brinell

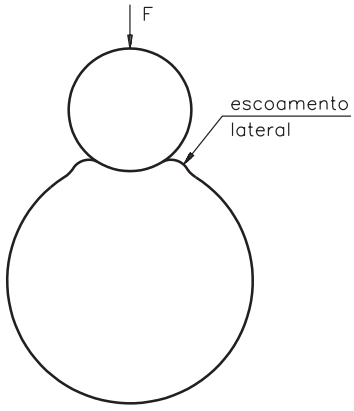
É feito em equipamento de fácil operação.

Por outro lado, o uso deste ensaio é limitado pela esfera empregada. Usando-se esferas de aço temperado só é possível medir dureza até 500 HB, pois durezas maiores danificariam a esfera.

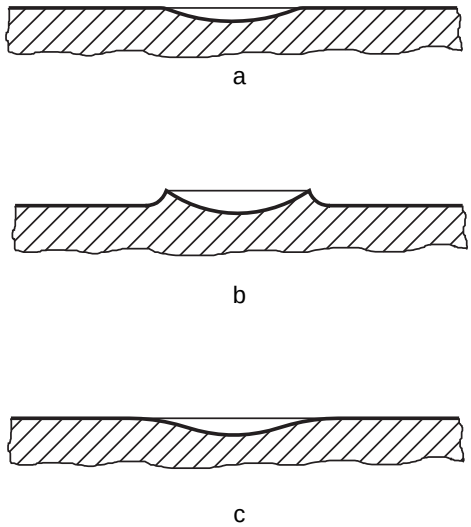



A recuperação elástica é uma fonte de erros, pois o diâmetro da impressão não é o mesmo quando a esfera está em contato com o metal e depois de aliviada a carga. Isto é mais sensível quanto mais duro for o metal.

O ensaio não deve ser realizado em superfícies cilíndricas com raio de curvatura menor que 5 vezes o diâmetro da esfera utilizada, porque haveria escoamento lateral do material e a dureza medida seria menor que a real.



Em alguns materiais podem ocorrer deformações no contorno da impressão, ocasionando erros de leitura. As figuras a seguir mostram uma superfície com impressão normal e duas impressões com deformação. A figura ***a*** representa a impressão normal; na figura ***b*** observa-se que houve aderência do material à esfera durante a aplicação da carga; e na figura ***c***, as bordas estão abauladas, dificultando a leitura do diâmetro.




Em certas situações em que é necessário avaliar a dureza de um material ou produto, outros tipos de ensaio podem ser mais aconselháveis. Você vai estudar dois deles nas duas próximas aulas. Mas, antes disso, que tal rever os assuntos vistos nesta aula para resolver com firmeza os exercícios propostos a seguir? Vamos lá!

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 1**

O ensaio de dureza Brinell é o único método indicado para:

**a)** ( ) conhecer a resistência de materiais frágeis ao desgaste e à penetração;
**b)** ( ) comparar a deformação elástica com a deformação plástica;
**c)** ( ) indicar se o material deve sofrer tratamento térmico;
**d)** ( ) comparar dureza de materiais heterogêneos.

**Exercício 2**

No ensaio Brinell padronizado utiliza-se uma esfera de ..... mm de diâmetro e aplica-se uma carga de ..... kgf por ..... segundos.

**a)** ( ) 2,5 – 187,5 – 10;
**b)** ( ) 3,0 – 3.000 – 15;
**c)** ( ) 10 – 3.000 – 15;
**d)** ( ) 10 – 750 – 10.

**Exercício 3**

A relação $\frac{F}{D^2}$

de um ensaio é igual a 30, para materiais que apresentam dureza HB entre 90 e 415. Cite dois exemplos de materiais que devem ser ensaiados nessas condições.

Respostas: ..... .

**Exercício 4**

Num ensaio de dureza Brinell com esfera de 2,5 mm e aplicação de uma carga de 62,5 kgf por 30 segundos, o diâmetro da calota esférica impressa no material foi de 1,05 mm e a dureza HB de 69.
Represente este resultado, a seguir.

Resposta: .....

**Exercício 5**

Uma liga dura de alumínio passou pelo ensaio de dureza Brinell pelo tempo padrão e o diâmetro de impressão produzido pela esfera de 2,5 mm foi de 0,85 mm. Qual o valor da dureza Brinell?

Resposta: ..... .

AULA

12

# Dureza Rockwell

## Introdução

No início do século XX houve muitos progressos no campo da determinação da dureza.

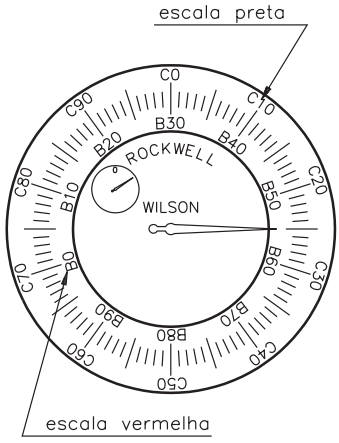
Em 1922, Rockwell desenvolveu um método de ensaio de dureza que utilizava um sistema de pré-carga. Este método apresenta algumas vantagens em relação ao ensaio Brinell, pois permite avaliar a dureza de metais diversos, desde os mais moles até os mais duros. Entretanto, também tem limitações, o que indica que está longe de ser a solução técnica ideal.

O ensaio Rockwell, que leva o nome do seu criador, é hoje o processo mais utilizado no mundo inteiro, devido à rapidez e à facilidade de execução, isenção de erros humanos, facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas e pequeno tamanho da impressão.

Todas essas razões justificam dedicar uma aula ao estudo deste método de ensaio. No final, você ficará sabendo como é feito o ensaio Rockwell, qual o equipamento empregado e como utilizar as diferentes escalas de dureza Rockwell.

## Nossa aula

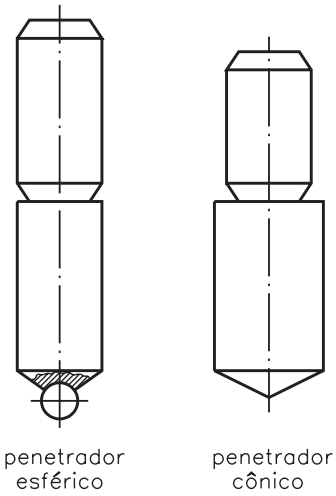
### Em que consiste o ensaio Rockwell



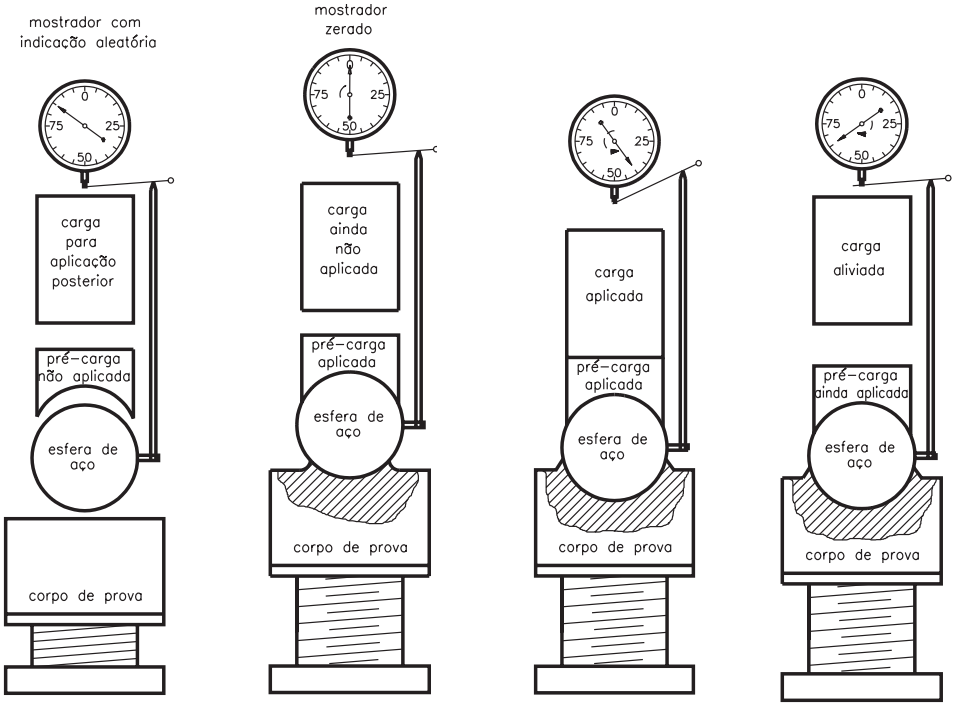

Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois aplica-se a carga do ensaio propriamente dita.

A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala predeterminada, adequada à faixa de dureza do material.

Os penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120º de conicidade).




## Descrição do processo




**1º passo:** aproximar a superfície do corpo de prova do penetrador.

**2º passo:** submeter o corpo de prova a uma pré-carga (carga menor).

**3º passo:** aplicar a carga maior até o ponteiro parar.

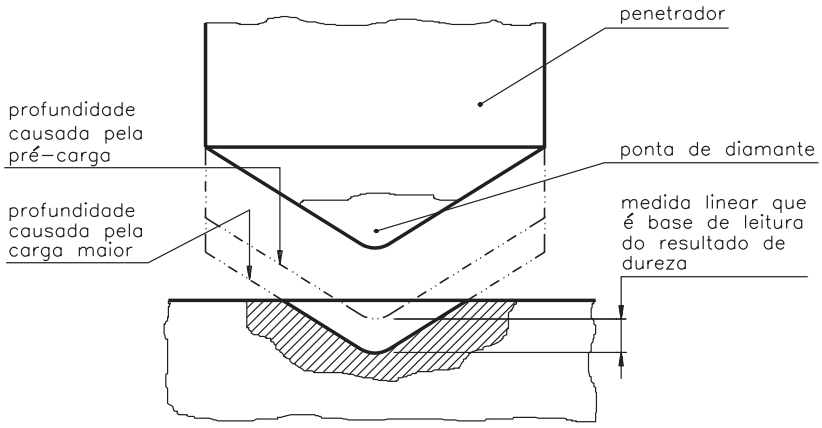
**4º passo:** retirar a carga maior e fazer a leitura do valor indicado no mostrador, na escala apropriada.

Quando se utiliza o penetrador cônico de diamante, deve-se fazer a leitura do resultado na escala externa do mostrador, de cor preta. Ao se usar o penetrador esférico, faz-se a leitura do resultado na escala vermelha.

Nos equipamentos com mostrador digital, uma vez fixada a escala a ser usada, o valor é dado diretamente na escala determinada.

O valor indicado na escala do mostrador é o valor da dureza Rockwell. Este valor corresponde à profundidade alcançada pelo penetrador, subtraídas a recuperação elástica do material, após a retirada da carga maior, e a profundidade decorrente da aplicação da pré-carga.

Em outras palavras: a profundidade da impressão produzida pela carga maior é a base de medida do ensaio Rockwell. Veja a seguir a representação esquemática da profundidade produzida por um penetrador cônico de diamante.




**Curiosidade**

A escala do mostrador é construída de tal modo que uma impressão profunda corresponde a um valor baixo na escala e uma impressão rasa corresponde a um valor alto na escala. Desse modo, um valor alto na escala indica que se trata de um material de alta dureza.

## Equipamento para ensaio de dureza Rockwell

Pode-se realizar o ensaio de dureza Rockwell em dois tipos de máquinas, ambas com a mesma técnica de operação, que diferem apenas pela precisão de seus componentes.

A máquina padrão mede a **dureza Rockwell normal** e é indicada para avaliação de dureza em geral.

A máquina mais precisa mede a **dureza Rockwell superficial**, e é indicada para avaliação de dureza em folhas finas ou lâminas, ou camadas superficiais de materiais.

Na máquina Rockwell normal, cada divisão da escala equivale a 0,02 mm; na máquina Rockwell superficial, cada divisão equivale a 0,01 mm.

As escalas de dureza Rockwell foram determinadas em função do tipo de penetrador e do valor da carga maior.

Nos ensaios de dureza Rockwell normal utiliza-se uma pré-carga de 10 kgf e a carga maior pode ser de 60, 100 ou 150 kgf.

Nos ensaios de dureza Rockwell superficial a pré-carga é de 3 kgf e a carga maior pode ser de 15, 30 ou 45 kgf.

Estas escalas não têm relação entre si. Por isso, não faz sentido comparar a dureza de materiais submetidos a ensaio de dureza Rockwell utilizando escalas diferentes. Ou seja, um material ensaiado numa escala só pode ser comparado a outro material ensaiado na mesma escala.

E por falar em escalas, analise os quadros a seguir, que mostram as escalas mais utilizadas nos processos industriais.

| ESCALA DE DUREZA ROCKWELL NORMAL E APLICAÇÕES | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ESCALA | COR DA ESCALA | CARGA MAIOR | PENETRADOR | FAIXA DE UTILIZAÇÃO | CAMPO DE APLICAÇÃO |
| **A** | preta | 60 | diamante cone 120° | 20 a 88 HRA | Carbonetos, folhas de aço com fina camada superficial endurecida |
| **C** | preta | 150 | diamante cone 120° | 20 a 70 HRC | Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB>100 |
| **D** | preta | 100 | diamante cone 120° | 40 a 77 HRD | Chapas finas de aço com média camada endurecida |
| **B** | vermelha | 100 | esfera aço 1,5875 mm | 20 a 100 HRB | Ligas de cobre, aços brandos, ligas de alumínio, ferro maleável etc. |
| **E** | vermelha | 100 | esfera aço 3,175 mm | 70 a 100 HRE | Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio |
| **F** | vermelha | 60 | esfera aço 1,5875 mm | 60 a 100 HRF | Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles |
| **G** | vermelha | 150 | esfera aço 1,5875 mm | 30 a 94 HRG | Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel |
| **H** | vermelha | 60 | esfera aço 3,175 mm | 80 a 100 HRH | Alumínio, zinco, chumbo |
| **K** | vermelha | 150 | esfera aço 3,175 mm | 40 a 100 HRK | Metais de mancais e outros muito moles ou finos |

| ESCALA DE DUREZA ROCKWELL SUPERFICIAL E APLICAÇÕES | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ESCALA | COR DA ESCALA | CARGA MAIOR | PENETRADOR | FAIXA DE UTILIZAÇÃO | CAMPO DE APLICAÇÃO |
| **15 N** | preta | 15 | diamante cone 120° | 65 a 90 HR 15N | Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD |
| **30 N** | preta | 30 | diamante | 40 a 80 HR 30N | Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD |
| **45 N** | preta | 45 | diamante | 35 a 70 HR 45N | Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD |
| **15 T** | vermelha | 15 | esfera aço 1,5875 mm | 50 a 94 HR 15T | Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG |
| **30 T** | vermelha | 30 | esfera aço 1,5875 mm | 10 a 84 HR 30T | Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG |
| **45 T** | vermelha | 45 | esfera aço 1,5875 mm | 10 a 75 HR 45T | Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG |

Para entender a informação contida na coluna **Faixa de utilização**, você precisa saber como são representados os valores de dureza Rockwell. É o que explicaremos a seguir.

## Representação da dureza Rockwell

O número de dureza Rockwell deve ser seguido pelo símbolo HR, com um sufixo que indique a escala utilizada.

Veja, por exemplo, a interpretação do resultado 64HRC:

- 64 é o valor de dureza obtido no ensaio;
- HR indica que se trata de ensaio de dureza Rockwell;
- a última letra, no exemplo C, indica qual a escala empregada.

Pare e resolva!

### Verificando o entendimento

Como você interpreta o seguinte resultado: 50HR15N?
Resposta: ..... .

Se você escreveu que 50 é o valor de dureza Rockwell superficial na escala 15N, acertou.

O número obtido no ensaio Rockwell corresponde a um valor adimensional, que somente possui significado quando comparado com outros valores da mesma escala.

## Utilizando as escalas de dureza Rockwell

Suponha que lhe peçam para fazer um ensaio de dureza Rockwell na escala C. Recorrendo aos quadros apresentados anteriormente, que trazem as escalas de dureza Rockwell, é possível identificar as condições de realização do ensaio. Como fazer isso? Acompanhe a demonstração.

- Uma vez que o ensaio deve ser feito na escala C, você já sabe que se trata de um ensaio de dureza Rockwell normal.
- O ensaio é de dureza Rockwell normal, logo a máquina a ser utilizada é a padrão.
- O penetrador para esta escala é o cônico de diamante.
- O penetrador deve ter 120º de conicidade.
- A carga maior do ensaio é de 150 kgf.
- A leitura do resultado é feita na escala preta do relógio.

Ficou claro? Então resolva o próximo exercício para comprovar o entendimento.

### Verificando o entendimento

Uma empresa adquiriu um material com a seguinte especificação: 70HR15T. Quais as condições do ensaio para confirmar se o material está de acordo com a especificação?

Resposta:
Tipo de máquina: .....
Tipo de penetrador: .....
Dimensão do penetrador: .....
Pré-carga: .....
Carga maior: .....
Cor da escala onde é feita a leitura do resultado: .....

A representação HR15T indica que as informações deverão ser procuradas na escala Rockwell superficial. Logo, a máquina deve ser a mais precisa. O penetrador será uma esfera de aço com 1,5875 mm de diâmetro. Será aplicada uma pré-carga de 3 kgf e a carga maior será de 15 kgf. O resultado deverá ser lido na escala vermelha.

## Profundidade de penetração

A profundidade que o penetrador vai atingir durante o ensaio é importante para definir a espessura mínima do corpo de prova.

De modo geral, a espessura mínima do corpo de prova deve ser 17 vezes a profundidade atingida pelo penetrador.

Entretanto, não há meios de medir a profundidade exata atingida pelo penetrador no ensaio de dureza Rockwell.

É possível obter a medida aproximada desta profundidade (P), a partir do valor de dureza indicado na escala da máquina de ensaio, utilizando as fórmulas a seguir:

- Penetrador de diamante:
  HR normal: $P = 0{,}002 \times (100 - HR)$
  HR superficial: $P = 0{,}001 \times (100 - HR)$
- Penetrador esférico:
  HR normal: $P = 0{,}002 \times (130 - HR)$
  HR superficial: $P = 0{,}001 \times (100 - HR)$

Por exemplo, a profundidade aproximada de penetração que será atingida ao ensaiar um material com dureza estimada de 40HRC é de 0,12 mm.

Como se chegou a este resultado? Consultando as tabelas com as escalas de dureza Rockwell, ficamos sabendo que a escala C se refere à dureza Rockwell normal e que esta escala utiliza penetrador de diamante. O passo seguinte foi escolher a fórmula: $P = 0{,}002 \times (100 - HR)$ e fazer as contas.

Tente você também!

### Verificando o entendimento

Qual deve ser a espessura mínima de uma chapa que será submetida ao ensaio de dureza Rockwell para um material com dureza esperada de 80HRB?

Resposta: .....

A primeira coisa que você deve ter feito é descobrir a profundidade aproximada atingida pelo penetrador.

Para isso, deve ter ido ao quadro com a escala B (dureza Rockwell normal), e constatado que esta escala usa penetrador esférico.

Com essas informações, deve ter escolhido a fórmula: $P = 0{,}002 \times (130 - 80)$ para encontrar o valor da profundidade aproximada. Feitos os cálculos, deve ter concluído que esta profundidade é de aproximadamente 0,1 mm.

Uma vez que a espessura do corpo de prova equivale, em geral, a pelo menos 17 vezes a medida da profundidade, a espessura mínima da chapa deve ser de 1,7 mm.

Como você viu, o ensaio de dureza Rockwell tornou possível avaliar a dureza de materiais que não poderiam ser submetidos ao ensaio Brinell. Mesmo assim, há situações em que nem o ensaio Brinell nem o Rockwell são recomendáveis. Por isso, a próxima aula será dedicada a outro tipo de ensaio de dureza, o ensaio Vickers.

Mas antes de estudar um assunto novo, é bom que você esteja seguro de que os assuntos desta aula ficaram bem entendidos. Uma maneira de verificar isso é fazendo os exercícios propostos a seguir.

## Exercícios

**Exercício 1**

Assinale com um X as vantagens que o método de ensaio Rockwell apresenta em relação ao método de ensaio Brinell.

**a)** ( ) permite avaliar a dureza de metais endurecidos;
**b)** ( ) deixa grandes marcas de impressão no material ensaiado;
**c)** ( ) permite leitura direta do resultado do ensaio na própria máquina;
**d)** ( ) serve para materiais heterogêneos.

**Exercício 2**

No ensaio de dureza Rockwell, a profundidade da impressão que serve como base da medida de dureza é causada pela:

**a)** ( ) pré-carga;
**b)** ( ) carga maior;
**c)** ( ) pré-carga mais carga maior;
**d)** ( ) carga maior, menos pré-carga.

**Exercício 3**

O ensaio de dureza Rockwell normal utiliza as cargas maiores de:

**a)** ( ) 60 – 100 – 150 kgf;
**b)** ( ) 15 – 30 – 45 kgf;
**c)** ( ) 15,625 – 31,25 – 62,5 kgf;
**d)** ( ) qualquer valor de carga.

**Exercício 4**

Descreva as condições de ensaio de dureza Rockwell para o material com a dureza estimada de 40HR45N:

**a)** tipo de máquina: .....
**b)** tipo de penetrador: .....
**c)** dimensão do penetrador: .....
**d)** carga maior: .....
**e)** cor da escala onde é lido o resultado: .....

**Exercício 5**

Calcule a espessura mínima que deve ter uma chapa que será ensaiada pelo método Rockwell, sabendo que a dureza estimada do material é 45 HRC.

AULA

13

# Dureza Vickers

## Introdução

Na aula anterior, você ficou sabendo que o ensaio de dureza Rockwell representou um avanço em relação ao ensaio Brinell, já que possibilitou avaliar a dureza de vários metais, que antes não podiam ser ensaiados quanto à dureza.

Entretanto, o ensaio Rockwell também mostra limitações. Por exemplo, suas escalas não têm continuidade. Por isso, materiais que apresentam dureza no limite de uma escala e no início de outra não podem ser comparados entre si quanto à dureza.

Outra limitação importante é que o resultado de dureza no ensaio Rockwell não tem relação com o valor de resistência à tração, como acontece no ensaio Brinell.

Vários pesquisadores tentaram encontrar uma solução para superar essas dificuldades.

Coube a Smith e Sandland, em 1925, o mérito de desenvolver um método de ensaio que ficou conhecido como **ensaio de dureza Vickers**. Este método leva em conta a relação ideal entre o diâmetro da esfera do penetrador Brinell e o diâmetro da calota esférica obtida, e vai além porque utiliza outro tipo de penetrador, que possibilita medir qualquer valor de dureza, incluindo desde os materiais mais duros até os mais moles.

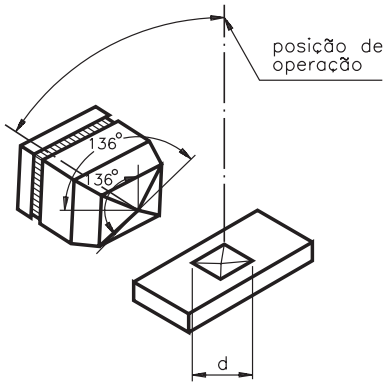
Isso não quer dizer que o ensaio Vickers resolva todos os problemas de avaliação de dureza dos materiais. Mas, somado aos outros dois métodos já estudados, é um bom caminho para atender às necessidades de processos industriais cada vez mais exigentes e sofisticados.

Nesta aula você ficará sabendo como é realizado este ensaio e como se calcula a dureza Vickers, além de constatar as vantagens e limitações deste método, em comparação com os dois anteriores.

## Cálculo da dureza Vickers

O ensaio desenvolvido por Smith e Sandland ficou conhecido como ensaio de dureza Vickers porque a empresa que fabricava as máquinas mais difundidas para operar com este método chamava-se Vickers-Armstrong.

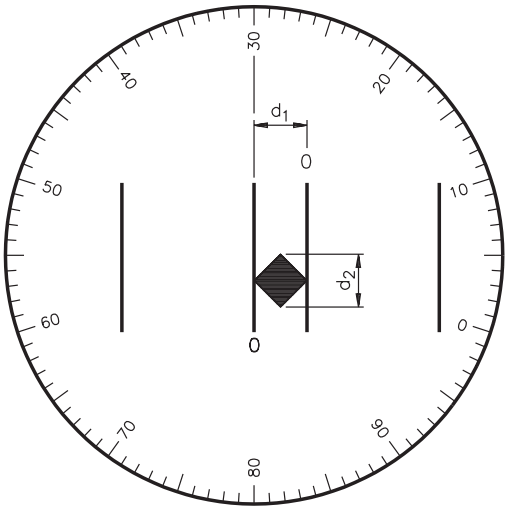
A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136º, sob uma determinada carga.




O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado. Essa relação, expressa em linguagem matemática é a seguinte:

$$HV = \frac{F}{A}$$

A máquina que faz o ensaio Vickers não fornece o valor da área de impressão da pirâmide, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais ($d_1$ e $d_2$) formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide.




Conhecendo as medidas das diagonais, é possível calcular a área da pirâmide de base quadrada (A), utilizando a fórmula:

$$A = \frac{d^2}{2 \text{ sen} \left( \frac{136°}{2} \right)}$$

Voltando à fórmula para cálculo da HV, e substituindo A pela fórmula acima, temos:

$$HV = \frac{F}{\frac{d^2}{2 \text{ sen } 68°}} \Rightarrow HV = \frac{F \times 2 \text{ sen } 68°}{d^2} \Rightarrow HV = \frac{1{,}8544 \text{ F}}{d^2}$$

Na fórmula anterior, a força deve ser expressa em quilograma-força (kgf) e o "d" corresponde à diagonal média, ou seja:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

e deve ser expresso em milímetro (mm). Se a máquina der o resultado em mícron (μ), esse valor deve ser convertido em milímetro.

Por exemplo, para encontrar o valor de dureza Vickers de um material que apresentou 0,24 mm e 0,26 mm de medida de diagonal da impressão, após aplicação de uma força de 10 kgf, basta utilizar as fórmulas apresentadas.

Primeiro, é preciso calcular o valor da diagonal média, que corresponde a:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \Rightarrow d = \frac{0{,}24 + 0{,}26}{2} \Rightarrow d = 0{,}25 \text{ mm}$$

Agora, só falta substituir os termos da fórmula de cálculo de dureza pelos valores conhecidos e fazer os cálculos:

$$HV = \frac{1{,}8544\ F}{d^2} \Rightarrow HV = \frac{1{,}8544 \times 10}{0{,}25^2} \Rightarrow HV = \frac{18{,}544}{0{,}0625} \Rightarrow HV = 296{,}7$$

Assim, ficamos sabendo que o valor de dureza Vickers (HV) para o material ensaiado é 296,7.

Outra forma de obter os valores de dureza Vickers é consultar tabelas montadas para determinadas cargas, em função da diagonal média.

### Representação do resultado do ensaio

A dureza Vickers é representada pelo valor de dureza, seguido do símbolo HV e de um número que indica o valor da carga aplicada. No exercício anterior, a representação do valor da dureza é: 296,7 HV 10.

A representação 440 HV 30 indica que o valor da dureza Vickers é 440 e que a carga aplicada foi de 30 kgf.

O tempo normal de aplicação da carga varia de 10 a 15 segundos. Quando a duração da aplicação da carga é diferente, indica-se o tempo de aplicação após a carga. Por exemplo, na representação: 440 HV 30/20, o último número indica que a carga foi aplicada por 20 segundos.

### Verificando o entendimento

Como você representa uma dureza Vickers 108, obtida num ensaio em que foi aplicada uma força de 5 kgf por 10 segundos?

Resposta: .....

Como 10 segundos está dentro do tempo normal de carga, você deve ter representado: 108 HV 5.

## Cargas usadas no ensaio Vickers

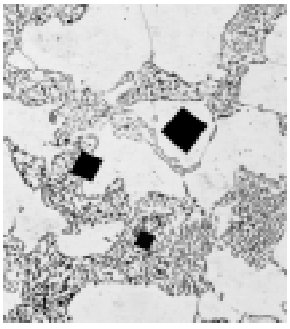
Neste método, ao contrário do que ocorre no Brinell, as cargas podem ser de qualquer valor, pois as impressões são sempre proporcionais à carga, para um mesmo material. Deste modo, o valor de dureza será o mesmo, independentemente da carga utilizada.

Por uma questão de padronização, as cargas recomendadas são: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120 kgf.

Para cargas muito altas (acima de 120 kgf), em vez do penetrador de pirâmide de diamante pode-se também usar esferas de aço temperado de 1 ou 2 mm de diâmetro na mesma máquina. Neste caso, o ensaio feito na máquina Vickers é o ensaio de dureza Brinell.

Para aplicações específicas, voltadas principalmente para superfícies tratadas (carbonetação, têmpera) ou para a determinação de dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura, utiliza-se o **ensaio de microdureza Vickers**.

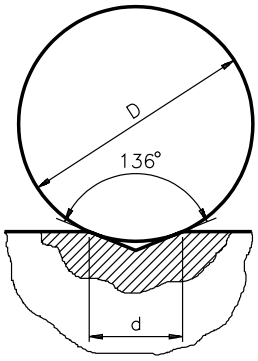
A microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, só que utiliza cargas menores que 1 kgf. A carga pode ter valores tão pequenos como 10 gf.



Na microdureza, como a carga aplicada é pequena, a impressão produzida é microscópica, como mostra a figura ampliada, ao lado.

## Comparando Brinell e Vickers

O ensaio Vickers produz valores de impressão semelhantes aos da dureza Brinell. Isso ocorre porque o ângulo de 136º da ponta de diamante produz uma impressão que mantém a relação ideal de 0,375 entre o diâmetro da calota esférica (d) e o diâmetro da esfera do penetrador Brinell (D), seja qual for a carga aplicada. É isso o que mostra o desenho ao lado.

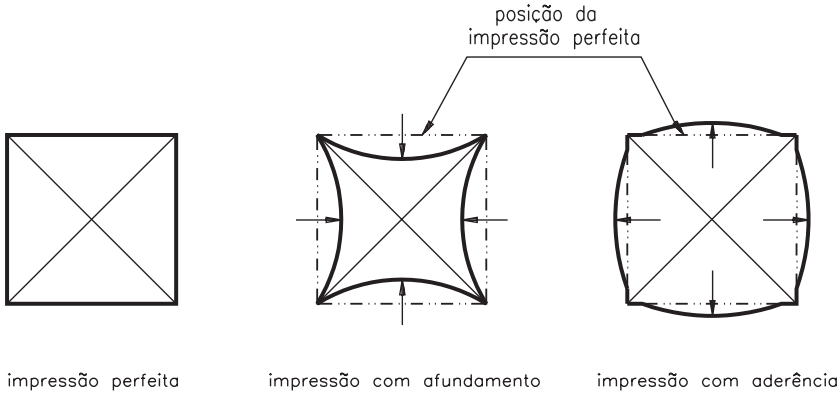



O uso de cargas diferentes é necessário para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível com o visor da máquina.

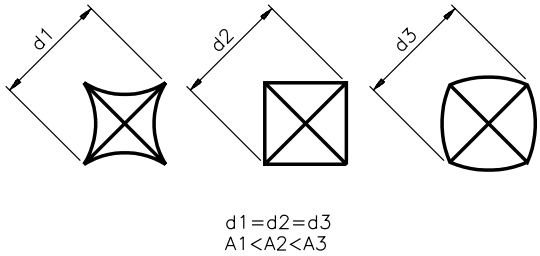
## Defeitos de impressão

Uma impressão perfeita, no ensaio Vickers, deve apresentar os lados retos.

Entretanto, podem ocorrer defeitos de impressão, devidos ao **afundamento** ou à **aderência** do metal em volta das faces do penetrador.




Quando ocorrem esses defeitos, embora as medidas das diagonais sejam iguais, as áreas de impressão são diferentes.




Como o cálculo do valor de dureza Vickers utiliza a medida da média de duas diagonais, esses erros afetam o resultado da dureza: teremos um valor de dureza maior do que o real nos casos de afundamento e um valor de dureza menor do que o real, nos casos de aderência.

É possível corrigir esses defeitos alterando-se o valor da carga do ensaio para mais ou para menos, dependendo do material e do tipo de defeito apresentado.

## Vantagens e limitações do ensaio Vickers

O ensaio Vickers fornece uma escala contínua de dureza, medindo todas as gamas de valores de dureza numa única escala.

As impressões são extremamente pequenas e, na maioria dos casos, não inutilizam as peças, mesmo as acabadas.

O penetrador, por ser de diamante, é praticamente indeformável.

Este ensaio aplica-se a materiais de qualquer espessura, e pode também ser usado para medir durezas superficiais.

Por outro lado, devem-se tomar cuidados especiais para evitar erros de medida ou de aplicação de carga, que alteram muito os valores reais de dureza.

A preparação do corpo de prova para microdureza deve ser feita, obrigatoriamente, por metalografia, utilizando-se, de preferência, o polimento eletrolítico, para evitar o encruamento superficial.

Quando se usam cargas menores do que 300 gf, pode haver recuperação elástica, dificultando a medida das diagonais.

A máquina de dureza Vickers requer aferição constante, pois qualquer erro na velocidade de aplicação da carga traz grandes diferenças nos valores de dureza.

É claro que muito mais poderia ser dito sobre os ensaios de dureza, mas vamos parar por aqui, pois a base deste assunto foi apresentada.

É importante que você saiba que existem outros métodos de ensaio de dureza, que servem a aplicações específicas. Caso queira ou precise saber mais a esse respeito, procure obter catálogos, prospectos e manuais dos fabricantes de equipamentos de ensaio, que, juntamente com a literatura técnica, constituem excelente fonte de informações atualizadas.

Antes de passar ao estudo de um assunto novo, é uma boa idéia resolver os exercícios a seguir.

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 1**

No ensaio de dureza Vickers o valor da carga não interfere no resultado da dureza, para um mesmo material, porque:

**a)** ( ) o penetrador é feito de material indeformável;
**b)** ( ) o penetrador tem a forma de pirâmide de base quadrada;
**c)** ( ) o ângulo entre as faces do penetrador garante impressões proporcionais ao Brinell ideal;
**d)** ( ) o penetrador tem dimensões proporcionais à esfera do Brinell ideal.

**Exercício 2**

Uma chapa deve ser submetida ao ensaio Vickers. Determine as condições do ensaio, sabendo que a dureza estimada do material é 116,6 HV 5.

**a)** equipamento: .....
**b)** carga aplicada: .....
**c)** faixa de tempo de aplicação da carga: .....

**Exercício 3**

No ensaio Vickers, defeitos de impressão causados por afundamento do material nas faces de impressão podem ser corrigidos por:

**a)** ( ) alteração da carga do ensaio;
**b)** ( ) aumento do tempo do ensaio;
**c)** ( ) substituição do penetrador de diamante;
**d)** ( ) ajuste do microscópio acoplado ao equipamento.

**Exercício 4**

O ensaio de microdureza Vickers utiliza cargas:

**a)** abaixo de 10 gf;
**b)** entre 10 gf e 1.000 gf;
**c)** entre 1 kgf e 5 kgf;
**d)** entre 5 kgf e 120 kgf.

**Exercício 5**

As diagonais medidas num ensaio de dureza Vickers, com carga de 5 kgf aplicada por 10 segundos, foram: 0,162 mm e 0,164 mm. Represente a dureza desse material.

Resposta: .....

AULA

14

# Ensaio de fluência

## Introdução

Nas aulas anteriores de ensaios de materiais, estudamos que todo corpo submetido a um esforço mecânico sofre uma deformação elástica, em maior ou menor grau, antes de apresentar deformação plástica ou de se romper.

Ou seja, verificamos que há sempre uma quantidade de esforço que não produz deformação permanente. Se o esforço é aliviado neste estágio, as dimensões da peça voltam ao original.

Será que isso significa que um produto construído para suportar um esforço estático **abaixo de seu limite elástico** vai durar para sempre?

A resposta é **não**! E você vai ficar sabendo por que ao estudar o ensaio apresentado nesta aula, o **ensaio de fluência**.

Neste ensaio, dois novos fatores entram em jogo: o **tempo** e a **temperatura**. Estudando os assuntos desta aula, você vai ficar sabendo como o tempo e a temperatura afetam a durabilidade de um produto, quais os tipos de ensaios de fluência e como são feitos. No final, poderá tirar suas próprias conclusões a respeito da importância deste tipo de ensaio.

## Nossa aula

### O que é a fluência

A fluência é a deformação plástica que ocorre num material, sob tensão constante ou quase constante, em função do tempo. A temperatura tem um papel importantíssimo nesse fenômeno.

A fluência ocorre devido à movimentação de falhas, que sempre existem na estrutura cristalina dos metais. Não haveria fluência se estas falhas não existissem.

Existem metais que exibem o fenômeno de fluência mesmo à temperatura ambiente, enquanto outros resistem a essa deformação mesmo a temperatura elevadas.

As exigências de uso têm levado ao desenvolvimento de novas ligas que resistam melhor a esse tipo de deformação. A necessidade de testar esses novos materiais, expostos a altas temperaturas ao longo do tempo, define a importância deste ensaio.

## O tempo e a temperatura

Os ensaios que analisamos anteriormente neste livro são feitos num curto espaço de tempo, isto é, os corpos de prova ou peças são submetidos a um determinado esforço por alguns segundos ou, no máximo, minutos.

Porém, nas condições reais de uso, os produtos sofrem solicitações diversas por longos períodos de tempo. O uso mostra que, em algumas situações, os produtos apresentam deformação permanente mesmo sofrendo solicitações **abaixo** do seu limite elástico.

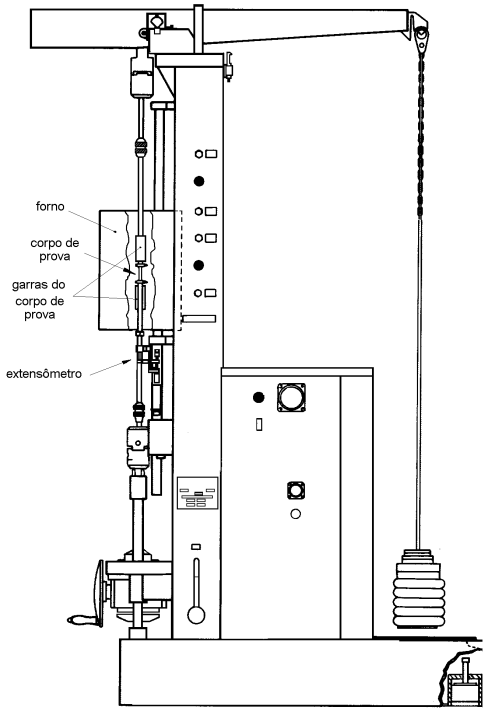
Essas deformações ocorrem mais freqüentemente em situações de uso do produto que envolvam altas temperaturas. E quanto maior a temperatura, maior a velocidade da deformação.

Nos ensaios de fluência, o controle da temperatura é muito importante. Verificou-se que pequenas variações de temperatura podem causar significativas alterações na velocidade de fluência.

Exemplo disso é o aço carbono submetido ao ensaio de fluência, a uma tensão de 3,5 kgf/mm$^2$, durante 1.000 horas: à temperatura de 500ºC, apresentou uma deformação de 0,04% e à temperatura de 540ºC apresentou uma deformação de 4%.

Imagine a importância desta característica para os foguetes, aviões a jato, instalações de refinarias de petróleo, equipamentos de indústria química, instalações nucleares, cabos de alta tensão etc., nos quais os esforços são grandes e as temperaturas de trabalho oscilam em torno de 1.000ºC.

## Equipamento para ensaio de fluência




Na maioria dos casos, avalia-se a fluência de um material submetendo-o ao esforço de tração. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de fluência são semelhantes aos do ensaio de tração.

O equipamento para a realização deste ensaio permite aplicar uma carga de tração constante ao corpo de prova. O corpo de prova fica dentro de um forno elétrico, de temperatura constante e controlável. Um extensômetro é acoplado ao equipamento, para medir a deformação em função do tempo.

Como os extensômetros são instrumentos de precisão, não suportam altas temperaturas. Por isso são ligados ao corpo de prova por meio de hastes de extensão, como mostra a figura ao lado.

Ao fixar o extensômetro ao corpo de prova deve-se tomar cuidado para evitar marcas que possam induzir a ruptura a ocorrer nos pontos de fixação, o que levaria à rejeição do ensaio.

## Preparação do ensaio

Nos ensaios de fluência, o corpo de prova deve passar por um período de aquecimento, até que se atinja a temperatura estabelecida. Mas é importante que o corpo de prova não sofra superaquecimento. A prática comum é aquecer primeiro o corpo de prova até 10ºC abaixo da temperatura do ensaio, por um período de 1 a 4 horas, para completa homogeneização da estrutura. Só depois disso o corpo de prova deve ser levado à temperatura do ensaio.

O aquecimento pode ser feito por meio de resistência elétrica, por radiação ou indução. A temperatura deve ser medida em dois ou três pontos, preferencialmente por meio de **pirômetros** ligados ao corpo de prova por **termopares** aferidos, de pequeno diâmetro.

**Termopar:** são dois fios de materiais diferentes, unidos nas pontas por solda, que geram uma diferença de potencial quando as pontas são submetidas a temperaturas diferentes.

**Pirômetro:** é um equipamento que relaciona a diferença de potencial gerada no termopar a uma escala de temperatura.

## Avaliando a fluência

Para avaliar a fluência, utilizam-se três tipos de ensaios:

- Ensaio de fluência propriamente dito;
- Ensaio de ruptura por fluência;
- Ensaio de relaxação.

As conclusões obtidas a partir do ensaio de fluência baseado no esforço de tração podem ser estendidas aos outros tipos de esforços estudados até aqui.

Os ensaios de fluência são muito longos, podendo durar de um mês até pouco mais de um ano. Por isso seu uso se restringe a atividades de pesquisa e desenvolvimento de novos materiais ou ligas metálicas.

Veja a seguir uma descrição geral dos três tipos de ensaios mencionados.

### Ensaio de fluência propriamente dito

Este ensaio consiste em aplicar uma determinada carga em um corpo de prova, a uma dada temperatura, e avaliar a deformação que ocorre durante a realização do ensaio.

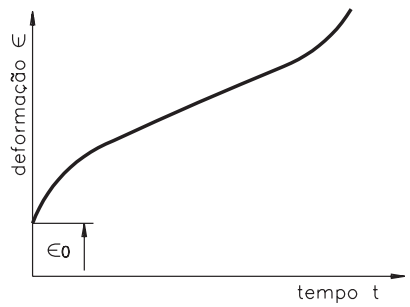
É importante ressaltar que, neste ensaio, tanto a carga como a temperatura são mantidas constantes durante todo o processo.

A duração deste ensaio é muito variável: geralmente leva um tempo superior a 1.000 horas. É normal o ensaio ter a mesma duração esperada para a vida útil do produto.

Às vezes, quando não é possivel esperar muito tempo, utilizam-se **extrapolações**, isto é, o ensaio é feito durante um tempo mais curto e, a partir da deformação obtida nesse intervalo, estima-se o comportamento do material por um tempo mais longo (vida útil do produto) e avalia-se a quantidade de deformação esperada ao longo deste tempo.

**Extrapolação**: qualquer processo em que se infere o comportamento de uma função fora de um intervalo, a partir de seu comportamento durante esse intervalo.

O resultado do ensaio é dado por uma curva de deformação (fluência) pelo tempo de duração do ensaio.




Para obter resultados significativos, é necessário realizar diversos ensaios no material, com diferentes cargas e temperaturas. As curvas assim obtidas devem representar as diversas situações práticas de uso do produto.

O objetivo do ensaio, em muito casos, é determinar as tensões necessárias para produzir uma deformação de 0,5%, 1,0% e, em alguns casos, até 2,0%, por um dado período de tempo, em função da temperatura. Com isso é possível determinar a vida útil e a máxima condição de uso do produto.

### Ensaio de ruptura por fluência

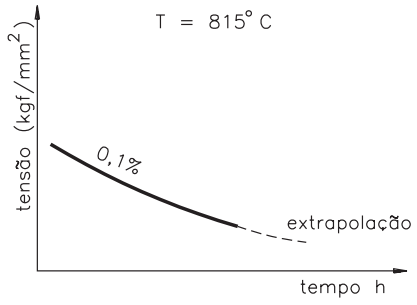
Este ensaio é semelhante ao anterior, só que neste caso os corpos de prova são sempre levados até a ruptura. Para isso, utilizam-se cargas maiores e, portanto, são obtidas maiores velocidades de fluência.

A deformação atingida pelos corpos de prova é bem maior: enquanto no ensaio de fluência a deformação do corpo de prova poucas vezes ultrapassa 1%, nos ensaios de ruptura por fluência pode atingir 50%.

A tensão e a temperatura são mantidas constantes neste ensaio. Os resultados obtidos no ensaio são: tempo para a ruptura do corpo de prova, medida da deformação e medida da estricção, em certos casos.

Este ensaio é muito usado pela sua brevidade, comparado com o ensaio de fluência propriamente dito. Sua duração fica em torno de 1.000 horas. Porém, são necessários muitos corpos de provas, ensaiados com cargas diferentes, para se obter resultados significativos.

O gráfico deste ensaio relaciona a carga com o tempo de ruptura. É construído a partir dos resultados de diversos testes.




**Ensaio de relaxação**

Os ensaios de fluência e de ruptura por fluência envolvem elevado número de equipamentos e milhares de horas de ensaio.

O ensaio de relaxação elimina essa dificuldade, produzindo dados sobre velocidade de fluência/tensão numa gama variada de velocidades, com apenas **um corpo de prova**.

Na sua forma mais simples, o ensaio de relaxação é feito mantendo a deformação constante, por meio da redução da tensão aplicada ao corpo de prova ao longo do tempo.

O resultado é justamente a queda da tensão ao longo do tempo, que mantém a velocidade de deformação constante, num dado valor.

A maioria dos ensaios de relaxação duram de 1.000 a 2.000 horas. Os resultados não têm relação direta com aplicação prática e são extrapolados empiricamente para situações reais.

A principal desvantagem deste ensaio prende-se às exigências do equipamento, cujo sistema de medição de força deve permitir medições precisas de pequenas variações de carga ao longo do tempo.

Outro aspecto delicado na realização deste tipo de ensaio é a necessidade de um estreito controle da temperatura da sala onde se encontra o equipamento, pois mesmo pequenas flutuações da temperatura provocam efeitos de dilatação nos componentes da máquina, que podem alterar os resultados.

Embora na prática esses ensaios se restrinjam às atividades de pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e ligas metálicas, é evidente sua importância para determinar as condições seguras de uso de diversos produtos.

**Exercício 1**

Assinale **F** ou **V**, conforme as afirmações forem falsas ou verdadeiras.

**a)** ( ) a fluência ocorre abaixo do limite elástico do material;
**b)** ( ) a temperatura não influi no fenômeno da fluência;
**c)** ( ) o ensaio de fluência é, em geral, bastante demorado;
**d)** ( ) o extensômetro avalia a temperatura do corpo de prova.

Marque com um X a resposta correta.

**Exercício 2**

A fluência é a deformação plástica que ocorre num material:

**a)** ( ) sob carga estática constante, em função da temperatura;
**b)** ( ) sob carga dinâmica, independentemente do tempo;
**c)** ( ) sob carga estática variável, em função da temperatura;
**d)** ( ) sob carga estática constante, em função do tempo e da temperatura.

**Exercício 3**

No ensaio de fluência propriamente dito:

**a)** ( ) a carga é mantida constante e a temperatura varia;
**b)** ( ) a carga é variável e a temperatura constante;
**c)** ( ) a carga e a temperatura são mantidas constantes;
**d)** ( ) a carga e a temperatura variam durante o ensaio.

**Exercício 4**

No ensaio de ruptura por fluência:

**a)** ( ) utilizam-se cargas maiores para acelerar a fluência;
**b)** ( ) as cargas são variáveis no mesmo ensaio;
**c)** ( ) as cargas são aumentadas até que o corpo de prova se rompa;
**d)** ( ) as cargas não afetam o resultado do ensaio.

**Exercício 5**

No ensaio de relaxação:

**a)** ( ) a carga é mantida constante e a temperatura aumentada;
**b)** ( ) a deformação é mantida constante e a carga alterada;
**c)** ( ) a deformação e a carga são aumentadas;
**d)** ( ) são usados **n** corpos de prova com cargas diferentes.

AULA

15

# Ensaio de fadiga

## Introdução

Em condições normais de uso, os produtos devem sofrer esforços abaixo do limite de proporcionalidade, ou limite elástico, que corresponde à tensão máxima que o material pode suportar.

Em geral, os fabricantes especificam o produto para suportar esforços acima desse limite, ensaiam os materiais, controlam o processo de produção e tomam todos os cuidados para que o produto não apresente qualquer problema.

Apesar de todas essas precauções, é possível que, após algum tempo de uso normal, de repente, sem aviso prévio e sem motivo aparente, o produto simplesmente venha a falhar, deixando o usuário na mão.

Essa falha é típica de um fenômeno chamado **fadiga**, que é o assunto desta aula. Você ficará sabendo o que é fadiga, como se determina a resistência à fadiga, como são apresentados os resultados deste ensaio, que fatores influenciam a resistência dos metais à fadiga e o que pode ser feito para melhorar essa resistência.

Não se deixe vencer pela fadiga! Estude com atenção, e ao final da aula você terá adquirido uma visão geral de um tipo de ensaio de importância fundamental nas indústrias.

## Nossa aula

### Quando começa a fadiga

Você já sabe que toda máquina é constituída por um conjunto de componentes. No uso normal, nunca ocorre de todos os componentes falharem ao mesmo tempo. Isso porque cada um tem características próprias, uma das quais é o tempo de vida útil esperado.

O ensaio de resistência à fadiga é um meio de especificar limites de tensão e de tempo de uso de uma peça ou elemento de máquina. É utilizado também para definir aplicações de materiais.

É sempre preferível ensaiar a própria peça, feita em condições normais de produção. Molas, barras de torção, rodas de automóveis, pontas de eixo etc. são exemplos de produtos normalmente submetidos a ensaio de fadiga.

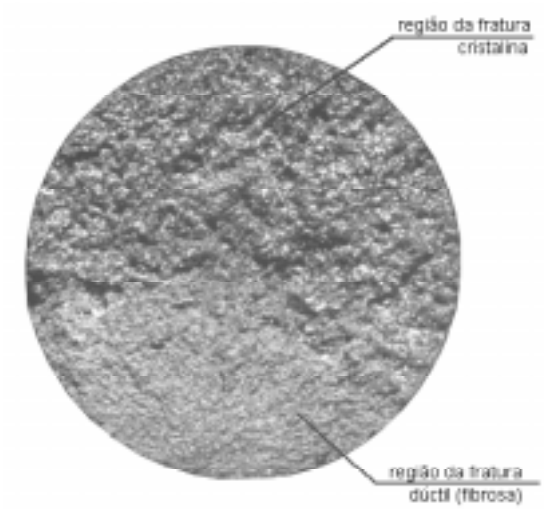
Quando não é possível o ensaio no próprio produto, ou se deseja comparar materiais, o ensaio é feito em corpos de prova padronizados.

**Leia com atenção:**

Fadiga é a ruptura de componentes, sob uma carga bem inferior à carga máxima suportada pelo material, devido a solicitações **cíclicas repetidas**.

A ruptura por fadiga começa a partir de uma trinca (nucleação) ou pequena falha superficial, que se propaga ampliando seu tamanho, devido às solicitações cíclicas. Quando a trinca aumenta de tamanho, o suficiente para que o restante do material não suporte mais o esforço que está sendo aplicado, a peça se rompe repentinamente.

A fratura por fadiga é típica: geralmente apresenta-se fibrosa na região da propagação da trinca e cristalina na região da ruptura repentina.



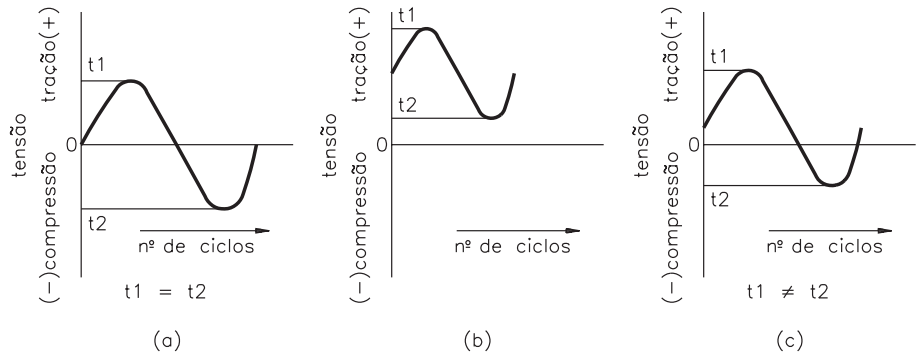

Você pode observar aproximadamente o que acontece na fadiga, dobrando repetidamente um pedaço de arame de aço. Após dobrar algumas vezes, se você observar atentamente, notará algumas pequenas trincas. Se continuar dobrando, observará que a trinca aumenta de tamanho até ocorrer a ruptura do arame.

O estudo da fadiga é importante porque a grande maioria das falhas de componentes de máquinas, em serviço, se deve à fadiga. E a ruptura por fadiga ocorre sem nenhum aviso prévio, ou seja, num dado momento a máquina está funcionando perfeitamente e, no instante seguinte, ela falha.

## Tensões cíclicas

Na definição de fadiga, destacou-se que ela se deve a esforços cíclicos repetidos. De maneira geral, peças sujeitas a fadiga estão submetidas a esforços que se repetem com regularidade. Trata-se das **tensões cíclicas**.

A tensão cíclica mais comum é caracterizada por uma **função senoidal**, onde os valores de tensão são representados no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas. As tensões de tração são representadas como positivas e as tensões de compressão como negativas. A figura a seguir apresenta três tipos de ciclos de tensão.



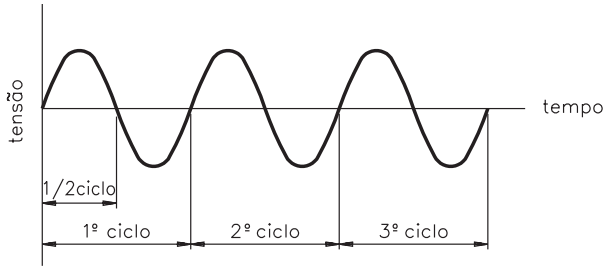

A figura **a** mostra um gráfico de tensão reversa, assim chamado porque as tensões de tração têm valor igual às tensões de compressão.

No gráfico **b** todas as tensões são positivas, ou seja, o corpo de prova está sempre submetido a uma tensão de tração, que oscila entre um valor máximo e um mínimo.

O gráfico **c** representa tensões positivas e negativas, como no primeiro caso, só que as tensões de compressão têm valores diferentes das tensões de tração.

**Dica**

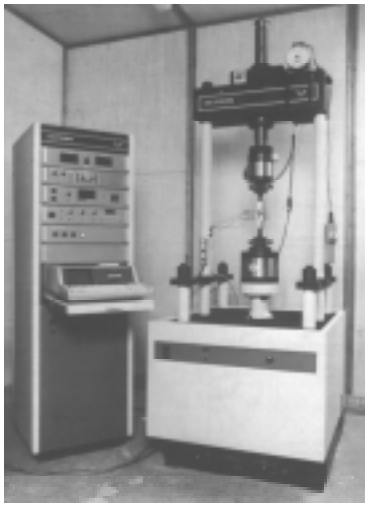
Um ciclo de tensão corresponde a um conjunto sucessivo de valores de tensão, que se repete na mesma seqüência e no mesmo período de tempo.




## Tipos de ensaio de fadiga

Os aparelhos de ensaio de fadiga são constituídos por um sistema de aplicação de cargas, que permite alterar a intensidade e o sentido do esforço, e por um contador de número de ciclos.

O teste é interrompido assim que o corpo de prova se rompe.

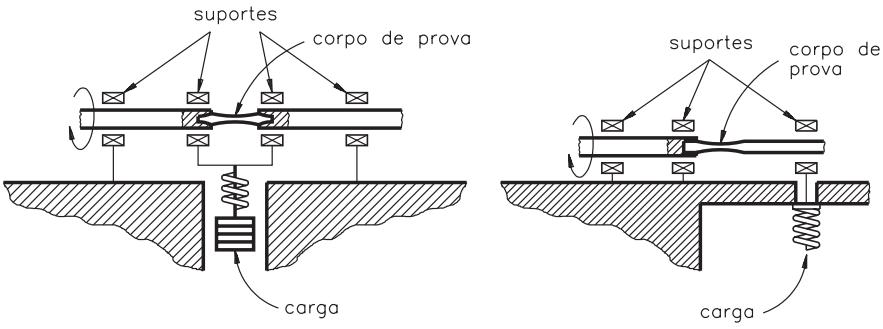


O ensaio é realizado de diversas maneiras, de acordo com o tipo de solicitação que se deseja aplicar:

- torção;
- tração-compressão;
- flexão;
- flexão rotativa.

O ensaio mais usual, realizado em corpos de prova extraídos de barras ou perfis metálicos, é o de flexão rotativa.

Este ensaio consiste em submeter um corpo de prova a solicitações de flexão, enquanto o mesmo é girado em torno de um eixo, por um sistema motriz com contagiros, numa rotação determinada e constante.



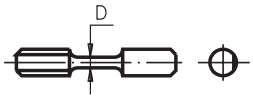

solicitação de flexão central

solicitação de flexão no extremo

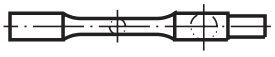
## Corpo de prova

O corpo de prova deve ser usinado e ter bom acabamento superficial, para não prejudicar os resultados do ensaio. A forma e as dimensões do corpo de prova variam, e constituem especificações do fabricante do equipamento utilizado. O ambiente onde é feito o ensaio também é padronizado.

As formas mais utilizadas de corpo de prova são apresentadas nas figuras a seguir.

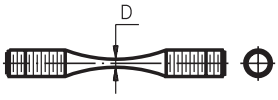



a) torção



b) flexão rotativa

c) flexão em chapa




c) tração compressão

Para uma mesma tensão, pode-se obter resultados de ensaio dispersos e que devem ser tratados estatisticamente. Mas, em geral, o ensaio é realizado em cerca de 10 corpos de prova, para cada um dos diversos níveis de tensão.

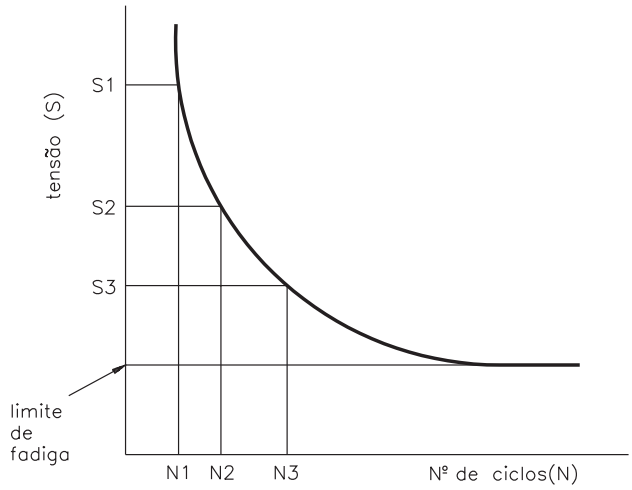
## Curva S-N

Os resultados do ensaio de fadiga geralmente são apresentados numa **curva tensão-número de ciclos**, ou simplesmente **curva S-N**. O **S** vem da palavra inglesa *stress*, que quer dizer "tensão", e **N** representa o número de ciclos.

Supondo que, para uma certa solicitação de flexão S1 o corpo de prova se rompa em um certo número de ciclos N1, e para uma solicitação S2 se rompa em N2 ciclos, e assim por diante, pode-se construir o diagrama S-N, com a tensão no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas.

Observando a curva obtida, nota-se que, à medida que se diminui a tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos. Nota-se, também, que diminuindo a tensão a partir de um certo nível – em que a curva se torna horizontal – o número de ciclos para o rompimento do corpo de prova torna-se praticamente infinito.

Esta tensão máxima, que praticamente não provoca mais a fratura por fadiga, chama-se **limite de fadiga** ou **resistência à fadiga** do metal considerado.




Mas, para a maioria dos materiais, especialmente os metais não ferrosos como o alumínio, a curva obtida no diagrama S-N é decrescente. Portanto, é necessário definir um número de ciclos para obter a correspondente tensão, que será chamada de resistência à fadiga.

Para o alumínio, cobre, magnésio e suas ligas, deve-se levar o ensaio a até 50 milhões de ciclos e, em alguns casos, a até 500 milhões de ciclos, para neste número definir a resistência à fadiga.

## Fatores que influenciam a resistencia à fadiga

Uma superfície mal acabada contém irregularidades que, como se fossem um entalhe, aumentam a concentração de tensões, resultando em tensões residuais que tendem a diminuir a resistência à fadiga.

Defeitos superficiais causados por polimento (queima superficial de carbono nos aços, recozimento superficial, trincas etc.) também diminuem a resistência à fadiga.

Tratamentos superficiais (cromeação, niquelação etc.) diminuem a resistência à fadiga, por introduzirem grandes mudanças nas tensões residuais, além de conferirem porosidade ao metal. Por outro lado, tratamentos superficiais endurecedores podem aumentar a resistência à fadiga.

O limite de fadiga depende da composição, da estrutura granular, das condições de conformação mecânica, do tratamento térmico etc.

O tratamento térmico adequado aumenta não somente a resistência estática, como também o limite de fadiga.

O encruamento dos aços dúcteis aumenta o limite de fadiga.

O meio ambiente também influencia consideravelmente o limite de fadiga, pois a ação corrosiva de um meio químico acelera a velocidade de propagação da trinca.

A forma é um fator crítico, porque a resistência à fadiga é grandemente afetada por descontinuidades nas peças, como cantos vivos, encontros de paredes, mudança brusca de seções.

## A resistência à fadiga pode ser melhorada

Sempre que possível, deve-se evitar a concentração de tensões. Por exemplo, um rasgo de chaveta num eixo é um elemento que concentra tensão e, conseqüentemente, diminui a resistência à fadiga.

Os projetos devem prever tensões contrárias favoráveis (opostas às tensões principais aplicadas), por meio de processos mecânicos, térmicos ou similares. Uma compensação deste tipo é encontrada em amortecedores de vibrações de motores a explosão.

Defeitos metalúrgicos como inclusões, poros, pontos moles etc. devem ser eliminados.

Deve-se selecionar os materiais metálicos de acordo com o ciclo de tensões: para aplicações com baixas tensões cíclicas, onde a deformação pode ser facilmente controlada, deve-se dar preferência a ligas de alta ductilidade. Para aplicações com elevadas tensões cíclicas, envolvendo deformações cíclicas predominantemente elásticas, deve-se preferir ligas de maior resistência mecânica.

Microestruturas estáveis, isto é, que não sofrem alterações espontâneas ao longo do tempo, apresentam maior resistência à fadiga.

De tudo que foi dito sobre fadiga nesta aula, você deve ter concluído que, no uso normal dos produtos, nós os submetemos permanentemente a ensaios de fadiga, que só terminam quando o produto falha.

Porém, a indústria tem que se preocupar com a fadiga **antes** de lançar o produto no mercado, pois este ensaio fornece informações que afetam diretamente a segurança do consumidor.

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta.

**Exercício 1**

A ruptura por fadiga ocorre quando o material está sujeito a:

**a)** ( ) tensões superiores ao limite de proporcionalidade;
**b)** ( ) tensões cíclicas repetitivas;
**c)** ( ) tensões iguais ao limite de proporcionalidade;
**d)** ( ) tensões estáticas.

**Exercício 2**

No gráfico de tensão reversa:

**a)** ( ) as tensões de tração são positivas e as tensões de compressão são negativas;
**b)** ( ) as tensões de tração são negativas e as tensões de compressão são positivas;
**c)** ( ) todas as tensões são positivas;
**d)** ( ) todas as tensões são negativas.

**Exercício 3**

São exemplos de fatores que **diminuem** a resistência à fadiga:

**a)** ( ) tratamentos superficiais, descontinuidades na superfície;
**b)** ( ) tratamento térmico, tratamentos superficiais endurecedores;
**c)** ( ) meio ambiente isento de agentes corrosivos, bom acabamento superficial;
**d)** ( ) encruamento dos aços dúcteis, formas sem cantos vivos.

**Exercício 4**

O ensaio de fadiga é baseado em esforços de:

**a)** ( ) tração e torção;
**b)** ( ) tração e compressão;
**c)** ( ) flexão e torção;
**d)** ( ) tração, compressão, torção e flexão.

**Exercício 5**

Na curva S-N, o limite de fadiga indica que:

**a)** ( ) se for atingida aquela tensão, o corpo se romperá;
**b)** ( ) mantendo aquela tensão indefinidamente, o corpo não se romperá;
**c)** ( ) foi atingido o número máximo de ciclos que o material suporta;
**d)** ( ) a partir deste limite, a curva é decrescente.

AULA

16

# Ensaio de impacto

## Introdução

Os veículos brasileiros têm, em geral, suspensão mais reforçada do que a dos similares europeus. Não é à toa. As condições de nossas estradas e ruas requerem esse reforço, para que os veículos possam enfrentar, com menores riscos de quebra, os choques provocados pelos buracos e outras irregularidades do asfalto ou do terreno.

Este exemplo serve para mostrar a importância do assunto desta aula.

Estamos falando do **ensaio de impacto**, que se caracteriza por submeter o corpo ensaiado a uma força brusca e repentina, que deve rompê-lo. É bem melhor saber quanto o material resiste a uma carga dinâmica numa situação de ensaio do que numa situação real de uso, concorda?

Agora imagine outra situação: se você colocasse um tijolo de barro, desses comuns, sobre uma mesa com tampo de vidro, com exceção da sujeira, nada mais aconteceria. O vidro suportaria sem problemas a força equivalente ao peso do tijolo.

Mas o que ocorreria se o mesmo tijolo despencasse de uma altura de 2 metros sobre a mesa de vidro? Um desastre, não é mesmo?

O que há de diferente nas duas situações, se a mesa é a mesma, assim como o tijolo, e portanto a força aplicada também é a mesma? A diferença está na **velocidade de aplicação da força**, ou seja, no impacto do tijolo contra o tampo da mesa.

A maioria dos ensaios que estudamos não avalia o comportamento dos materiais submetidos a esforços dinâmicos. No caso da fadiga, embora os esforços sejam dinâmicos, o ensaio correspondente leva mais em conta o fato de serem cíclicos.

Porém, a maioria das máquinas e equipamentos, quando em funcionamento, está submetida a esforços dinâmicos.

Estudando os assuntos desta aula você irá conhecer os fatores que afetam o comportamento dos metais dúcteis, levando-os à fratura frágil, e os procedimentos para a realização dos ensaios de impacto. E será capaz de identificar as características dos dois tipos de corpos de prova utilizados neste ensaio: o Charpy e o Izod.

## Fratura frágil

As fraturas produzidas por impacto podem ser frágeis ou dúcteis. As fraturas frágeis caracterizam-se pelo aspecto cristalino e as fraturas dúcteis apresentam aparência fibrosa.

Os materiais frágeis rompem-se sem nenhuma deformação plástica, de forma brusca. Por isso, esses materiais não podem ser utilizados em aplicações nas quais sejam comuns esforços bruscos, como em eixos de máquinas, bielas etc.

Para estas aplicações são desejáveis materiais que tenham capacidade de absorver energia e dissipá-la, para que a ruptura não aconteça, ou seja, materiais que apresentem **tenacidade**.

Esta propriedade está relacionada com a fase plástica dos materiais e por isso se utilizam as ligas metálicas dúcteis neste tipo de aplicação.

Porém, mesmo utilizando ligas dúcteis, com resistência suficiente para suportar uma determinada aplicação, verificou-se na prática que um material dúctil pode romper-se de forma frágil.

Esta característica dos materiais ficou mais evidente durante a Segunda Guerra Mundial, quando os equipamentos bélicos foram levados a solicitações críticas de uso, despertando o interesse dos cientistas pelo assunto.

## Fatores que influenciam o comportamento frágil dos materiais dúcteis

Um material dúctil pode romper-se sem deformação plástica apreciável, ou seja, de maneira frágil, quando as condições abaixo estiverem presentes:

- velocidade de aplicação da carga suficientemente alta;
- trinca ou entalhe no material;
- temperatura de uso do material suficientemente baixa.

Alguns materiais são mais afetados pela velocidade alta do choque, apresentando uma sensibilidade que é chamada **sensibilidade à velocidade**.

Uma trinca promove concentração de tensões muito elevadas, o que faz com que a maior parte da energia produzida pela ação do golpe seja concentrada numa região localizada da peça, com a conseqüente formação da fratura frágil. A existência de uma trinca, por menor que seja, muda substancialmente o comportamento do material dúctil.

Esta característica do material dúctil, de comportar-se como frágil devido à trinca, é freqüentemente chamada de **sensibilidade ao entalhe**.

A temperatura tem um efeito muito acentuado na resistência dos metais ao choque, ao contrário do que ocorre na resistência estática.

A energia absorvida por um corpo de prova varia sensivelmente com a temperatura do ensaio.

Um corpo de prova a uma temperatura T1 pode absorver muito mais energia do que se estivesse a uma temperatura T2, bem menor que T1, ou pode absorver a mesma energia a uma temperatura T3, pouco menor que T1

**Em outras palavras:**

A existência de trincas no material, a baixa temperatura e a alta velocidade de carregamento constituem os fatores básicos para que ocorra uma fratura do tipo frágil nos materiais metálicos dúcteis.

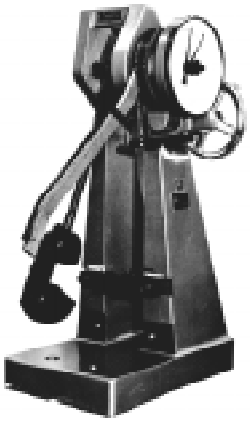
## Descrição do ensaio de impacto

Um dos ensaios que permitem estudar os efeitos das cargas dinâmicas é o ensaio de impacto. Este ensaio é usado para medir a tendência de um metal de se comportar de maneira frágil.

O choque ou impacto representa um esforço de natureza dinâmica, porque a carga é aplicada repentina e bruscamente.

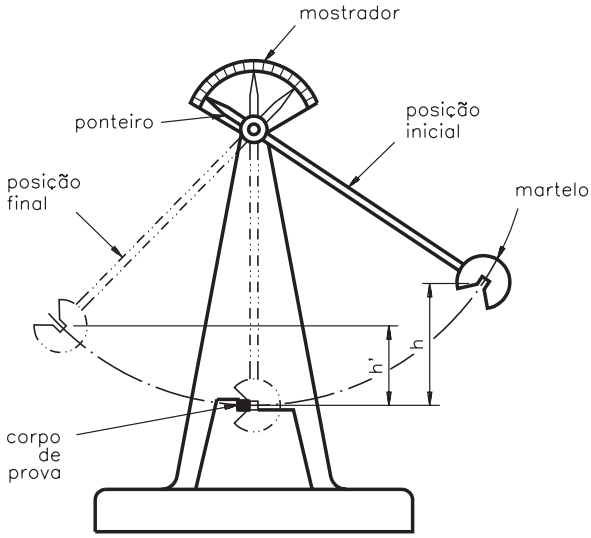
No impacto, não é só a força aplicada que conta. Outro fator é a velocidade de aplicação da força. Força associada com velocidade traduz-se em **energia**.

O **ensaio de impacto** consiste em medir a **quantidade de energia** absorvida por uma amostra do material, quando submetida à ação de um esforço de choque de valor conhecido.



O método mais comum para para ensaiar metais é o do golpe, desferido por um peso em oscilação. A máquina correspondente é o martelo pendular.

O pêndulo é levado a uma certa posição, onde adquire uma energia inicial.




Ao cair, ele encontra no seu percurso o corpo de prova, que se rompe. A sua trajetória continua até certa altura, que corresponde à posição final, onde o pêndulo apresenta uma energia final.

A diferença entre as energias inicial e final corresponde à energia absorvida pelo material.

De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de energia adotada é o joule. Em máquinas mais antigas, a unidade de energia pode ser dada em kgf · m, kgf · cm ou kgf · mm.

A máquina é dotada de uma escala, que indica a posição do pêndulo, e é calibrada de modo a indicar a **energia potencial**.

**Para recordar:**

A fórmula para o cálculo da energia potencial (Ep) é:
$Ep = m \times g \times h$, onde:
m = massa
g = aceleração da gravidade
h = altura

No ensaio de impacto, a massa do martelo e a aceleração da gravidade são conhecidas. A altura inicial também é conhecida. A única variável desconhecida é a altura final, que é obtida pelo ensaio.

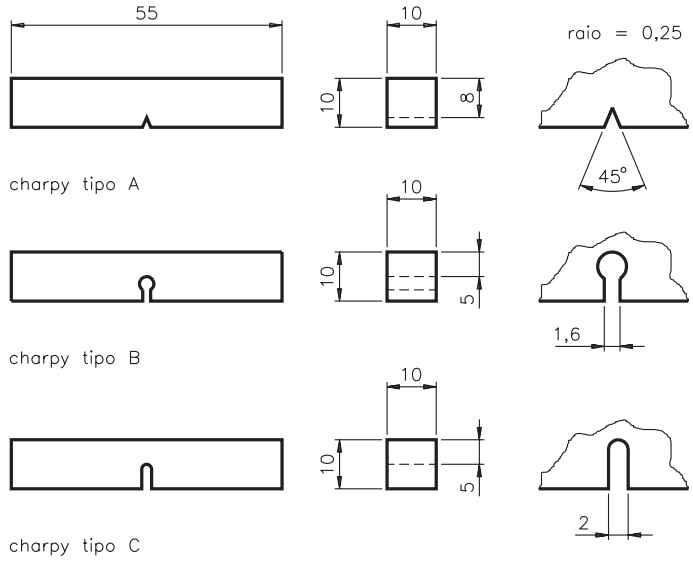
O mostrador da máquina simplesmente registra a diferença entre a altura inicial e a altura final, após o rompimento do corpo de prova, numa escala relacionada com a unidade de medida de energia adotada.

## Corpos de prova

Nos ensaios de impacto, utilizam-se duas classes de corpos de prova com entalhe: o Charpy e o Izod. Há um tipo especial para ferros fundidos e ligas não ferrosas fundidas sob pressão. Esses corpos de prova seguem especificações de normas internacionais, baseadas na norma americana E-23 da ASTM.

Os corpos de prova Charpy compreendem três subtipos (A, B e C), de acordo com a forma do entalhe.

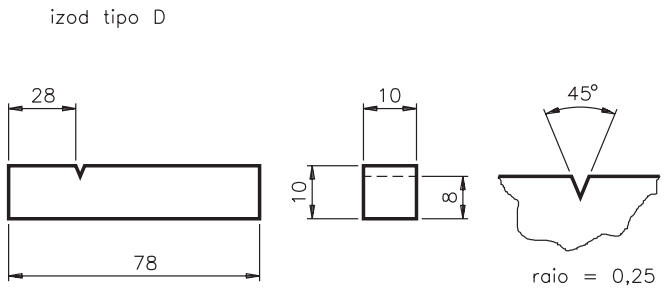
A figura a seguir mostra as formas e dimensões desses três tipos de corpos de prova e dos respectivos entalhes.



As diferentes formas de entalhe são necessárias para assegurar que haja ruptura do corpo de prova, mesmo nos materiais mais dúcteis.

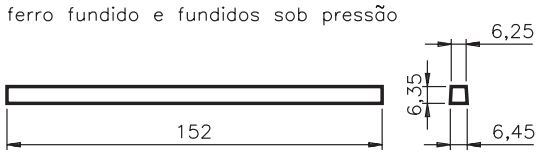
Quando a queda do martelo não provoca a ruptura do corpo de prova, o ensaio deve ser repetido com outro tipo de corpo de prova, que apresente entalhe mais severo, de modo a garantir a ruptura. Dos três tipos apresentados, o C é o que apresenta maior área de entalhe, ou seja, o entalhe mais severo.

O corpo de prova Izod tem a mesma forma de entalhe do Charpy tipo A, localizada em posição diferente (não centralizada).

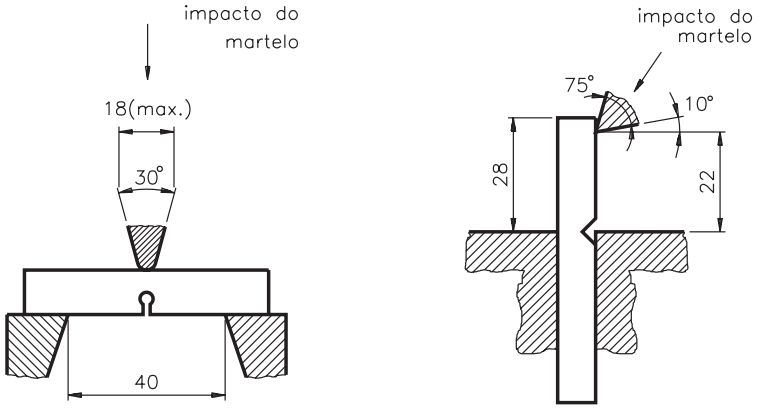



O corpo de prova Charpy é apoiado na máquina e o Izod é engastado, o que justifica seu maior comprimento.

Corpos de prova de ferro fundido e ligas não ferrosas fundidas sob pressão não apresentam entalhe.




A única diferença entre o ensaio Charpy e o Izod é que no Charpy o golpe é desferido na face oposta ao entalhe e no Izod é desferido no mesmo lado do entalhe.




As dimensões do corpo de prova, a forma e o tamanho do entalhe usado determinam um dado estado de tensões que não se distribuem de modo uniforme por todo o corpo de prova, no ensaio. Por isso, esse ensaio não fornece um valor quantitativo da tenacidade do metal.

A energia medida é um valor relativo e serve apenas para comparar resultados obtidos **nas mesmas condições** de ensaio. Isso explica por que os resultados desse ensaio não têm aplicação nos cálculos de projetos de engenharia.

Mesmo tomando-se todos os cuidados para controlar a realização do ensaio, os resultados obtidos com vários corpos de prova de um mesmo metal são bastante diversos. Para chegar a conclusões confiáveis a respeito do material ensaiado, é recomendável fazer o ensaio em pelo menos três corpos de prova.

Tudo o que foi dito até agora sobre o ensaio de impacto pressupõe sua realização à temperatura ambiente. Em condições de temperatura diversas da temperatura ambiente, os resultados deste ensaio variam sensivelmente.

A temperatura, especificamente a baixa temperatura, é um fator de extrema importância no comportamento frágil dos metais. Mas esse é um assunto que fica para a próxima aula. Por enquanto, resolva os exercícios propostos a seguir.

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 1**

"O resultado do ensaio (de impacto) é apenas uma medida da energia absorvida e não fornece indicações seguras sobre o comportamento do metal ao choque em geral, o que seria possível se se pudesse ensaiar uma peça inteira, sob as condições da prática."

Souza, Sérgio Augusto de. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos – Fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 5 ed., 1982, página 83.

A afirmativa acima quer dizer:

**a)** ( ) que o ensaio de impacto não é útil para prever o comportamento do metal sob impacto;
**b)** ( ) que o ensaio de impacto só seria válido caso se pudesse ensaiar a peça inteira;
**c)** ( ) que o ensaio de impacto não tem utilidade prática;
**d)** ( ) que o resultado do ensaio é uma medida relativa da energia absorvida pelo corpo de prova.

**Exercício 2**

O ensaio de impacto caracteriza-se por submeter o corpo ensaiado a:

**a)** ( ) um esforço estático e lento;
**b)** ( ) um esforço dinâmico e cíclico;
**c)** ( ) um esforço estático e brusco;
**d)** ( ) um esforço dinâmico e repentino.

**Exercício 3**

Os fatores que levam os materiais dúcteis a um comportamento frágil são:

**a)** ( ) temperatura, velocidade de aplicação da carga e resistência do material;
**b)** ( ) valor da carga, aceleração da gravidade, altura do martelo pendular;
**c)** ( ) temperatura, velocidade de aplicação da carga, concentração de tensões;
**d)** ( ) energia potencial, altura, existência de trincas no corpo de prova.

**Exercício 4**

O resultado do ensaio de impacto é avaliado pela:

**a)** ( ) diferença entre a altura inicial e a altura final do martelo pendular;
**b)** ( ) diferença entre a energia inicial e a energia final do martelo pendular;
**c)** ( ) diferença entre a energia inicial e a energia final do corpo de prova;
**d)** ( ) velocidade atingida pelo martelo pendular na aplicação da carga.

**Exercício 5**

A única diferença entre o ensaio Charpy e o ensaio Izod é:

**a)** ( ) a velocidade de aplicação da carga;
**b)** ( ) a temperatura do ensaio;
**c)** ( ) a posição de aplicação do impacto;
**d)** ( ) o tamanho do entalhe.

AULA

17

# Impacto a baixas temperaturas

## Introdução

Conta-se que os primeiros exploradores do Ártico enfrentaram dificuldades fenomenais para levar a cabo sua missão, porque os equipamentos de que dispunham naquela época não suportavam as baixas temperaturas típicas das regiões polares.

Diz-se também que um dos fatores que ajudou a derrotar os alemães na Rússia, na Segunda Guerra Mundial, foi o rigoroso inverno russo. Um fator que possivelmente contribuiu para isso foi a inadequação dos materiais usados na construção das máquinas de guerra.

Imagine esta situação: um soldado alemão, enfrentando um frio muito intenso, vendo a esteira do seu blindado romper-se, sem motivo aparente. Ou vendo a boca do canhão partir-se ao dar o primeiro tiro. Isso não é necessariamente ficção. Pode muito bem ter acontecido.

A temperatura influencia muito a resistência de alguns materiais ao choque, ao contrário do que ocorre na resistência à tração, que não é afetada por essa característica.

Pesquisadores ingleses, franceses e alemães foram os primeiros a observar esse fato e a desenvolver ensaios que permitissem avaliar o comportamento dos materiais a baixas temperaturas.

Nesta aula você vai conhecer o ensaio de impacto a baixa temperatura. Ficará sabendo o que é temperatura de transição, como ela pode ser representada graficamente e quais são os fatores que a afetam.

## Nossa aula

### Temperatura de transição

Ao ensaiar os metais ao impacto, verificou-se que há uma faixa de temperatura relativamente pequena na qual a energia absorvida pelo corpo de prova cai apreciavelmente. Esta faixa é denominada **temperatura de transição**.

A temperatura de transição é aquela em que ocorre uma mudança no caráter da ruptura do material, passando de dúctil a frágil ou vice-versa.

Por exemplo, um dado aço absorve 17 joules de energia de impacto à temperatura ambiente (± 25ºC). Quando a temperatura desce a –23ºC, o valor de energia absorvida é pouco alterado, atingindo 16 joules. Este valor cai para 3 joules à temperatura de –26ºC.

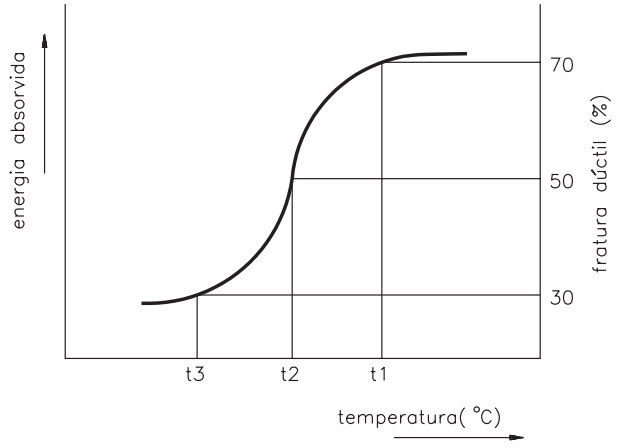
Como esta passagem, na maioria dos casos, não é repentina é usual definir-se uma **faixa de temperatura de transição**.

A faixa de temperatura de transição compreende o intervalo de temperatura em que a fratura se apresenta com 70% de aspecto frágil (cristalina) e 30% de aspecto dúctil (fibrosa) e 70% de aspecto dúctil e 30% de aspecto frágil. O tamanho dessa faixa varia conforme o metal. Às vezes, a queda é muito repentina, como no exemplo anterior.

A definição dessa faixa é importante porque só podemos utilizar um material numa faixa de temperatura em que não se manifeste a mudança brusca do caráter da ruptura.

## Gráfico da temperatura de transição

Pode-se representar a temperatura de transição graficamente. Indicando-se os valores de temperatura no eixo das abscissas e os valores de energia absorvida no eixo das ordenadas, é possível traçar a curva que mostra o comportamento do material quanto ao tipo de fratura (frágil ou dúctil).




A temperatura T1 corresponde à fratura 70% dúctil e 30% frágil. A temperatura T3 corresponde à fratura 30% dúctil e 70% frágil. E a temperatura T2 é o ponto no qual a fratura se apresenta 50% dúctil e 50% frágil. O intervalo de temperatura de transição corresponde ao intervalo entre T1 e T3.

Os metais que têm estrutura cristalina **CFC**, como o cobre, alumínio, níquel, aço inoxidável austenítico etc., **não** apresentam temperatura de transição, ou seja, os valores de impacto não são influenciados pela temperatura. Por isso esses materiais são indicados para trabalhos em baixíssimas temperaturas, como tanques criogênicos, por exemplo.

**Dica**

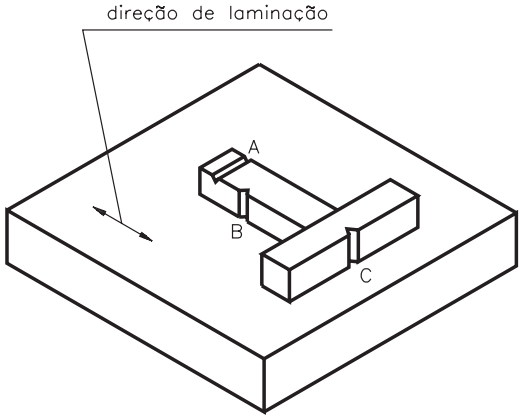
Para obter maiores informações sobre a estrutura cristalina dos metais (CFC, CCC, hexagonal etc.) consulte o módulo **Materiais**.

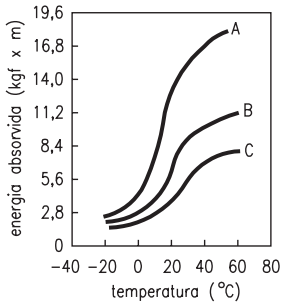
## Fatores que influenciam a temperatura de transição

O intervalo de transição é influenciado por certas características como:

- **Tratamento térmico** – Aços-carbono e de baixa liga são menos sujeitos à influência da temperatura quando submetidos a tratamento térmico que aumenta sua resistência;
- **Tamanho de grãos** – Tamanhos de grãos grosseiros tendem a elevar a temperatura de transição, de modo a produzir fratura frágil em temperaturas mais próximas à temperatura ambiente. Tamanhos de grãos finos abaixam a temperatura de transição;
- **Encruamento** – Materiais encruados, que sofreram quebra dos grãos que compõem sua estrutura, tendem a apresentar maior temperatura de transição;
- **Impurezas** – A presença de impurezas, que fragilizam a estrutura do material, tende a elevar a temperatura de transição;
- **Elementos de liga** – A adição de certos elementos de liga, como o níquel, por exemplo, tende a melhorar a resistência ao impacto, mesmo a temperaturas mais baixas;
- **Processos de fabricação** – Um mesmo aço, produzido por processos diferentes, possuirá temperaturas de transição diferentes;
- **Retirada do corpo de prova** – A forma de retirada dos corpos de prova interfere na posição das fibras do material. As normas internacionais geralmente especificam a posição da retirada dos corpos de prova, nos produtos siderúrgicos, pois a região de onde eles são retirados, bem como a posição do entalhe, têm fundamental importância sobre os valores obtidos no ensaio.

Veja, por exemplo, três possibilidades de retirada e posicionamento do entalhe em corpos de prova Charpy, retirados de posições diferentes de uma chapa de aço doce.






Submetidos ao ensaio de impacto, esses corpos apresentaram três curvas diferentes, como mostra o gráfico a seguir.

No corpo de prova A, o entalhe está transversal às fibras do material. Por isso, a curva correspondente, no gráfico anterior, mostra que este foi o corpo de prova que apresentou a maior quantidade de energia absorvida.

No corpo de prova C, o entalhe está no sentido da fibra, o que favorece o cisalhamento. Por isso, a absorção de energia é a pior possível.

O corpo de prova B também tem entalhe transversal. Só que, neste caso, o entalhe atravessa o núcleo da chapa, cortando todas as fibras transversalmente. A curva correspondente encontra-se numa situação intermediária, em comparação com as outras duas.

Essa relação entre as curvas permanece constante, qualquer que seja a temperatura do ensaio.

## Resfriamento do corpo de prova

Os corpos de prova retirados para ensaio de impacto devem ser resfriados, até que se atinja a temperatura desejada para o ensaio.

As técnicas de resfriamento são determinadas em normas técnicas específicas. Um modo de obter o resfriamento consiste em mergulhar o corpo de prova num tanque contendo nitrogênio líquido, por aproximadamente 15 minutos. Este é o tempo necessário para homogeneizar a temperatura em todo o corpo de prova.

Outra forma de obter o resfriamento é por meio de uma mistura de álcool e gelo seco, que permite atingir temperaturas de até 70ºC negativos.

O tempo máximo para romper o corpo de prova após o resfriamento é de 5 segundos.

Devido à grande dispersão dos resultados dos ensaios, principalmente próximo à temperatura de transição, gerada pela dificuldade de obter corpos de prova rigorosamente iguais e pela falta de homogeneidade dos materiais, o ensaio de impacto comum não oferece resultados aplicáveis a projetos de engenharia estrutural. Para responder a essas necessidades práticas, foram desenvolvidos outros tipos de ensaio de impacto e outros equipamentos.

O aprofundamento nestes ensaios vai além dos objetivos deste módulo. Mas se o assunto for de seu interesse, não se acomode. Procure ler mais a respeito e pesquise catálogos e folhetos de fabricantes de equipamentos, que são os meios de obter informações atualizadas.

Com esta aula, encerra-se o estudo do conjunto de ensaios classificados como destrutivos. Antes de passar para o próximo bloco, faça uma boa revisão do que foi apresentado até aqui. E não se esqueça de resolver os exercícios a seguir.

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta.

**Exercício 1**

A temperatura de transição é:

**a)** ( ) a temperatura ambiente do ensaio;
**b)** ( ) a temperatura em que a fratura passa de frágil para dúctil e vice-versa;
**c)** ( ) a temperatura em que o corpo de prova se rompe de forma frágil;
**d)** ( ) a temperatura em que o corpo de prova se rompe de forma dúctil.

**Exercício 2**

São exemplos de materiais que **não** são afetados pela temperatura, no ensaio de impacto:

**a)** ( ) ferro, zinco, níquel;
**b)** ( ) aço inoxidável, ferro, bronze;
**c)** ( ) cobre, alumínio, níquel;
**d)** ( ) alumínio, aço doce, magnésio.

**Exercício 3**

No ensaio de impacto a baixas temperaturas:

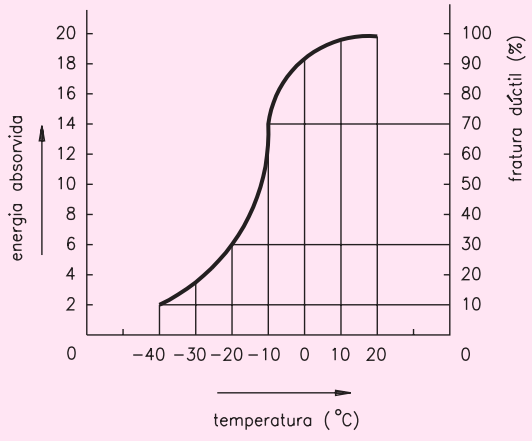
**a)** ( ) utiliza-se uma máquina especial para temperaturas negativas;
**b)** ( ) a temperatura da sala de ensaio deve ser rebaixada;
**c)** ( ) a temperatura do corpo de prova é 0ºC;
**d)** ( ) a temperatura do corpo de prova é rebaixada até o grau desejado.

**Exercício 4**

Cite três exemplos de fatores que **elevam** a temperatura de transição.

**Exercício 5**

Analise a curva representada a seguir e responda:
Até que temperatura o material em questão pode ser utilizado?
Explique sua resposta.



AULA

18

# Ensaios visuais

## Introdução

END não é o fim! Na verdade, esta é a sigla que identifica o novo grupo de ensaios que você vai estudar nesta e nas próximas aulas deste módulo: os **ensaios não destrutivos**.

Esses ensaios caracterizam-se por não deixar marcas no material ensaiado, lembra-se? Por isso podem ser realizados em produtos acabados, sem qualquer risco de inutilizá-los em conseqüência do ensaio.

Quando vai à feira e escolhe frutas e legumes, você usa a visão para separar, por exemplo, aquela laranja mais bonita e saudável daquela feia e estragada.

Essa atividade simples nada mais é do que um tipo de ensaio não destrutivo: o **ensaio visual**.

Outro exemplo. Você já imaginou quantas peças diferentes existem num automóvel? Cada uma delas tem sua importância, mas sabemos que umas são mais importantes do que outras. Imagine se o sistema de freios falhasse ao ser acionado; causaria, sem dúvida, danos muito mais significativos do que se a tampa do porta-luvas emperrasse. Claro, não é? Por este motivo, é muito importante definir claramente os critérios de aceitação e rejeição de cada componente de um determinado produto, pois isso determina a escolha do tipo de ensaio não destrutivo aplicado a cada material, o que é fundamental para garantir a segurança e o bem-estar dos usuários.

Geralmente, um único tipo de ensaio não abrange toda a extensão da peça ou da parte a ser examinada. Podemos fazer uma comparação. Por exemplo, o exame do próprio corpo humano. Sabemos que num exame de rotina o médico usa vários tipos de END para diagnosticar um problema ou atestar que o paciente se encontra em perfeita saúde.

Que exames são esses? Por exemplo, quando o médico examina a garganta com um palito ou uma lanterninha apropriada, está realizando um exame visual.

Ouvir os batimentos do coração com o estetoscópio, analisar os pulmões por meio de uma chapa radiográfica ou medir a pressão arterial podem fazer parte de um único processo de avaliação da saúde de um paciente. Analisando o resultado de cada um dos exames, o médico tira conclusões e toma decisões.

Voltemos à indústria. Os procedimentos são similares. Vamos iniciar nossa aula de **ensaio visual**. Nas próximas, estudaremos os ensaios por líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultra-som e radiografia industrial.

## De olho no produto

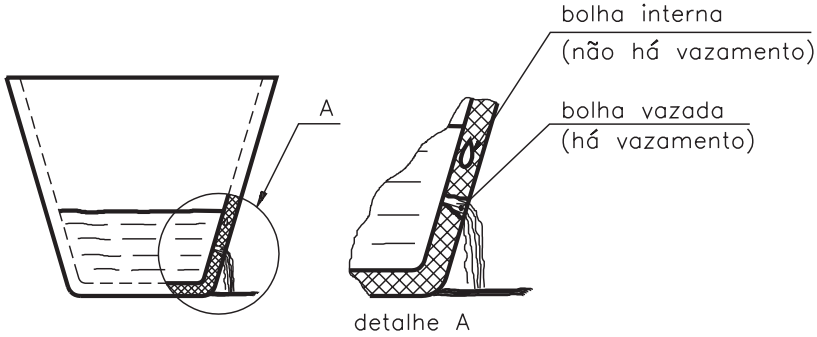
O **ensaio visual dos metais** foi o primeiro método de ensaio não destrutivo aplicado pelo homem. É, com certeza, o ensaio mais barato, usado em todos os ramos da indústria.

Assim, a **inspeção visual exige definição clara e precisa de critérios de aceitação e rejeição do produto** que está sendo inspecionado. Requer ainda inspetores treinados e especializados, para cada tipo ou família de produtos. Um inspetor visual de chapas laminadas não poderá inspecionar peças fundidas e vice-versa, sem prévio treinamento.

## Descontinuidades e defeitos

É importante que fiquem claros, no início desse nosso estudo, os conceitos de descontinuidade e defeito de peças. Esses termos são muito comuns na área de ensaios **não destrutivos**. Para entendê-los, vejamos um exemplo simples: um copo de vidro com pequenas bolhas de ar no interior de sua parede, formadas devido a imperfeições no processo de fabricação, pode ser utilizado sem prejuízo para o usuário. Essas imperfeições são classificadas como **descontinuidades**.

Mas, caso essas mesmas bolhas aflorassem à superfície do copo, de modo a permitir a passagem do líquido do interior para a parte externa, elas seriam classificadas como **defeitos**, pois impediriam o uso do copo.




De modo geral, nos deparamos na indústria com inúmeras variáveis de processo que podem gerar imperfeições nos produtos.

Essas imperfeições devem ser classificadas como descontinuidades ou defeitos. Os responsáveis por essa atividade são os projetistas profissionais, que por meio de cálculos de engenharia selecionam os componentes de um produto que impliquem segurança e apresentem o desempenho esperado pelo cliente.

## Principal ferramenta do ensaio visual

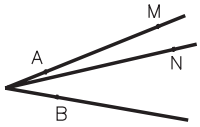
A principal ferramenta do ensaio visual são os olhos, importantes órgãos do corpo humano.

O olho é considerado um órgão pouco preciso. A visão varia em cada um de nós, e mostra-se mais variável ainda quando se comparam observações visuais num grupo de pessoas. Para minimizar essas variáveis, deve-se padronizar fatores como a luminosidade, a distância ou o ângulo em que é feita a observação.

A ilusão de ótica é outro problema na execução dos ensaios visuais. Comprove isso observando as figuras abaixo e fazendo os testes a seguir.

1) Quais traços são mais curtos: os da direita ou os da esquerda?

2) Qual elipse é maior: a de baixo ou a interna superior?




3) Qual distância é maior: entre os pontos A e B ou entre os pontos M e N?

Para eliminar esse problema, nos ensaios visuais, devemos utilizar instrumentos que permitam dimensionar as descontinuidades, por exemplo, uma escala graduada (régua). Repita os testes usando uma régua. Assim, você chegará a conclusões mais confiáveis.

A inspeção visual a olho nu é afetada pela distância entre o olho do observador e o objeto examinado. A distância recomendada para inspeção situa-se em torno de 25 cm: abaixo desta medida, começam a ocorrer distorções na visualização do objeto.

Existem outros fatores que podem influenciar na detecção de descontinuidades no ensaio visual.

- **Limpeza da superfície**
  As superfícies das peças ou partes a serem examinadas devem ser cuidadosamente limpas, de tal forma que resíduos como graxas, óleos, poeira, oxidação etc. não impeçam a detecção de possíveis descontinuidades e/ou até de defeitos.

- **Acabamento da superfície**
  O acabamento superficial resultante de alguns processos de fabricação - fundição, forjamento, laminação – pode mascarar ou esconder descontinuidades; portanto, dependendo dos requisitos de qualidade da peça, elas devem ser cuidadosamente preparadas (decapadas, rebarbadas, usinadas) para, só então, serem examinadas.

- **Nível de iluminação e seu posicionamento**
  O tipo de luz utilizada também influi muito no resultado da inspeção visual. A luz branca natural, ou seja, a luz do dia, é uma das mais indicadas; porém, por problemas de *layout*, a maioria dos exames é feita em ambientes fechados, no interior de fábricas. Utilizam-se, então, lâmpadas elétricas, que devem ser posicionadas atrás do inspetor, ou em outra posição qualquer, de modo a não ofuscar sua vista.

- **Contraste entre a descontinuidade e o resto da superfície**
  A descontinuidade superficial de um determinado produto deve provocar um contraste, ou seja, uma diferença visual clara em relação à superfície de execução do exame. Esta característica deve ser avaliada antes de se escolher o exame visual como método de determinação de descontinuidades, para evitar que possíveis defeitos sejam liberados equivocadamente.

**Fique atento**

Um fator de fracasso na inspeção visual é a fadiga visual dos inspetores, que observam os mesmos tipos de peças durante longos períodos de trabalho. Para minimizar esse problema, deve-se programar paradas para descanso. Outro recurso é colocar esporadicamente na linha de inspeção peças-padrão, com defeitos mínimos conhecidos, a fim de avaliar o desempenho dos inspetores.

Além do treinamento, estes devem receber acompanhamento oftalmológico. Ele faz parte da qualificação dos inspetores e deve ser realizado periodicamente, para garantir sua acuidade visual.

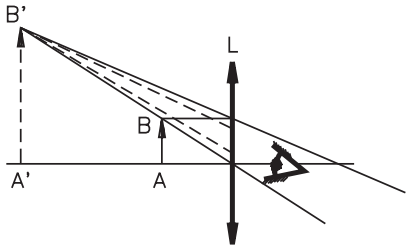
## Ajudando os nossos olhos

Em certos tipos de inspeções – por exemplo, na parede interna de tubos de pequeno diâmetro e em partes internas de peças –, é necessário usar instrumentos ópticos auxiliares, que complementam a função do nosso olho. Os instrumentos ópticos mais utilizados são:

- Lupas e microscópios;
- Espelhos e tuboscópios;
- Câmeras de tevê em circuito fechado.

Vamos conhecer cada um deles mais de perto.

- **Lupas e microscópios**
  As lupas são o instrumento óptico mais usado na indústria. A lupa é uma **lente biconvexa** de pequena distância focal, geralmente de 5 a 10 cm, que produz uma **imagem virtual**, aumentada, do objeto. Assim, quando o inspetor utiliza uma lupa, ele está enxergando a imagem do objeto e não o próprio objeto. Esta imagem virtual é maior e forma-se atrás dele.




esquema da imagem virtual A'B',fornecida por uma lupa L de um objeto AB.

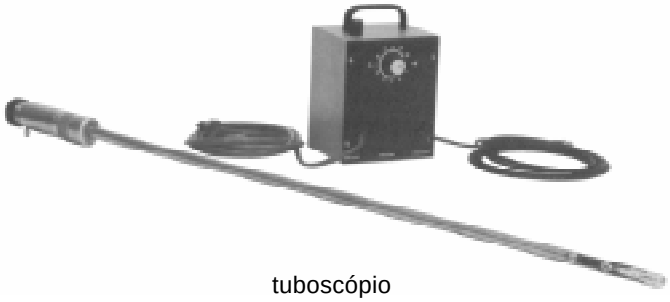
Existem no mercado lupas com diversos aumentos. As mais comuns variam de 1,5 a 10 vezes de aumento, permitindo observar descontinuidades de até centésimos de milímetro. Algumas possuem uma escala graduada que permite dimensionar as descontinuidades.

Os microscópios são constituídos por conjuntos de lentes denominadas objetivas e oculares. Elas possibilitam ampliar descontinuidades até milhares de vezes.

Na maioria dos casos, eles são utilizados na inspeção de peças pequenas, como molas, fios, parafusos, mas em casos especiais podem ser acoplados a peças grandes.

- **Espelhos e tuboscópios**
  Um exemplo típico de espelho na inspeção visual, que ocorre no cotidiano, é quando o dentista observa a boca do paciente com aquele espelhinho fixado numa haste metálica. Na indústria, espelhos também são usados para inspeção de cantos, soldas e superfícies onde nossos olhos não alcançam.

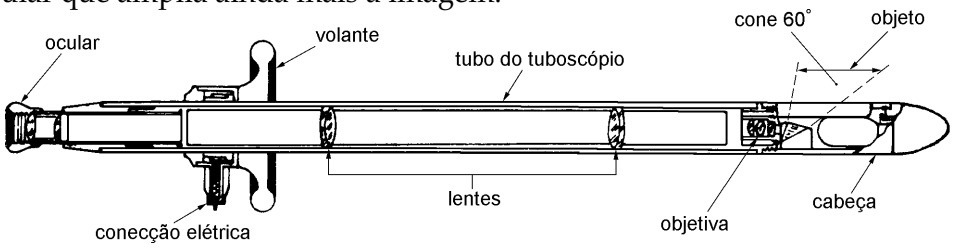
Imagine quão difícil seria observar as paredes internas de tubos longos, de pequeno diâmetro, utilizados na construção de caldeiras e trocadores de calor, ou o interior da câmera de combustão dos motores a explosão. Sem os **tubos-cópios**, não seria possível tal observação.



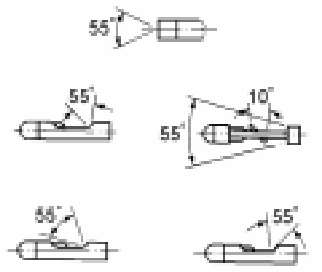
tuboscópio

Tuboscópios são instrumentos ópticos construídos com os mais variados diâmetros e comprimentos, que geralmente possuem seu próprio dispositivo de iluminação.

Da mesma forma que os microscópios, os tuboscópios também possuem lentes objetivas e oculares. Porém, a imagem do objeto é transmitida através do tubo do tuboscópio até a extremidade do mesmo, onde se encontra uma lente ocular que amplia ainda mais a imagem.




Os tuboscópios podem ser fabricados numa só peça, ou em partes que se encaixam. Uma característica importante para o seu funcionamento é que eles giram em torno do eixo do seu tubo, permitindo uma inspeção visual circunferencial. Isso é possível porque o tuboscópio possui uma peça chamada volante, que permite o giro da cabeça do instrumento para qualquer ângulo.




Os tuboscópios possuem cabeças de diversos formatos e ângulos de incidência, possibilitando inspeções em diversos ângulos.

- **Câmeras de tevê em circuito fechado**
  Micromputadores e câmeras de tevê em circuito fechado são acessórios de grande valia nas inspeções visuais.

Uma câmera de tevê acoplada à cabeça de um tuboscópio permite ao inspetor executar o exame de superfícies a grandes distâncias; este recurso deve ser utilizado quando o ambiente em que se encontra a peça, ou a parte dela a ser examinada, não é favorável devido a gases tóxicos, altas temperaturas ou radiação. Outro exemplo é quando se realiza uma inspeção de longa duração e que não pode ser interrompida; nesse caso, o uso de câmeras de tevê é de grande ajuda.

Exemplo disso é a figura ao lado, que mostra o inspetor examinando uma solda de 21 metros de comprimento no interior de um tubo, com um aparelho chamado videoscópio; ele nada mais é do que um tuboscópio, com a sofisticação de estar acoplado a uma câmera de tevê; sua flexibilidade permite maior mobilidade dentro do tubo que está sendo inspecionado.

Agora que você já está por dentro do ensaio visual, resolva os exercícios a seguir.

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 1**

O primeiro método de ensaio não destrutivo aplicado pelo homem foi:

**a)** ( ) o ensaio visual pelo tuboscópio;
**b)** ( ) o ensaio visual pelo microscópio;
**c)** ( ) o ensaio visual dos metais;
**d)** ( ) o ensaio visual de raios X.

**Exercício 2**

É exemplo de descontinuidade e defeito simultaneamente:

**a)** ( ) bolha de ar no copo que não deixe vazar o líquido e bolha que o deixe vazar;
**b)** ( ) bolha de ar no copo que deixe vazar o líquido e bolha que não o deixe vazar;
**c)** ( ) tubo de tinta com trinca que deixe vazar o produto e tubo que não o deixe vazar;
**d)** ( ) balão de oxigênio que perca o conteúdo e balão que não o perca.

**Exercício 3**

A principal ferramenta do ensaio visual é:

**a)** ( ) uma escala com graduação uniforme;
**b)** ( ) uma lupa com lente biconvexa;
**c)** ( ) o microscópio;
**d)** ( ) o olho humano.

**Exercício 4**

Outros fatores que podem distorcer as descontinuidades do ensaio visual são:

**a)** ( ) contraste entre a continuidade e o resto da superfície, limpeza e acabamento da superfície;
**b)** ( ) limpeza da superfície, acabamento da superfície, nível de iluminação e seu posicionamento, contraste entre a descontinuidade e o resto da superfície;
**c)** ( ) limpeza da superfície, acabamento da superfície e iluminação do aparelho;
**d)** ( ) iluminação do aparelho, processo de fabricação inadequado e superfície oleosa.

**Exercício 5**

Para inspeção visual de solda em lugares de acesso difícil utiliza-se:

**a)** ( ) o microscópio;
**b)** ( ) o espelho;
**c)** ( ) o radar eletrônico;
**d)** ( ) a lupa.

AULA

19

# Líquidos penetrantes

## Introdução

Depois do ensaio visual, o ensaio por líquidos penetrantes é o ensaio não destrutivo mais antigo. Ele teve início nas oficinas de manutenção das estradas de ferro, em várias partes do mundo.

Naquela época, começo da era industrial, não se tinha conhecimento do comportamento das descontinuidades existentes nas peças. E quando estas eram colocadas em uso, expostas a esforços de tração, compressão, flexão e, principalmente, esforços cíclicos, acabavam se rompendo por fadiga.

Era relativamente comum o aparecimento de trincas e até a ruptura de peças de vagões, como eixos, rodas, partes excêntricas etc., sem que os engenheiros e projetistas da época pudessem determinar a causa do problema.

Algumas trincas podiam ser percebidas, mas o ensaio visual não era suficiente para detectar todas elas, pela dificuldade de limpeza das peças.

Foi desenvolvido então um método especial não destrutivo para detectar rachaduras em peças de vagões e locomotivas, chamado de **método do óleo e giz**.

Neste método, as peças, depois de lavadas em água fervendo ou com uma solução de soda cáustica, eram mergulhadas num tanque de óleo misturado com querosene, no qual ficavam submersas algumas horas ou até um dia inteiro, até que essa mistura penetrasse nas trincas porventura existentes nas peças.

Depois desta etapa, as peças eram removidas do tanque, limpas com estopa embebida em querosene e colocadas para secar. Depois de secas, eram pintadas com uma mistura de giz moído e álcool; dessa pintura resultava uma camada de pó branco sobre a superfície da peça. Em seguida, martelavam-se as peças, fazendo com que a mistura de óleo e querosene saísse dos locais em que houvesse trincas, manchando a pintura de giz e tornando as trincas visíveis.

Este teste era muito passível de erros, pois não havia qualquer controle dos materiais utilizados – o óleo, o querosene e o giz. Além disso, o teste não conseguia detectar pequenas trincas e defeitos subsuperficiais.

Testes mais precisos e confiáveis só apareceram por volta de 1930, quando o teste do "óleo e giz" foi substituído pelo de partículas magnéticas.

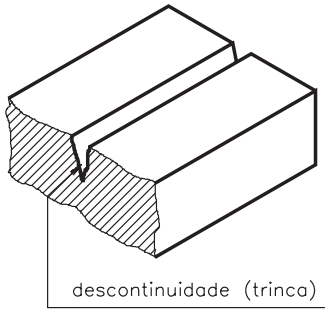
Somente em 1942, nos Estados Unidos, Roberto C. Switzer, aperfeiçoando o teste do "óleo e giz", desenvolveu a técnica de **líquidos penetrantes**, pela necessidade que a indústria aeronáutica americana tinha de testar as peças dos aviões, que são até hoje fabricadas com ligas de metais não ferrosos, como alumínio e titânio, e que, conseqüentemente, não podem ser ensaiados por partículas magnéticas.

Agora que você já está por dentro da história deste importante ensaio, vamos conhecer a sua técnica.

## Descrição do ensaio



Hoje em dia, o ensaio por líquidos penetrantes, além de ser aplicado em peças de metais não ferrosos, também é utilizado para outros tipos de materiais sólidos, como metais ferrosos, cerâmicas vitrificadas, vidros, plásticos e outros que não sejam porosos. Sua finalidade é detectar descontinuidades abertas na superfície das peças, como trincas, poros, dobras, que não sejam visíveis a olho nu.




O ensaio consiste em aplicar um líquido penetrante sobre a superfície a ser ensaiada. Após remover o excesso da superfície, faz-se sair da descontinuidade o líquido penetrante retido, utilizando-se para isso um revelador.

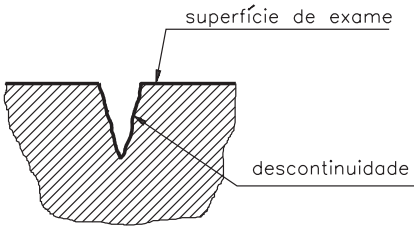
A imagem da descontinuidade, ou seja, o líquido penetrante contrastando com o revelador, fica então visível.

Vamos agora conhecer as etapas deste ensaio:

**a) Preparação e limpeza da superfície**

A limpeza da superfície a ser ensaiada é fundamental para a revelação precisa e confiável das descontinuidades porventura existentes na superfície de ensaio.

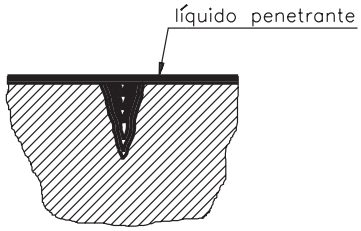
O objetivo da limpeza é remover tinta, camadas protetoras, óxidos, areia, graxa, óleo, poeira ou qualquer resíduo que impeça o penetrante de entrar na descontinuidade.



Para remover esses resíduos sem contaminar a superfície de ensaio utilizam-se solventes, desengraxantes ou outros meios apropriados. A Tabela 1 apresenta alguns contaminantes, descreve seus efeitos e indica possíveis soluções para limpeza e correção da superfície de exame.

| TABELA 1 - CONTAMINANTES E SUA REMOÇÃO | | |
|---|---|---|
| **CONTAMINANTE OU CONDIÇÃO SUPERFICIAL** | **EFEITO** | **SOLUÇÃO** |
| 1) Óleo, graxa | A grande maioria dos lubrificantes apresentam fluorescência sob a luz negra. Esta fluorescência poderá provocar mascaramento ou indicações falsas. Álem disso, eles prejudicam a ação do líquido penetrante. | Vapor desengraxante, limpeza alcalina a quente, solvente ou removedor. |
| 2) Carbonos, verniz, terra | Impedem a entrada do líquido penetrante ou absorvem o mesmo, ocasionando fluorescência ou coloração de fundo. Impedem a ação umectante. Provocam uma "ponte" entre as indicações. | Solvente ou solução alcalina, escovamento, vapor, jateamento. |
| 3) Ferrugem, óxido | Mesmo efeito de 2 | Solução alcalina ou ácida<br>Escova manual ou rotativa<br>Vapor<br>Jateamento |
| 4) Pintura | Impede a entrada do líquido penetrante ou a ação umectante. Provoca uma "ponte" entre as indicações. | Solvente removedor de tinta<br>Removedor alcalino<br>Jateamento<br>Queima |
| 5) Água | Impede a entrada do líquido penetrante ou a ação umectante. | Ar seco<br>Aquecimento<br>Estufa |
| 6) Ácidos ou álcalis | Impede a entrada do líquido penetrante ou a ação umectante. | Lavagem com água corrente<br>Neutralizadores |
| 7) Rugosidade superficial | Dificulta a limpeza, preparação superficial e a remoção do excesso de líquido penetrante. | Polimento<br>Usinagem |
| 8) Encobrimento da descontinuidade devido a uma operação de conformação ou jateamento | Pode impedir a entrada do líquido penetrante. | Ataque químico<br>Usinagem |

### b) Aplicação do líquido penetrante




Consiste em aplicar, por meio de pincel, imersão, pistola ou spray, um líquido, geralmente de cor vermelha ou fluorescente, capaz de penetrar nas descontinuidades depois de um determinado tempo em contato com a superfície de ensaio.

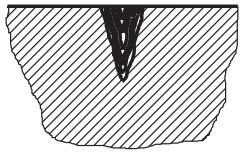
A Tabela 2 pode ser utilizada como referência para estabelecer os tempos de penetração de diversos materiais, com seus respectivos processos de fabricação.

**TABELA 2 - TEMPOS DE PENETRAÇÃO MÍNIMOS EM MINUTOS**
(para temperaturas entre 16º e 25ºC)

| MATERIAL | PROCESSO DE FABRICAÇÃO | TIPO DE DESCONTINUIDADE | LAVÁVEL A ÁGUA | PÓS-EMULSIFICÁVEL | REMOVÍVEL A SOLVENTE |
|---|---|---|---|---|---|
| Alumínio | Fundido | Trinca a frio Porosidade - Gota Fria | 5 a 15 | 5 | 3 |
| | Forjado | Dobra | NR* | 10 | 7 |
| | Solda | Porosidade | 30 | 5 | 3 |
| | Qualquer | Trinca | 30 | 10 | 5 |
| Magnésio | Fundido | Porosidade - Gota Fria | 15 | 5 | 3 |
| | Forjado | Dobra | NR | 10 | 7 |
| | Solda | Porosidade | 30 | 10 | 5 |
| | Qualquer | Trinca | 30 | 10 | 5 |
| Aço | Fundido | Porosidade - Gota Fria | 30 | 10 | 5 |
| | Forjado | Dobra | NR | 10 | 7 |
| | Solda | Porosidade | 60 | 20 | 7 |
| | Qualquer | Trinca | 30 | 20 | 7 |
| Latão e Bronze | Fundido | Porosidade - Gota Fria | 10 | 5 | 3 |
| | Forjado | Dobra | NR | 10 | 7 |
| | Brazado | Porosidade | 15 | 10 | 3 |
| | Qualquer | Trinca | 30 | 10 | 3 |
| Plástico | Qualquer | Trinca | 5 a 30 | 5 | 5 |
| Vidro | Qualquer | Trinca | 5 a 30 | 5 | 5 |
| Titânio e Ligas | Qualquer | | NR | 20 a 30 | 15 |

* NR= não recomendado

### c) Remoção do excesso de penetrante

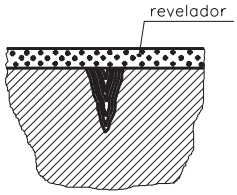


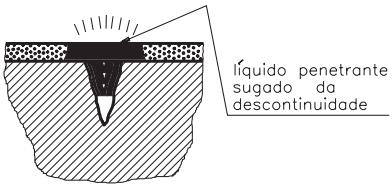
Decorrido o tempo mínimo de penetração, deve-se remover o excesso de penetrante, de modo que a superfície de ensaio fique totalmente isenta do líquido - este deve ficar retido somente nas descontinuidades. Esta etapa do ensaio pode ser feita com um pano ou papel seco ou umedecido com solvente: em outros casos, lava-se a peça com água, secando-a posteriormente, ou aplica-se agente pós-emulsificável, fazendo-se depois a lavagem com água.

Uma operação de limpeza deficiente pode mascarar os resultados, revelando até descontinuidades inexistentes.

**d) Revelação**

Para revelar as descontinuidades, aplica-se o revelador, que nada mais é do que um talco branco. Esse talco pode ser aplicado a seco ou misturado em algum líquido.




O revelador atua como se fosse um mata-borrão, sugando o penetrante das descontinuidades e revelando-as.

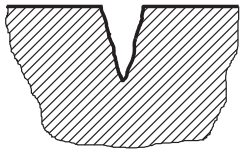
Da mesma forma que na etapa de penetração, aqui também deve-se prever um tempo para a revelação, em função do tipo da peça, do tipo de defeito a ser detectado e da temperatura ambiente. Geralmente faz-se uma inspeção logo no início da secagem do revelador e outra quando a peça está totalmente seca.

**e) Inspeção**

No caso dos líquidos penetrantes visíveis, a inspeção é feita sob luz branca natural ou artificial. O revelador, aplicado à superfície de ensaio, proporciona um fundo branco que contrasta com a indicação da descontinuidade, que geralmente é vermelha e brilhante.

Para os líquidos penetrantes **fluorescentes**, as indicações se tornam visíveis em ambientes escuros, sob a presença de **luz negra**, e se apresentam numa cor amarelo esverdeado, contra um fundo de contraste entre o violeta e o azul.

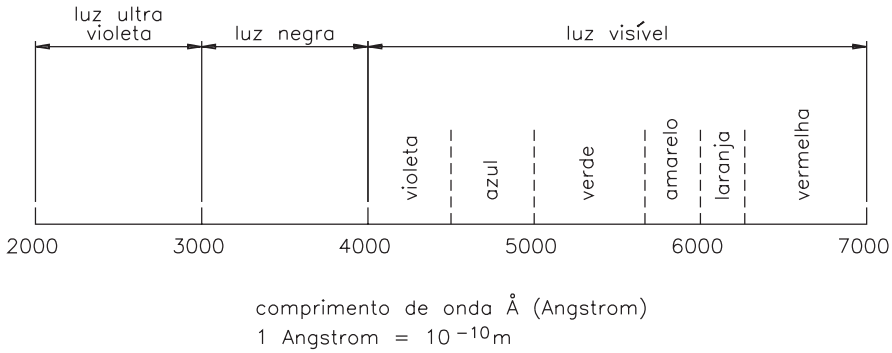
**f) Limpeza**



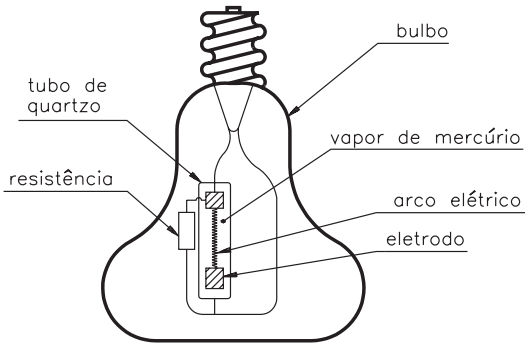
Após a inspeção da peça e a elaboração do relatório de ensaio, ela deve ser devidamente limpa, removendo-se totalmente os resíduos do ensaio; esses resíduos podem prejudicar uma etapa posterior no processo de fabricação do produto ou até o seu próprio uso, caso esteja acabado.

**Aprenda mais esta**

A luz negra, popularizada em discotecas, boates e casas de espetáculos, tem comprimento de onda menor do que o menor comprimento de onda da luz visível.



A luz negra tem a propriedade de causar o fenômeno da **fluorescência** em certas substâncias. Sua radiação não é visível. É produzida por um arco elétrico que passa pelo vapor de mercúrio.




Entre os eletrodos forma-se um arco elétrico que passa pelo vapor de mercúrio, resultando na luz negra.

Fluorescência é a capacidade que certas substâncias têm de absorver radiações não visíveis (luz não visível) de uma determinada fonte e convertê-la em radiações visíveis (luz visível).

## Vantagens e limitações

Agora que você já sabe onde pode aplicar o método de inspeção por líquidos penetrantes e já conhece as etapas de execução deste ensaio, vamos estudar suas vantagens e limitações.

**Vantagens**

- Podemos dizer que a principal vantagem deste método é sua simplicidade, pois é fácil interpretar seus resultados.
- O treinamento é simples e requer pouco tempo do operador.
- Não há limitações quanto ao tamanho, forma das peças a serem ensaiadas, nem quanto ao tipo de material.
- O ensaio pode revelar descontinuidades extremamente finas, da ordem de 0,001 mm de largura, totalmente imperceptíveis a olho nu.

**Limitações**

- O ensaio só detecta descontinuidades abertas e superficiais, já que o líquido tem de penetrar na descontinuidade. Por esta razão, a descontinuidade não pode estar preenchida com qualquer material estranho.
- A superfície do material a ser examinada não pode ser porosa ou absorvente, já que não conseguiríamos remover totalmente o excesso de penetrante, e isso iria mascarar os resultados.
- O ensaio pode se tornar inviável em peças de geometria complicada, que necessitam de absoluta limpeza após o ensaio, como é o caso de peças para a indústria alimentícia, farmacêutica ou hospitalar.

## Um bom líquido penetrante

O líquido penetrante é formado pela mistura de vários líquidos, e deve apresentar uma série de características, indispensáveis ao bom resultado do ensaio. Vejamos quais são essas características:

**a)** ter capacidade de penetrar em pequenas aberturas;
**b)** ser capaz de manter-se em aberturas relativamente grandes;
**c)** ser removível da superfície onde está aplicado;
**d)** ter capacidade de espalhar-se em um filme fino sobre a superfície de ensaio;
**e)** apresentar grande brilho;
**f)** ser estável quando estocado ou em uso;
**g)** ter baixo custo;
**h)** não deve perder a cor ou a fluorescência quando exposto ao calor, luz branca ou luz negra;
**i)** não deve reagir com o material em ensaio, e nem com a sua embalagem;
**j)** não pode ser inflamável;
**l)** não deve ser tóxico;
**m)** não deve evaporar ou secar rapidamente;
**n)** em contato com o revelador, deve sair em pouco tempo da cavidade onde tiver penetrado.

Como você viu, ser um líquido penetrante não é tão simples assim. É bom saber que nenhuma dessas características, por si só, determina a qualidade do líquido penetrante: a qualidade depende da combinação destas características.

### Tipos de líquidos penetrantes

Os líquidos penetrantes são classificados quanto à visibilidade e quanto ao tipo de remoção de excesso.

Quanto à visibilidade podem ser:

- **Fluorescentes (método A)**
  Constituídos por substâncias naturalmente fluorescentes, são ativados e processados para apresentarem alta fluorescência quando excitados por raios ultravioleta (luz negra).
- **Visíveis coloridos (método B)**
  Esses penetrantes são geralmente de cor vermelha, para que as indicações produzam um bom contraste com o fundo branco do revelador.

**Emulsificador** é um composto químico complexo que, uma vez misturado ao líquido penetrante à base de óleo, faz com que o penetrante seja lavável pela água. Ele é utilizado na fase de remoção do excesso.

Quanto ao tipo de remoção do excesso, podem ser:

- **Laváveis em água**
  Os líquidos penetrantes deste tipo são elaborados de tal maneira que permitem a remoção do excesso com água; esta operação deve ser cuidadosa; se for demorada ou se for empregado jato de água, o líquido pode ser removido do interior das descontinuidades.
- **Pós-emulsificáveis**
  Neste caso, os líquidos penetrantes são fabricados de maneira a serem insóluveis em água. A remoção do excesso é facilitada pela adição de um **emulsificador**, aplicado em separado. Este combina-se com o excesso de penetrante, formando uma mistura lavável com água.

- **Removíveis por solventes**
  Estes tipos de líquidos penetrantes são fabricados de forma a permitir que o excesso seja removido com pano seco, papel-toalha ou qualquer outro material absorvente que não solte fiapo, até que reste uma pequena quantidade de líquido na superfície de ensaio; esta deve ser então removida com um solvente removedor apropriado.

A combinação destas cinco características gera seis opções diferentes para sua utilização. Veja o quadro abaixo.

| REMOÇÃO DE PENETRANTES | | | |
|---|---|---|---|
| MÉTODO | TIPO DE REMOÇÃO | | |
| | Água | Pós-emulsificável | Solvente |
| "A" fluorescentes | A1 | A2 | A3 |
| "B" visíveis coloridos | B1 | B2 | B3 |

**Quais deles devemos escolher?**

Diante de tantos tipos de penetrantes, como saber qual o mais adequado? Aí vão algumas dicas:

- **Penetrante fluorescente lavável com água**
  Esse método é bom para detectar quase todos os tipos de defeitos, menos arranhaduras ou defeitos rasos. Pode ser utilizado em peças não uniformes e que tenham superfície rugosa; confere boa visibilidade. É um método simples e econômico.

- **Penetrante fluorescente pós-emulsificável**
  É mais brilhante que os demais, tem grande sensibilidade para detectar defeitos muitos pequenos e/ou muito abertos e rasos. É um método muito produtivo, pois requer pouco tempo de penetração e é facilmente lavável, mas é mais caro que os outros.

- **Penetrante visível** (lavável por solvente, em água ou pós-emulsificável)
  Estes métodos são práticos e portáteis, dispensam o uso de luz negra, mas têm menos sensibilidade para detectar defeitos muito finos; a visualização das indicações é limitada.

As características dos penetrantes sem dúvida nos ajudarão a escolher o método mais adequado para um determinado ensaio, porém o fator mais importante a ser considerado são os requisitos de qualidade que devem constar na especificação do produto.

É com base nestes requisitos que devemos escolher o método. Não se pode simplesmente estabelecer que **todas** as descontinuidades devem ser detectadas, pois poderíamos escolher um método mais caro que o necessário. Precisamos estar conscientes de que a peça deve estar livre de defeitos que interfiram na utilização do produto, ocasionando descontinuidades reprováveis.

Com base nesses aspectos, um método mais simples e barato pode ser também eficiente para realizar o ensaio.

## Revelação

O revelador é aquele talco que suga o penetrante das descontinuidades para revelá-las ao inspetor; além de cumprir esta função, deve ser capaz de formar uma indicação a partir de um pequeno volume de penetrante retido na descontinuidade, e ter capacidade de mostrar separadamente duas ou mais indicações próximas. Para atender a todas estas características, tem de possuir algumas propriedades. Vamos conhecê-las.

**a)** deve ser fabricado com substâncias absorventes, que favorecem a ação de mata-borrão;

**b)** quando aplicado, deve cobrir a superfície de exame, promovendo assim o contraste;

**c)** precisa ter granulação fina;

**d)** tem de ser fácil de aplicar, resultando numa camada fina e uniforme;

**e)** deve ser umedecido facilmente pelo penetrante;

**f)** deve ser de fácil remoção, para a limpeza final;

**g)** deve aderir à superfície;

**h)** não deve ser tóxico, nem atacar a superfície de exame.

Como ocorre com os líquidos penetrantes, existem também no mercado vários tipos de reveladores, para diversos tipos de aplicação. O critério de escolha deve ser similar ao do líquido penetrante.

Os reveladores são classificados da seguinte maneira:

– **de pó seco**

São constituídos de uma mistura fofa de sílica e talco que deve ser mantida seca. São indicados para uso em sistemas estacionários ou automáticos. Vêm caindo em desuso devido à falta de confiabilidade para detectar defeitos pequenos.

– **revelador aquoso**

Neste tipo de revelador, o pó misturado com água pode ser aplicado por imersão, derramamento ou aspersão (borrifamento). Após a aplicação, as peças são secas com secador de cabelo, ou em fornos de secagem.

– **revelador úmido não aquoso**

Neste caso, o talco está misturado com solventes-nafta, álcool ou solventes à base de cloro. Eles são aplicados com aerossol ou pistola de ar comprimido, em superfícies secas.

A função principal desse revelador é proporcionar um fundo de contraste branco para os penetrantes visíveis, resultando em alta sensibilidade.

– **revelador em película**

É constituído por uma película adesiva plástica contendo um revelador que traz o líquido penetrante para a superfície.

À medida que a película seca, formam-se as indicações das descontinuidades. Este método permite que, após o ensaio, possa destacar-se a película da superfície e arquivá-la.

**Dica**

Hoje já existem no mercado kits que fornecem o produto de limpeza (solvente), o líquido penetrante e um revelador. Estes kits são de grande valia, pois facilitam muito a vida do inspetor. Mas devemos consultar as especificações de ensaio para poder escolher o kit com os produtos mais adequados.

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 1**

O ensaio por líquidos penetrantes teve seu início:

**a)** ( ) na fabricação de cascos de navios;
**b)** ( ) nas pontes da África;
**c)** ( ) nas torres de alta tensão americana;
**d)** ( ) nas oficinas de manutenção das estradas de ferro, em várias partes do mundo.

**Exercício 2**

Numere de 1 a 5, a seqüência correta de execução do ensaio por líquidos penetrantes

**a)** ( ) remoção do excesso de líquido penetrante;
**b)** ( ) preparação e limpeza da superfície de ensaio;
**c)** ( ) revelação;
**d)** ( ) aplicação do líquido penetrante;
**e)** ( ) inspeção e limpeza da peça.

**Exercício 3**

Para que a imagem da descontinuidade fique visível, devemos contrastar com o líquido penetrante um:

**a)** ( ) revelador;
**b)** ( ) outro líquido penetrante mais forte;
**c)** ( ) água com soda caústica;
**d)** ( ) líquido incolor.

**Exercício 4**

Assinale com um C as proposições corretas, que exprimam vantagens em usar o ensaio por líquidos penetrantes:

**a)** ( ) o treinamento é simples e requer pouco tempo do operador;
**b)** ( ) o ensaio pode revelar descontinuidades da ordem de até 1 mm;
**c)** ( ) só podemos ensaiar peças de determinado tamanho;
**d)** ( ) a interpretação dos resultados é fácil de fazer.

**Exercício 5**

Escreva abaixo quatro características que um bom líquido penetrante não pode deixar de ter.

**a)** .....

**b)** .....

**c)** .....

**d)** .....

AULA

20

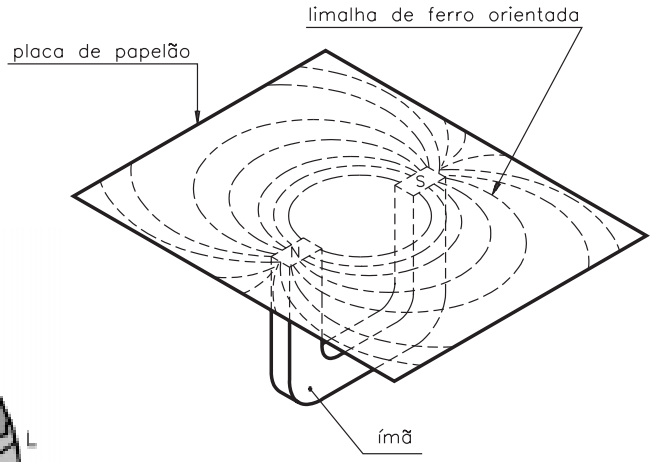
# Partículas magnéticas

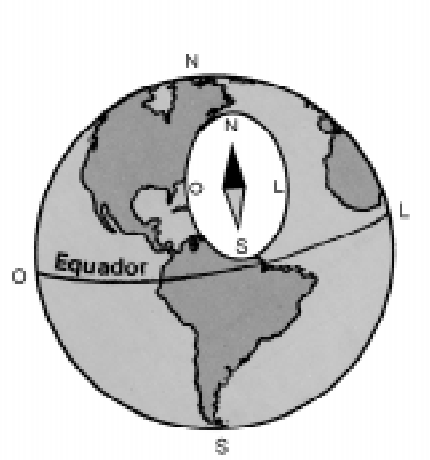
## Introdução

Com certeza você já observou uma bússola.

Já verificou que, ao girá-la, a agulha imantada flutuante mantém-se alinhada na direção norte-sul do globo terrestre?

Deve ter observado também que, ao colocarmos um ímã sob um papelão e jogarmos limalha fina de ferro sobre esta superfície, com ligeiras pancadas no papelão a limalha se alinha obedecendo a uma determinada orientação.




limanha de ferro orientada

Por que isto ocorre? Que "forças invisíveis" agem sobre esses materiais?

Veremos nesta aula como é feito o ensaio por partículas magnéticas. Nesse ensaio, utilizamos essas "forças invisíveis", que também alinham as partículas magnéticas sobre as peças ensaiadas. Onde houver descontinuidades, a orientação será alterada, revelando-as.

## Ensaio por partículas magnéticas

**Ferromagnéticos** - Nome dado aos materiais que são fortemente atraídos pelo ímã, como ferro, níquel, cobalto e quase todos os tipos de aço.

O ensaio por partículas magnéticas é largamente utilizado nas indústrias para detectar descontinuidades superficiais e subsuperficiais, até aproximadamente 3 mm de profundidade, em materiais ferromagnéticos.

Para melhor compreender o ensaio, é necessário saber o que significam os termos a seguir:

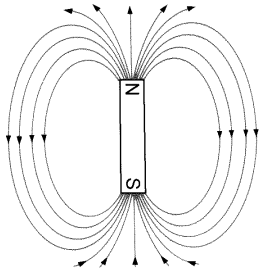
– campo magnético;
– linhas de força do campo magnético;
– campo de fuga.

Observe novamente a figura que mostra a limalha de ferro sobre o papelão.

Chamamos de **campo magnético** a região que circunda o ímã e está sob o efeito dessas "forças invisíveis", que são as **forças magnéticas**.

– O campo magnético pode ser representado por linhas chamadas **linhas de indução magnética**, **linhas de força do campo magnético**, ou ainda, **linhas de fluxo do campo magnético**.

– Em qualquer ímã, essas linhas saem do pólo norte do ímã e caminham na direção do seu pólo sul.



sentido das linhas de fluxo do ímã

**Atenção**

Nas linhas de fluxo do campo magnético não há transporte de qualquer tipo de material de um pólo a outro.

## Ponto de partida da pesquisa

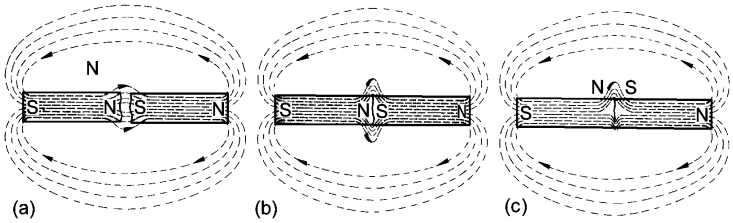
No início do século, W. E. Hoke observou que, ao usinar peças de ferro e aço num torno com mandril imantado, as finas limalhas eram atraídas para rachaduras visíveis, existentes nas peças.

**Fenômeno observado**

As linhas de fluxo que passam por um material submetido a um campo magnético são alteradas por descontinuidades existentes no material.

Esta observação ajudou a desenvolver pesquisas em andamento, culminando com o surgimento do ensaio por partículas magnéticas.

Mas por que as partículas de limalha se agrupam nas descontinuidades? Observe as figuras a seguir.

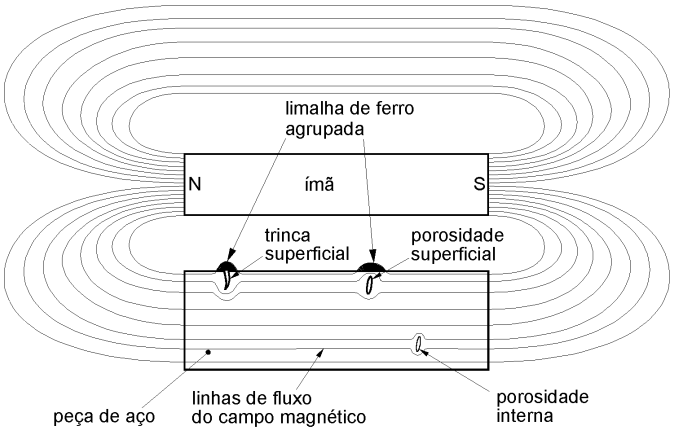



polarização no imã nas regiões com descontinuidade

Na descontinuidade há nova polarização do ímã, repelindo as linhas de fluxo. A esta repulsão chamamos de **campo de fuga.**

O que ocorre com uma peça de aço, por exemplo, quando submetida a um campo magnético?

Veja a figura ao lado.

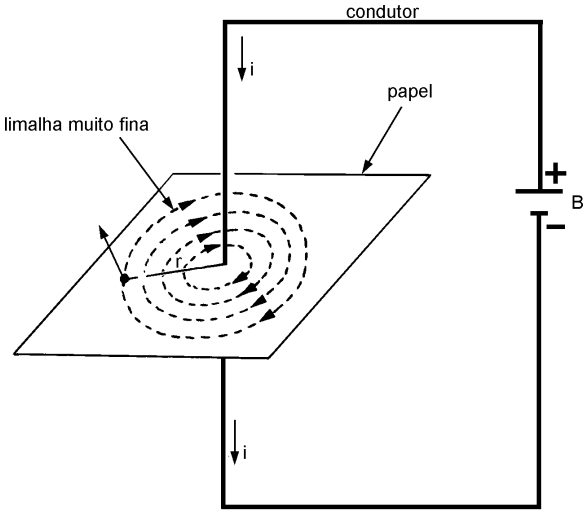



desvios das linhas de fluxo na peça.

Primeiro observe que as linhas de fluxo do campo magnético passam através da peça, imantando-a. Observe ainda que:

- As linhas de fluxo da peça são repelidas pelas descontinuidades devido à sua polarização, gerando o campo de fuga;
- Esta polarização atrai a limalha, revelando a descontinuidade;
- Quando o campo de fuga não atinge a superfície, não há atração das partículas de limalha.

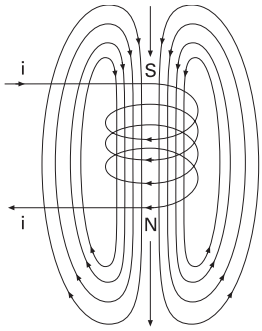
**Saiba mais essa...**



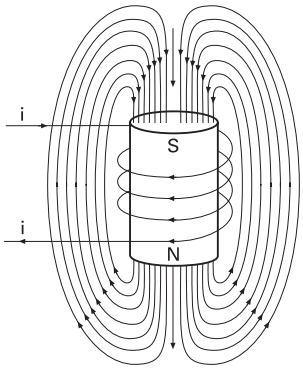

campo magnético gerado por corrente elétrica (i)

A formação de campos magnéticos não é exclusividade dos pólos terrestres e nem dos ímãs permanentes. Se passarmos corrente elétrica por um fio condutor, haverá formação de campo magnético ao redor desse condutor. Portanto, a corrente elétrica também gera campo magnético.

**Saiba mais essa...**




O campo magnético é mais intenso quando a corrente elétrica, em vez de passar por um fio reto, passa por um condutor enrolado em espiral (bobina).




Uma barra de material ferromagnético, colocada no interior da bobina, aumenta muitas vezes o campo magnético produzido pela corrente da bobina.

Vamos estudar agora este ensaio esclarecendo primeiro o que são partículas magnéticas.

## Partículas magnéticas

Partículas magnéticas nada mais são do que um substituto para a limalha de ferro. São constituídas de pós de ferro, óxidos de ferro muito finos e, portanto, com propriedades magnéticas semelhantes às do ferro.

Embora chamadas de "partículas magnéticas", na realidade elas são partículas **magnetizáveis** e não pequenos ímãs ou pó de ímã.

Agora você deve estar pronto para conhecer o ensaio por partículas magnéticas.

## Etapas para a execução do ensaio

1. Preparação e limpeza da superfície
2. Magnetização da peça
3. Aplicação das partículas magnéticas
4. Inspeção da peça e limpeza
5. Desmagnetização da peça

Vamos conhecer cada etapa detalhadamente:

### Preparação e limpeza da superfície

**Carepa**: camada de óxidos formada nas superfícies da peça, em decorrência de sua permanência a temperaturas elevadas, na presença de oxigênio.

Em geral, o ensaio é realizado em peças e produtos acabados, semi-acabados ou em uso. O objetivo dessa etapa é remover sujeira, oxidação, **carepas**, respingos ou inclusões, graxas etc. da superfície em exame. Essas impurezas prejudicam o ensaio, formando falsos campos de fuga ou contaminando as partículas e impedindo seu reaproveitamento.

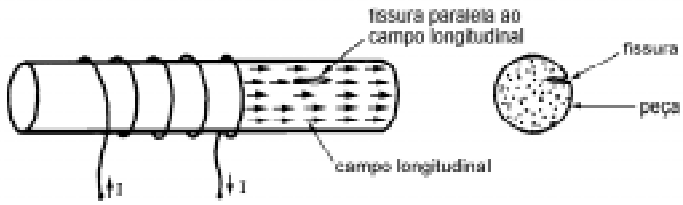
Os métodos mais utilizados para a limpeza das peças são:

- jato de areia ou granalha de aço;
- escovas de aço;
- solventes.

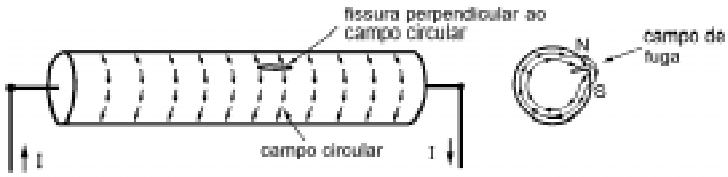
Neste momento, temos a peça limpa e pronta para o ensaio.

### Magnetização da peça

As figuras a seguir mostram que, quando a descontinuidade é paralela às linhas de fluxo do campo magnético, o campo de fuga é pequeno e o ensaio tem menor sensibilidade. Se é perpendicular às linhas de fluxo do campo magnético, o campo de fuga é maior, dando maior sensibilidade ao ensaio.




descontinuidades paralelas ao campo magnético




descontinuidade perpendicular ao campo magnético

Devido às dimensões, à geometria variada das peças e à necessidade de gerarmos campos magnéticos ora longitudinais, ora transversais, foram desenvolvidos vários métodos de magnetização das peças.

### Vamos magnetizar as peças?

| QUADRO 1 - MÉTODOS DE MAGNETIZAÇÃO | | |
|---|---|---|
| MÉTODO | TÉCNICAS DE MAGNETIZAÇÃO | |
| Longitudinal (cria campo magnético longitudinal na peça) | Indução de campo | Bobina eletromagnética<br>Yoke |
| Circular (cria campo magnético circular na peça) | Indução de campo | Condutor central |
| | Passagem de corrente | Eletrodos (pontas)<br>Contato direto (placas) |
| Multidirecional (cria simultaneamente campo magnético longitudinal e circular) | Indução e/ou passagem de corrente | Combinação das técnicas de campo longitudinal com o circular. |

Para cada método existe uma técnica de magnetização e um equipamento apropriado.

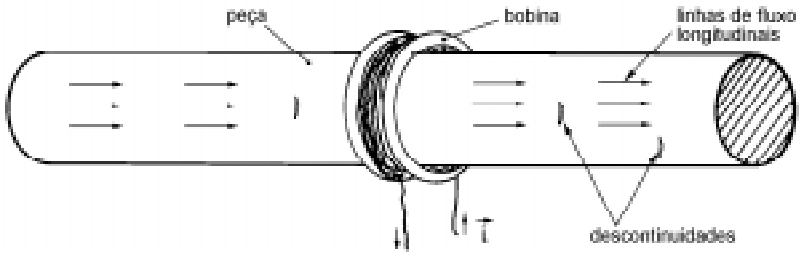
## Técnicas de magnetização

### Magnetização por indução de campo magnético

Neste caso, as peças são colocadas dentro do campo magnético do equipamento, fazendo-se então com que as linhas de fluxo atravessem a peça.

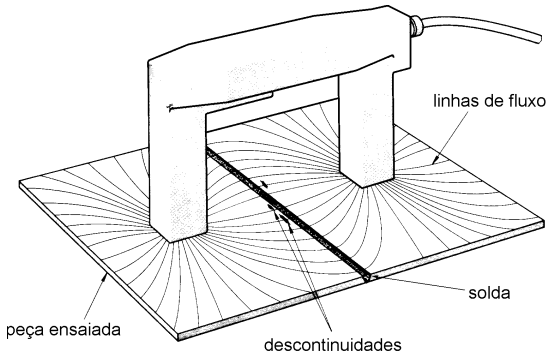
As linhas de fluxo podem ser longitudinais ou circulares, dependendo do método de magnetização, que é escolhido em função do tipo de descontinuidade a verificar.

**Por bobinas eletromagnéticas** – A peça é colocada no interior de uma bobina eletromagnética. Ao circular corrente elétrica pela bobina, forma-se um campo longitudinal na peça por indução magnética.

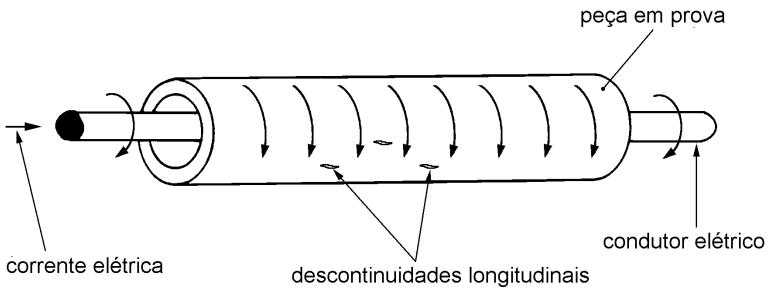



**Por yoke** (**yoke é o nome dado ao equipamento**) – Nesta técnica, a magnetização é feita pela indução de um campo magnético, gerado por um eletroímã em forma de "U" invertido que é apoiado na peça a ser examinada.

Quando este eletroímã é percorrido pela corrente elétrica (CC ou CA), gera-se na peça um campo magnético longitudinal entre as pernas do yoke.



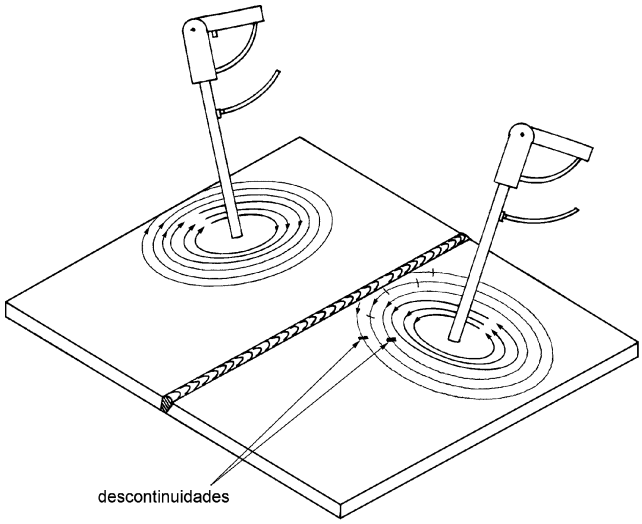

**Por condutor central** – Técnica usual para ensaio de tubos. Um condutor elétrico, que irá induzir um campo magnético circular, é introduzido no tubo, facilitando a visualização das suas descontinuidades longitudinais.



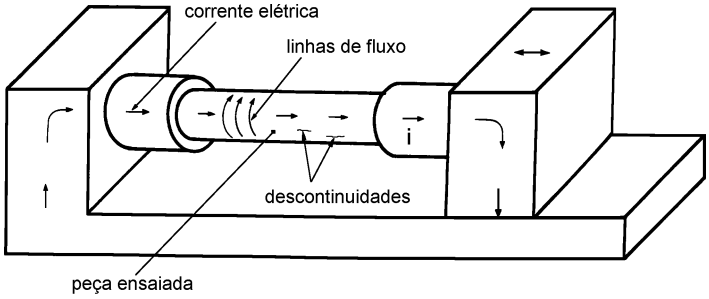
**Magnetização por passagem de corrente**

Neste caso, faz-se passar uma corrente elétrica através da peça. A peça funciona como um condutor, gerando ao redor dela seu próprio campo magnético.

**Por eletrodos** – É a magnetização pela utilização de eletrodos; quando apoiados na superfície da peça, eles permitem a passagem de corrente na mesma. O campo formado é circular.




**Por contato direto** – Tem sua maior aplicação em máquinas estacionárias. A magnetização é efetuada pela passagem de corrente de uma extremidade da peça à outra. O campo magnético que se forma é circular.




**Indução/passagem de corrente (método multidirecional)**

Dois campos magnéticos, um circular e outro longitudinal ou dois longitudinais perpendiculares são aplicados simultaneamente à peça ensaiada. Isso é feito quando queremos detectar, numa única operação, descontinuidades em qualquer direção.

A vantagem desta técnica é que ela permite analisar as peças de uma única vez. A dificuldade principal é conseguir um equilíbrio entre os dois campos, de modo que um não se sobreponha ao outro.

**Técnicas de ensaio**

Você já deve ter atraído agulhas e alfinetes com ímãs. Depois de retirar estes objetos do contato com o ímã, observou que eles ainda se atraíam mutuamente.

Há materiais que depois de magnetizados retêm parte deste magnetismo, mesmo com a remoção do campo magnetizante. São materiais com alto magnetismo residual. Há ainda aqueles que não retêm o magnetismo, após a remoção do campo magnetizante.

Estas diferenças permitem o ensaio por meio de duas técnicas:

**Técnica do campo contínuo** – As partículas magnéticas são aplicadas quando a peça está sob efeito do campo magnético. Após a retirada desse campo, não há magnetismo residual.

**Técnica do campo residual** – Nesta técnica, as partículas são aplicadas depois que a peça sai da influência do campo magnético, isto é, o ensaio é realizado apenas com o magnetismo residual. Neste caso, depois do ensaio é necessário desmagnetizar a peça.

Neste ponto, estamos com a peça magnetizada e pronta para receber as partículas magnéticas. Mas como verificar se o campo magnético gerado é suficiente para detectar as descontinuidades?

Temos que garantir que o campo gerado tenha uma intensidade suficiente para que se formem os campos de fuga desejados.

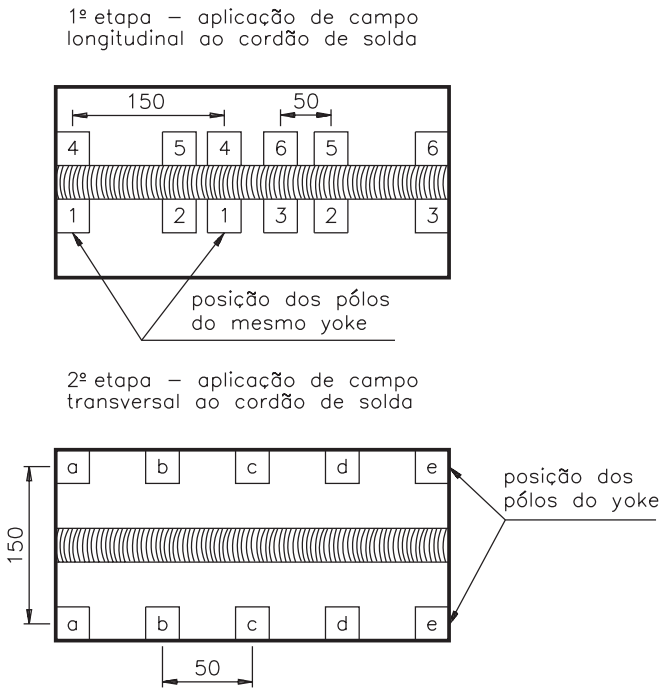
Existem várias maneiras de verificar isto:

- com aparelhos medidores de campo magnético;
- aplicando o ensaio em peças com defeitos conhecidos;
- utilizando-se padrões normalizados com descontinuidades conhecidas;
- no caso do yoke, ele deve gerar um campo magnético suficiente para levantar, no mínimo, 4,5 kgf em corrente alternada e 18,1 kgf em corrente contínua.

**Técnica de varredura** – Para garantir que toda a peça foi submetida ao campo magnético, efetuamos uma varredura magnética.

Depois de escolhida a técnica de magnetização, é necessário esquematizar na peça qual será o formato do campo magnético. Deve-se observar se toda ela será submetida a campos magnéticos, defasados de 90° um do outro, e também verificar se este campo será aplicado na peça inteira, isto é, se será feita uma varredura magnética total da mesma.

Isso é conseguido movimentando-se o equipamento magnetizante ou aplicando-se duas técnicas de magnetização (o método multidirecional, descrito anteriormente). A figura a seguir mostra um exemplo de varredura feita com o yoke.




esquema de varredura para ensaio com yoke

**Aplicação das partículas magnéticas**

As partículas magnéticas são fornecidas na forma de pó, em pasta ou ainda em pó suspenso em líquido (concentrado).

Podem ainda ser fornecidas em diversas cores, para inspeção com luz branca, ou como partículas fluorescentes, para inspeção com luz negra.

Portanto, os métodos de ensaio podem ser classificados:

**a)** Quanto à forma de aplicação da partícula magnética:
- Via seca: pó
- Via úmida: suspensa em líquido

**b)** Quanto à forma de inspeção:
- Visíveis: luz branca
- Fluorescentes: luz negra

**Via seca** – As partículas magnéticas para esta finalidade não requerem preparação prévia. São aplicadas diretamente sobre a superfície magnetizada da peça, por aplicadores de pó manuais ou bombas de pulverização. As partículas podem ser recuperadas, desde que a peça ensaiada permita que elas sejam recolhidas isentas de contaminação.

**Via úmida** – Neste método, as partículas possuem granulometria muito fina, o que permite detectar descontinuidades muito pequenas. As partículas são fornecidas pelos fabricantes na forma de pó ou em suspensão (concentrada) em líquido. Para a aplicação, devem ser preparadas adequadamente, segundo norma específica (são diluídas em líquido, que pode ser água, querosene ou óleo leve).

Para verificar a concentração das partículas no líquido:

- coloca-se 100 ml da suspensão num tubo padrão graduado;
- depois de 30 minutos, verifica-se o volume de partículas que se depositaram no fundo.

Os valores recomendados são:

- 1,2 a 2,4 ml para inspeção por via úmida visível em luz branca;
- 0,1 a 0,7 ml para inspeção por via úmida visível em luz negra.

A aplicação é realizada na forma de chuveiros de baixa pressão, borrifadores manuais ou simplesmente derramando-se a mistura sobre as peças.

Para melhor visualizar as partículas magnéticas, podemos aplicar previamente sobre a superfície da peça um "contraste", que é uma tinta branca na forma de spray.

As partículas magnéticas (via seca e via úmida) são fornecidas em diversas cores, para facilitar a visualização das descontinuidades na peça ensaiada.

### Inspeção da peça e limpeza

Esta etapa é realizada imediatamente após ou junto com a etapa anterior. Aplicam-se as partículas magnéticas e efetua-se, em seguida, a observação e avaliação das indicações.

Feita a inspeção, registram-se os resultados e promove-se a limpeza da peça, reaproveitando-se as partículas, se possível. Se a peça apresentar magnetismo residual, deverá ser desmagnetizada.

### Desmagnetização da peça

A desmagnetização é feita em materiais que retêm parte do magnetismo, depois que se interrompe a força magnetizante.

A desmagnetização evita problemas como:

**Interferência na usinagem** – Peças com magnetismo residual, ao serem usinadas, vão magnetizar as ferramentas de corte e os cavacos. Cavacos grudados na ferramenta contribuirão para a perda de seu corte.

**Interferência na soldagem** – Há o desvio do arco elétrico, devido à magnetização residual, o que prejudica a qualidade do cordão de solda. Esse fenômeno é conhecido como sopro magnético.

**Interferência em instrumentos** – O magnetismo residual da peça irá afetar instrumentos de medição, quando colocados num mesmo conjunto.

Não é necessário proceder à desmagnetização quando os materiais e as peças:

- possuem baixa retentividade magnética;
- forem submetidos a tratamento térmico;
- tiverem de ser novamente magnetizados.

Para a desmagnetização das peças, devemos submetê-las a um campo magnético pulsante (invertendo seu sentido) de intensidade superior ao campo magnetizante, reduzindo-o a zero gradualmente.

Isto é conseguido, por exemplo, com a peça passando através de uma bobina; ou com a peça parada dentro da bobina, reduzindo-se gradualmente o campo magnético.

Você percebeu que há várias opções para realizar o ensaio por partículas magnéticas. Cabe ao técnico escolher a forma que melhor se adapte às características da peça.

## Exercícios

**Exercício 1**

Assinale a alternativa em que **todos** os materiais podem ser ensaiados por partículas magnéticas:

**a)** ( ) aço, alumínio, níquel, cobre;
**b)** ( ) ferro, aço, níquel, cobalto;
**c)** ( ) ferro, níquel, cobre, chumbo;
**d)** ( ) alumínio, zinco, cobre, estanho.

**Exercício 2**

O ensaio por partículas magnéticas detecta descontinuidades de até ..... mm de profundidade, aproximadamente.

**Exercício 3**

O ensaio por partículas magnéticas pode ser classificado quanto à forma de aplicação da partícula magnética e quanto à forma de inspeção, respectivamente, em:

**a)** ( ) via úmida, via aquosa, via fluorescente normal;
**b)** ( ) via branca, via vermelha, via fluorescente e visível;
**c)** ( ) via úmida, via seca, visível e fluorescente;
**d)** ( ) visível, fluorescente, via úmida e via seca.

**Exercício 4**

Enumere, de 1 a 5, as etapas de execução do ensaio por partículas magnéticas:

**a)** ( ) inspeção da peça e limpeza;
**b)** ( ) aplicação das partículas magnéticas;
**c)** ( ) magnetização da peça;
**d)** ( ) preparação e limpeza da superfície;
**e)** ( ) desmagnetização da peça.

**Exercício 5**

Complete o quadro a seguir, sobre os métodos e técnicas de magnetização.

| MÉTODO | TÉCNICAS DE MAGNETIZAÇÃO | |
|---|---|---|
| Magnetização longitudinal | Indução de campo | |
| | Indução de campo | |
| | | Eletrodos (pontas)<br>Contato direto (placas) |
| Magnetização multidirecional | Indução e/ou passagem de corrente | |

AULA

21

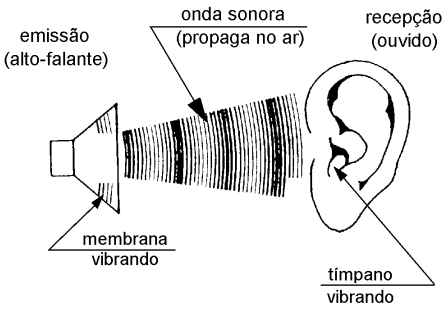
# Ultra-som

## Introdução

Você sabia que, por terem uma visão quase nula, os morcegos se orientam pelo ultra-som?

Eles **emitem** ondas ultra-sônicas e quando **recebem** o eco de retorno são capazes de identificar o que têm à sua frente.

Os sons audíveis pelo ouvido humano também possuem uma **fonte emissora**, uma **receptora** e um **meio de propagação**, que é o local por onde o som viaja da fonte emissora até à receptora.



propagação do som

Portanto, o som se origina da **vibração de um material**. Esta vibração é transmitida ao ar e levada, na forma de ondas sonoras, até a fonte receptora.

Nesta aula e na próxima estudaremos a realização do ensaio por ultra-som. Nesse ensaio, induzimos, por meio de um emissor, ondas ultra-sônicas que se propagam através do material que desejamos analisar. Pelo eco captado no receptor, determina-se a existência ou não de descontinuidades.

O ensaio por ultra-som é um dos principais métodos de ensaio não destrutivo aplicados na indústria, porque permite inspecionar todo o volume da peça.

Para compreender esse ensaio você deve saber:

- O que são ondas
- Como se classificam
- Como se propagam
- Quais são seus principais elementos
- O que é ultra-som
- Como gerar o ultra-som.

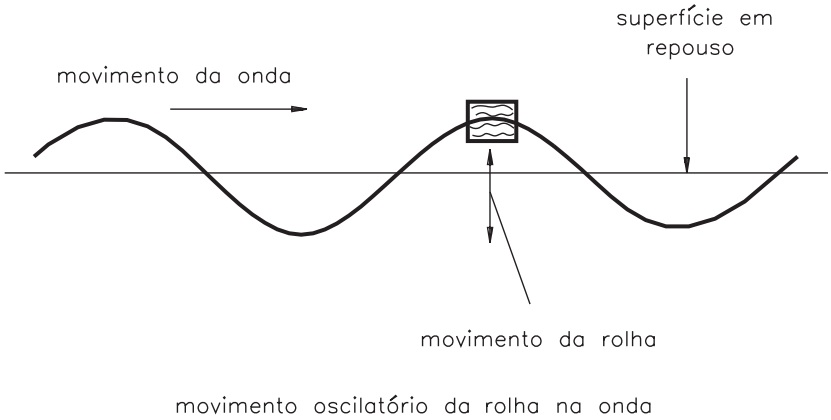
Que tal começar pelas ondas?

## O que são ondas?

Imagine a superfície calma de uma lagoa. Se você jogar uma pedra no centro dessa lagoa, no ponto em que a pedra atingir a água ocorrerá uma perturbação, que se propagará em todas as direções da superfície.

Se você puser uma rolha flutuando nessa lagoa e jogar de novo uma pedra, observará que a rolha não sairá do local. Apenas oscilará, acompanhando as moléculas da água, de cima para baixo, enquanto a onda se movimenta horizontalmente.

Onda é uma perturbação que se propaga através de um meio.




Toda onda transmite energia, sem transportar matéria.

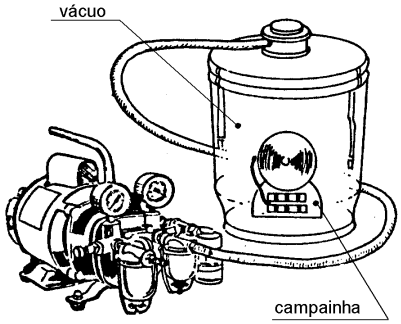
## Classificação das ondas

As ondas podem ser classificadas quanto à sua **natureza** e quanto ao **sentido de suas vibrações**.

Quanto à **natureza** podem ser:

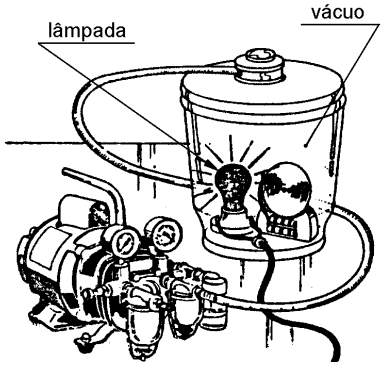
- **Mecânicas**: necessitam de um meio material para se propagar. Exemplo: corda de violão. A onda, neste caso sonora, propaga-se através do ar, até os nossos ouvidos.

Se acionarmos uma campainha no vácuo, não haverá som, pois a sua vibração não pode ser transmitida.




- **Eletromagnéticas**: não necessitam de um meio material para se propagar. Exemplo: luz, ondas de rádio, televisão, raios x, raios gama etc.

Ao ligarmos uma lâmpada no vácuo vemos sua luminosidade, porque ela não depende de meio material para ser transmitida.




**Leia com atenção**

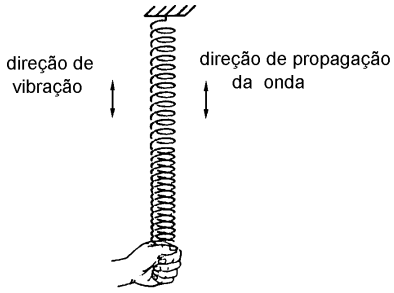
As partículas de um material (sólido, líquido ou gasoso) estão interligadas por forças de adesão. Ao vibrarmos uma partícula, esta vibração se transmite à partícula vizinha. Produz-se então uma onda mecânica.

As ondas sonoras são ondas mecânicas. Dependem de um meio material (sólidos, líquidos ou gases) para serem transmitidas.

Quanto ao **sentido da vibração**, as ondas classificam-se em:

- **Transversais**: numa onda transversal, as partículas vibram em direção perpendicular à direção de propagação da onda. É o caso do movimento das cordas do violão.

- **Longitudinais**: as partículas vibram na mesma direção da propagação da onda.

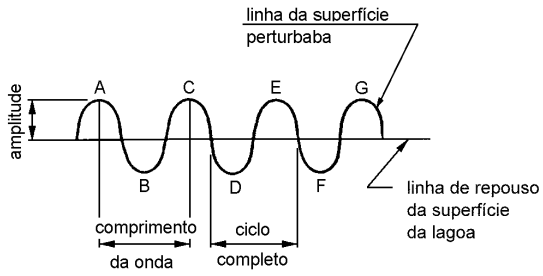


onda longitudinal

A velocidade de propagação de uma onda longitudinal é maior do que a de uma onda transversal.

## Elementos de uma onda

O exemplo da pedra atirada à lagoa é ótimo para entendermos algumas definições. Analise a figura a seguir e procure identificar cada um dos elementos descritos:




- Crista: são os pontos mais altos da onda (A, C, E, G).
- Vales: são os pontos mais baixos da onda (B, D, F).
- Comprimento: é a distância de uma crista à outra (ou de um vale a outro).
- Amplitude: é a altura da crista, medida a partir da superfície calma da lagoa (linha de repouso).
- Freqüência: é o número de ciclos pela unidade de tempo.

**Dica**

A unidade de medida de freqüência é o hertz (Hz)
1 Hz = 1 ciclo/segundo
1 quilohertz (1 kHz) = 1.000 ciclos/segundo
1 megahertz (1 MHz) = 1.000.000 ciclos/segundo

- Ciclo: movimento completo de um ponto qualquer da onda, saindo de sua posição original e voltando a ela.
- Velocidade de propagação: a velocidade de propagação de uma onda é função do meio que ela percorre. Para diferentes materiais temos diferentes velocidades de propagação.

A velocidade do som no ar é de aproximadamente 330 metros por segundo. No caso de um sólido, ou de um líquido, esta velocidade é bem maior, pois sua estrutura é mais compacta, facilitando a propagação. No aço, a velocidade de propagação do som é de 5.900 metros por segundo.

A tabela a seguir informa a velocidade de propagação das ondas sonoras em alguns materiais de uso comum na indústria.

| TABELA 1 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM | | |
|---|---|---|
| MATERIAL | VELOCIDADE (M/ S) | |
| | Onda longitudinal | Onda transversal |
| Alumínio | 6.300 | 3.100 |
| Chumbo | 2.160 | 700 |
| Aço | 5.900 | 3.250 |
| Ferro fundido | 3.500 a 5.600 | 2.200 a 3.200 |
| Latão | 3.830 | 2.050 |
| Vidro | 5.570 | 3.520 |
| Acrílico | 2.730 | 1.430 |

## E o que é ultra-som?

Os sons com freqüências **abaixo** de 20 Hz são chamados de **infra-sons**.

Os sons com frequência **acima** de 20.000 Hz são chamados de **ultra-sons**.

O som audível pelo ouvido humano está compreendido entre as freqüências de 20 a 20.000 Hz.

Alguns animais são capazes de ouvir ultra-sons. É o caso dos cães, que chegam a perceber sons com 25.000 vibrações por segundo (25 kHz). Os morcegos captam sons de até 50.000 vibrações por segundo (50 kHz).

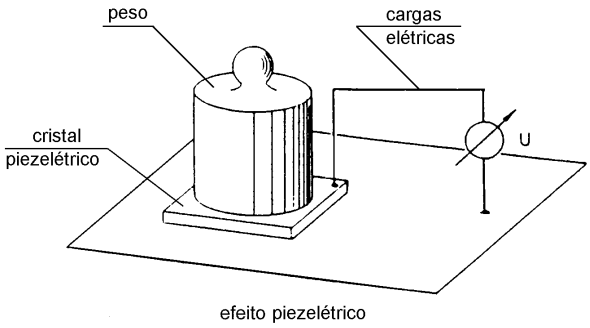
### Produção do ultra-som

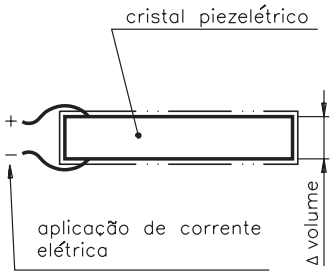
A forma mais comum de produzir o ultra-som para os ensaios não destrutivos é a que utiliza os cristais **piezelétricos**, como o sulfato de lítio, o titanato de bário, o quartzo etc.

Você quer saber o que é um cristal piezelétrico? Então leia o próximo tópico.

### Início das pesquisas

Em 1880, os irmãos Curie (Pierre e Jacques) descobriram o efeito **piezelétrico** de certos materiais. Observaram que **determinados materiais** (como o quartzo) cortados em lâminas, quando submetidos a cargas mecânicas geravam cargas elétricas em sua superfície.



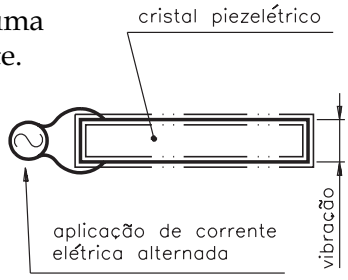




No ano seguinte, G. Lippmann descobriu que o inverso da observação dos irmãos Curie também era verdadeiro. Aplicando-se cargas elétricas na superfície dos cristais piezelétricos, originavam-se deformações no cristal.

Quando se aplica corrente elétrica alternada, há uma vibração no cristal, na mesma frequência da corrente.

Esse princípio é utilizado na geração e na recepção do ultra-som.

Ao se aplicar corrente alternada de alta freqüência num cristal piezelétrico, ele vibrará na mesma freqüência, gerando o ultra-som.




Na recepção, ocorre o inverso: o ultra-som fará vibrar o cristal, gerando um sinal elétrico de alta freqüência.

Em geral, para os ensaios não destrutivos utilizam-se freqüências na faixa de 0,5 a 25 MHz (500.000 a 25.000.000 Hz).

## Vantagens e desvantagens do ensaio por ultra-som

O ensaio por ultra-som, comparado com outros métodos não destrutivos, apresenta as seguintes vantagens:

- localização precisa das descontinuidades existentes nas peças, sem processos intermediários, como, por exemplo, a revelação de filmes;
- alta sensibilidade ao detectar pequenas descontinuidades;
- maior penetração para detectar descontinuidades internas na peça;
- respostas imediatas pelo uso de equipamento eletrônico.

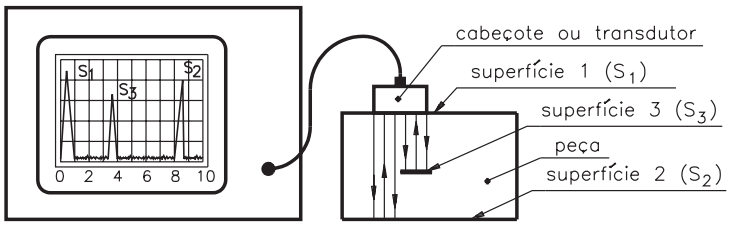
Como desvantagens podemos citar:

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

### Aplicando o ultra-som

O uso do ultra-som como ensaio não destrutivo é largamente difundido nas indústrias para detectar descontinuidades em todo o volume do material a analisar, tanto em metais (ferrosos ou não ferrosos) como em não metais.

O ensaio consiste em fazer com que o ultra-som, emitido por um **transdutor**, percorra o material a ser ensaiado, efetuando-se a verificação dos ecos recebidos de volta, pelo mesmo ou por outro transdutor.




esquema básico: ultra–som

## O que é transdutor?

Transdutor, também conhecido como cabeçote, é todo dispositivo que converte um tipo de energia em outro. Conhecemos vários tipos de transdutores, entre eles o microfone e o alto-falante.

No ensaio de ultra-som, os transdutores são necessários para converter energia elétrica em energia mecânica de vibração (ultra-som) e vice-versa.

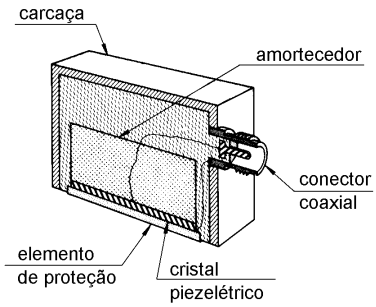
### Parâmetros dos transdutores

No ensaio por ultra-som, existe grande variedade de transdutores para atender a diversas aplicações.

São subdivididos em categorias: quanto ao ângulo de emissão/recepção do ultra-som e quanto à função (emissor ou receptor ou emissor/receptor).

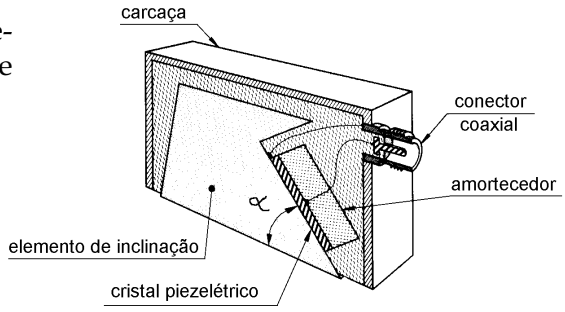
Quanto ao ângulo de emissão/recepção do ultra-som os transdutores podem ser:

- **Normais**: emitem e/ou recebem o ultra-som perpendicularmente à sua superfície.



transdutor normal - monocristal

- **Angulares**: emitem e/ou recebem o ultra-som obliquamente à sua superfície.

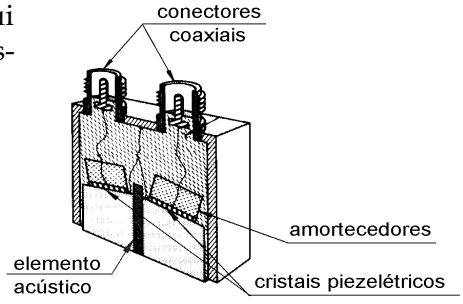


transdutor angular - monocristal

Quanto à função, os transdutores podem ser:

- **Monocristal**: possuem apenas um cristal piezelétrico.
  Há três modalidades:
  – só emissor de ondas ultra-sônicas;
  – só receptor de ondas ultra-sônicas (este tipo deve trabalhar junto com o primeiro);
  – emissor e receptor de ondas ultra-sônicas (o mesmo cristal emite e recebe os ecos ultra-sônicos de maneira sincronizada).

- **Duplo cristal**: o mesmo transdutor possui um cristal para recepção e outro para emissão do ultra-som.



transdutor normal - duplo cristal

### Características dos transdutores

Os elementos que caracterizam os transdutores são:

- **Tamanho do cristal piezelétrico**: os transdutores normais mais utilizados possuem de 5 a 25 mm de diâmetro. Em geral, nos transdutores angulares utilizam-se cristais retangulares.

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

## Acoplante

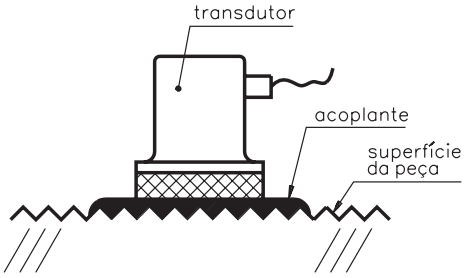
Como o ultra-som deve passar do transdutor para a peça com o mínimo de interferência, há necessidade de colocar um elemento, o **acoplante**, que faça esta ligação, evitando o mau contato.

Este acoplante pode ser óleo, água, glicerina, graxa etc.

## Método de ensaio

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

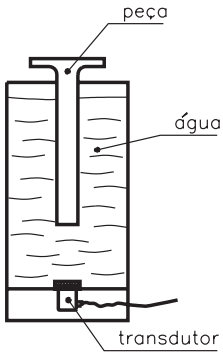
- **Ensaio por contato direto**: o acoplante é colocado em pequena quantidade entre a peça e o cabeçote, formando uma película.



acoplamento peça – transdutor

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

A aplicação deste método requer a construção de dispositivos adaptados ao tipo de peça a ensaiar.




Agora que você já sabe o que é uma onda sonora, como as ondas se propagam, o que é o ultra-som, os tipos de transdutores e as técnicas de acoplamento, o próximo passo é a realização do ensaio.

Mas antes, que tal verificar o aprendizado dos assuntos desta aula?

## Exercícios

**Exercício 1**

As ondas são classificadas quanto à sua natureza em ..... e ..... e quanto ao sentido de vibração em ..... e .....

**Exercício 2**

Os sons com freqüência acima de 20.000 Hz são denominados .....

**Exercício 3**

A velocidade de propagação de uma onda ..... é maior do que a de uma onda .....

**Exercício 4**

Para analisar materiais diferentes devemos sempre calibrar o aparelho, pois a velocidade de ..... muda de um ..... para outro.

**Exercício 5**

Os cristais piezelétricos ..... quando submetidos a uma ..... alternada.

**Exercício 6**

Os transdutores podem ser classificados quanto ao ângulo de emissão/recepção do ultra-som em ..... e ..... e quanto à função em ..... e .....

AULA

22

# Realizando o ensaio de ultra-som

## Introdução

Na aula anterior, você ficou sabendo que o ultra-som é uma onda mecânica que se propaga de uma **fonte emissora** até uma **fonte receptora**, através de um meio físico.

Viu também que a velocidade de propagação depende do meio e do tipo de onda emitido (longitudinal ou transversal). E ficou conhecendo alguns tipos de **transdutores**, que são elementos fundamentais no ensaio, pois têm a função de receber o sinal elétrico do aparelho e converter esse sinal em energia mecânica de vibração, produzindo o ultra-som e vice-versa.

Agora, vamos completar nosso estudo sobre o ensaio imaginando que a pessoa que opera o equipamento na fábrica faltou, e você recebeu a incumbência de analisar por ultra-som um bloco usinado de aço laminado, com dimensões do $80 \times 80 \times 40$ mm.

O que fazer? Calma! Não entre em pânico... ainda.

Nesta aula, estudaremos alguns assuntos que ajudarão você a se sair bem. Veremos:

– as técnicas de ensaio com os diversos tipos de transdutores;
– o equipamento de ultra-som;
– o ensaio com transdutores normais;
– o ensaio com transdutores angulares.

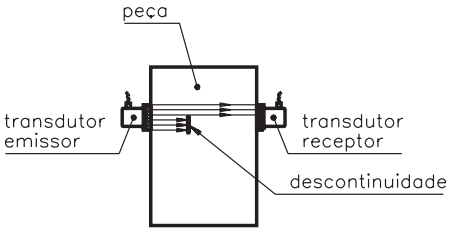
## Nossa aula

### Técnicas de ensaio

Pelo tipo de transdutor utilizado, podemos classificar o ensaio por ultra-som em quatro técnicas: por transparência, por pulso-eco, por duplo cristal e por transdutores angulares.

#### Técnica da transparência

Observe a figura ao lado.



Não havendo descontinuidades no material, o receptor recebe aproximadamente 100% do sinal emitido.

Havendo descontinuidades, o receptor recebe uma porcentagem inferior ao sinal emitido.

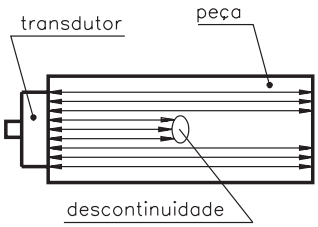
Esta técnica é mais indicada para processos automáticos que envolvem grandes produções.

Ela não é apropriada para processos de medições manuais, por diversas razões:

– cansaço em segurar dois cabeçotes;
– a face posterior da peça pode ser inacessível;
– dificuldade de bom acoplamento dos dois lados;
– dificuldade de posicionar corretamente os dois cabeçotes;
– dificuldade em manusear o equipamento e os dois cabeçotes ao mesmo tempo.

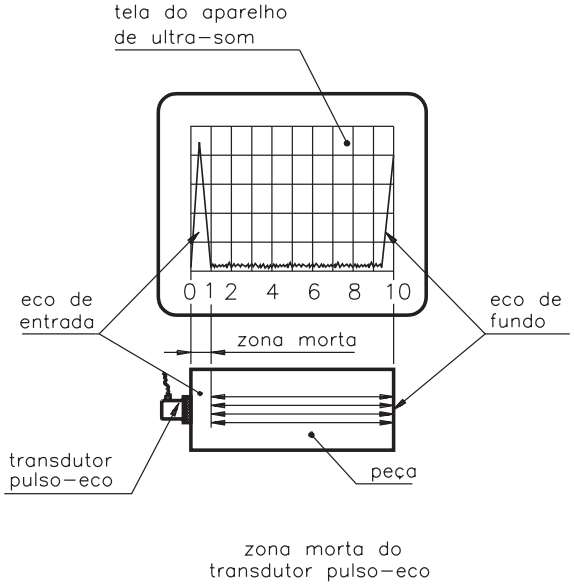
**Técnica por pulso-eco:**

Nos ensaios por ultra-som em processos manuais, geralmente usamos os transdutores do tipo monocristal, emissor e receptor (pulso-eco), pela facilidade de manuseio e de operação.




É possível fazer uma medição precisa quando o transdutor não está emitindo sinal durante a chegada de um eco. Neste caso, as ondas ultrasônicas têm de ser pulsantes para que o cristal possa receber os ecos de retorno nos intervalos de pulsação.

É fácil entender que, se o pulso emissor bater numa descontinuidade muito próxima da superfície, haverá um eco retornando, antes de terminar a emissão. Neste caso, o sinal da descontinuidade não é percebido.



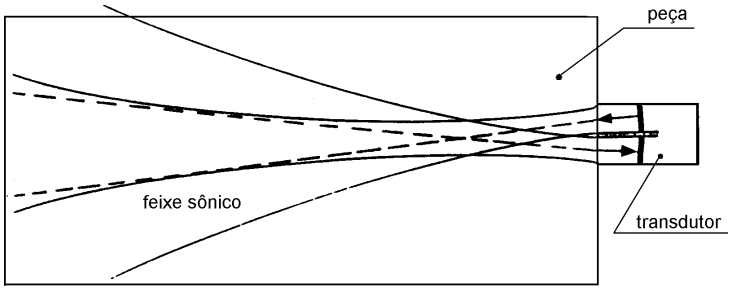
**Fique sabendo ...**

**Zona morta** é a área próxima da superfície na qual não se detectam ecos durante o tempo de emissão.

### Técnica do duplo cristal

Para ensaiar peças com pouca espessura, nas quais se espera encontrar descontinuidades próximas à superfície, os transdutores pulso-eco não são adequados, pelos motivos já vistos.

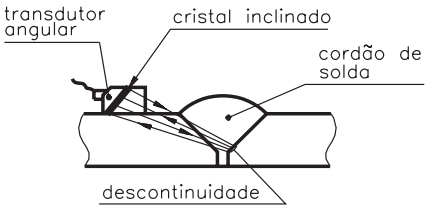
Neste caso, usamos outro tipo de transdutor – o **transmissor e receptor** (**TR**), **por duplo cristal**. A zona morta, neste caso, é menor.




Os transdutores TR são usados freqüentemente para verificar dimensões de materiais e detectar, localizar e avaliar falhas subsuperficiais.

### Técnica com transdutores angulares

Imagine a colocação de qualquer dos transdutores vistos anteriomente sobre um cordão de solda. Não teríamos acoplamento suficiente para o ensaio.




Neste caso, usamos os transdutores angulares, que possibilitam um acoplamento perfeito e a detecção das descontinuidades.

## Equipamento de ensaio por ultra-som

No ensaio, o que nos interessa é medir a intensidade do sinal elétrico de retorno (tensão), recebido pelo transdutor, e o tempo transcorrido entre a emissão do pulso e o retorno do eco.

Imagine que você tenha em mãos uma chapa de aço com 50 mm de espessura e precise medir o tempo que o som leva para percorrer o caminho de ida e volta através dessa espessura.

Sabendo que:

espessura (e) = 0,050 m

velocidade de propagação do som no aço (v) = 5.920 m/s

$$\text{tempo (t)} = 2 \times \frac{e}{v} \Rightarrow t = 2 \times \frac{0{,}050 \text{ m}}{5.920 \text{ m/s}} \Rightarrow t = 0{,}0000168 \text{ s ou } t = 16{,}8\ \mu\text{s}$$

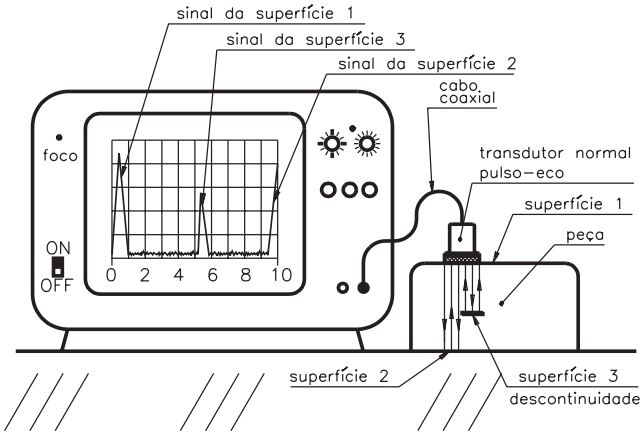
| µs = microsegundos |
|---|

Como você mediria esse tempo tão pequeno?

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

Na tela, vemos na vertical a intensidade do sinal elétrico de saída do eco e de retorno e, na horizontal, o intervalo entre a emissão e a recepção do pulso.

Além de operar como osciloscópio, efetuando medições (fonte receptora), o aparelho possui também uma fonte emissora de sinais elétricos, para gerar o ultra-som através dos transdutores.



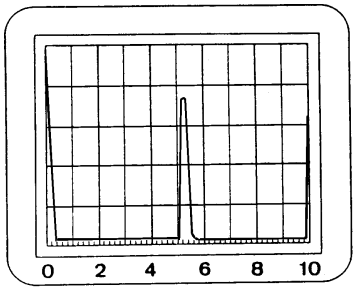

esquema básico da resposta obtida no ensaio de ultra–som

Na prática, o valor numérico dessas medidas propriamente ditas não nos interessa, pois trabalhamos por meio de comparações. Comparamos as alturas e as distâncias entre os pulsos na tela com outros conhecidos, ajustados previamente na calibração do equipamento. Vejamos o que isso significa.

Tomemos novamente o exemplo da chapa de aço com 50 mm de espessura. O procedimento para acerto da escala da tela consiste em ajustar as 10 divisões horizontais da tela, a partir de um padrão confeccionado do mesmo tipo de material a ser ensaiado.

Neste caso, usaremos um bloco de aço, que apresenta uma das suas dimensões equivalente a 100 mm. Portanto, cada divisão da tela terá 10 mm (100 mm/ 10 divisões = 10 mm por divisão).

Logo, o valor do tempo (16,8 µs) não nos interessa, mas sim que este tempo é relativo a 50 mm de peça, isto é, a distância entre o pulso de saída e o de retorno na tela, corresponde a 50 mm.



tela com escala de 10 divisões

Sendo nossa escala de 0 a 100 mm, o pulso de resposta da parede oposta da chapa – **eco de fundo** – aparecerá na tela na quinta divisão. Como a espessura cabe duas vezes na tela ajustada para 100 mm, aparecerá mais um pulso na décima divisão.

Essa é a metodologia utilizada para o ajuste da escala.

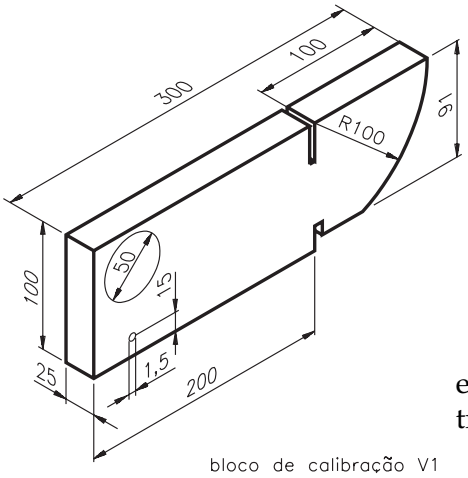
Observe que os pulsos, embora sejam da mesma superfície refletora, diminuem de tamanho. Essa atenuação é causada pela distância que o som percorre no material, ou seja, quanto maior a distância percorrida dentro da peça, menor a intensidade do sinal de retorno, devido aos desvios e absorção do ultra-som pelo material.

## O ensaio propriamente dito

Você já se sente capaz de efetuar o ensaio no bloco de aço?

A primeira coisa a fazer é escolher a técnica de ensaio.

Por tratar-se de uma única peça plana (bom acoplamento), de dimensões consideráveis, você pode optar pela **técnica pulso-eco** com o **transdutor normal**.



bloco de calibração V1

Como a velocidade de propagação do ultra-som é diferente para cada material, necessitamos de um padrão para calibrar o equipamento, isto é, para ajustar os pulsos de resposta na tela do aparelho.

Neste caso, usamos o bloco-padrão **V1**, em aço, o mesmo material da peça. Este bloco traz marcações para facilitar o ajuste.

### Calibração

A calibração é efetuada para atender aos critérios de aceitação preestabelecidos pela engenharia da fábrica. Afinal, nem toda descontinuidade representa um defeito, lembra-se?

No caso do bloco de aço que vamos analisar, vamos imaginar que o critério de aceitação determinado é: serão considerados defeitos as descontinuidades com diâmetros superiores a 1,5 mm.

### Ajuste da escala (distância)

Iniciamos a calibração ligando o aparelho e conectando o cabo coaxial ao transdutor escolhido e ao aparelho.

Selecionamos a função para operação com transdutor monocristal pulso-eco.

Os aparelhos de ultra-som possuem escalas de medição para ajuste da tela, ou seja, ajuste do tempo de resposta para jogar o pulso na tela.

Exemplo de escalas que um aparelho pode possuir:

- 0 a 50 mm
- 0 a 100 mm
- 0 a 200 mm
- 0 a 500 mm
- 0 a 1.000 mm

Para ensaiarmos a peça em questão ($80 \times 80 \times 40$ mm), podemos selecionar a escala de 0 a 100 mm. Se a tela possuir 10 divisões, cada divisão da tela terá 10 mm (fator de escala K).

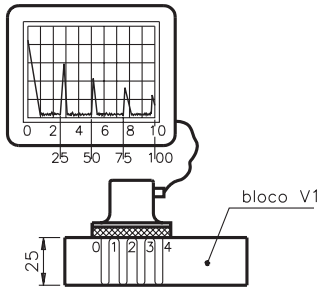
O fator K é conhecido a partir das seguintes relações
K = escala/divisão da tela
K = 100/10
K = 10 mm

O passo seguinte é acoplar o transdutor sobre o bloco-padrão na espessura de 25 mm.

Deverão aparecer na tela 4 pulsos, pois na escala de 0 a 100 mm cabe 4 vezes a espessura de 25 mm.

Número de pulsos = escala de profundidade/espessura de calibração
Número de pulsos = 100/25
Número de pulsos = 4

Para conseguir melhor precisão da escala, devemos ajustar os pulsos nas seguintes localizações da tela:
1º pulso = 25 mm/K → posição na tela = 2,5
2º pulso = 50 mm/K → posição na tela = 5,0
3º pulso = 75 mm/K → posição na tela = 7,5
4º pulso = 100 mm/K → posição na tela = 10



seqüências de ecos de fundo, em 25mm de espessura

A escala para peças de aço de até 100 mm está pronta e calibrada.

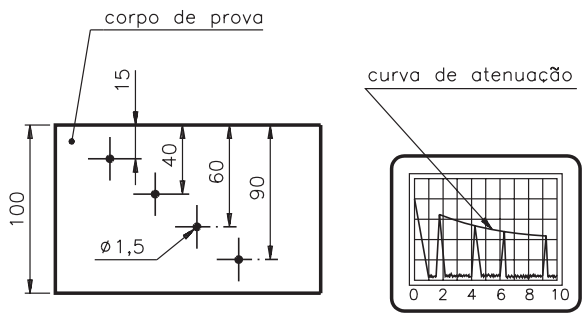
## Ajuste da sensibilidade de resposta

É nesta etapa que ajustamos a sensibilidade do aparelho para detectar as descontinuidades preestabelecidas como defeitos.

Vimos que o sinal de retorno é atenuado em função da distância da descontinuidade à superfície.

Portanto, necessitamos elaborar uma curva de atenuação de sinal para nos orientarmos.

Para isso, podemos tomar como referência um corpo de prova conhecido, em aço, com furos propositalmente efetuados com 1,5 mm de diâmetro que é a referência, em nosso exemplo, em distâncias crescentes da superfície.



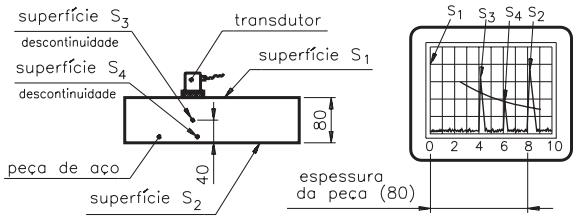

curva de atenuação

Traçamos então a curva de atenuação do sinal em função da espessura da peça, de modo a termos uma intensidade de sinal suficiente mesmo para os furos localizados próximo à face inferior da peça.

Pronto. Agora é só adaptar a curva sobre a tela do aparelho e inspecionar o bloco de aço.

### Localizando as descontinuidades

Agora sim, você já pode acoplar o transdutor sobre a peça, como mostra a figura seguinte.




inspeção da peça com curva de atenuação

Depois, é só movimentar lentamente o transdutor sobre toda a superfície a ser ensaiada, efetuando uma varredura na peça. Essa varredura deve ser feita pelo menos em duas superfícies da peça, pois dependendo da posição da descontinuidade (topo, transversal ou longitudinal) o sinal será maior ou menor.

Qualquer pulso que apareça entre 0 e 8 na tela, acima da curva de atenuação, como no exemplo - $S_3$, será interpretado como defeito pelo operador. Os que ficarem abaixo, como $S_4$, serão apenas descontinuidades.

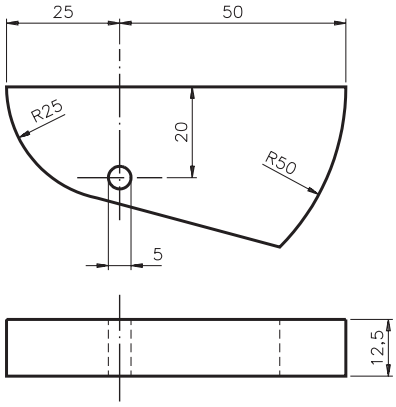
Há situações em que o ensaio com transdutores normais não é possível. É o caso de uma chapa de aço soldada.

A inspeção do cordão de solda é praticamente impossível com os cabeçotes normais já vistos. Por isso, devemos usar cabeçotes angulares, que enviam pulsos em determinados ângulos com a superfície do material, como por exemplo 35°, 45°, 60°, 70°, 80° etc.

## Ensaio com transdutor angular

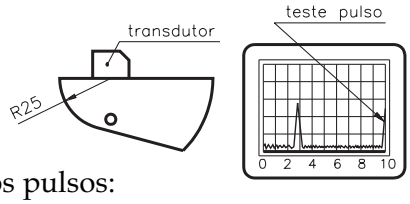
O processo inicial de calibração é semelhante ao realizado para os transdutores normais. Como exemplo, usaremos a escala 0 a 100 mm, com K = 10 mm e transdutor de 60º.

### Calibração




Para essa finalidade, dois blocos-padrão podem ser utilizados: V1 ou V2. Usaremos, neste caso, o bloco V2.

O primeiro procedimento consiste em acoplar o transdutor sobre o bloco-padrão V2, focando o raio de 25 mm.




Ajustando o aparelho, na tela aparecerão os pulsos:
2,5 divisões × K = 25 mm
10 divisões × K = 100 mm

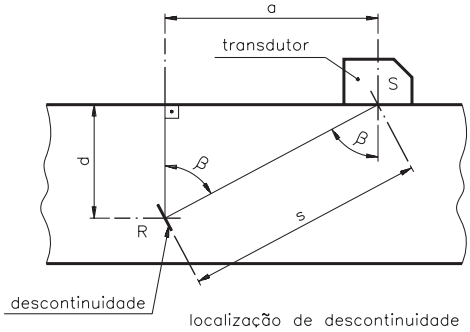
### Localizando as descontinuidades

Após os ajustes necessários no equipamento, é só inspecionar a peça.

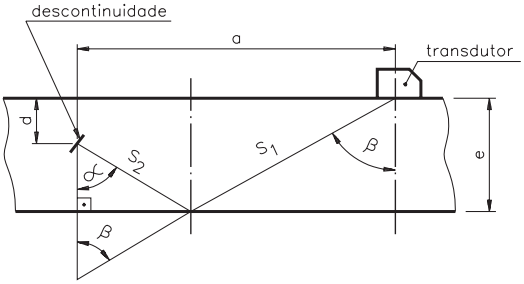
Na tela aparecerá a distância **S** entre o cabeçote e a descontinuidade. A localização é conseguida por meio da trigonometria, aplicando-se as relações para o triângulo retângulo.

No exemplo, β = 60º.

a = sen 60º × S
d = cos 60º × S




localização de descontinuidade com cabeçote angular




localização de descontinuidade – onda refletida

Caso a onda ultra-sônica seja refletida antes de atingir a descontinuidade, adotamos outra forma de cálculo.

$S = S_1 + S_2$

$a = S \cdot \text{sen } 60^o$

$d = 2e - S \cdot \cos 60^o$

Depois, é só efetuar a varredura lentamente, ao longo de todo o cordão de solda.

Apostamos que, com estas informações, você se sairia bem ao realizar a inspeção da peça solicitada, em substituição ao operador que faltou.

Mas, para ficar realmente "afiado", resolva os exercícios a seguir.

## Exercícios

**Exercício 1**

As técnicas de ensaio por ultra-som são denominadas ....., ..... e ..... .

**Exercício 2**

Para ensaiar peças de espessura pequena, nas quais se pretenda encontrar descontinuidades próximas à superfície, a técnica mais recomendada é por ..... .

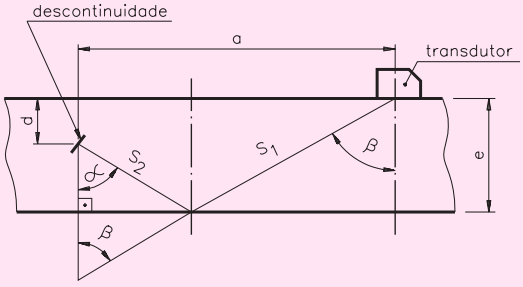
**Exercício 3**

Assinale **V** se a afirmação for verdadeira ou **F**, se for falsa:

**a)** ( ) os transdutores convertem os sinais elétricos emitidos pelo aparelho em ondas ultra-sônicas e vice-versa;
**b)** ( ) um tipo de osciloscópio é utilizado para medir a intensidade do sinal elétrico e o tempo de retorno dos ecos;
**c)** ( ) os transdutores normais são ideais para análise de cordões de solda;
**d)** ( ) o ideal é utilizarmos um bloco V1 confeccionado em aço, para calibrarmos o equipamento para análise de aço, alumínio, cobre e outros materiais.

**Exercício 4**

Localize a descontinuidade para calibração em escala 0-100 mm.




$\beta$ = 60º
$S_1$ = 30 mm
$S_2$ = 16 mm
e = 15 mm

**a)** ( ) a = 23,0 mm e d = 9,8 mm;
**b)** ( ) a = 39,8 mm e d = 7,0 mm;
**c)** ( ) a = 7,0 mm e d = 39,8 mm;
**d)** ( ) a = 25,9 mm e d = 15,0 mm.

**Exercício 5**

Calcule o fator de escala K para tela com 10 divisões e escala de 0 a 200 mm.

**a)** ( ) 2 mm;
**b)** ( ) 10 mm;
**c)** ( ) 15 mm;
**d)** ( ) 20 mm.

AULA

23

# Radiografia industrial

## Introdução

Se você já teve algum tipo de fratura óssea ou pegou uma gripe mais forte, certamente o médico deve ter solicitado uma radiografia da área afetada, para fazer um diagnóstico do seu problema.

Realizada a radiografia, é provável que você tenha observado, junto com o médico, o resultado, apresentado numa chapa radiográfica semelhante ao negativo de uma fotografia.

Pelas diferenças de tonalidade na chapa, ele percebeu várias coisas e até comentou com você, que deve ter ficado meio desconfiado, pois não viu quase nada ou... nada do que ele apontou.

É, a interpretação da radiografia requer conhecimento especializado e prática!

Na indústria, usa-se o mesmo tipo de exame, com o mesmo produto final para análise – a chapa radiográfica – para detectar descontinuidades em materiais. É a **radiografia industrial**, mais um tipo de ensaio não destrutivo que você vai começar a estudar nesta aula.

Mas há um aspecto muito importante: a radiografia industrial trabalha com doses de radiação cerca de dez vezes maiores que as usuais nos ensaios de radiografia clínica! Por aí você já pode imaginar que a segurança é um dos fatores fundamentais na realização deste ensaio.

Só pode agir com segurança quem conhece o assunto. Por isso, vamos começar pelo estudo de alguns conceitos básicos, necessários à compreensão dos ensaios por radiografia, como: em que consiste este ensaio e qual a sua importância; como surgiu; quais os tipos de radiação utilizados, suas características e modos de obtenção.

## Nossa aula

### Ensaio por radiografia

Na radiografia industrial, utilizamos o mesmo princípio da radiografia clínica.

Coloca-se o material a ser ensaiado entre uma fonte emissora de radiação e um filme.

Uma parte dos raios emitidos é absorvida pelo material e a outra parte irá atravessá-lo, sensibilizando o filme e produzindo nele uma imagem do material ensaiado.

Após a revelação, temos uma chapa radiográfica para ser analisada e interpretada por um técnico especializado.

## Por que radiografar?

Imagine as seguintes situações:

- um gasoduto transportando gás combustível a alta pressão entre refinarias, ou mesmo entre equipamentos dentro da refinaria;
- uma caldeira fornecendo vapor a alta pressão em uma indústria ou hospital.

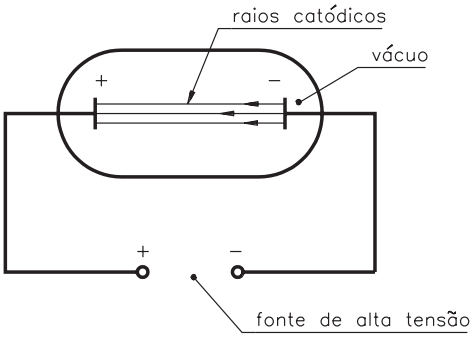
Estes produtos simplesmente não podem falhar e, portanto, não podem ter defeitos!

Mas a construção dos gasodutos, caldeiras, oleodutos etc. é feita basicamente com chapas de aço e solda.

Se uma solda não estiver adequada, não suportará a pressão e apresentará vazamentos, podendo provocar acidentes com conseqüências terríveis. A explosão de uma caldeira, por exemplo, pode fazer desaparecer o prédio onde ela está instalada e tudo mais que estiver na vizinhança.

Para evitar acidentes, precisamos ter certeza de que não há defeitos nesses produtos. Por isso, realizamos os ensaios não destrutivos. Nos casos citados, a radiografia é bastante utilizada - os cordões de solda são totalmente radiografados.

## Tudo começou por acaso...




esquema de geração de raios catódicos

Em 1895, quando o professor Wilhelm K. Röentgen pesquisava a fluorescência causada por **raios catódicos** numa folha de papel recoberta com uma película de sal de bário, ele acidentalmente esqueceu de retirar uma caixa de papelão preto que protegia a ampola de raios catódicos. Ficou surpreso ao perceber que, mesmo assim, ocorria a fluorescência na película de sal de bário.

**Raios catódicos –** São um feixe de elétrons que partem do cátodo, (pólo negativo), acelerados a alta velocidade por uma fonte externa de alta tensão, em direção a um alvo, o ânodo (pólo positivo).

Röentgen concluiu que algum tipo de raio, desconhecido até então, ultrapassava a caixa de papelão atingindo o papel. Ou seja, além dos raios catódicos, a ampola emitia outro tipo de raio. Por ser um raio desconhecido, Röentgen resolveu chamá-lo de **raio X**.

A descoberta dos raios X foi de grande auxílio para diversas pesquisas. Alguns meses mais tarde, outros cientistas divulgaram suas descobertas.

**Metais pesados** – Metais com grande número atômico.

Henri Becquerel, Pierre e Marie Curie constataram a emissão de raios, semelhantes aos raios X, por **metais pesados**, como o urânio, o polônio e o rádio, surgindo daí a denominação **radioatividade**: emissão espontânea de radiação por elementos químicos, naturais ou artificiais. Nos anos que se seguiram, diversos experimentos nucleares levaram à descoberta do raio $\gamma$ (lê-se gama). Esta descoberta deu origem à **gamagrafia**, inspeção por meio de raios gama.

Nos ensaios por radiografia industrial, utilizamos dois tipos de radiação: o raio X e o raio gama.

## Um pouco de onda

Os raios X e os raios gama, assim como a luz, são formas de radiação eletromagnética de natureza ondulatória, isto é, propagam-se em forma de ondas. Possuem alta freqüência e, portanto, pequeno comprimento de onda.

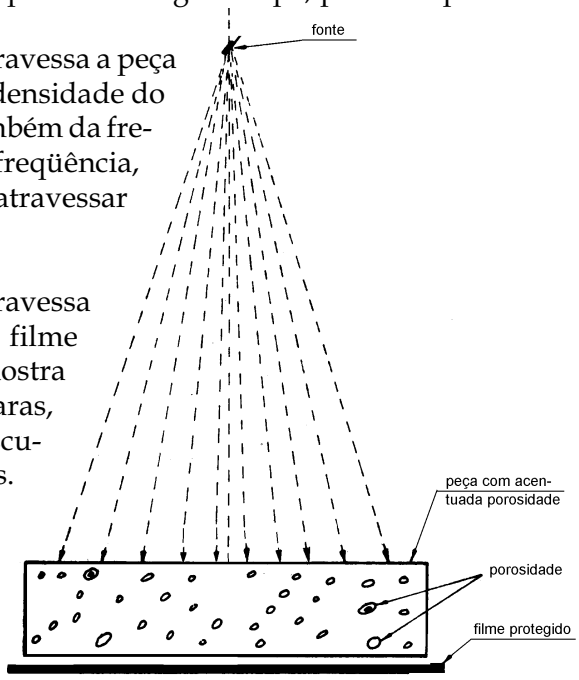
O comprimento de onda desses raios é menor que o da luz visível dos raios ultravioleta e infravermelhos.

espectro de radiações eletromagnéticas

Merece destaque o fato de os raios X e gama poderem atravessar corpos opacos, como metais e concreto, enquanto a luz visível atravessa apenas materiais translúcidos, como o vidro transparente e a água limpa, por exemplo.

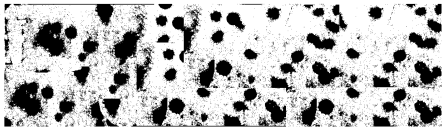
A quantidade de radiação que atravessa a peça é variável e depende da espessura e densidade do material naquele ponto. Depende também da freqüência de radiação – quanto maior a freqüência, maior sua capacidade de penetrar e atravessar os materiais.

Essa variação de radiação que atravessa a peça é captada e registrada em filme radiográfico que, após a revelação, mostra uma imagem da peça com regiões claras, referentes às maiores espessuras, e escuras, referentes às menores espessuras.



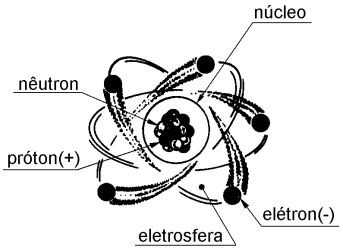

As principais propriedades das radiações X e gama são:

- propagam-se em linha reta, à velocidade da luz (300.000km/s);
- produzem luz em substâncias fluorescentes;
- provocam o escurecimento de filmes fotográficos;


aspecto de um filme radiográfico

– tornam o ar e outros gases condutores de eletricidade;
– são mais absorvidas pelos elementos pesados;
– não são desviadas por campos magnéticos;
– possuem vários comprimentos de onda;
– causam danos às células do corpo humano e modificações genéticas.

## Geração dos raios X



átomo

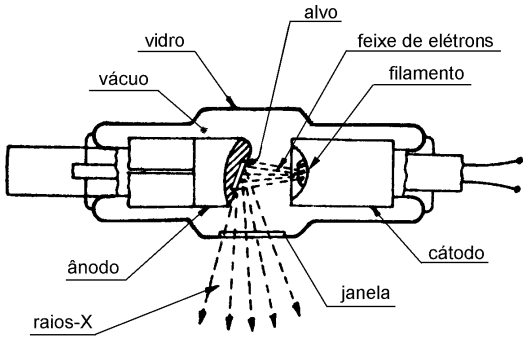
Você deve estar lembrado de que o átomo é constituído do núcleo, com seus prótons e nêutrons, mais a eletrosfera, com seus elétrons.

Os raios X são gerados ao se acelerar, por meio de uma fonte externa de energia, os elétrons de um cátodo. Esses elétrons saem em alta velocidade em direção ao ânodo. Ao colidirem com o ânodo, esses elétrons penetram na eletrosfera do metal do ânodo, causando sua instabilidade, com grande liberação de calor e de ondas eletromagnéticas – **os raios X**.

Um dispositivo usado para gerar raios X é o tubo de Coolidge, que nada mais é do que um tubo de raios catódicos modificado.

Consiste numa ampola de vidro com alto vácuo, que contém um cátodo feito de um filamento aquecido e um ânodo feito de metal duro, com alto ponto de fusão (tungstênio).

As tensões utilizadas na produção de raios X são da ordem de 80.000 a 500.000 Volts (80 a 500 kV).



tubo de Coolidge para raio X

A intensidade dos raios X é determinada pela corrente elétrica que passa pelo filamento. Quanto maior a intensidade da corrente, maior o aquecimento do filamento e maior o número de elétrons que ele libera.

Devido ao aquecimento causado no alvo (ânodo) pelo bombardeamento de elétrons, é necessário refrigerá-lo por aleta ou por circulação de água.

O poder de penetração dos raios X é tanto maior quanto menor for seu comprimento de onda, que é função da tensão que acelera os elétrons do filamento para o alvo.

## Geração dos raios gama

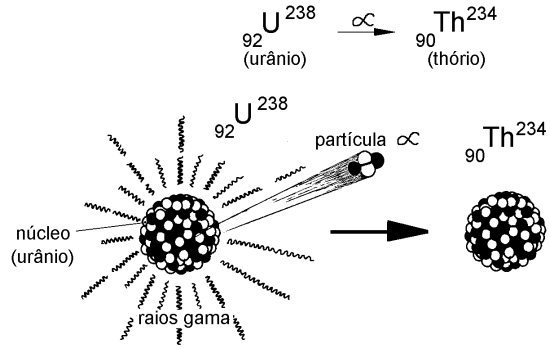
Como já vimos, o núcleo atômico é formado por partículas chamadas prótons e nêutrons. Os elementos químicos são definidos em função do número de prótons presentes no núcleo do átomo.

Entretanto, é possível encontrar átomos do mesmo elemento químico com diferentes quantidades de nêutrons no seu núcleo. Esses elementos são os chamados **isótopos**.

Muitos dos isótopos dos elementos encontrados na natureza são **radioativos**, isto é, emitem **espontaneamente** do núcleo partículas e radiações eletromagnéticas.

O urânio pode apresentar em seu núcleo 92 prótons e 146 nêutrons (o chamado urânio 238 ou U238) – ou 92 prótons e 143 nêutrons (o urânio 235 ou U235). Ele é um exemplo de isótopo radioativo, ou seja, que emite partículas e radiações eletromagnéticas.

As partículas e as radiações eletromagnéticas emitidas pelos isótopos radioativos são de três tipos: alfa ($\alpha$), beta ($\beta$) e gama ($\gamma$).



desintegração do urânio 238 originando thório 234

As partículas alfa são formadas por dois prótons e dois nêutrons. As partículas beta são semelhantes aos elétrons. Esses dois tipos de partículas possuem cargas elétricas e, portanto, podem ser desviadas por campos magnéticos. Além disso, seu alcance é pequeno, limitando-se a poucos centímetros no ar.

Os raios gama, são radiações eletromagnéticas com alto poder de penetração. Por isso essa radiação é usada nos ensaios.

Existem dois tipos de isótopos: os naturais e os artificiais. Os primeiros são encontrados normalmente na natureza. Os artificiais são produzidos nos reatores nucleares bombardeando-se nêutrons nos núcleos dos átomos.

Na gamagrafia utilizam-se isótopos artificiais. Os mais usados são o irídio 192, o césio 137, o túlio 170 e o cobalto 60.

Quando se trabalha com isótopos, um aspecto importante é conhecer a atividade da fonte, que mede a velocidade de desintegração nuclear.

Uma unidade de medida é o becquerel (Bq), que equivale a uma desintegração por segundo. Outra unidade usada é o curie (Ci), que equivale a $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq.

Só para ter uma idéia, saiba que uma fonte de irídio 192 pode ter atividade de até $18{,}5 \times 10^{11}$ Bq. Quanto é isso? Imagine!

Todos os núcleos dos átomos se desintegram da mesma maneira. Portanto, alguns valores devem ser conhecidos como, por exemplo, a "meia-vida" de um isótopo radioativo.

Com as desintegrações nucleares, a atividade da fonte decresce. Para designar o tempo necessário para a atividade da fonte chegar à metade do seu valor inicial, utiliza-se o termo "meia-vida". Esta característica varia para cada isótopo. Veja alguns exemplos:

| ISÓTOPO | MEIA-VIDA |
|---|---|
| Cobalto 60 | 5,3 anos |
| Irídio 192 | 75 dias |
| Césio 137 | 33 anos |

## O filme

O filme para radiografia é semelhante aos filmes comuns. A única diferença é que é recoberto dos dois lados por uma emulsão de sais de prata (brometo de prata – AgBr).

Depois que o filme é exposto à radiação, os grãos dos sais de prata reagem quimicamente em contato com o revelador, transformando-se em prata metálica enegrecida.

É essa prata escurecida que forma a imagem na chapa radiográfica.

O filme radiográfico é escolhido em função do ensaio a ser realizado. Suas características são:

– densidade radiográfica: é o grau de enegrecimento registrado no filme em função da exposição;

– contraste da imagem: é dado pela diferença de densidade entre as regiões do filme;

– velocidade do filme: é a taxa em que ocorre a sensibilização dos grãos de sais de prata. Filmes com grãos maiores necessitam de menor tempo de exposição;

– granulometria: é o tamanho dos grãos nos sais da emulsão. Quanto menores os grãos, maior a nitidez.

## Qualidade e sensibilidade radiográfica

A radiografia de qualidade requer nitidez e definição da imagem. Consegue-se isso controlando o contraste, ou seja, a densidade da imagem. Além disso, é necessário evitar falhas de processamento do filme (arranhões, manchas etc.).

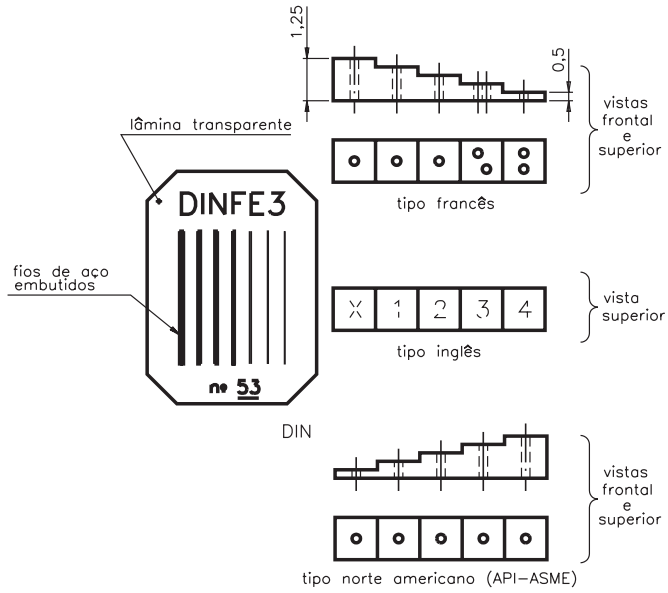
A sensibilidade radiográfica também precisa ser controlada, devendo ser ajustada aos requisitos da inspeção.

O grau de sensibilidade, que pode ser alto, médio ou baixo, é determinado pelo uso a que se destina a peça. Quem faz essa definição é a engenharia de fábrica, segundo normas específicas.

Para controlar a sensibilidade radiográfica, basta colocar **penetrômetros** sobre a face da peça metálica voltada para a fonte de radiação.

Os **penetrômetros** ou indicadores de qualidade de imagem – **IQI** – são dispositivos (lâminas de uma ou várias espessuras, ou fios de diversos diâmetros), colocados em evidência sobre a peça, para verificar a sensibilidade radiográfica, isto é, a nitidez desses dispositivos na radiografia.

Em geral, o IQI deve ter 2% da menor espessura da peça analisada e precisa necessariamente ser visível na radiografia.




tipos de penetrômetros (IQI)

Até aqui você viu que tipos de radiação interessam à radiografia industrial e como podem ser obtidas. Para prosseguir o estudo desse assunto nas próximas aulas, é importante que você verifique o que foi aprendido, resolvendo os exercícios a seguir.

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 1**

As radiações eletromagnéticas se propagam à mesma velocidade:

**a)** ( ) do som;
**b)** ( ) da luz;
**c)** ( ) do ultra-som;
**d)** ( ) do ultravioleta.

**Exercício 2**

Os tipos de radiação eletromagnética utilizados na radiografia industrial são:

**a)** ( ) ultravioleta e infravermelho;
**b)** ( ) microondas e ondas de rádio;
**c)** ( ) raios gama e raios x;
**d)** ( ) raios alfa e raios beta.

**Exercício 3**

Podemos dizer que radiografia é:

**a)** ( ) um filme radiográfico com o resultado do exame impresso;
**b)** ( ) o ato de realizar um ensaio não destrutivo;
**c)** ( ) emissão de radiação X e gama;
**d)** ( ) o dispositivo que bombardeia elétrons no ânodo.

**Exercício 4**

O IQI é usado para:

**a)** ( ) avaliar a densidade do filme radiográfico;
**b)** ( ) medir a atividade radioativa da fonte;
**c)** ( ) avaliar a sensibilidade da imagem obtida na radiografia;
**d)** ( ) melhorar o contraste da imagem no filme.

**Exercício 5**

Escreva **V** se a afirmação for verdadeira, ou **F**, se for falsa:

**a)** ( ) a atividade de uma fonte é a grandeza que mede a velocidade de desintegração dos núcleos atômicos;
**b)** ( ) a emissão de radiação é uma atividade que ocorre devido à instabilização energética do isótopo;
**c)** ( ) em gamagrafia geralmente usamos isótopos naturais;
**d)** ( ) o becquerel é a grandeza que mede as desintegrações nucleares por segundo em um isótopo.

AULA

24

# Ensaio por raios X

## Introdução

Na aula anterior você conheceu os raios X e os raios gama, que são radiações eletromagnéticas, e algumas de suas propriedades.

Nesta aula, estudaremos mais detalhadamente o ensaio por raios X. Você terá uma descrição básica do equipamento, do ensaio e dos cuidados durante a sua realização.

Antes de estudar o ensaio propriamente dito, você ainda precisa conhecer mais algumas características dos elementos envolvidos na radiação, ou seja, fonte, peça e filme radiográfico.

Essas características, assim como os princípios estudados na aula anterior, são comuns às radiações X e gama. As diferenças entre os dois ensaios referem-se principalmente aos aspectos operacionais, como você mesmo poderá constatar depois de estudar os assuntos desta aula e da próxima.

## Nossa aula

### Geometria da exposição

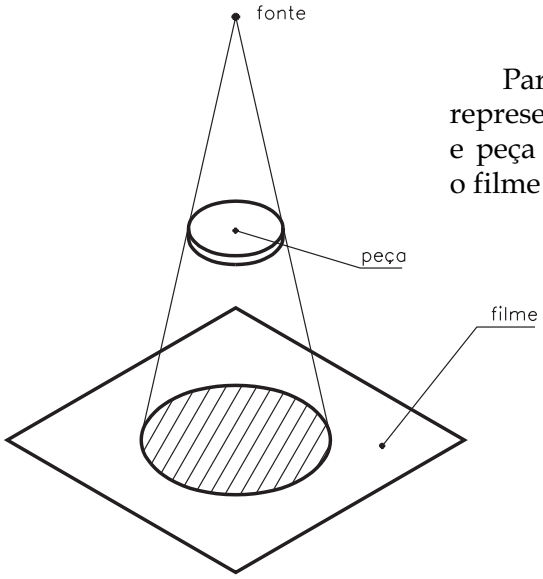
A radiografia é na realidade uma "sombra" da peça, provocada por seu posicionamento na trajetória das radiações X ou gama.

Podemos neste caso utilizar os mesmos princípios geométricos aplicados às sombras produzidas pela luz.

Para compreender o que ocorre e, portanto, obter melhores resultados na radiografia, você deve conhecer a influência da **distância** e da **posição** entre os elementos: fonte de radiação, peça e filme.

Vamos analisar como esses dois fatores afetam a formação da imagem.

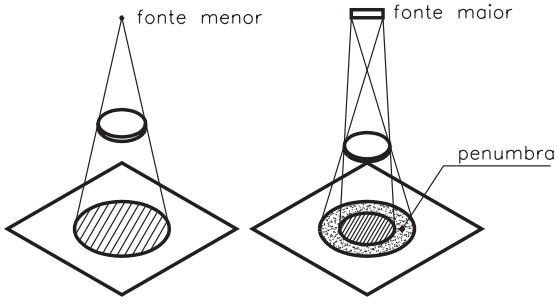
**Ampliação da imagem** – A imagem da peça no filme torna-se maior que a própria peça à medida que aumenta a distância entre a peça e o filme, resultando uma imagem irreal.

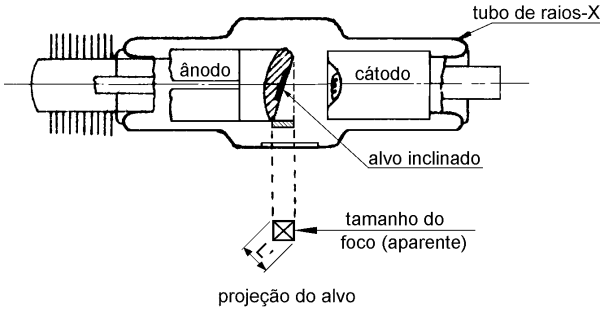



Para que a imagem projetada no filme represente o tamanho real da peça, filme e peça devem estar próximos. Na prática, o filme deve estar em contato com a peça.

A fonte de radiação, pelo contrário, deve ficar o mais afastada possível da peça e do filme, para minimizar o efeito de ampliação da imagem, respeitadas as características do equipamento e da fonte.

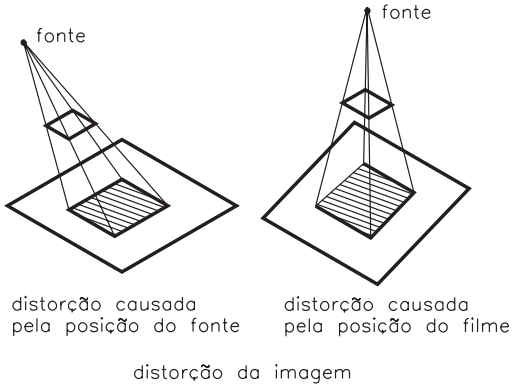
**Nitidez da imagem** – Quanto maiores as dimensões da fonte emissora, menor a nitidez da imagem, devido à formação de uma penumbra na radiografia. Para evitar este problema, deve-se utilizar uma fonte emissora com a menor dimensão possível.




No caso dos raios X, para melhorar a nitidez da imagem o alvo (ânodo) é posicionado num plano inclinado em relação ao filme, de modo a concentrar a radiação emitida.

**Distorção da imagem** – Se houver uma inclinação entre a fonte, a peça e o filme, a imagem resultará distorcida. Para eliminar esta distorção, deve-se colocar a fonte emissora o mais perpendicular possível em relação à base da peça e ao filme.



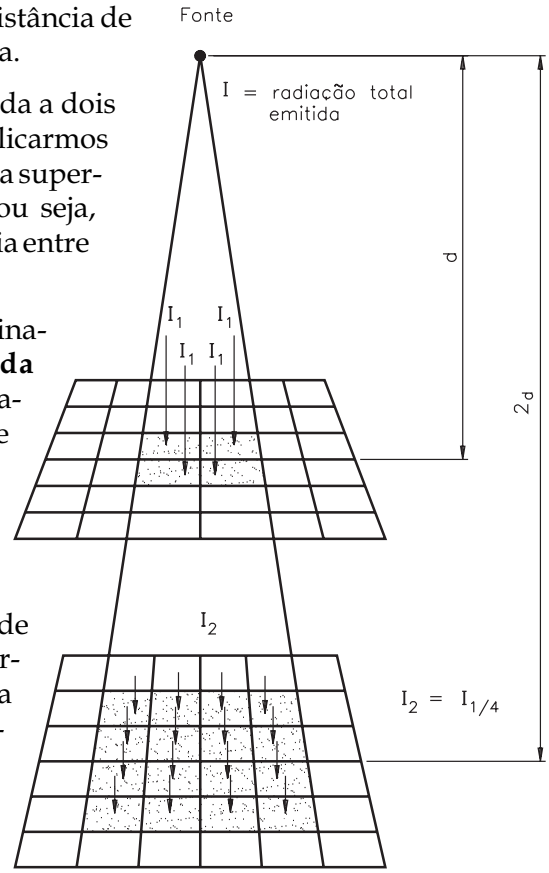
## Lei do inverso do quadrado da distância

Imagine uma lâmpada acesa, à distância de um metro da superfície de uma mesa.

Se elevarmos esta mesma lâmpada a dois metros de altura, isto é, se multiplicarmos a altura por 2, o nível de iluminação na superfície da mesa será dividido por 4, ou seja, dividido por $2^2$ (quadrado da distância entre a fonte de luz e a superfície).

Este fenômeno recebe a denominação de **lei do inverso do quadrado da distância** (no nosso caso, lei da atenuação da radiação). Esta lei também se aplica aos ensaios radiográficos, pois neste caso as radiações emitidas têm propriedades semelhantes às da luz visível.

A intensidade com que um feixe de radiação atinge uma superfície é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre esta superfície e o ponto de emissão, ou seja, a radiação é atenuada em virtude do aumento da distância. Este é outro fator que limita a colocação da fonte distante da peça, para minimizar a **ampliação da imagem**.




**Ionização** é o processo que torna o ar condutor de eletricidade.

**Fique sabendo ...**

Uma das unidades de medida da intensidade de radiação é o Coulomb/kg (C/kg). 1 C/kg é a intensidade de radiação necessária para produzir uma **ionização** equivalente a uma unidade eletrostática de carga, conhecida como **Coulomb**, em um quilograma de ar, à temperatura de 20ºC e à pressão de uma atmosfera.

### Verificando o entendimento

Um tubo de raios X emite uma radiação que atinge a intensidade de 100 µC/kg (micro Coulomb/kg) à distância de 1 m da fonte. Determine a intensidade a 5 m da fonte.

Resposta: .....

E então, conseguiu resolver? Compare sua resolução com as explicações a seguir.

Você sabe que a uma distância $\mathbf{d_1}$ corresponde uma intensidade $\mathbf{I_1}$ e a uma distância $\mathbf{d_2}$ corresponde uma intensidade $\mathbf{I_2}$.

A lei do inverso do quadrado da distância estabelece a seguinte relação matemática:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(d_2)^2}{(d_1)^2}$$

No problema proposto: $\mathbf{d_1}$ = 1 m; $\mathbf{I_1}$ = 100 μC/kg; $\mathbf{d_2}$ = 5 m e $\mathbf{I_2}$ é o valor procurado.

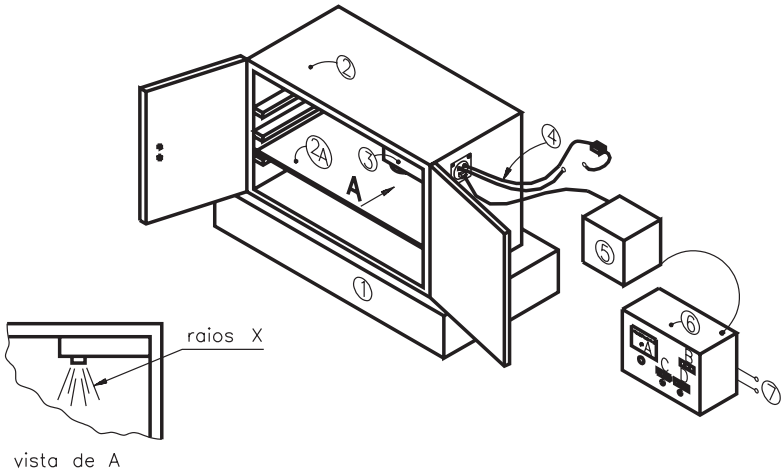
Substituindo as variáveis da fórmula pelos valores conhecidos, você obtém:

$$\frac{100}{I_2} = \frac{5^2}{1^2} \Rightarrow 5^2\ I_2 = 100 \cdot 1^2 \Rightarrow 25\ I_2 = 100 \Rightarrow I_2 = \frac{100}{25} \Rightarrow I_2 = 4\ \mu C/kg$$

Logo, a intensidade da fonte, a 5 metros de distância, será igual a 4 microCoulomb/kg.

## Equipamento para o ensaio de raios X

A ilustração a seguir mostra a configuração básica de um equipamento estacionário de raios X para peças de pequeno porte.




① Base do equipamento, geralmente feita de concreto.

② "Bunker" – Estrutura metálica em aço, com placas de chumbo para impedir o vazamento da radiação para o ambiente.

2A Prateleira regulável para apoio do conjunto a ser ensaiado.

③ Ampola – Tubo de raios X.

④ Sistema de circulação de água para refrigeração do tubo.

⑤ Transformador para alta tensão.

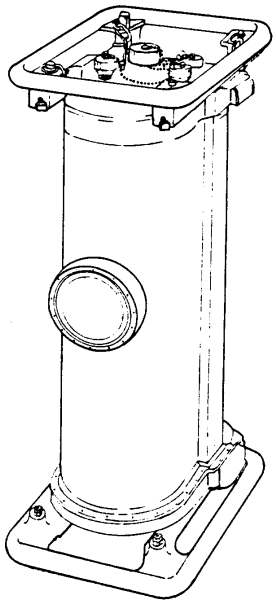
⑥ Sistema de controle do equipamento.
A – Mostrador e seletor de voltagem.
B – Lâmpadas sinalizadoras.
C – Mostrador e seletor do tempo de exposição.
D – Mostrador e seletor de amperagem.

⑦ Alimentação de energia da rede de energia elétrica.

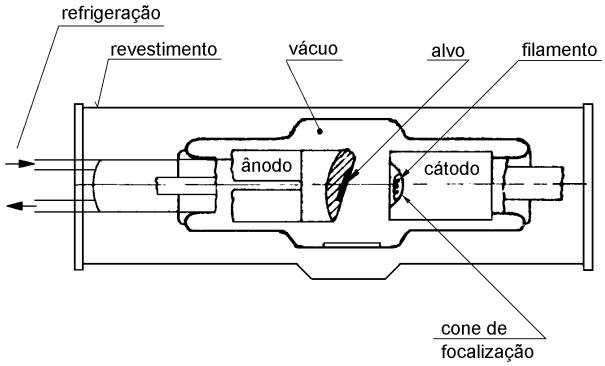
esquema básico do equipamento para raios X

Na aula anterior, você viu que os raios X são produzidos no tubo de Coolidge, que é o coração do equipamento.

Veja agora os principais elementos **do tubo de raios X**.



aspecto externo do tubo




elementos principais do tubo de raios-X

Observe que o **cátodo** é constituído por um **filamento** e pelo **cone de focalização**.

O filamento é feito de tungstênio (metal com alto ponto de fusão), para resistir às altas temperaturas.

O cone de focalização é feito de uma liga de ferro e níquel (Fe-Ni). Ele envolve o filamento com a finalidade de concentrar a emissão do feixe eletrônico numa área restrita do ânodo.

Volte a observar o **ânodo**. O alvo no ânodo é feito de tungstênio, pois este material, além de resistir a temperaturas elevadas, apresenta alta densidade e, portanto, grande número de átomos para colisão.

O **vácuo** existente no interior do tubo tem a função de proteger os elementos contra a oxidação e também de proporcionar isolamento elétrico, para evitar a ocorrência de centelhas entre os eletrodos.

Devido às altas temperaturas envolvidas, há necessidade de um **sistema de refrigeração** para evitar danos aos componentes.

O elemento mais afetado é o ânodo, que recebe o impacto dos elétrons, gerando os raios X e grande quantidade de calor.

Um **fluido refrigerante**, que normalmente é água, circula no interior do ânodo para refrigeração.

O **revestimento**, geralmente feito de chumbo, tem a finalidade de reduzir a intensidade da radiação espalhada. Apresenta apenas uma abertura para a saída dos raios X, na direção desejada.

## Variáveis que afetam a quantidade de raios X emitidos

As principais variáveis que influenciam a quantidade de raios X emitidos são:

**Intensidade da corrente**: A emissão de elétrons é diretamente proporcional à temperatura do filamento que é aquecido pela corrente elétrica. Quanto maior for a corrente, maior será a temperatura do filamento e, portanto, maior a quantidade de elétrons emitidos. A intensidade da corrente é medida em miliampere (milésimo de ampère).

**Diferença de potencial (DDP)**: A diferença de potencial ou **voltagem** é medida em kV (quilovolt). Quanto maior a DDP entre o ânodo e o cátodo, maior a aceleração dos elétrons, causando maior impacto no ânodo e gerando raios X com maior energia, ou seja, com maior poder de penetração e, conseqüentemente, pequeno comprimento de onda.

## Determinação do tempo de exposição

A **exposição** ou **quantidade de radiação recebida** é diretamente proporcional à miliamperagem e à voltagem aplicada ao tubo de Coolidge.

Uma vez fixados esses dois fatores, o **tempo de exposição** é outro parâmetro que influi na sensibilização do filme. Quanto maior o tempo, maior a sensibilização.
Portanto, é fundamental determinar o tempo de exposição.

Para determinar o tempo de exposição, utilizam-se as **curvas de exposição** fornecidas pelo fabricante do equipamento. Cada equipamento possui sua curva específica.

Para entender melhor esse assunto, você precisa conhecer um pouco mais sobre os filmes radiográficos.

Na aula anterior, vimos que as principais características dos filmes são: densidade radiográfica, contraste da imagem, velocidade do filme e granulometria. Se você não estiver lembrado, consulte novamente a Aula 23.

De acordo com essas características, os filmes radiográficos são classificados em quatro tipos:

| TIPO DE FILME | VELOCIDADE | CONTRASTE | GRANULAÇÃO |
|---|---|---|---|
| 1 | baixa | muito alto | extra fina |
| 2 | média | alto | fina |
| 3 | alta | médio | grosseira |
| 4 | muito alta | muito alto | várias |

A seleção do filme radiográfico para uma dada aplicação é um compromisso entre a qualidade requerida dessa radiografia e seu custo, incluindo-se aí o tempo de exposição. Para facilitar a escolha, os fabricantes fornecem as curvas características de cada tipo de filme.

A norma da **American Society for Testing and Materials** – ASTM E94 relaciona o tipo de filme com a espessura da peça e com a voltagem a ser utilizada no ensaio. O quadro a seguir mostra um extrato dessa norma, desenvolvido para o aço.

| GUIA PARA SELEÇÃO DE FILMES DE ACORDO COM **ASTM E94** - PARA AÇO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ESPESSURA DO MATERIAL | VOLTAGEM APLICADA NO EQUIPAMENTO **(kV)** | | | | |
| **(mm)** | **50 a 80** | **80 a 120** | **120 a 150** | **150 a 250** | **250 a 400** |
| 0 a 6,3 | 3 | 3 | 3 | 1 | |
| 6,3 a 12,7 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 12,7 a 25,4 | | 4 | 3 | 2 | 2 |
| 25,4 a 50,8 | | | | 3 | 2 |
| 50,8 a 101,6 | | | | 4 | 4 |
| 101,6 a 203,2 | | | | | 4 |

## Telas intensificadoras de imagem (écrans)

Para dar maior nitidez às radiografias e diminuir o tempo de exposição, usam-se as **telas intensificadoras**, conhecidas por **écrans**.

Estas telas evitam que as radiações que ultrapassam o filme reflitam de volta para este, prejudicando a nitidez da radiografia, além de favorecer uma maior absorção de radiação pelo filme.

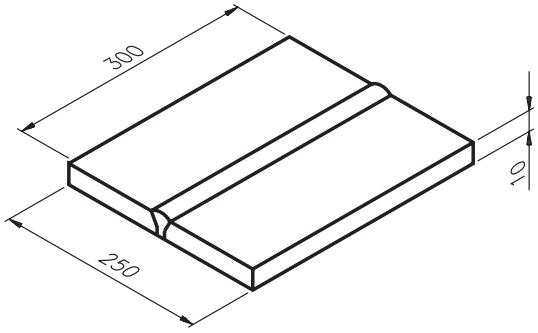
Alguns écrans utilizados são cartões recobertos com película fina de chumbo, da ordem de centésimo de milímetro.

Se os assuntos tratados até aqui ficaram suficientemente claros, você já tem condições de acompanhar a realização de um ensaio por raios X. Se ainda não se sentir seguro, estude novamente a aula anterior e os tópicos precedentes desta aula, até sentir que as dúvidas ficaram esclarecidas. Depois, que tal partir para a execução do ensaio?

## Ensaio de solda por raios X

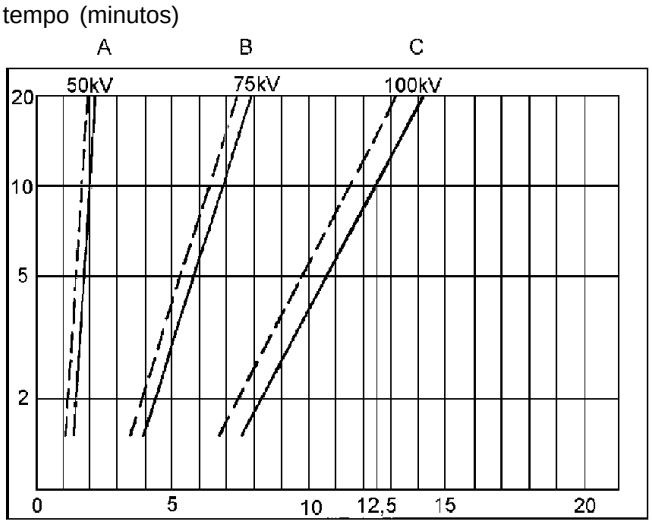
No início da aula anterior, você ficou sabendo que uma das utilizações da radiografia industrial é na inspeção de solda. Para conhecer o processo como um todo, veja como é feita esta inspeção.

Observe a peça a seguir, uma chapa de aço soldada.




Para ensaiar esta peça, será utilizado um equipamento com capacidade de até 100 kV e 15 mA.

Analise a curva de **tempo de exposição** fornecida para este equipamento.




Material: aço
Filme tipo: 3
Corrente no tubo: 15 mA
Dif.: 700 mm (distância filme/foco)
Densidade resultante: { 2,0 ____ / 2,2 ____
Tela intensificadora: 0,02 mm frente e verso
Revelação: 5 min, a 20ºC

espessura (mm)

**exemplo de curvas de tempo de exposição**

A espessura do material a ser ensaiado é conhecida (10 mm). No caso, vamos adicionar 2,5 mm a essa espessura, devido ao reforço do cordão de solda. O gráfico mostra que para esta espessura deve ser tomada como base a curva C (para 100 kV). Ligando ao eixo do tempo o ponto em que a linha da espessura (12,5 mm) cruza com a curva C, constatamos que o tempo de exposição deve ser de 10 minutos. Outras informações obtidas são:

– filme de alta velocidade e médio contraste;

– intensidade de corrente no tubo de 15 mA;

– distância filme/foco (**dff**) de 700 mm;

– densidade radiográfica a ser obtida entre 2,0 e 2,2;

– espessura do écran de 0,02 mm – frente e verso.

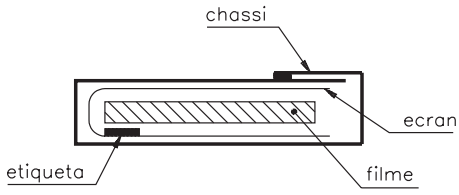
– tempo de revelação - 5 minutos com banho à 20ºC.

Dessa forma, para nossa chapa de aço com 12,5 mm de espessura total, obtemos, além dos parâmetros anteriores: voltagem de 100 kV e tempo de exposição de 10 minutos.

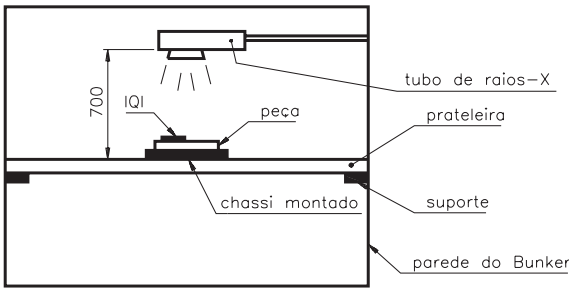
## Preparação do ensaio

Antes de submeter a peça soldada à radiação, é necessário preparar o equipamento que será utilizado. Veja, a seguir, as principais etapas desta preparação.

**1.** Montar o **chassi-suporte** tipo envelope para blindar à luz o conjunto formado pela etiqueta de identificação da radiografia, o filme e o écran. Essa montagem é realizada em câmara escura.



2. Montar o sistema no **bunker**, que é o local onde fica alojado o tubo de raio X e onde se coloca o conjunto formado pela peça e o chassi montado, que serão submetidos a radiação. O bunker pode ser feito de estrutura metálica revestida com camada de chumbo, como no nosso exemplo, ou por paredes de concreto, que geralmente são construções para peças maiores.




Nessa montagem colocamos ainda o IQI sobre a peça soldada para verificar a qualidade da radiografia.

3. Fechar a porta do bunker, pois somente assim o equipamento pode ser acionado, devido ao sistema de segurança, evitando a exposição dos operadores e meio-ambiente à radiação.

4. Regular o equipamento no painel de controle, ajustando o tempo (10 minutos), a voltagem (100 kV) e a amperagem (15 mA).

## O ensaio

Agora que o equipamento está pronto para ser acionado, os próximos passos são:

1. Acionar o sistema de segurança, (visual e/ou sonoro) para garantir que durante o ensaio, os níveis de radiação estejam dentro dos padrões de segurança exigidos pelas normas vigentes.

2. Ligar a refrigeração do tubo, dar o **start**, isto é, ligar o equipamento e aguardar o tempo estipulado.

3. Decorrido o tempo determinado, desligar a máquina e retirar o chassi do bunker.

4. Processar o filme (revelação). A revelação, realizada em câmara escura, consiste em submeter o filme a um processamento químico, a fim de revelar e fixar a imagem obtida na chapa radiográfica.

5. Verificação da qualidade da radiografia. A análise da radiografia é realizada num **negatoscópio** para melhor visualização.

**Negatoscópio**: dispositivo constituído por uma caixa com vidro fosco, tendo no interior lâmpadas fluorescentes.

Nesta etapa, deve-se analisar as seguintes características:

- Densidade radiográfica: se atende aos requisitos especificados em norma técnica. A densidade é medida por densitômetros.
- Nitidez da imagem do IQI: a imagem do penetrômetro na radiografia deve estar visível, obedecendo aos requisitos especificados em norma técnica.
- Existência de arranhões, manchas etc., que invalidam o resultado do exame radiográfico.

Se os itens anteriores forem atendidos, poderemos passar à análise da radiografia, com o objetivo de identificar possíveis descontinuidades.

Para isso, deve-se compará-la com padrões radiográficos estabelecidos em norma técnica.

A última etapa é emitir o **laudo** do ensaio, isto é, o documento que contém o parecer técnico sobre as condições da solda. A radiografia é então arquivada, para possíveis consultas futuras.

Peça ensaiada, resultado pronto. Uma boa medida agora é resolver os exercícios a seguir, para verificar se os assuntos apresentados foram assimilados.

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 1**

Para reduzir o problema de ampliação da imagem da peça radiografada nos filmes radiográficos, devemos:

**a)** ( ) usar fontes de radiação de tamanho pequeno;
**b)** ( ) colocar o filme afastado da peça a ser radiografada;
**c)** ( ) colocar a peça a ser radiograda encostada no filme;
**d)** ( ) colocar a fonte de radiação encostada na peça.

**Exercício 2**

Para evitar a distorção da imagem da peça radiografada no filme radiográfico, a fonte de radiação:

**a)** ( ) deve ser de tamanho pequeno;
**b)** ( ) deve estar perpendicular à base da peça e ao filme;
**c)** ( ) deve emitir pouca intensidade de radiação;
**d)** ( ) deve estar inclinada em relação à peça e ao filme.

**Exercício 3**

Uma fonte de radiação, distante 50 cm de uma peça, emite um feixe de raios X que atinge a peça com intensidade de 30 μC/kg. Aplicando a **lei do inverso do quadrado da distância**, indique que intensidade de radiação atingirá a peça se a fonte for colocada a 70 cm de distância.

**a)** ( ) 15,31 μC/kg;
**b)** ( ) 1,43 μC/kg;
**c)** ( ) 5,88 μC/kg;
**d)** ( ) 29,4 μC/kg.

**Exercício 4**

Escreva **V** se a frase for verdadeira ou **F** se for falsa:

**a)** ( ) as telas intensificadoras aumentam o tempo de exposição;
**b)** ( ) as regiões mais claras da radiografia possuem maior densidade;
**c)** ( ) contraste radiográfico é a diferença de densidade entre regiões de uma radiografia;
**d)** ( ) a quantidade de raios X emitida por uma fonte é afetada pela miliamperagem selecionada no equipamento;
**e)** ( ) o comprimento de onda dos raios X é influenciado pela DDP entre ânodo e cátodo no tubo de Coolidge.

**Exercício 5**

Analise novamente a **curva de tempo de exposição** apresentada no texto e escreva os parâmetros para análise de uma solda em chapa de aço com 5 mm de espessura total, no equipamento com capacidade para 100 kV e 15 mA.

**a)** tipo de filme: .....
**b)** corrente no tubo: .....
**c)** voltagem .....
**d)** dff = .....
**e)** tempo de exposição: .....

AULA

25

# Ensaio por raios gama

## Introdução

Na aula anterior, você aprendeu a fazer ensaio por raios X numa chapa soldada. Constatou que durante a realização do ensaio **aparentemente** nada acontece, porque as radiações emitidas não são visíveis.

É justamente isso que torna as radiações mais perigosas: não podemos vê-las e não as sentimos. Porém, dependendo da dose e tempo de exposição, seus efeitos prejudiciais à saúde não tardam a aparecer.

Quanto menor o comprimento de onda, mais perigosas para a saúde são as radiações correspondentes. E se você voltar a analisar o espectro das radiações eletromagnéticas, apresentado na Aula 23 deste módulo, verá que as radiações X e gama podem apresentar comprimentos de onda muito pequenos.

Nesta aula, você conhecerá o equipamento utilizado no ensaio por raios gama e ficará sabendo quais são os procedimentos para a realização desse ensaio.

E como a **segurança** é um aspecto fundamental nos ensaios por radiografia industrial, esta aula abordará também os cuidados voltados para a proteção e segurança de todos os envolvidos nos trabalhos em que há emissão de radiações eletromagnéticas.

## Nossa aula

### Relembrando alguns conceitos

Nas aulas anteriores sobre radiografia industrial, você ficou sabendo que:

- Os raios gama são ondas eletromagnéticas originadas por isótopos instáveis (radioativos).
- Na radiografia industrial, utilizam-se **isótopos artificiais**. Os mais usados são: cobalto 60, irídio 192, césio 137 e túlio 170.
- Uma das unidades que mede a atividade de uma fonte é o becquerel (Bq), que equivale a uma desintegração por segundo. Usa-se também o curie (Ci). Um **Ci** equivale a 37 bilhões de desintegrações por segundo.

- Com as desintegrações, há um decaimento da atividade do isótopo. **Meia-vida** de um isótopo é o tempo necessário para a atividade da fonte chegar à metade do seu valor inicial.

| ISÓTOPO | MEIA-VIDA |
|---|---|
| Cobalto 60 | 5,3 anos |
| Irídio 192 | 75 dias |
| Tulio 170 | 127 dias |
| Césio 137 | 33 anos |

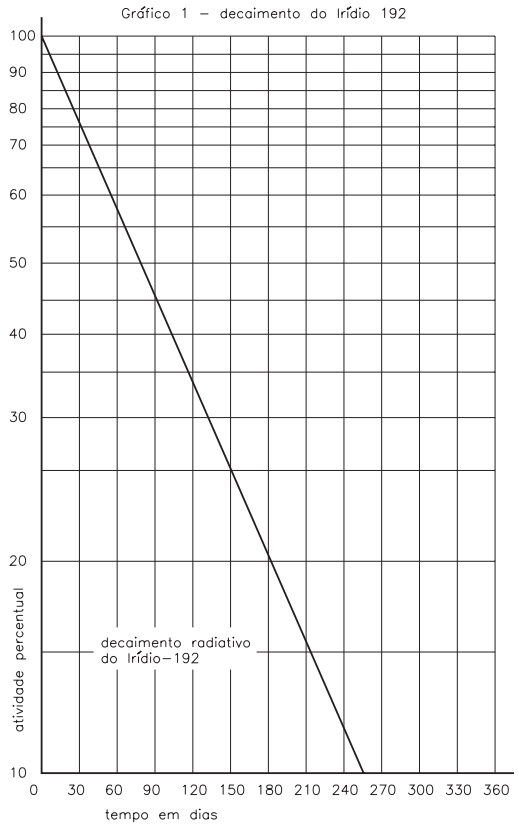
## É importante saber que...

É necessário levar em conta o decaimento da atividade do isótopo, pois isso afeta as condições do ensaio.

Imagine, por exemplo, que você radiografou hoje uma solda, com boa qualidade e nitidez, utilizando uma fonte nova (máxima radiação) de irídio 192, com tempo de exposição de 6 minutos.

Se daqui a 30 dias você tiver que radiografar o mesmo tipo de peça, o que você deve fazer? É necessário manter as mesmas condições do ensaio anterior. E você sabe que a meia-vida do Irídio 192 é de 75 dias. Logo, após 30 dias, sua fonte terá reduzida a intensidade de emissão e, para compensar, o tempo de exposição deverá ser maior.

Analise o gráfico a seguir, que mostra o decaimento radioativo do Irídio 192.



O gráfico mostra que, em 30 dias, a emissão da fonte cai de 100% para 75%. Portanto, para descobrir qual o tempo de exposição após 30 dias, usando a mesma fonte, basta estabelecer uma relação inversamente proporcional pois, com a diminuição da emissão da fonte, o tempo deve ser aumentado. Então:

$$\downarrow \frac{100\ \%}{75\ \%} \uparrow \frac{6\ \text{min.}}{t\ \text{min.}} \Rightarrow \frac{100\ \%}{75\ \%} = \frac{t\ \text{min.}}{6\ \text{min.}} \Rightarrow t = \frac{100 \times 6}{75} \Rightarrow t = 8\ \text{minutos}$$

Portanto, para radiografar o mesmo tipo de peça 30 dias depois, o tempo de exposição deverá ser ajustado para 8 minutos.

## Comparando os ensaios por raios X e raios gama

No equipamento para raios X é possível gerar ondas eletromagnéticas com diversos comprimentos de onda, ajustando-se a tensão aplicada ao equipamento.

Já os isótopos emitem radiações gama características do elemento emissor, isto é, cada isótopo tem sua emissão específica quanto à quantidade de energia e ao comprimento de onda.

A quantidade de energia emitida por um isótopo radioativo é medida em eletrovolt (eV).

**1 eV** é a energia adquirida por um elétron quando acelerado em uma diferença de potencial (DDP) de 1 Volt.

No caso dos raios X, a emissão de radiação cessa quando se desliga o equipamento. A fonte de raios gama, pelo contrário, emite radiações continuamente e por isso deve ser guardada numa blindagem.

Não é necessário empregar energia elétrica para gerar raios gama. Portanto, eles podem ser usados em locais remotos, até mesmo onde não haja energia elétrica.

Os equipamentos para gamagrafia são mais simples, têm menor custo inicial e requerem menor manutenção, comparados aos de raios X.

Em geral, a gamagrafia pode ser empregada em qualquer atividade industrial em que se use os raios X. Além disso, a gamagrafia pode ser utilizada em locais e condições em que os raios X não sejam acessíveis.

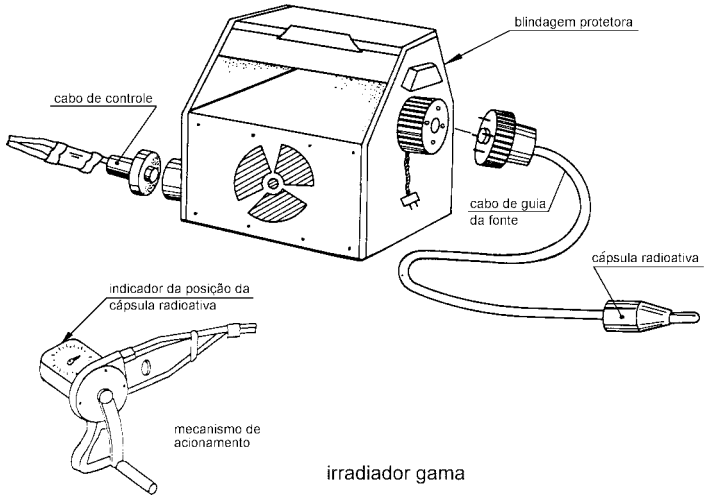
A tabela a seguir mostra a equivalência entre raios X e raios gama. Esta tabela serve como referência para a escolha do isótopo, em função da espessura da peça a ser ensaiada e das características do equipamento utilizado.

| ISÓTOPO | ENERGIA Rg γ MeV (*) | EQUIVALÊNCIA RX | PENETRAÇÃO PARA AÇO (mm) |
|---|---|---|---|
| Co 60 | 1,17 e 1,33 | 2000 kV | 60 a 205 |
| Cs 137 | 0,66 | 500 kV | 20 a 80 |
| Ir 192 | 0,46 – 0,61 | 400 kV | 10 a 40 |
| Tm 170 | 0,084 | 100 kV | 3 a 10 |

(*) MeV = megaeletrovolt

## Equipamento para o ensaio por raios gama

A figura a seguir mostra a configuração simplificada de um equipamento irradiador de raios gama.



irradiador gama

As três partes básicas que compõem os irradiadores são: **blindagem**, **mangote** e **comandos**.

A **blindagem** serve para absorver a radiação emitida continuamente pela fonte, mantendo a parte externa em padrões aceitáveis, determinados em normas internacionais. É geralmente fabricada de chumbo ou **urânio exaurido**, com estrutura externa em aço inoxidável.

**Urânio exaurido** é o urânio que perdeu a capacidade de emitir partículas radioativas, tornando-se um átomo estável.

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

Os **comandos** permitem o acionamento e o controle da fonte. O controle pode ser elétrico, pneumático ou, como é mais comum, manual. Por meio desses acionamentos, leva-se a fonte radioativa para fora da blindagem, pelo mangote, expondo-a no local a ser realizado o ensaio. Após o tempo de exposição, a fonte é recolhida novamente à blindagem.

### Preparando o ensaio

Os procedimentos para a gamagrafia são semelhantes aos dos raios X. Para que você possa entendê-los melhor, vamos imaginar o ensaio de uma chapa de aço soldada de topo, com as seguintes dimensões: 300 mm x 250 mm x 20 mm (espessura). Considerando o reforço no cordão de solda, a nossa espessura total será de 25 mm.

Antes de realizar o ensaio, são necessárias algumas atividades preparatórias. A primeira é determinar o **tempo de exposição**.

O tempo de exposição é determinado por um gráfico específico para cada isótopo. Este gráfico correlaciona o **fator de exposição** (FE) com a **espessura da peça** e a **densidade radiográfica** a ser obtida, fixando alguns parâmetros, como o tipo de filme, a tela intensificadora e as condições de revelação.

Entre os isótopos radioativos, o irídio, por ser metálico, pode ser fornecido em forma de pastilha, enquanto que o césio só é fornecido em pó. Isso faz com que a preferência recaia sobre o irídio, quando comparado ao césio, pois em caso de acidente com a fonte, o risco de contaminação pelo pó é muito maior. Para o nosso ensaio, o isótopo escolhido será o **irídio 192**.

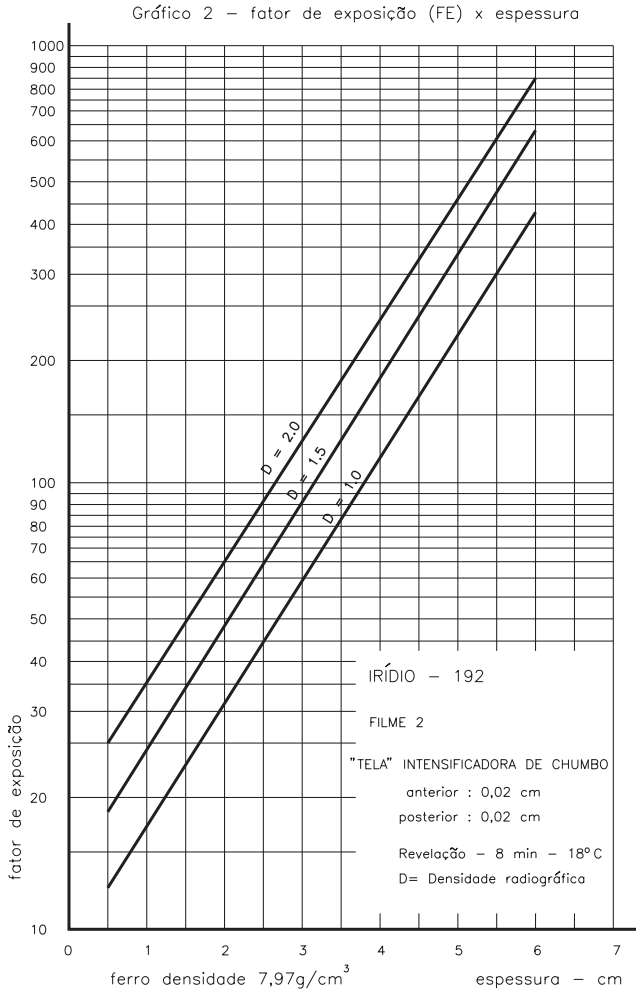
Você está lembrado que a proximidade entre a fonte e o filme produz distorções na imagem e pode causar também penumbra na chapa e que, por outro lado, o aumento da distância diminui a intensidade da fonte? Levando em consideração esses fatores, nossa fonte será colocada a **70 cm** do filme (dff), distância que tem permitido bons resultados na prática.

Os melhores índices de nitidez na chapa são obtidos com densidades variando entre 1,5 e 3,5. O mais usual é determinar a densidade entre 2,0 e 2,5. No nosso caso, a densidade radiográfica escolhida é 2,0.

Toda fonte tem uma documentação que a acompanha desde a sua produção. No nosso exemplo, a documentação informa que a fonte está com 75 dias. Uma vez que a fonte de irídio 192 tem atividade inicial de 20.000 mCi (miliCurie), é necessário determinar a atividade atual da fonte.

Volte a analisar o **Gráfico 1**. Você vai verificar que a fonte com 75 dias tem 50% de sua atividade inicial. Portanto, a emissão da nossa fonte é de 10.000 mCi.

Observe agora o **Gráfico 2** a seguir, que correlaciona o fator de exposição à espessura da peça. Analise a curva referente à densidade (D) igual a 2,0. Cruzando a espessura da peça mais o cordão de solda (25 mm) com o fator de exposição, constatamos que o valor do fator de exposição é 90.



O fator de exposição (FE) é obtido pela seguinte fórmula $FE = \frac{A \times t}{d^2}$, na qual:

– **A** é a atividade da fonte em milicurie (mCi)
– **t** é o tempo de exposição em minutos (min) e
– **d** é a distância fonte-filme (dff) em centímetros (cm)

Mas o que nos interessa saber é o tempo de exposição. Para descobri-lo, devemos isolar o **t** na fórmula anterior, como segue:

$$t = \frac{FE \times d^2}{A} \Rightarrow t = \frac{90 \times (70)^2}{10.000} \Rightarrow t = 44 \text{ min } 6 \text{ seg}$$

Portanto, no nosso exemplo o tempo de exposição será de 44 minutos e 6 segundos.

Outra providência importante, no caso de ensaio por raios gama em campo, é determinar a **distância de balizamento**, ou seja, a distância mínima permissível para a execução do ensaio, sem acarretar riscos para a população local e para os trabalhadores. O local é isolado com cordas e cartazes claros, com o símbolo normalizado e dizeres alertando sobre **perigo** e **radiação**. É terminantemente proibida a circulação de pessoas no local durante o ensaio.

O cálculo desta distância, feito em função de normas específicas, possibilita demarcar o local do ensaio e isolar a área de risco, a fim de que ninguém se exponha à radiação.

No nosso caso, de acordo com as normas específicas, vamos supor que o ensaio seja feito em um bunker de metal (aço e chumbo) ou de concreto, não sendo necessária a preocupação com a distância de balizamento.

**Finalmente o ensaio**

Definidos todos os parâmetros, passamos à montagem do ensaio, seguindo os mesmos procedimentos já vistos para o ensaio de raios X:

- Montar o chassi (filme, tela intensificadora e etiqueta em câmara escura).
- Colocar a peça, o chassi montado, o IQI e o irradiador na posição correta.
- Acionar o sistema de segurança (sinalização sonora e/ou luminosa).
- Acionar os comandos do equipamento para iniciar a exposição pelo tempo calculado.
- Recolher a fonte e o irradiador.
- Revelar o filme.
- Analisar o filme no negatoscópio.

Estes procedimentos já foram vistos na aula anterior, com relação aos raios X, lembra-se?

A análise da radiografia, requer conhecimentos específicos e muita prática.

Para ter uma idéia, veja o aspecto de uma radiografia de elementos soldados.

Aspectos da radiografia por raios gama

Após a análise, emite-se o laudo técnico e arquiva-se a radiografia.

E, para finalizar, estude com atenção o próximo tópico, que trata de um assunto de interesse geral: a proteção contra as radiações eletromagnéticas.

## Proteção radiológica

Você já sabe que os raios X e gama causam danos às células do corpo humano e modificações genéticas. É importante saber quais são esses danos e conhecer as medidas básicas de segurança para evitá-los.

Os danos causados pelas radiações vão desde queimaduras da epiderme a alterações no sistema sanguíneo, câncer e alterações no código genético das células.

Hoje os fenômenos radioativos já são bem conhecidos, o que tornou possível estabelecer procedimentos e normas que tornam seguro o uso da radiografia industrial.

No Brasil, o órgão responsável pela determinação e execução da política de radioproteção é a **Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN**.

Dose de radiação é a quantidade de radiação recebida ao longo do tempo. A **dose máxima permissível**, isto é, a quantidade de radiação aceitável, tanto para o trabalhador como para a população em geral, foi estabelecida pelas **Normas Internacionais de Proteção Radiológica**.

Os órgãos competentes estabelecem as doses máximas de radiação que um profissional da área pode receber semanalmente, em função da exposição do corpo inteiro ou de algumas de suas partes.

Como a dosagem é acumulativa e necessita de rigoroso controle, cada pessoa que trabalha com equipamento que emita radiações deve portar, obrigatoriamente, um **dosímetro pessoal**, que permite constatar e controlar a exposição ao longo do tempo.

**Dosímetro pessoal** é um detetor individual de bolso, que mede as doses de radiação recebidas durante o dia de trabalho.

Esses trabalhadores são submetidos a exames médicos regulares, e o dosímetro pessoal é analisado, periodicamente, por órgãos especializados.

Considerando uma dada intensidade da radiação, seus efeitos são mais acentuados quanto maior o tempo de exposição.

Isso é o mesmo que ocorre com as radiações emitidas pelo Sol: se você se expuser ao sol alguns minutos todos os dias, certamente não lhe acontecerá nada prejudicial. Por outro lado, se resolver ficar tomando sol na praia num dia típico de verão, das 7 às 17 horas, com certeza os efeitos serão notados imediatamente.

Em outras palavras: as doses de radiação estão sempre relacionadas com o tempo de exposição.

Além do tempo de exposição, a proteção radiológica é realizada em função de mais dois outros fatores: blindagem e distância em relação à fonte.

As fontes de radiação são confinadas em locais apropriados, de forma a garantir níveis aceitáveis de radiação no ambiente.

Você já sabe que a intensidade da radiação diminui na proporção inversa do quadrado da distância. Na radiografia de campo, a **distância de balizamento** deve ser rigorosamente respeitada.

Em recintos fechados, ou com equipamentos estacionários, o local onde a peça será exposta a radiação deve ser confinado e blindado com chapas de chumbo (**bunker**), a fim de preservar níveis aceitáveis de radiação no ambiente.

Para finalizar nosso estudo sobre **END**, vale reforçar a idéia de que um ensaio não exclui o outro e sim o complementa. Por isso, quando for necessário detectar descontinuidades de peças, é importante ter bem claros os pontos positivos e as limitações dos métodos existentes.

O quadro apresentado a seguir vai ajudá-lo a fazer uma síntese comparativa das vantagens e desvantagens dos métodos estudados neste módulo. Analise-o com atenção e depois resolva os exercícios sugeridos. Desejamos que seus estudos tenham um *happy END*.

| COMPARAÇÃO DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS | | | |
|---|---|---|---|
| EXAME RADIOGRÁFICO | EXAME POR LÍQUIDO PENETRANTE | EXAME POR PARTÍCULA MAGNÉTICA | EXAME POR ULTRA-SOM |
| Custo relativamente alto. | Baixo custo. | Baixo custo. | Custo relativamente alto. |
| Difícil utilização. | Fácil utilização. | Em alguns casos, é de fácil utilização. | Fácil utilização. |
| Detecta descontinuidade interna no material. | Detecta apenas descontinuidades na superfície do material. | Detecta apenas descontinuidades superficiais ou próximas à superfície. | Detecta descontinuidades internas no material. |
| Não requer preparo da superfície. | Exige superfície previamente preparada. | Exige superfície previamente preparada. | Exige superfície previamente preparada. |
| Permite registro permanente das falhas encontradas. | Dificuldade no registro das falhas encontradas. | É difícil manter um registro das falhas encontradas. | Não é possível manter um registro das falhas encontradas. |
| Pode ser aplicado em qualquer material. | Não pode ser aplicado em materiais porosos. | Só pode ser aplicado em materiais ferromagnéticos. | Dificuldade de aplicação em alguns materiais. |
| O tempo envolvido no exame é relativamente longo. | Rapidez na execução do exame. | Rapidez na execução do exame. | Rapidez na execução do exame. |
| Requer grau de conhecimento maior na execução e interpretação dos resultados. | Não requer grande conhecimento para sua execução e para a interpretação dos resultados. | Não requer grande nível de conhecimento para sua execução e para a interpretação dos resultados. | Requer elevado grau de conhecimento para sua execução e para a análise dos resultados. |
| Não detecta descontinuidades planas perpendiculares à direção da radiação. | Detecta qualquer tipo de descontinuidade, desde que seja aberta à superfície. | Detecta apenas descontinuidades perpendiculares às linhas de força do campo magnético. | Não detecta descontinuidades paralelas à direção do feixe sônico. |
| Exige medidas de segurança rígidas na sua execução. | Não requer medidas especiais de segurança. | Não requer medidas especiais de segurança. | Não requer medidas especiais de segurança. |

## Exercícios

Marque com um X a resposta correta:

**Exercício 1**

A proteção radiológica baseia-se em:

**a)** ( ) foco, fonte, filme;
**b)** ( ) distância da fonte, tempo de exposição, blindagem;
**c)** ( ) distância da peça à fonte, tempo de exposição da peça, blindagem;
**d)** ( ) energia emitida, tempo transcorrido, local de exposição.

**Exercício 2**

Assinale **V** se a afirmação for verdadeira ou **F** se for falsa:

**a)** ( ) para um equipamento colocado em recinto fechado, o conjunto fonte, peça e filme deve estar em bunker blindado;
**b)** ( ) o efeito da radiação no corpo humano não é acumulativo;
**c)** ( ) a fonte de raios X emite radiação continuamente, enquanto a radiação de raios gama cessa quando se desliga a fonte;
**d)** ( ) na gamagrafia em campo, a determinação da distância de balizamento é muito importante.

**Exercício 3**

Consulte o Gráfico 1 e diga qual é a atividade inicial de uma fonte de irídio 192 após 60 dias.

**a)** ( ) 100%;
**b)** ( ) 78%;
**c)** ( ) 57%;
**d)** ( ) 50%.

**Exercício 4**

Os irradiadores gama podem ser divididos em três partes básicas, quanto à função. São elas:

**a)** ( ) blindagem, mangote e comandos;
**b)** ( ) blindagem, indicador de posição, cabo de controle;
**c)** ( ) cápsula radioativa, mangote, indicador de posição;
**d)** ( ) indicador de posição, comandos, fonte.

**Exercício 5**

Qual o tempo de exposição para ensaiar uma peça soldada com 30 mm de espessura total?
Consulte o Gráfico 2 desta aula. São dados:
dff = 80 cm
fonte: Ir 192 com 20.000 mCi
densidade = 1

**a)** ( ) 15 min 20 seg;
**b)** ( ) 19 min 12 seg;
**c)** ( ) 22 min 05 seg;
**d)** ( ) 10 min 10 seg.

# Bibliografia


ABENDE. **Curso básico de ultra-som**. São Paulo, s/d.

ABENDE. **Líquidos penetrantes** (apostila). São Paulo, s/d.

ABENDE. **Partículas magnéticas** (apostila). São Paulo, s/d.

ABENDE. **Programa de formação de inspetores em ensaios não destrutivos**. São Paulo, s/d.

ASM. **Nondestructive evaluation and quality control**. Metals Handbook. 1992. Vol. 17.

ABM. **Ensaios não destrutivos**. São Paulo, 1988.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2 ed. São Paulo, McGraw Hill, 1986. Vol. I, II e III.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM. **Inspetor de soldagem**. Vol. 1, s/i.

HIGGINS, R. A. P**ropriedades e estruturas dos materiais em engenharia**. Trad. Joel R. Teodósio. São Paulo. DIFEL, 1982.

SENAI DR/RJ. **Curso de formação de inspetor de exames não destrutivos por radiografia**. Rio de Janeiro, 1988.

SENAI/DN. **Ensaio de materiais por ultra-som**. Curso desenvolvido pela empresa Krautkrämer (Alemanha). Trad. Amilton Carvalhal. Revisão técnica: Haroldo Courel Filho, Rio de Janeiro, 1995.

SENAI/SP DMD. **Ensaios tecnológicos**. Dario do Amaral Filho e outros. 3 ed. São Paulo, 1990, 37 p. (Ciências II, 8).

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaios mecênicos de materiais metálicos**. 5 ed. Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo, IPT.

# Gabaritos das aulas 1 a 25

## Aula 1 - Ensaiar é preciso!

**1.** **a)** não acarreta
**b)** física
**c)** química
**d)** mecânica

**2.** Elasticidade

**3.**

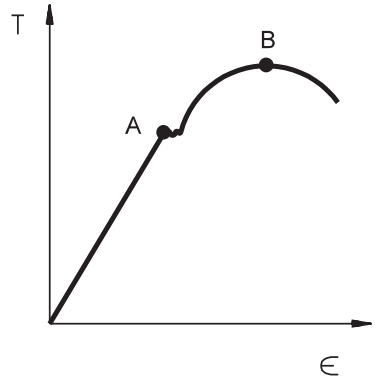
| | |
|---|---|
| Ensaio por ultra-som | **2** |
| Ensaio visual | **2** |
| Ensaio de tração | **1** |
| Ensaio por lima | **1** |
| Ensaio de dureza | **1** |

## Aula 2 - Ensaio de tração: cálculo da tensão

**1.** a, d
**2.** d
**3.** 6,66%
**4.** 1,224 kgf/mm$^2$
**5.** 56,0 MPa

## Aula 3 - Ensaio de tração: propriedades mecânicas avaliadas

**1.**



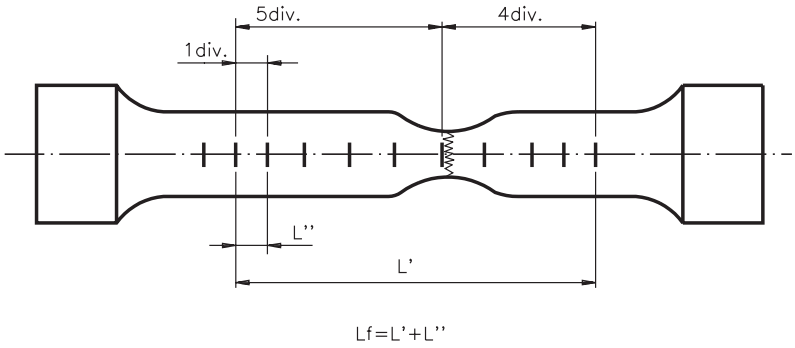

**2.** A
**3.** B
**4.** c
**5.** b

## Aula 4 - Ensaio de tração: procedimentos normalizados

**1.** V
**2.** b
**3.** a
**4.** c
**5.** c

## Aula 5 - Ensaio de tração: análise dos resultados

**1.**




**2.** O limite elástico, pois esta é a força máxima que o corpo suporta sem se deformar plasticamente.
**3.** b
**4.** V
**5.** b

## Aula 6 - Ensaio de compressão

**1.** a
**2.** d
**3.** c
**4.** b
**5.** 1.600 MPa

## Aula 7 - Ensaio de cisalhamento

**1.** escorregamento
**2.** cortante ou de cisalhamento
**3.** universal de ensaios
**4.** 353,85 MPa
**5.** 5,11 mm

## Aula 8 - Dobramento e flexão

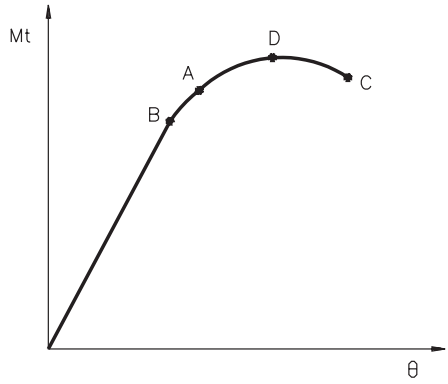
**1.** d
**2.** c
**3.** a
**4.** c
**5.** **a)** 20,38 MPa
**b)** 20382,165 MPa

## Aula 9 - Ensaio de embutimento

**1.** b
**2.** c

3. a
4. b
5. d

## Aula 10 - Ensaio de torção

1. 200 Nm
2. 

3. c
4. c
5. Devem ser consideradas corretas as respostas que incluírem eixos de máquinas, barras de torção, partes rotativas de motores etc.

## Aula 11 - Dureza Brinell

1. d
2. c
3. Aços e ferros fundidos
4. 69HB 2,5/62,5/30
5. 107HB 2,5/62,5/15

## Aula 12 - Dureza Rockwell

1. a, c
2. b
3. a
4. **a)** Rockwell superficial
   **b)** diamante
   **c)** cone de 120º
   **d)** 45 kgf
   **e)** preta
5. 1,87 mm

## Aula 13 - Dureza Vickers

1. c
2. **a)** Vickers normal
   **b)** 5 kgf
   **c)** de 10 a 15 segundos
3. a
4. b
5. 349 HV5

## Aula 14 - Ensaio de fluência

1. **a)** V
   **b)** F

**c)** V
**d)** F

**2.** d
**3.** c
**4.** a
**5.** b

## Aula 15 - Ensaio de fadiga

**1.** b
**2.** a
**3.** a
**4.** d
**5.** b

## Aula 16 - Ensaio de impacto

**1.** d
**2.** d
**3.** c
**4.** b
**5.** c

## Aula 17 - Impacto a baixas temperaturas

**1.** b
**2.** c
**3.** d
**4.** Presença de impurezas, grãos grosseiros, encruamento.
**5.** -10ºC. Esta temperatura define a condição de fratura 70% dúctil e 30% frágil, que é a temperatura de início da transição de fratura dúctil para frágil.

## Aula 18 - Ensaios visuais

**1.** c
**2.** a
**3.** d
**4.** b
**5.** b

## Aula 19 - Líquidos penetrantes

**1.** d
**2.** b
**3.** a
**4.** As afirmações **a** e **d** estão corretas.
**5.** Escrever pelo menos quatro dos itens da página 140.

## Aula 20 - Partículas magnéticas

**1.** b
**2.** três
**3.** c
**4.** **a)** 4
**b)** 3
**c)** 2
**d)** 1
**e)** 5

**5.** A resposta correta encontra-se no quadro da página 149.

## Aula 21 - Ultra-som

**1.** mecânicas e eletromagnéticas/transversais e longitudinais
**2.** ultra-som
**3.** longitudinal/transversal
**4.** propagação/material
**5.** deformam-se/corrente
**6.** normais e angulares/monocristal e duplocristal

## Aula 22 - Realizando o ensaio de ultra-som

**1.** por trasparência, por pulso-eco, por duplo cristal e por cabeçote angular.
**2.** duplo cristal
**3.** V, V, F, F
**4.** b
**5.** d

## Aula 23 - Radiografia industrial

**1.** b
**2.** c
**3.** a
**4.** c
**5.** **a)** V
**b)** V
**c)** F
**d)** V

## Aula 24 - Ensaio por raios X

**1.** c
**2.** b
**3.** a
**4.** **a)** F
**b)** F
**c)** V
**d)** V
**e)** V
**5.** **a)** 3
**b)** 15 mA
**c)** 75 kV
**d)** 700 mm
**e)** 3 minutos

## Aula 25 - Ensaio por raios gama

**1.** b
**2.** **a)** V
**b)** F
**c)** F
**d)** V
**3.** c
**4.** a
**5.** b