

Laboratório de Resistência dos Materiais

20 de setembro de 2006

O curso de Laboratório de Resistência dos Materiais está dividido em 3 partes:

1. **Ensaio em materiais metálicos.** Faz-se aqui uma série de ensaios, preferencialmente em aço, buscando avaliar suas propriedades mecânicas. São estes os ensaios:
 - Ensaio de tração
 - Ensaio de compressão
 - Ensaio de dobramento e flexão
 - Ensaio de cisalhamento
 - Ensaio de dureza Brinell, Rockwell e Vickers.
 - Ensaio de impacto com pêndulo Charpy
2. **Ensaio em madeira.** Estuda-se aqui o comportamento mecânico da madeira submetida a diversas situações de carregamento. Faz-se os ensaios:
 - Ensaio de tração
 - Ensaio de flexão
 - Ensaio de impacto
3. **Extensometria elétrica de resistência.** Nesta parte é introduzida a medição de deformações via extensômetros elétricos de resistência - “*strain-gages*”. Faz-se os ensaios:
 - Ensaio de tração
 - Ensaio de flexão

Parte I

Ensaio em materiais metálicos

O material utilizado nesta parte do curso foi extraído do livro: Resistência dos Materiais - R. C. Ribbeler e da apostila extraída da Biblioteca Virtual da USP, dos autores Ivan Cozaciuc, Luís Rodrigues da Silva e Marcos Antonio Togni.

Ensaiai 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.

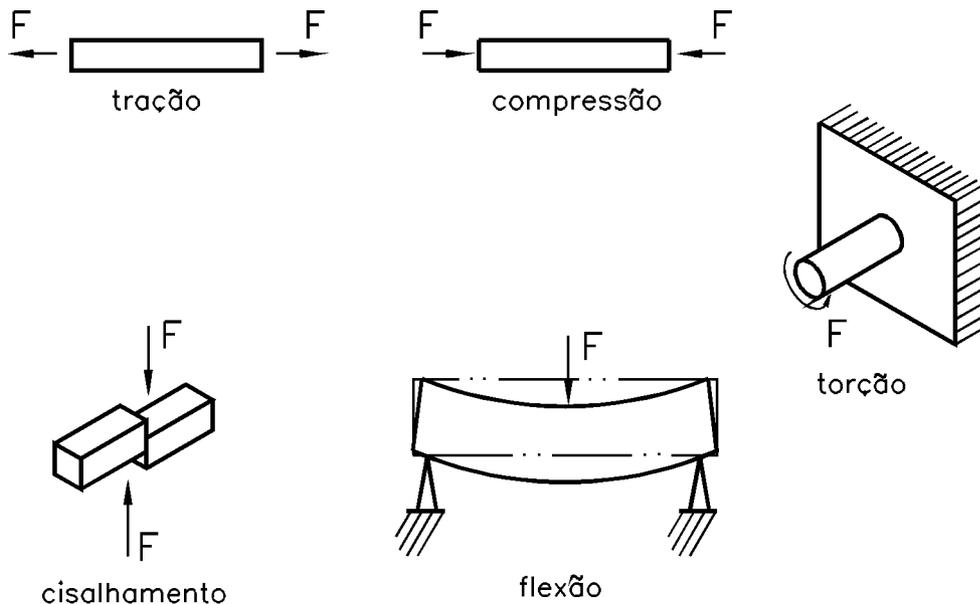
Que propriedades são essas, que podem ser verificadas nos ensaios? É possível que você já tenha analisado algumas delas ao estudar o módulo **Materiais** ou mesmo em outra oportunidade.

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.

Nossa aula

Onde são feitos os ensaios

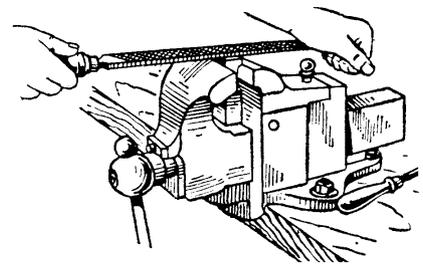
Os ensaios podem ser realizados na própria oficina ou em ambientes especialmente equipados para essa finalidade: os laboratórios de ensaios.



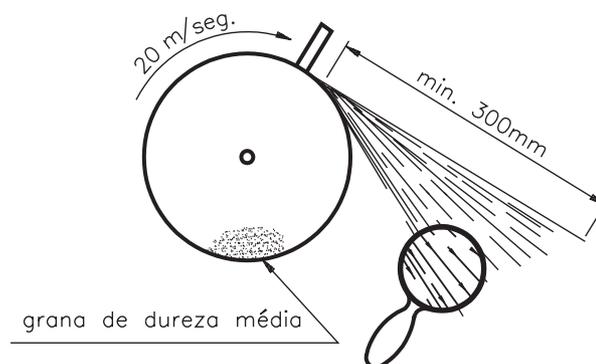
Os ensaios fornecem resultados gerais, que são aplicados a diversos casos, e devem poder ser repetidos em qualquer local que apresente as condições adequadas.

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.

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.

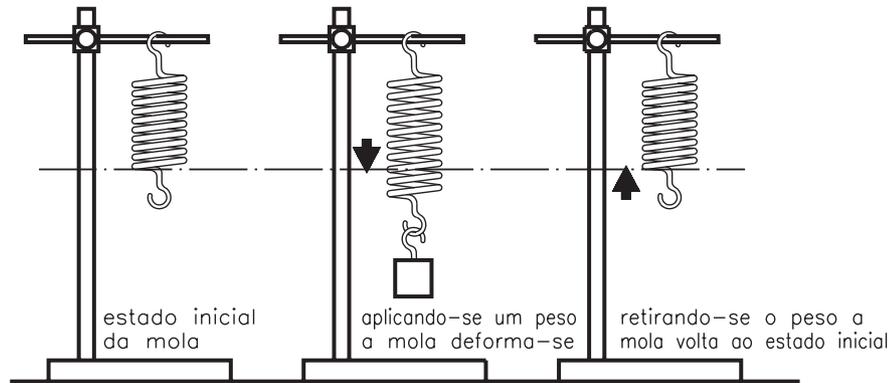
Entre as propriedades físicas, destacam-se as **propriedades mecânicas**, que se referem à forma como os materiais reagem aos esforços externos, apresentando deformação ou ruptura.

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.

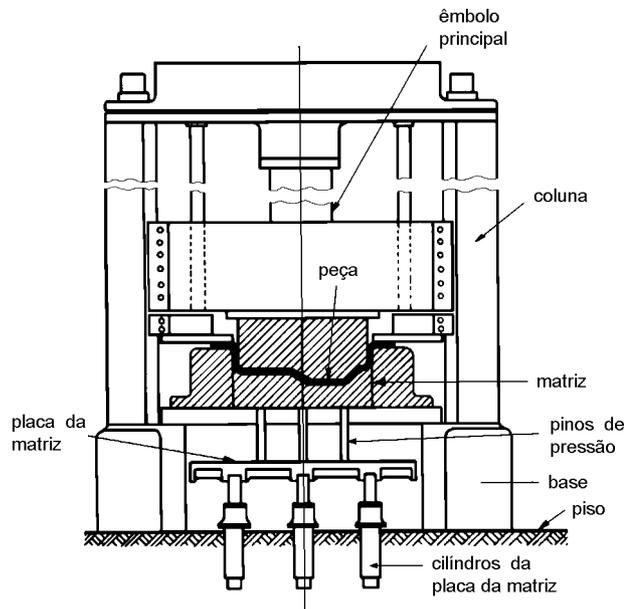
Protótipo é a versão preliminar de um produto, produzida em pequena quantidade, e utilizada durante a fase de testes.

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

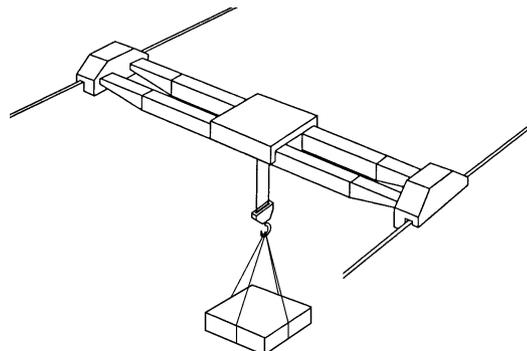
A **elasticidade** é um exemplo de propriedade mecânica. Pode ser definida como a capacidade que um material tem de retornar à sua forma e dimensões originais quando cessa o esforço que o deformava.



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.

Ensaio destrutivo 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

Ensaio não destrutivo são aqueles que após sua realização não deixam nenhuma marca ou sinal e, por consequência, 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	



Ensaio de tração: cálculo da tensão

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!

Introdução

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. Ficarás 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!

Para que servem os ensaios de tração

Nossa aula

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

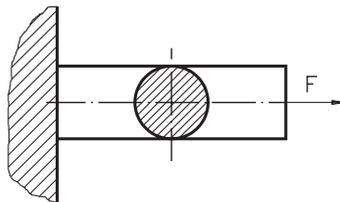
O corpo de prova é preferencialmente utilizado quando o resultado do ensaio precisa ser comparado com especificações de normas internacionais.

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.

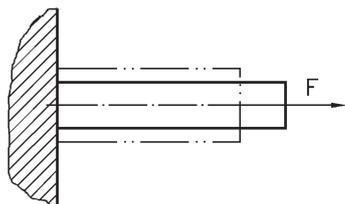


Antes da ruptura, a deformação



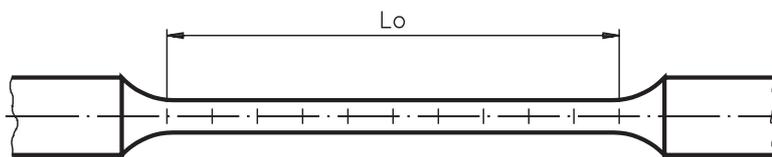
Imagine um corpo preso numa das extremidades, submetido a uma força, como na ilustração ao lado. Quando esta força é aplicada na direção do **eixo longitudinal**, dizemos que se trata de uma **força axial**. Ao mesmo tempo, a força axial é perpendicular à seção transversal do corpo.

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**.

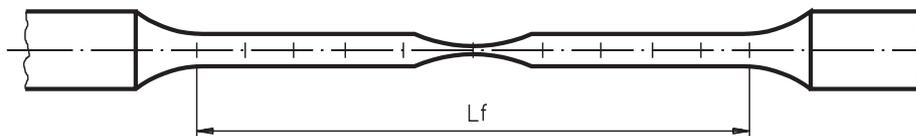


A aplicação de uma força axial de tração num corpo preso produz uma **deformação** no corpo, isto é, um aumento no seu comprimento com diminuição da área da seção transversal.

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:

$$A = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

sendo que L_0 representa o comprimento inicial antes do ensaio e L_f 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:

$$A = \frac{L_f - L_0}{L_0} \Rightarrow A = \frac{13,2 - 12}{12} \Rightarrow A = \frac{1,2}{12} = 0,1 \text{ mm/mm}$$

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

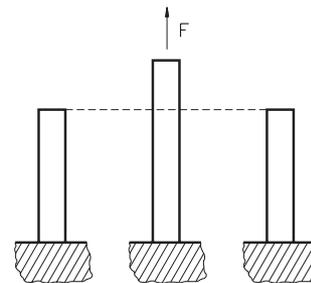
Escreva na forma percentual o valor da deformação correspondente a 0,2 cm/cm.

Resposta:

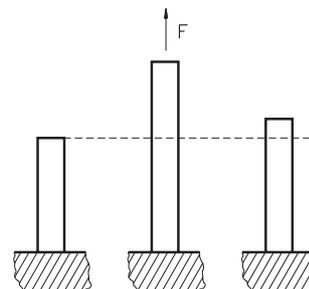
A resposta correta é 20%. Você deve ter chegado a este valor multiplicando 0,2 por 100.

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

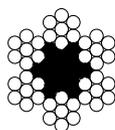
A força de tração atua sobre a área da seção transversal do material. Tem-se assim uma relação entre essa força aplicada e a área do material que está sendo exigida, denominada **tensão**. Neste módulo, a tensão será representada pela letra **T**.

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 $132,73 \text{ mm}^2$, composto por 42 espiras de $1,2 \text{ mm}^2$, tem como área útil $50,4 \text{ mm}^2$.

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 frequentemente 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/mm ²	= 0,102 kgf/mm ²	
1 kgf/mm ²	= 1422,27 psi	= 9,807 MPa	= 9,807 N/mm ²

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/mm², 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:
 $\text{kgf/mm}^2 \rightarrow$ se $1 \text{ MPa} = 0,102 \text{ kgf/mm}^2$, então: $20 \text{ MPa} = 2,04 \text{ kgf/mm}^2$

e para:

$\text{psi} \rightarrow$ se $1 \text{ kgf/mm}^2 = 1422,27 \text{ psi}$, então $2,04 \text{ kgf/mm}^2 = 2901,4308 \text{ psi}$

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 mm^2 de seção, sabendo que o material estará exposto a uma força de 40 N.

Simple, não é mesmo? Sabendo qual a força aplicada ($F = 40 \text{ N}$) e qual a área da seção do tirante ($S = 4 \text{ mm}^2$), basta aplicar a fórmula:

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

Portanto, a tensão que o cabo deverá suportar é de 10 N/mm^2 . 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).

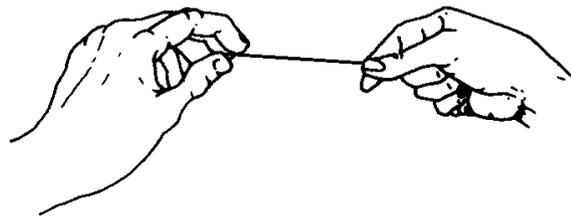


Ensaio de tração: propriedades mecânicas avaliadas

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!

Diagrama tensão-deformação

Nossa aula

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 (S_0).

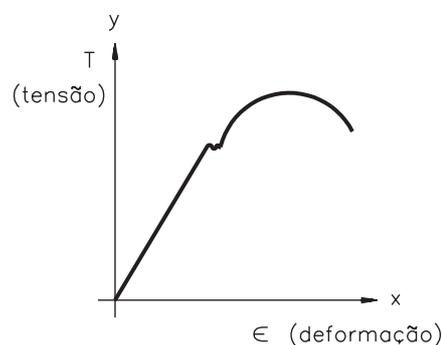
Assim, aplicando a fórmula $T = \frac{F}{S_0}$,

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).

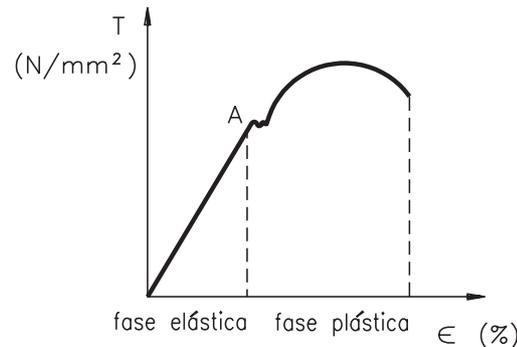
A curva resultante apresenta certas características que são comuns a diversos tipos de materiais usados na área da Mecânica.



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 (ϵ) proporcional à tensão aplicada (T), desenvolvendo assim a constante da mola (K), ou lei de Hooke, onde $K = T/\epsilon$.

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**.

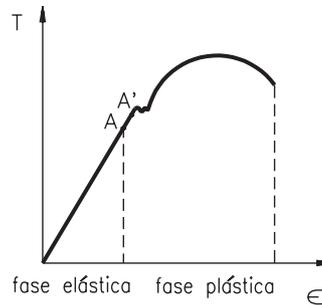
A expressão matemática dessa relação é: $E = \frac{T}{\epsilon}$, onde E é a constante que representa o **módulo de elasticidade**.

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.

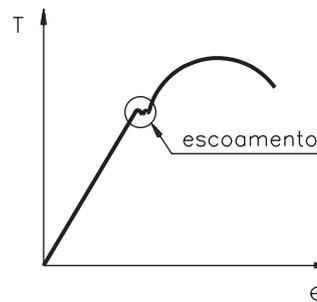
Na prática, considera-se que o limite de proporcionalidade e o limite de elasticidade são coincidentes.



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.

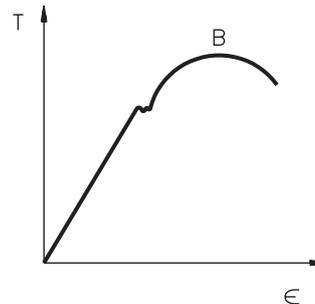
No início da fase plástica ocorre um fenômeno chamado **escoamento**. O escoamento caracteriza-se por uma deformação permanente do material sem que haja aumento de carga, mas com aumento da velocidade de deformação. Durante o escoamento a carga oscila entre valores muito próximos uns dos outros.



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).



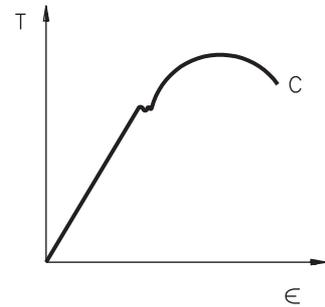
Para calcular o valor do limite de resistência (LR), basta aplicar a fórmula:

$$LR = \frac{F_{\max}}{S_0}$$

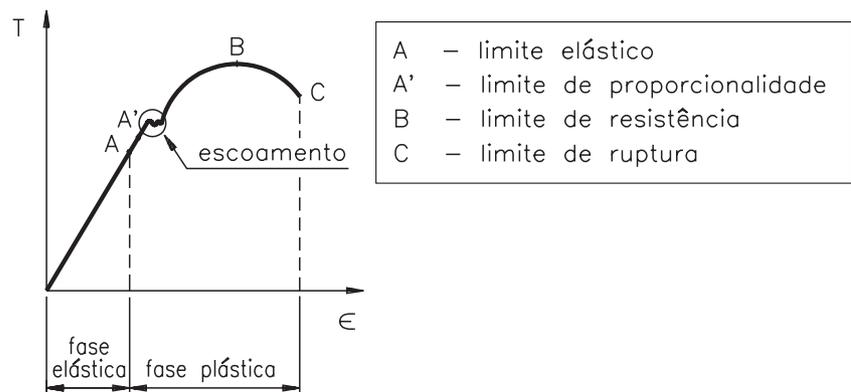
Limite de ruptura

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.

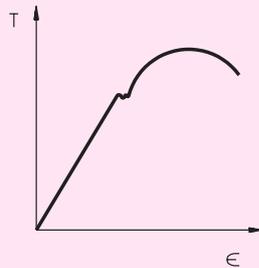
Por ora é suficiente. Que tal descansar um pouco para assentar as idéias e depois retomar o estudo resolvendo os exercícios propostos a seguir? Se tiver alguma dificuldade, faça uma revisão dos assuntos tratados nesta aula antes de prosseguir.

Exercícios

Exercício 1

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

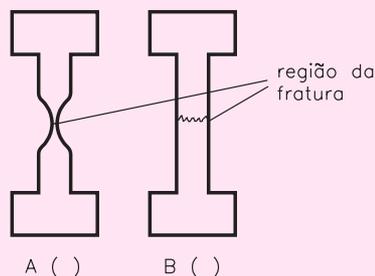
- o ponto A, que representa o limite de elasticidade
- o ponto B, que representa o limite de resistência



Marque com um X a resposta correta.

Exercício 2

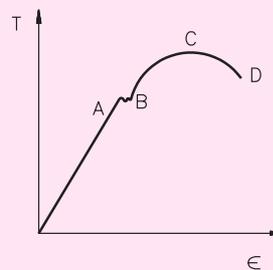
Compare as regiões das fraturas dos corpos de prova A e B, apresentados a seguir. Depois responda: qual corpo de prova representa material dúctil?



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 $LR = \frac{F_{max}}{S_0}$ permite calcular:

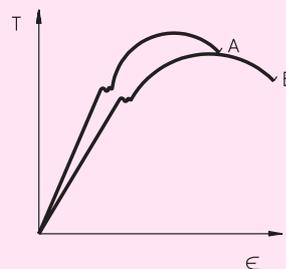
- a) () o limite de escoamento;
 b) () a estrição;
 c) () o limite de resistência;
 d) () o limite de ruptura.

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 ()



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, painéis 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 reproduzíveis onde quer que o ensaio seja executado.

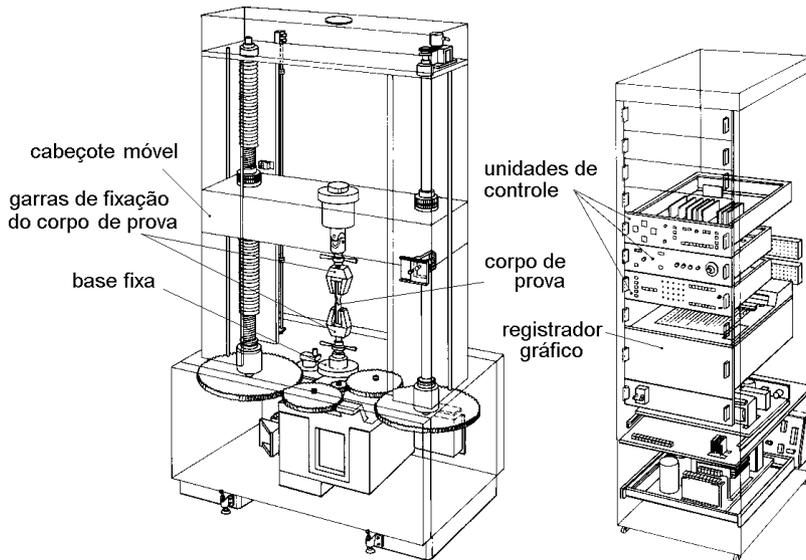
As normas técnicas mais utilizadas pelos laboratórios de ensaios provêm das seguintes instituições:

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.

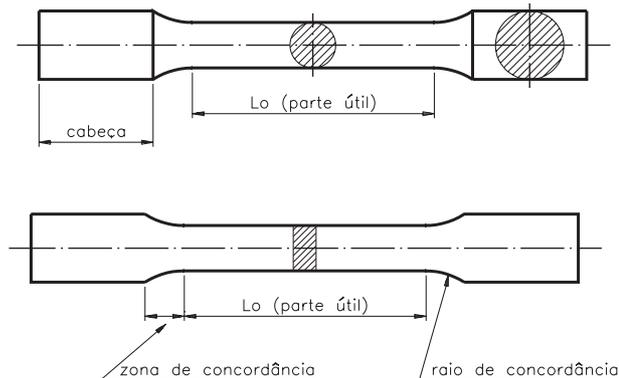
Dinamômetro é um equipamento utilizado para medir forças.

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

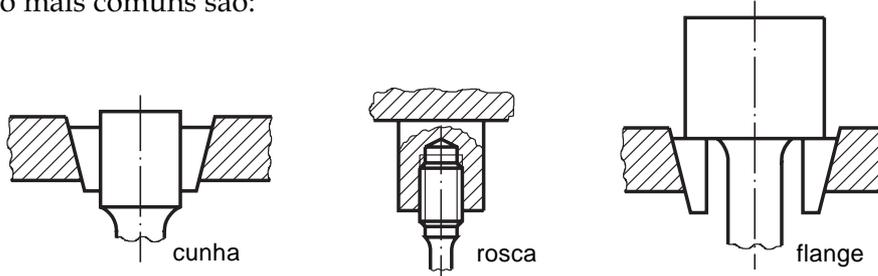
O ensaio de tração é feito em corpos de prova com características especificadas de acordo com normas técnicas. Suas dimensões devem ser adequadas à capacidade da máquina de ensaio.

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 L_0 , 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 útil 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.

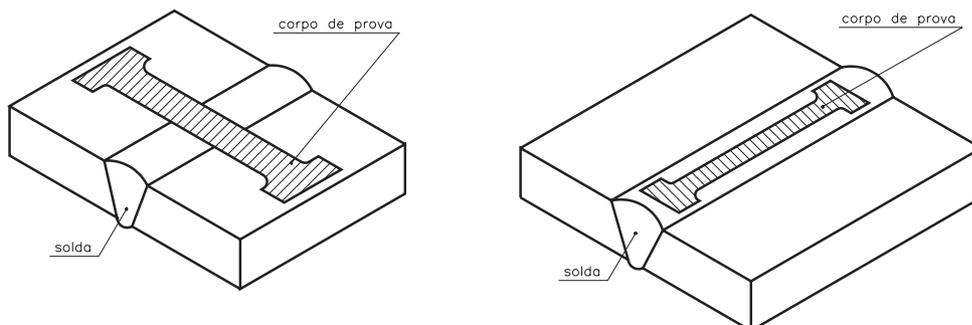
Por acordo internacional, sempre que possível um corpo de prova deve ter 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento inicial. Não sendo possível a retirada de um corpo de prova deste tipo, deve-se adotar um corpo com dimensões proporcionais a essas.

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 superfície 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.



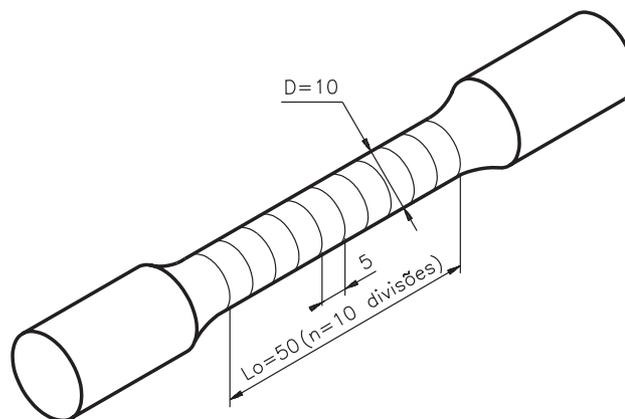
Os ensaios dos corpos de prova soldados normalmente determinam apenas o limite de resistência à tração. Isso porque, ao efetuar o ensaio de tração de um corpo de prova com solda, tensiona-se simultaneamente dois materiais de propriedades diferentes (metal de base e metal de solda). Os valores obtidos 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

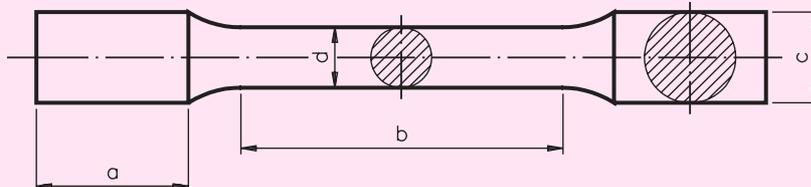
Escreva **V** se a frase for verdadeira ou **F** se for falsa:

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

Exercício 2

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

- a) ()
b) ()
c) ()
d) ()

**Exercício 3**

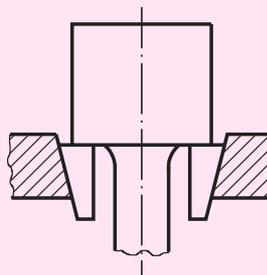
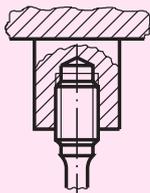
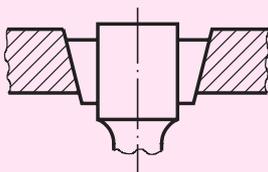
Assinalar com um X a alternativa que completa a frase corretamente:

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

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



a) ()

b) ()

c) ()

Exercício 5

Assinalar 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.

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.

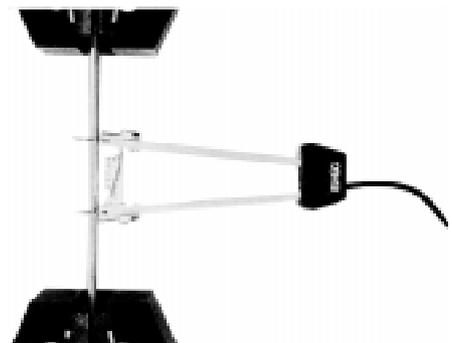
Nossa aula

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:

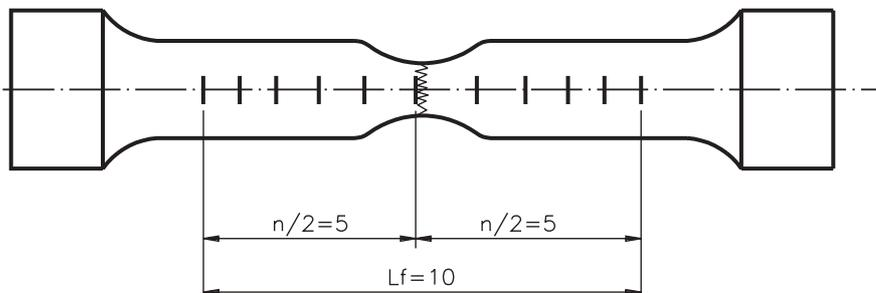
$$A = \frac{L_f - L_o}{L_o}$$

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

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.

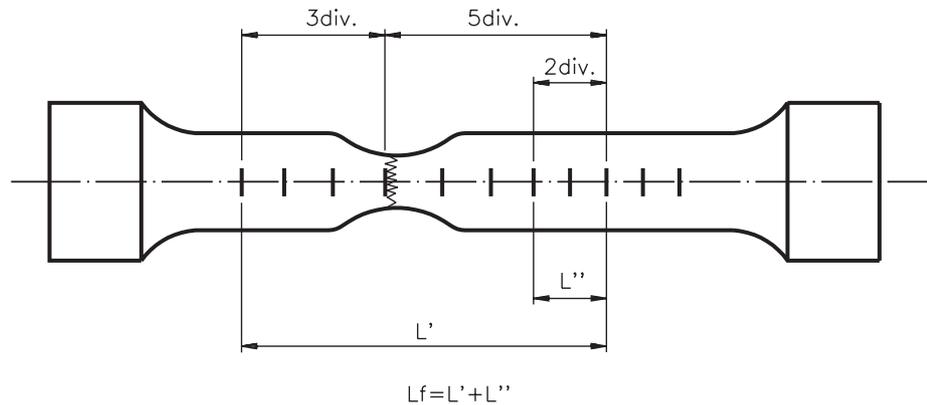


Este é o método para determinar o comprimento final quando a ruptura ocorre no centro da parte útil do corpo de prova.

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 L_f 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 sollicitação ultrapassasse o limite elástico, porque qualquer sollicitação 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.

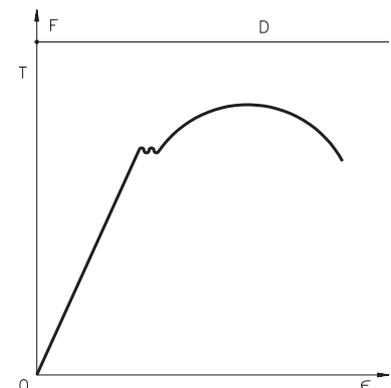
A rigor, a determinação do limite elástico deveria ser feita por carregamentos e descarregamentos sucessivos, até que se alcançasse uma tensão que mostrasse, com precisão, uma deformação permanente.

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**.

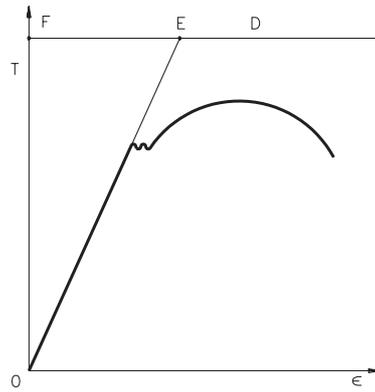
O limite Johnson corresponde à tensão na qual a velocidade de deformação é 50% maior que na origem.

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

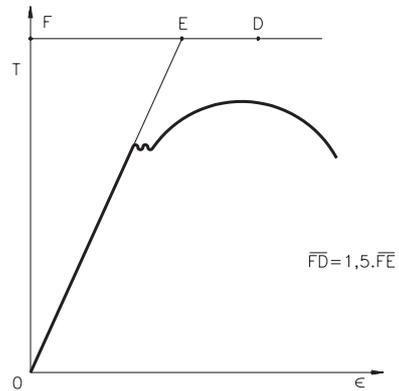
1. Trace uma reta perpendicular ao eixo das tensões, fora da região da curva tensão-deformação (F-D).



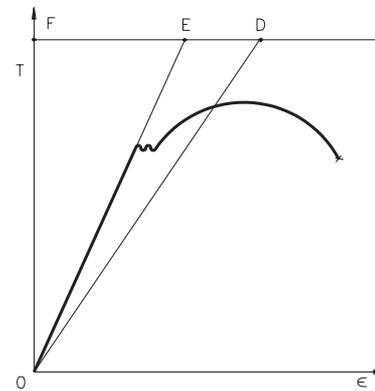
2. Prolongue a reta da zona elástica, a partir do ponto O, até que ela corte a reta FD no ponto E.



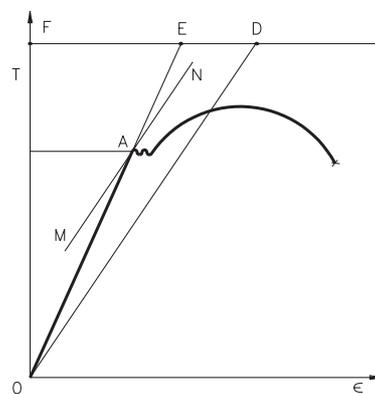
3. Remarque o ponto D de modo que a medida do segmento FD seja igual a uma vez e meia o segmento FE.



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.

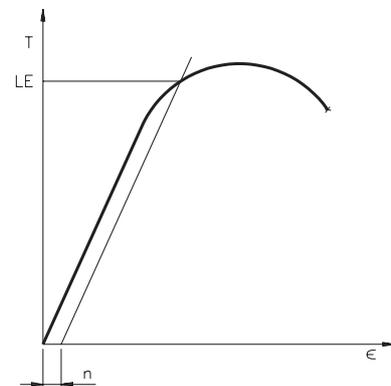
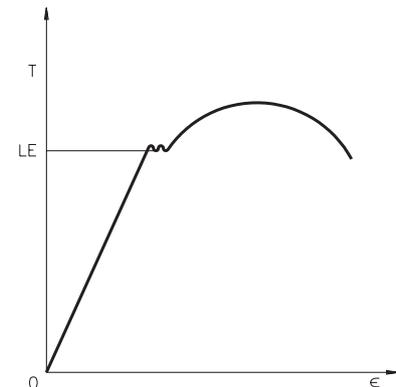
Entretanto, vários metais não apresentam escoamento, e mesmo nas ligas em que ocorre ele não pode ser observado, na maioria dos casos, porque acontece muito rápido e não é possível detectá-lo.

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

O valor convencional (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 único 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:

$$Z = \frac{S_0 - S_f}{S_0}$$

onde S_0 é a área de seção transversal inicial e S_f 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

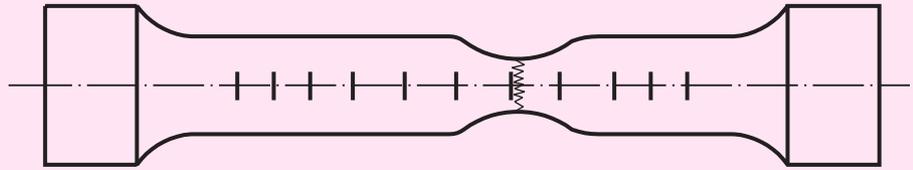
C.P. nº	Ø Médio mm	Comprimento útil mm	Área da seção inicial mm ²	Limite de escoamento		Limite de resistência		Alongamento		Estricção	
				N	MPa	N	MPa	mm Lf	%	mm Df	%
1	10	50	78,54	21991	280	32987	420	62	24	6	64
Executante:				Visto:							

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 (L_f).



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.



Ensaio de compressão

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

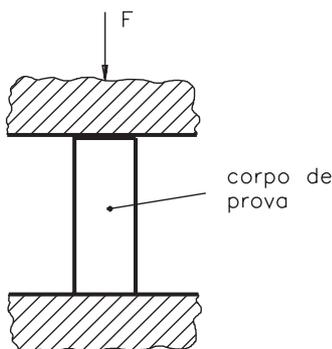
Às vezes, a grande exigência requerida para um projeto é a resistência à compressão. Nesses casos, o projetista deve especificar um material que possua boa resistência à compressão, que não se deforme facilmente e que assegure boa precisão dimensional quando solicitado por esforços de compressão.

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.

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.

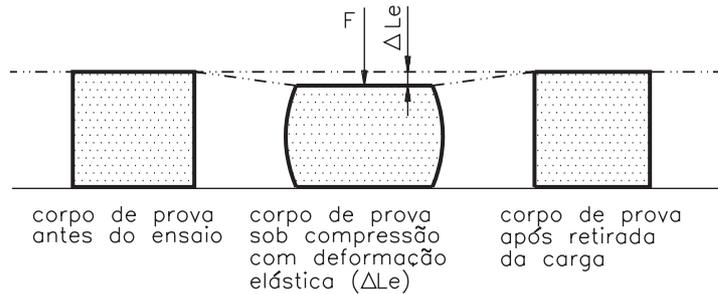
Introdução

Nossa aula

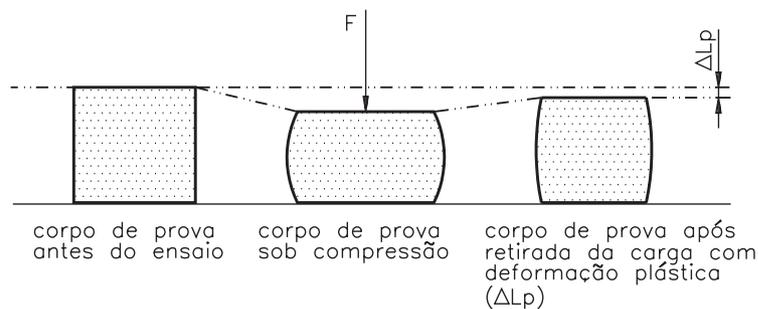
Do mesmo modo que o ensaio de tração, o ensaio de compressão pode ser executado na máquina universal de ensaios, com a adaptação de duas placas lisas – uma fixa e outra móvel. É entre elas que o corpo de prova é apoiado e mantido firme durante a compressão.

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
	F → força de compressão
	S → área da seção do corpo
$\epsilon = \frac{L_o - L_f}{L_o}$	ϵ → deformação
	$L_o - L_f$ → variação do comprimento do corpo
	L_o → comprimento inicial do corpo
$E = \frac{T}{\epsilon}$	E → módulo de elasticidade
	T → tensão
	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: $T = \dots\dots\dots$ e $\epsilon = \dots\dots\dots$

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:

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

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

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

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

$$\epsilon = \frac{L_0 - L_f}{L_0}$$

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:

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

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?

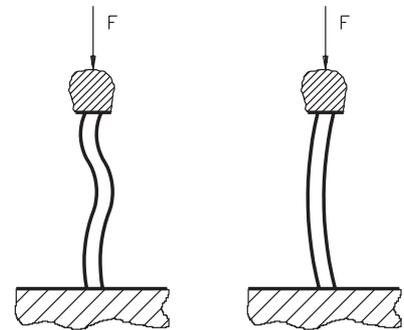
Limitações do ensaio de compressão

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.

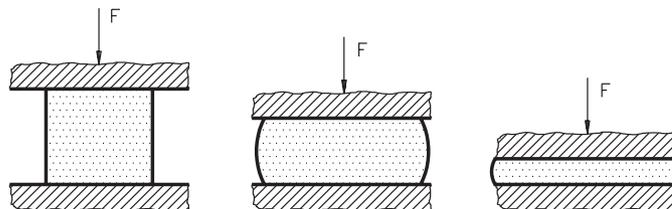


A flambagem ocorre principalmente em corpos de prova com comprimento maior em relação ao diâmetro. Por esse motivo, dependendo do grau de ductilidade do material, é necessário limitar o comprimento dos corpos de prova, que devem ter de 3 a 8 vezes o valor de seu diâmetro. Em alguns materiais muito dúcteis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

$$LR = \frac{F_{\max}}{S_0}$$

onde F_{\max} corresponde à carga máxima atingida após o escoamento e S_0 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:

$$LR = \frac{F_{\max}}{S_0}$$

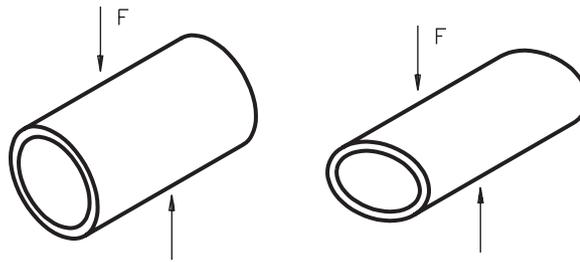
basta substituir os termos da fórmula pelos valores conhecidos:

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

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

Ensaio 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 achatá-la.



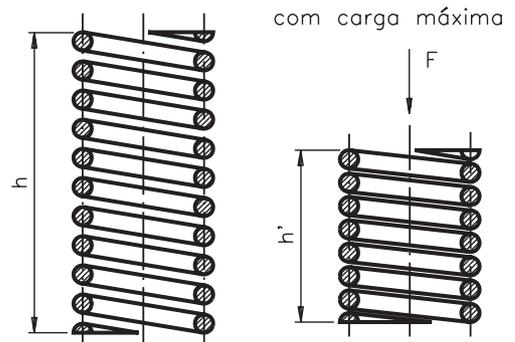
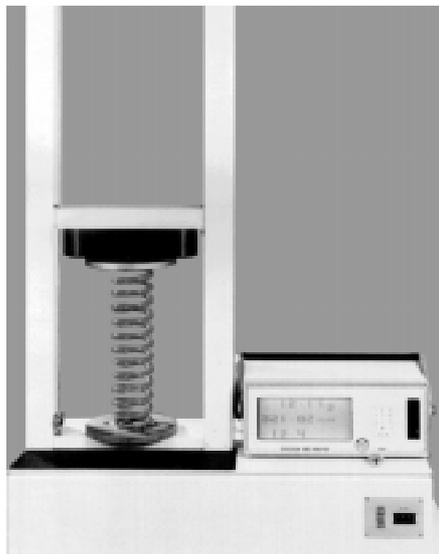
A distância final entre as placas, que varia conforme a dimensão do tubo, deve ser registrada. O resultado é avaliado pelo aparecimento ou não de fissuras, ou seja, rachaduras, sem levar em conta a carga aplicada.

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

Ensaio 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

Ensaaios 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?



Ensaio de cisalhamento

Introdução

*P*ode 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**.

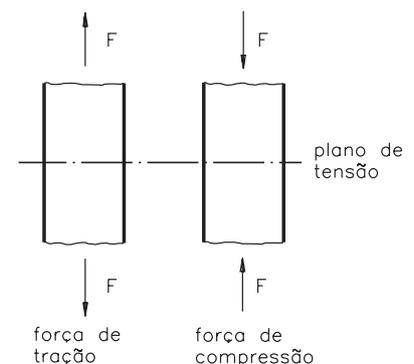
Todo material apresenta certa resistência ao cisalhamento. Saber até onde vai esta resistência é muito importante, principalmente na estamparia, que envolve corte de chapas, ou nas uniões de chapas por solda, por rebites ou por parafusos, onde a força cortante é o principal esforço que as uniões vão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

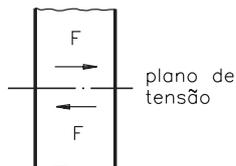
Nesta aula você ficará conhecendo dois modos de calcular a tensão de cisalhamento: realizando o ensaio de cisalhamento e utilizando o valor de resistência à tração do material. E ficará sabendo como são feitos os ensaios de cisalhamento de alguns componentes mais sujeitos aos esforços cortantes.

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

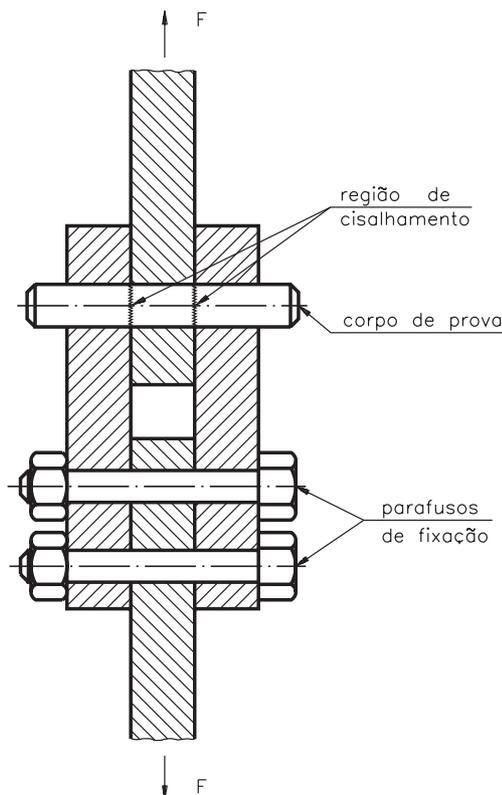
A forma do produto final afeta sua resistência ao cisalhamento. É por essa razão que o ensaio de cisalhamento é mais frequentemente feito em produtos acabados, tais como pinos, rebites, parafusos, cordões de solda, barras e chapas.

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 simplificada na figura a seguir.

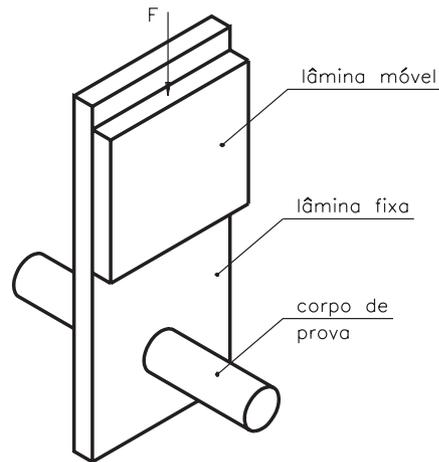


O dispositivo é fixado na máquina de ensaio e os rebites, parafusos ou pinos são inseridos entre as duas partes móveis.

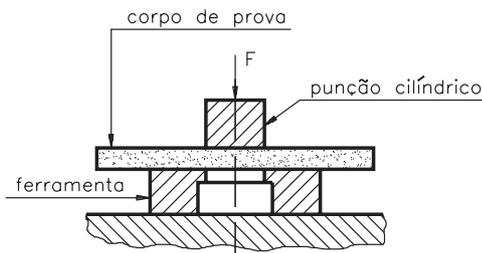
Ao se aplicar uma tensão de tração ou compressão no dispositivo, transmite-se uma força cortante à seção transversal do produto ensaiado. No decorrer do ensaio, esta força será elevada até que ocorra a ruptura do corpo.

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:

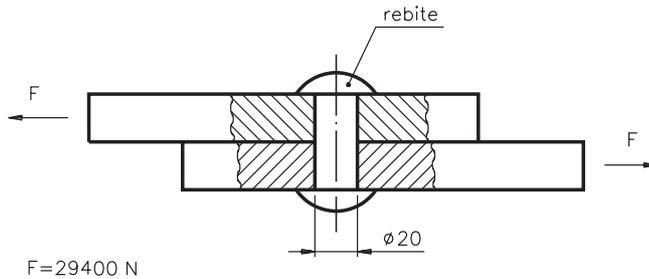
$$TC = \frac{F}{S}$$

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: $TC = 0,75 T$.

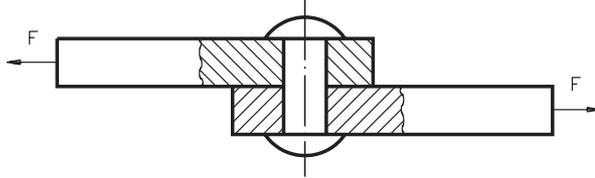
É por isso que, em muitos casos, em vez de realizar o ensaio de cisalhamento, que exige os dispositivos já vistos, utilizam-se os dados do ensaio de tração, mais facilmente disponíveis.

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:

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

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

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

Agora, basta transportar os valores conhecidos para a fórmula:

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

Como $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ 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.

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).

Exercícios

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.

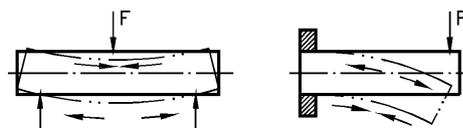
Por exemplo, já lhe aconteceu de estar parado sobre uma ponte, num congestionamento, sentindo o chão tremer sob as rodas do seu carro enquanto os veículos ao seu lado se movem? Sorte sua o fato de a ponte balançar. Isso significa que a estrutura estava suportando o esforço produzido pelo peso dos veículos.

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.

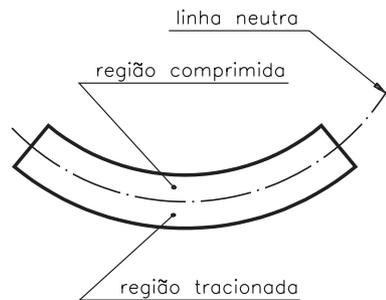
Nossa aula

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**.

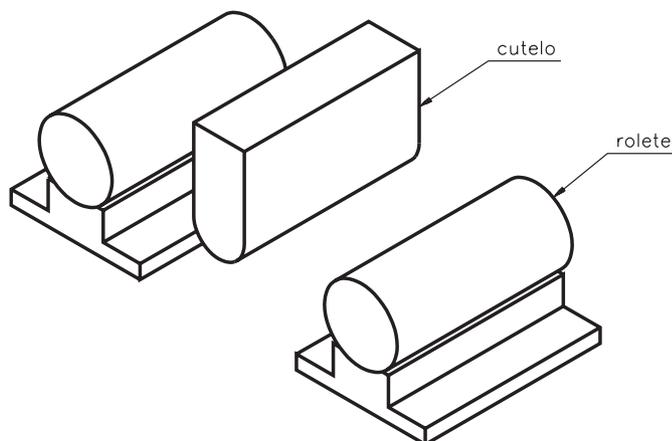
Isso quer dizer que, no fundo, flexão e dobramento são etapas diferentes da aplicação de um mesmo esforço, sendo a **flexão** associada à **fase elástica** e o **dobramento** à **fase plástica**.

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

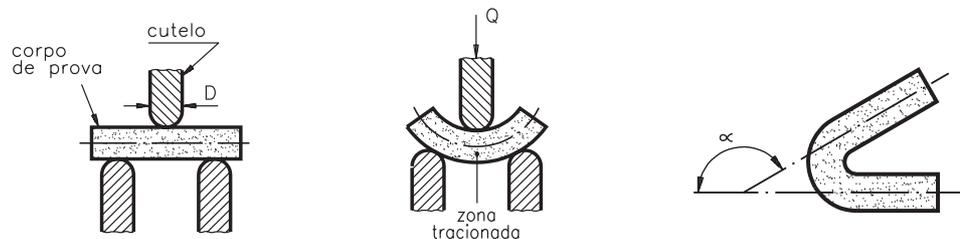
Experimente dobrar duas barras de um metal: por exemplo, uma de alumínio recozido e outra de alumínio encruado.

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.

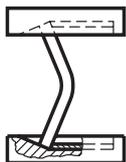


O valor da carga, na maioria das vezes, não importa. O ângulo determina a severidade do ensaio e é geralmente de 90, 120 ou 180°.

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.

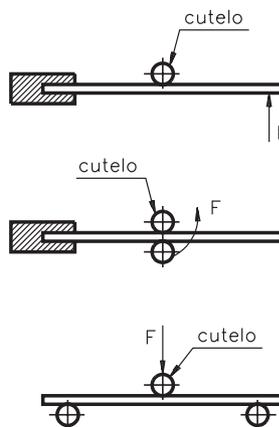
Processos de dobramento

Há dois processos de dobramento: o dobramento livre e o dobramento semiguado. 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.

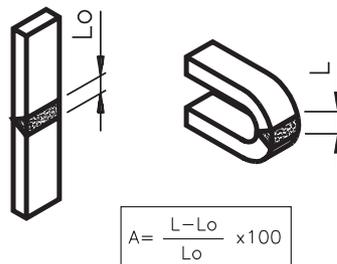
Neste caso, o ensaio consiste em dobrar a barra até se atingir um ângulo de 180° com um cutelo de dimensão especificada de acordo com o tipo de aço da barra – quanto maior a resistência do aço, maior o cutelo. O dobramento normalmente é do tipo semiguiado.

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.



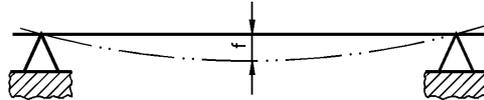
Agora que você já aprendeu algumas noções sobre o ensaio de dobramento, que tal conhecer algumas características do ensaio de flexão? Este é o assunto que será tratado a seguir.

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.

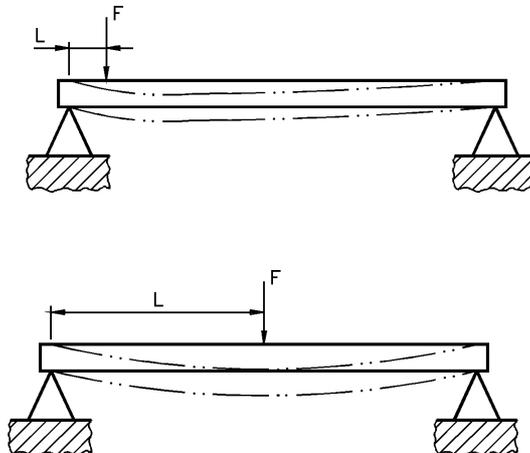
Propriedades mecânicas avaliadas

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** (M_f).

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

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

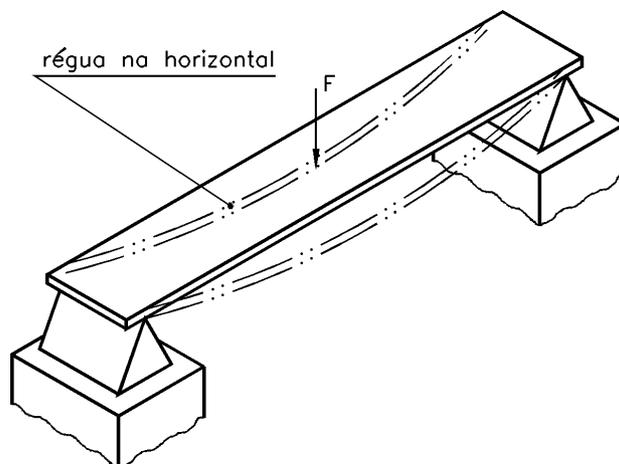
A fórmula matemática para calcular o momento fletor é:

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

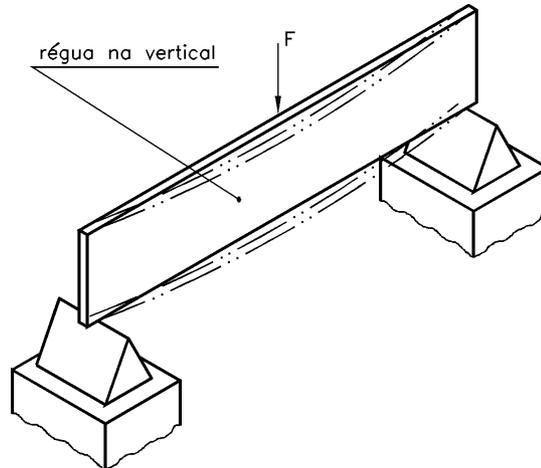
Outro elemento que você precisa conhecer é o **momento de inércia** da seção transversal. Um exemplo o ajudará a entender do que estamos falando.

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).

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

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.



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.

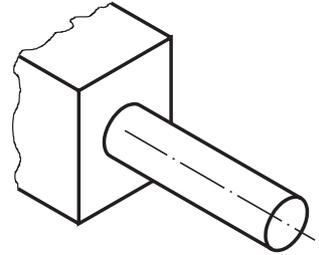
A torção é diferente da compressão, da tração e do cisalhamento porque nestes casos o esforço é aplicado no sentido longitudinal ou transversal, e na torção o esforço é aplicado no sentido de rotação.

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

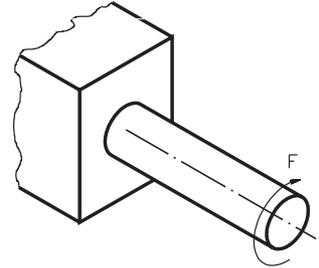
Como na torção uma parte do material está sendo tracionada e outra parte comprimida, em casos de rotina podemos usar os dados do ensaio de tração para prever como o material ensaiado se comportará quando sujeito a torção.

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.

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



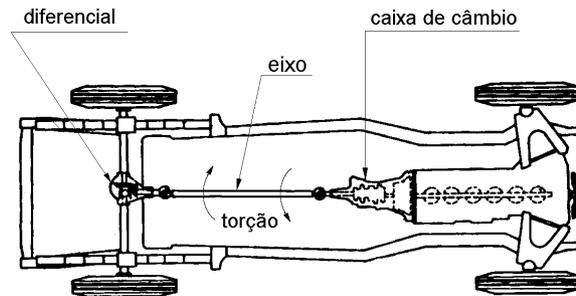
Imagine que este corpo passe a sofrer a ação de uma força no sentido de rotação, aplicada na extremidade solta do corpo.



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.

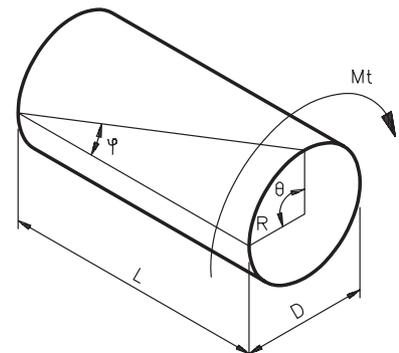
Uma ponta do eixo está ligada à roda, por meio do diferencial traseiro. A outra ponta está ligada ao motor, por intermédio da caixa de câmbio.



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.



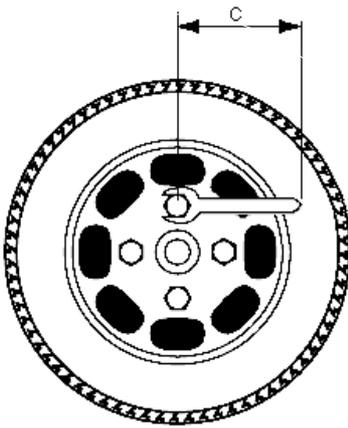
Analise com atenção o desenho anterior e observe que:

- 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: M_t , que representa o momento torsor.

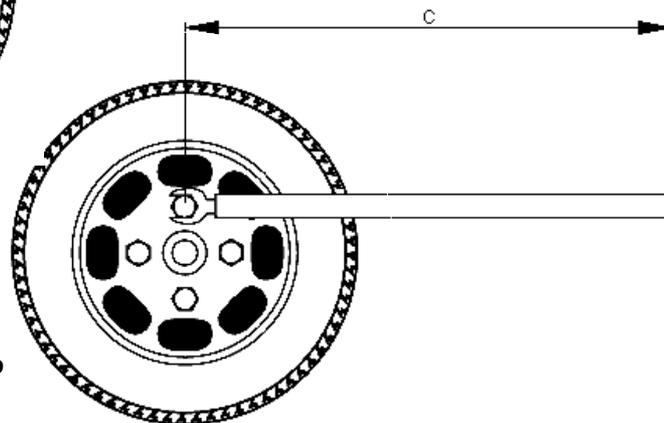
Veja a seguir o que é momento torsor e como ele age nos esforços de torção.

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).

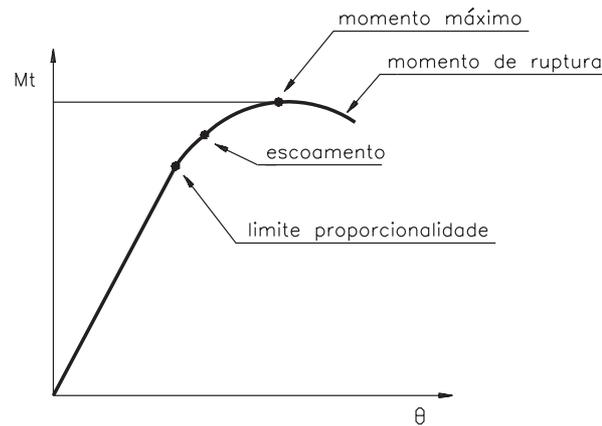
Em linguagem matemática, o momento de uma força (M_f) pode ser expresso pela fórmula: $M_f = F \times C$.

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.

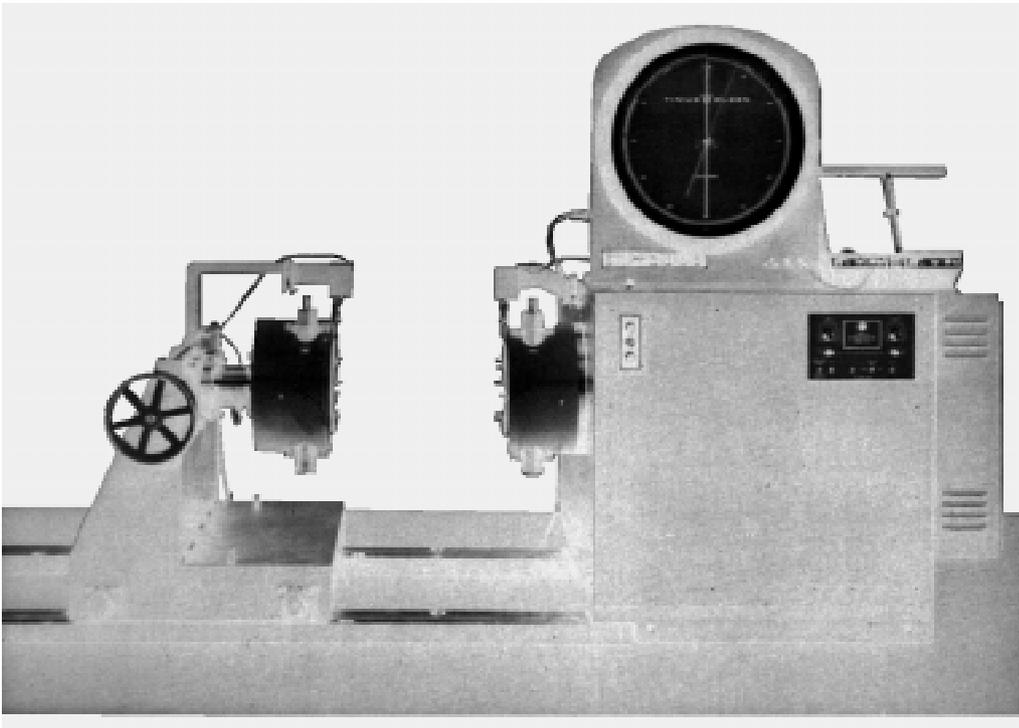
Entretanto, o comprimento e o diâmetro do corpo de prova devem ser tais que permitam as medições de momentos e ângulos de torção com precisão e também que não dificultem o engastamento nas garras da máquina de ensaio.

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.

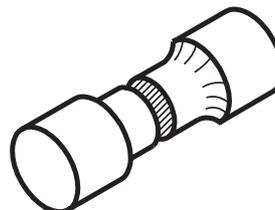
Esta máquina possui duas cabeças às quais o corpo de prova é fixado. Uma das cabeças é giratória e aplica ao corpo de prova o momento de torção. A outra está ligada a um pêndulo que indica, numa escala, o valor do momento aplicado ao corpo de prova.



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 45° 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

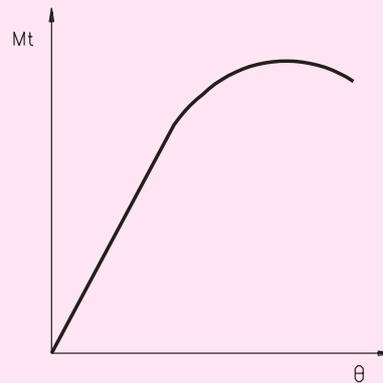
No diagrama abaixo, escreva:

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 45° com o eixo do corpo de prova;

d) () fratura em ângulo diferente de 45° 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.

Dureza Brinell

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.

Introdução

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.

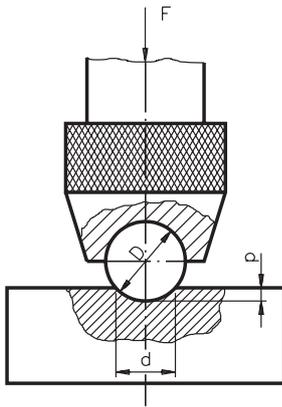
Curiosidade Escala Mohs (1822)

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.

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 (A_c).

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

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

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

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

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:

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

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:

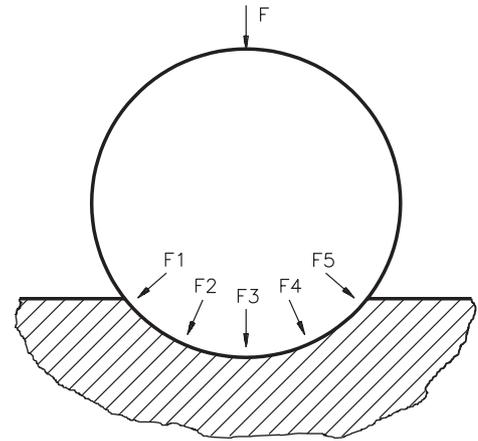
$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \Rightarrow HB = \frac{2 \times 187,5}{\pi \times 2,5 (2,5 - \sqrt{2,5^2 - 1^2})} \Rightarrow$$

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

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

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 D² indicadas no primeiro quadro.

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

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:

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

Isolando **p**, temos:

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

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.

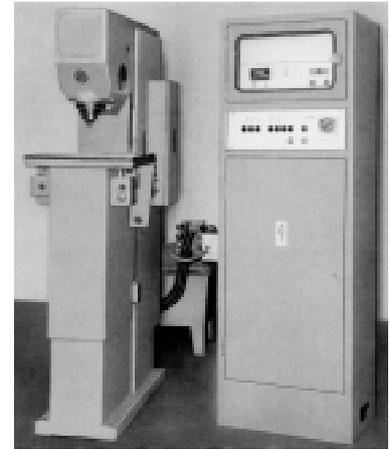
A medida do diâmetro da calota (d) deve ser obtida pela média de duas leituras obtidas a 90° uma da outra, e de maneira geral não pode haver diferença maior que 0,06 mm entre as duas leituras, para esferas de 10 mm.

Vantagens e limitações do ensaio Brinell

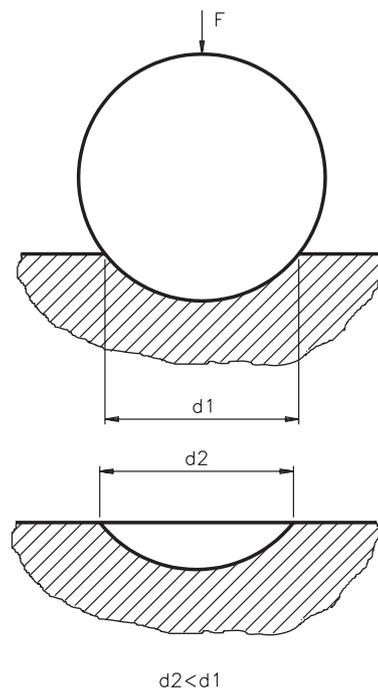
O ensaio Brinell é usado especialmente para avaliação de dureza de metais não ferrosos, ferro fundido, aço, produtos siderúrgicos em geral e de peças não temperadas. É o único ensaio utilizado e aceito para ensaios em metais que não tenham estrutura internauniforme.

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.

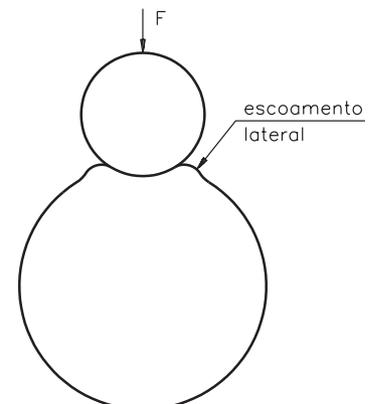


Durômetro Brinell

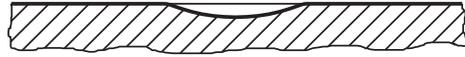


A recuperação elástica é uma fonte de erros, pois o diâmetro da impressão não é o mesmo quando a esfera está em contato com o metal e depois de aliviada a carga. Isto é mais sensível quanto mais duro for o metal.

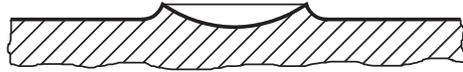
O ensaio não deve ser realizado em superfícies cilíndricas com raio de curvatura menor que 5 vezes o diâmetro da esfera utilizada, porque haveria escoamento lateral do material e a dureza medida seria menor que a real.



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.



a



b



c

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!

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.

Exercícios

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:



Dureza Rockwell

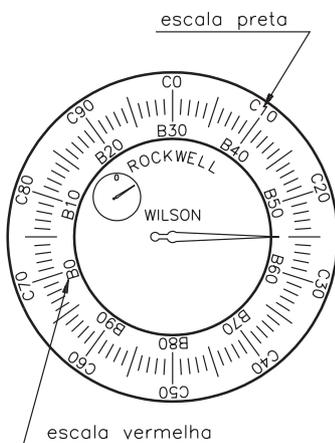
No início do século XX houve muitos progressos no campo da determinação da dureza.

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.

Em que consiste o ensaio Rockwell



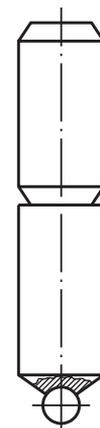
Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois aplica-se a carga do ensaio propriamente dita.

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.

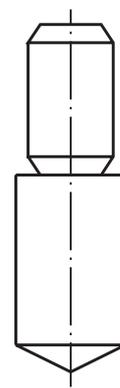
Introdução

Nossa aula

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

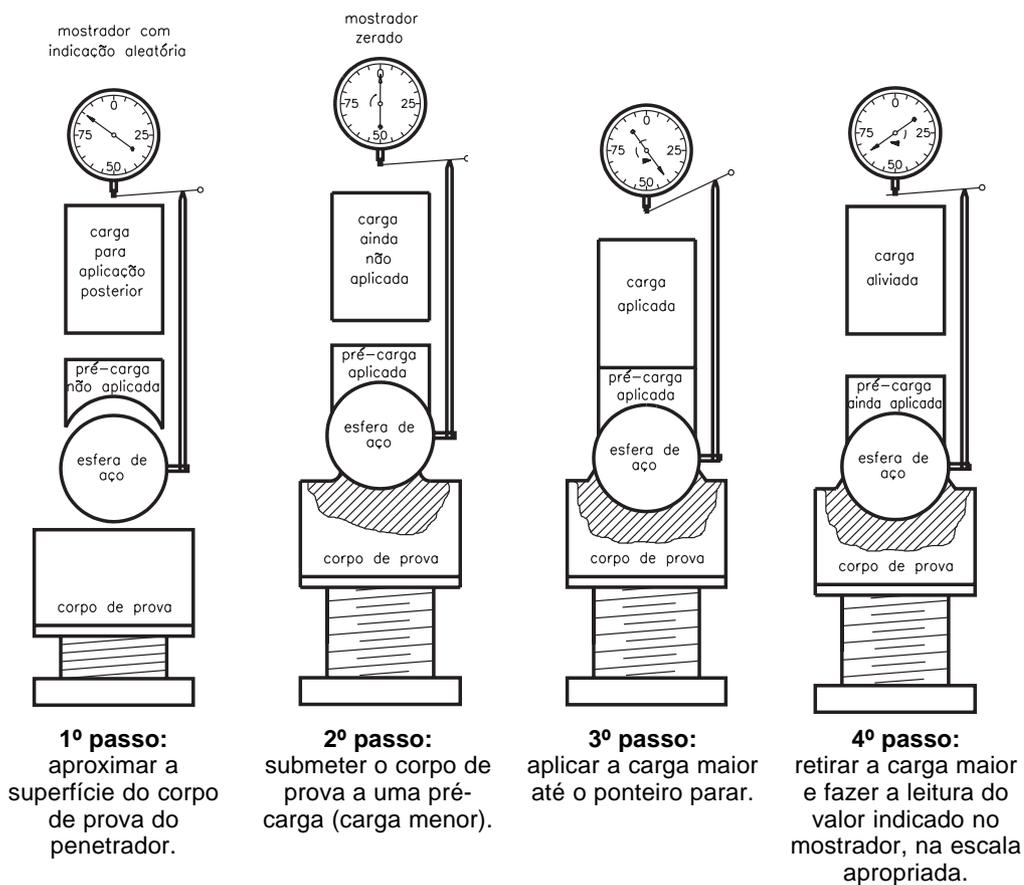


penetrador esférico



penetrador cônico

Descrição do processo

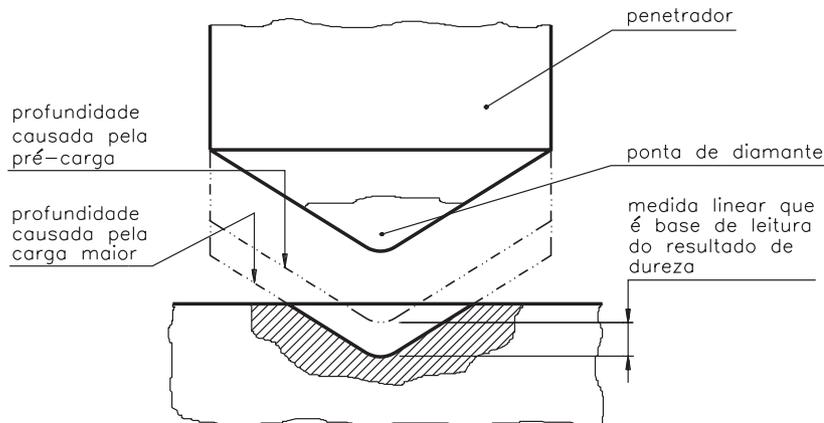


Quando se utiliza o penetrador cônico de diamante, deve-se fazer a leitura do resultado na escala externa do mostrador, de cor preta. Ao se usar o penetrador esférico, faz-se a leitura do resultado na escala vermelha.

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 120° 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.



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.

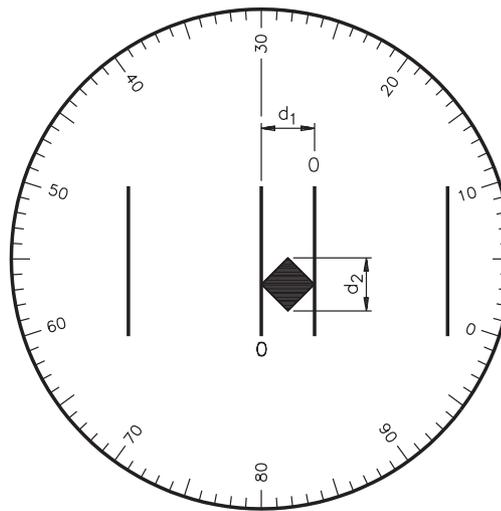
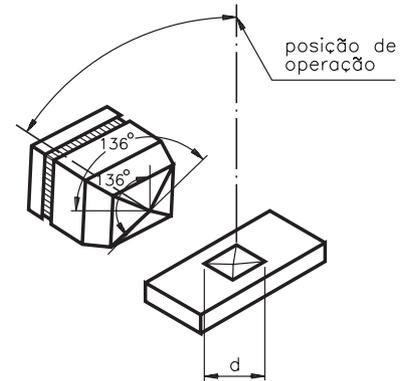
O ensaio desenvolvido por Smith e Sandland ficou conhecido como ensaio de dureza Vickers porque a empresa que fabricava as máquinas mais difundidas para operar com este método chamava-se Vickers-Armstrong.

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 136°, 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:

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

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

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

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 micron (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

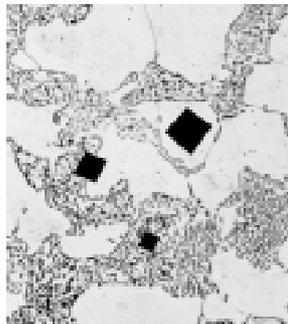
Neste método, ao contrário do que ocorre no Brinell, as cargas podem ser de qualquer valor, pois as impressões são sempre proporcionais à carga, para um mesmo material. Deste modo, o valor de dureza será o mesmo, independentemente da carga utilizada.

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.



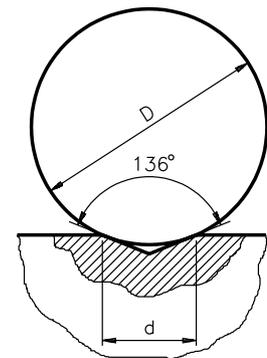
Na microdureza, como a carga aplicada é pequena, a impressão produzida é microscópica, como mostra a figura ampliada, ao lado.



Comparando Brinell e Vickers

O ensaio Vickers produz valores de impressão semelhantes aos da dureza Brinell. Isso ocorre porque o ângulo de 136° 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.

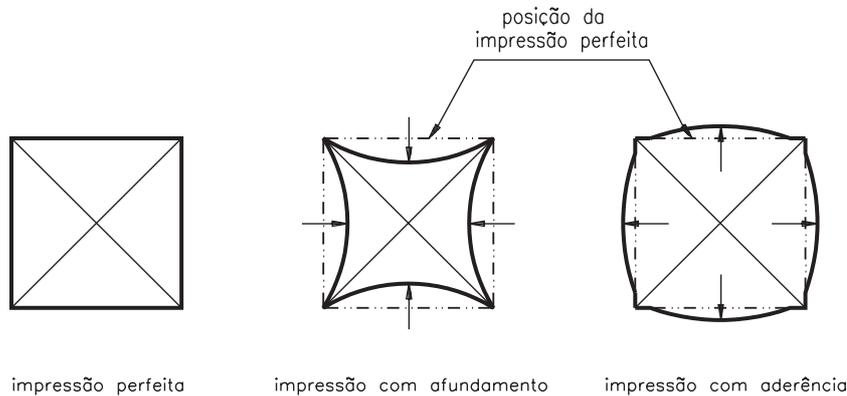
O uso de cargas diferentes é necessário para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível com o visor da máquina.



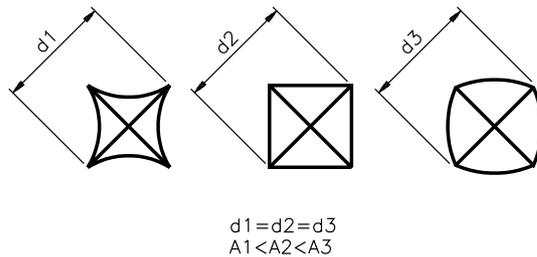
Defeitos de impressão

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:



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.

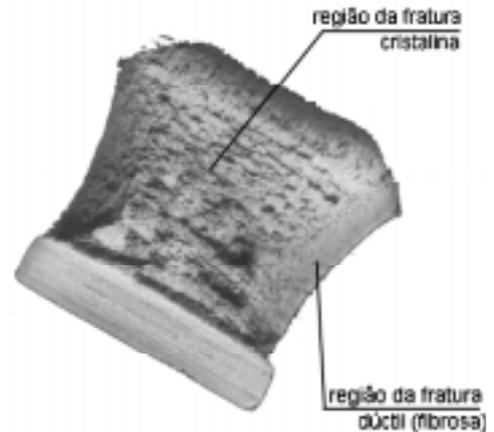
A maioria dos ensaios que estudamos não avalia o comportamento dos materiais submetidos a esforços dinâmicos. No caso da fadiga, embora os esforços sejam dinâmicos, o ensaio correspondente leva mais em conta o fato de serem cíclicos.

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.

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 T_1 pode absorver muito mais energia do que se estivesse a uma temperatura T_2 , bem menor que T_1 , ou pode absorver a mesma energia a uma temperatura T_3 , pouco menor que T_1 .

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**.

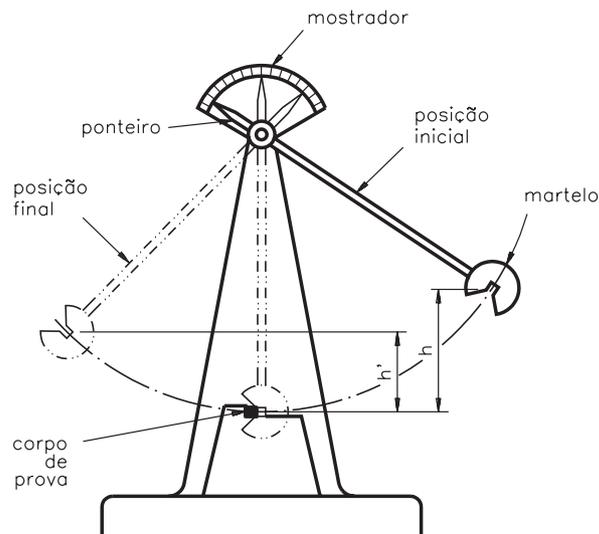
O **ensaio de impacto** consiste em medir a **quantidade de energia** absorvida por uma amostra do material, quando submetida à ação de um esforço de choque de valor conhecido.



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.

O método mais comum 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.



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 $\text{kgf} \cdot \text{m}$, $\text{kgf} \cdot \text{cm}$ ou $\text{kgf} \cdot \text{mm}$.

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 (E_p) é:

$E_p = m \times g \times h$, 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.

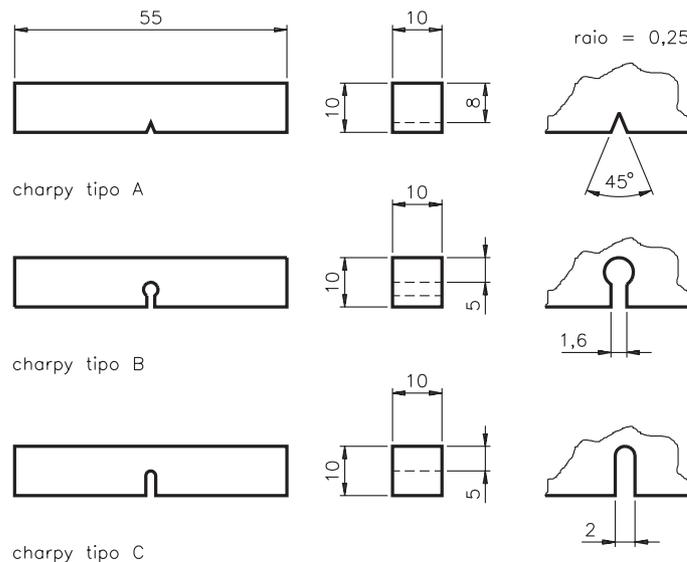
O mostrador da máquina simplesmente registra a diferença entre a altura inicial e a altura final, após o rompimento do corpo de prova, numa escala relacionada com a unidade de medida de energia adotada.

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.

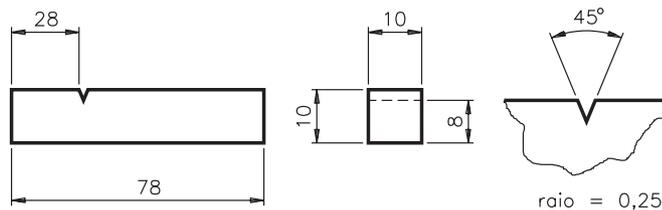


As diferentes formas de entalhe são necessárias para assegurar que haja ruptura do corpo de prova, mesmo nos materiais mais dúcteis.

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).

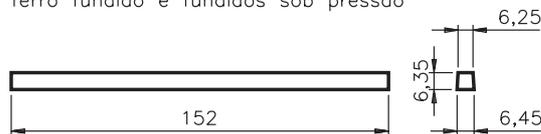
izod tipo D



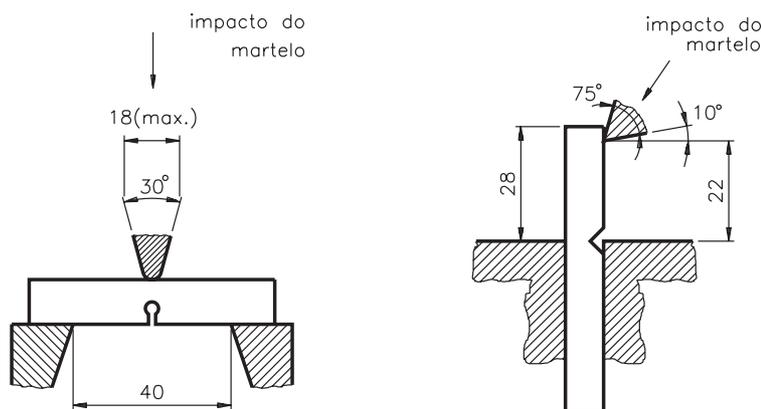
O corpo de prova Charpy é apoiado na máquina e o Izod é engastado, o que justifica seu maior comprimento.

Corpos de prova de ferro fundido e ligas não ferrosas fundidas sob pressão não apresentam entalhe.

ferro fundido e fundidos sob pressão



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. **Ensaio 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.



DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

Bruno Márcio Agostini.

bmagostini@yahoo.com.br

Outubro de 2005

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	03
1.1 AMOSTRAGEM.....	04
1.2 VALORES CARACTERÍSTICOS.....	04
1.3 RELATÓRIO.....	05
2 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	06
2.1 OBJETIVO.....	06
2.2 DEFINIÇÕES.....	06
2.3 PROCEDIMENTO.....	06
2.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	07
2.5 OBSERVAÇÕES.....	07
3 COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS.....	08
3.1 OBJETIVO.....	08
3.2 DEFINIÇÕES.....	08
3.3 PROCEDIMENTO.....	08
3.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	09
3.5 OBSERVAÇÕES.....	09
4 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	10
4.1 OBJETIVO.....	10
4.2 DEFINIÇÕES.....	10
4.3 PROCEDIMENTO.....	10
4.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	11
4.5 OBSERVAÇÕES.....	11
5 TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS.....	12
5.1 OBJETIVO.....	12
5.2 DEFINIÇÕES.....	12
5.3 PROCEDIMENTO.....	12
5.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	13
5.5 OBSERVAÇÕES.....	13
6 FLEXÃO.....	14
6.1 OBJETIVO.....	14
6.2 DEFINIÇÕES.....	14
6.3 PROCEDIMENTO.....	14
6.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	15
6.5 OBSERVAÇÕES.....	15
7 DUREZA.....	16
7.1 OBJETIVO.....	16
7.2 DEFINIÇÕES.....	16
7.3 PROCEDIMENTO.....	16
7.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	17
8 RESISTÊNCIA AO IMPACTO NA FLEXÃO (ENSAIO DE FLEXÃO DINÂMICA DA MADEIRA).....	18
8.1 OBJETIVO.....	18
8.2 DEFINIÇÕES.....	18
8.3 PROCEDIMENTO.....	18
8.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	19
8.5 OBSERVAÇÃO.....	19
9 BIBLIOGRAFIA.....	20

1 INTRODUÇÃO

A madeira é, provavelmente, o material de construção mais antigo dada a sua disponibilidade na natureza e sua relativa facilidade de manuseio. Comparada a outros materiais de construção convencionais utilizados atualmente, a madeira apresenta uma excelente relação resistência/peso. A madeira possui ainda outras características favoráveis ao uso em construção tais como facilidade de beneficiamento e bom isolamento térmico.

As madeiras utilizadas em construção são obtidas a partir do tronco de árvores. Distinguem-se duas categorias principais de madeiras:

* Madeiras duras: Provenientes de árvores frondosas, *dicotiledôneas* da classe Angiosperma. Possuem folhas achatadas e largas e apresentam crescimento lento. Ex: peroba, ipê, sucupira, eucaliptos.

* Madeiras macias: Provenientes em geral das árvores *coníferas* da classe Gimnosperma. Possuem folhas em forma de agulhas ou escamas e sementes agrupadas em forma de cones e apresentam crescimento rápido. Ex: pinho, pinus.

Devido à orientação das células e conseqüentemente das fibras, a madeira é um material anisotrópico, apresentando três direções principais (longitudinal, radial e tangencial). A diferença de propriedades entre as direções radial e tangencial raramente tem importância prática. Diferencia-se porém as propriedades na direção das fibras principais (direção longitudinal, crescimento vertical) e na direção perpendicular a estas fibras (radial e tangencial, crescimento circunferencial).

As propriedades físicas e mecânicas das espécies de madeira são determinadas por meio de ensaios padronizados realizados em amostras devidamente retiradas de um determinado lote de madeira.

No Brasil estes ensaios estão descritos no Anexo B da NBR 7190/1997-Projeto de estruturas de madeira.

É primordial saber que as propriedades mecânicas obtidas nesses ensaios variam com o teor de umidade da madeira, tempo de duração do carregamento e ocorrência de defeitos. Somente após conhecida a variação das propriedades mecânicas da madeira em função destes fatores chega-se aos valores a serem utilizados em projeto.

Em geral realiza-se primeiramente um ensaio destrutivo em uma amostra pertencente ao lote em estudo para que se tenha uma estimativa do valor da propriedade que se procura determinar.

Uma vez de posse da estimativa realiza-se o ensaio conforme estabelece a NBR 7190. A duração do ensaio varia de três a oito minutos seguindo dois ciclos de carga e descarga para acomodação do equipamento de ensaio, sendo que a segunda recarga segue até a ruptura do corpo-de-prova a qual é caracterizada pela ruptura ou deformação excessiva.

1.1 AMOSTRAGEM

Para a investigação direta de lotes de madeira serrada considerados homogêneos, cada lote não deve ter volume superior a 12 m³.

Do lote a ser investigado deve-se extrair uma amostra, com corpos de prova distribuídos aleatoriamente no lote, devendo ser representativa da totalidade deste. Para isso não se deve retirar mais de um corpo-de-prova de uma mesma peça. Os corpos-de-prova devem ser isentos de defeitos e retirados de regiões afastadas das extremidades das peças de pelo menos cinco vezes a menor dimensão da seção transversal da peça considerada, mas nunca menor que trinta centímetros.

O número de corpos-de-prova deve atender aos objetivos da caracterização:

- a) caracterização simplificada: seis corpos-de-prova;
- b) caracterização mínima da resistência de espécies pouco conhecidas: doze corpos-de-prova.

1.2 VALORES CARACTERÍSTICOS

Os valores característicos das propriedades da madeira devem ser estimados pela expressão (1) como é proposto na NBR 7190:

$$x_{wk} = \left(2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - x_{\frac{n}{2}} \right) 1,1 \quad (1)$$

Os resultados devem ser colocados em ordem crescente $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, desprezando-se o valor mais alto se o número de corpos-de-prova for ímpar, não se tomando para x_{wk} valor inferior a x_1 , nem a 0,7 do valor médio (x_m).

1.3 RELATÓRIO

Os resultados dos ensaios devem ser apresentados em relatório técnico que deve conter:

- a) referência à NBR 7190-1997;
- b) descrição da amostra, fazendo referência às condições de armazenagem do lote;
- c) forma e dimensões dos corpos-de-prova, com indicação da direção das fibras;
- d) valor médio da umidade do lote;
- e) valores (característicos) determinados das propriedades da madeira.

2 COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

2.1 OBJETIVO

Determinar a resistência à compressão paralela às fibras da madeira.

2.2 DEFINIÇÕES

A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo-de-prova com seção transversal quadrada, sendo dada por:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (2)$$

$F_{c0,max}$ é a máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em newtons;

A é a área inicial da seção transversal comprimida, em milímetros quadrados;

f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras, em megapascals.

O valor característico da resistência à compressão paralela às fibras $f_{c0,k}$ deve ser determinado pela expressão (1).

A rigidez da madeira na direção paralela às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade (E_{c0}), obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica proveniente do ensaio de compressão. Para esta finalidade o carregamento deve ser aplicado em dois ciclos de carga e descarga como prevê a NBR 7190:1997.

2.3 PROCEDIMENTO

O corpo-de-prova deve ter forma prismática, com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e 15,0 cm de comprimento na direção longitudinal (figura 1).

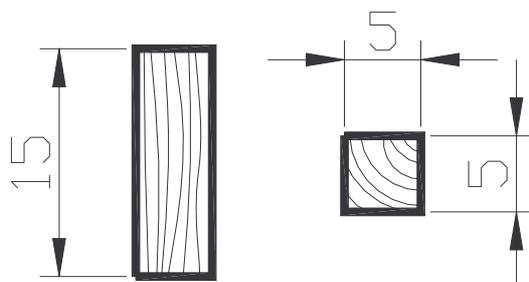


Figura 1 – Corpo-de-prova para o ensaio de compressão paralela às fibras.

Para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras, as medidas dos lados do corpo-de-prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm.

Para o ajuste do corpo-de-prova na máquina de ensaio deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova.

A resistência deve ser determinada com carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min (aproximadamente 2,5 t/min para seção transversal de 5,0 cm x 5,0 cm).

2.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Deve ser feita conforme descreve o item relatório.

2.5 OBSERVAÇÕES:

No diagrama tensão x deformação correspondente à segunda recarga observa-se a existência de um trecho linear até a tensão limite de proporcionalidade, devido ao comportamento elástico da madeira. A partir desta tensão verifica-se um comportamento não-linear da madeira o qual está associado à flambagem das fibras da madeira.

Sob compressão axial as células que compõem as fibras atuam como tubos de paredes finas paralelos e colados entre si. O colapso envolve a fratura do material ligante e flambagem das células (Wangaard, 1979).

3 COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS

3.1 OBJETIVO

Determinar a resistência à compressão normal às fibras da madeira.

3.2 DEFINIÇÕES

A resistência à compressão normal às fibras (f_{c90}) é o valor convencional determinado pela deformação específica residual de 2 ‰, obtida a partir do gráfico tensão x deformação do ensaio de compressão uniforme realizado em corpo-de-prova prismático.

O valor característico da resistência à compressão normal às fibras $f_{c90,k}$ deve ser estimado pela expressão (1).

A rigidez da madeira na direção normal às fibras deve ser determinada por seu módulo de elasticidade (E_{c90}), obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica proveniente do ensaio de compressão. Para esta finalidade o carregamento deve ser aplicado em dois ciclos de carga e descarga como prevê a NBR 7190:1997.

3.3 PROCEDIMENTO

O corpo-de-prova deve ter forma prismática, com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e 10,0 cm de altura, na direção tangencial (figura 2).

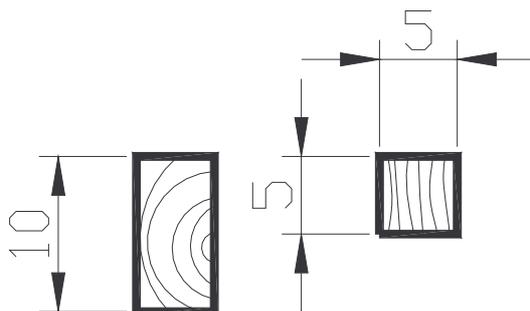


Figura 2 - Corpo-de-prova para o ensaio de compressão normal às fibras.

Para a determinação da resistência à compressão paralela às fibras, as medidas dos lados do corpo-de-prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm.

Para o ajuste do corpo-de-prova na máquina de ensaio deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova.

A resistência deve ser determinada com carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min (aproximadamente 2,5 t/min para seção transversal de 5,0 cm x 5,0 cm).

3.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Deve ser feita conforme descreve o item relatório.

3.5 OBSERVAÇÕES:

As fibras, que são constituídas por células ocas, quando comprimidas transversalmente são achatadas precocemente, apresentando grandes deformações. Devido a isto o diagrama tensão x deformação apresenta um patamar quase horizontal após ser atingida a tensão limite de proporcionalidade.

Segundo Pfeil (2003) o valor de f_{c90} é cerca de $\frac{1}{4}$ do valor de f_{c0} .

4 TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS

4.1 OBJETIVO

Determinar a resistência à tração paralela às fibras da madeira.

4.2 DEFINIÇÕES

A resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) é dada pela máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo-de-prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme de área A e comprimento não menor que $8\sqrt{A}$.

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,max}}{A} \quad (3)$$

$F_{t0,max}$ é a máxima força de tração aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em newtons;

A é a área inicial da seção transversal tracionada do trecho central do corpo-de-prova, em milímetros quadrados;

f_{t0} é a resistência à tração paralela às fibras, em megapascals.

O valor característico da resistência à tração paralela às fibras $f_{t0,k}$ deve ser determinado pela expressão (1).

A rigidez da madeira, na direção paralela às fibras, obtida pelo ensaio de tração paralela às fibras, é caracterizada pelo módulo de elasticidade (E_{t0}) obtido do trecho linear do diagrama tensão x deformação específica. Para esta finalidade o carregamento deve ser aplicado em dois ciclos de carga e descarga como prevê a NBR 7190:1997.

4.3 PROCEDIMENTO

Para a determinação de f_{t0} pode ser utilizado corpo-de-prova com seção transversal de 2,0 cm x 5,0 cm e 45,0 cm de comprimento sendo que o trecho central deve medir 21,0 cm e as extremidades para fixação das garras da máquina de ensaio 12,0 cm (figura 3).

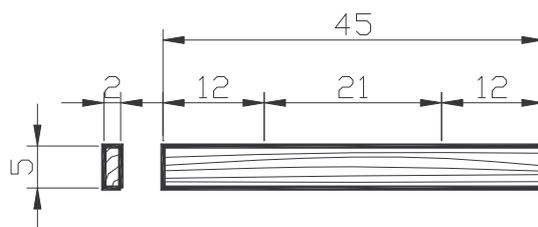


Figura 3 - Corpo-de-prova para o ensaio de tração paralela às fibras.

Para a determinação da resistência à tração paralela às fibras, as medidas do corpo-de-prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm.

Para o ajuste do corpo-de-prova na máquina de ensaio deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova.

A resistência deve ser determinada com carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min (aproximadamente 2,5 t/min para seção transversal de 5,0 cm x 5,0 cm).

4.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Deve ser feita conforme descreve o item relatório.

4.5 OBSERVAÇÕES:

Em geral os corpos-de-prova para ensaio de tração simples possuem dimensões maiores na região das garras objetivando garantir que a ruptura ocorra na região central.

O comportamento à tração paralela às fibras é caracterizado pelo regime linear até tensões bem próximas à de ruptura e por pequenas deformações.

5 TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS

5.1 OBJETIVO

Determinar a resistência à tração normal às fibras da madeira.

5.2 DEFINIÇÕES

A resistência à tração normal às fibras (f_{t90}) é dada pela máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo-de-prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme de área A e comprimento não menor que $2,5\sqrt{A}$.

$$f_{t90} = \frac{F_{t90,max}}{A_{t90}} \quad (4)$$

Onde:

$F_{t90,max}$ é a máxima força de tração aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em newtons;

A_{t90} é a área inicial da seção transversal tracionada do trecho alongado do corpo-de-prova, em milímetros quadrados;

f_{t90} é a resistência à tração normal às fibras, em megapascals.

O valor característico da resistência à tração normal às fibras $f_{t90,k}$ deve ser determinado pela expressão (1).

A resistência à tração normal às fibras deve ser utilizada apenas para estudos comparativos entre diferentes espécies de madeira, não devendo ser aplicada na avaliação da segurança das estruturas de madeira.

5.3 PROCEDIMENTO

Para a determinação da resistência à tração normal às fibras, as medidas do corpo-de-prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm.

Para o ajuste do corpo-de-prova na máquina de ensaio deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova.

A resistência deve ser determinada com carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min (aproximadamente 2,5 t/min para seção transversal de 5,0 cm x 5,0 cm).

5.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Deve ser feita conforme descreve o item relatório.

5.5 OBSERVAÇÕES:

A madeira raramente é solicitada à tração normal às fibras. Esta solicitação aparece, entretanto, em algumas ligações e em vigas curvas de madeira laminada colada (Pfeil, 2003).

Para Pfeil (2003) devem ser evitadas situações em que a madeira seja solicitada na direção normal às fibras pois f_{t90} é pequena, e depende da resistência da lignina como material ligante.

6 FLEXÃO

6.1 OBJETIVO

Determinar a resistência à flexão da madeira pela aplicação de carga estática (crescimento lento e gradativo).

6.2 DEFINIÇÕES

A resistência da madeira à flexão (f_M) (equação 5) é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão simples, calculado com a hipótese de a madeira ser um material elástico.

$$f_M = \frac{M_{max}}{W_e} \quad (5)$$

M_{max} é o máximo momento aplicado ao corpo-de-prova durante o ensaio, em newtons;
 W_e é o módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo-de-prova dado por $bh^2/6$, em milímetros cúbicos;

f_M é a resistência à flexão da madeira, em megapascals.

O valor característico da resistência convencional à flexão $f_{M,k}$ deve ser determinado pela expressão (1).

A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade (E_{M0}) determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento. Para esta finalidade o carregamento deve ser aplicado em dois ciclos de carga e descarga como prevê a NBR 7190:1997.

6.3 PROCEDIMENTO

O corpo-de-prova deve ter forma prismática, com seção transversal quadrada de 5,0 cm de lado e comprimento, na direção paralela às fibras, de 115,0 cm (figura 4).

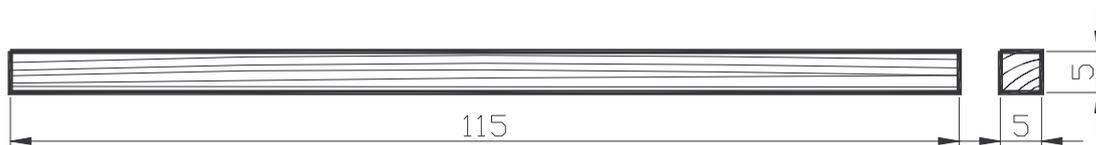


Figura 4 - Corpo-de-prova para o ensaio de flexão.

O corpo-de-prova deve ser fabricado de preferência com o plano de flexão perpendicular à direção radial da madeira, não se admitindo inclinações de fibras maiores que 6° em relação ao comprimento do corpo-de-prova.

Para a determinação da resistência convencional à flexão, as medidas dos lados do corpo-de-prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm.

No ensaio, o corpo-de-prova deve ser vinculado a dois apoios articulados móveis, com vão livre entre apoios de $21h$, em que h é o lado do corpo-de-prova, sendo o equilíbrio do sistema garantido pelo atrito com o atuador.

O carregamento consiste em uma carga concentrada, aplicada por meio de um cutelo acoplado ao atuador.

A resistência à flexão deve ser determinada com carregamento monotônico crescente, com uma taxa em torno de 10 MPa/min (aproximadamente 2,5 t/min para seção transversal de 5,0 cm x 5,0 cm).

6.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Deve ser feita conforme descreve o item relatório.

6.5 OBSERVAÇÕES:

Na flexão, as fibras são solicitadas à tração, compressão e ao cisalhamento.

O valor do módulo de elasticidade na flexão (E_{M0}) é um pouco menor do que o obtido no ensaio de compressão paralela às fibras (E_{C0}). O valor de E_{C0} pode ser obtido por meio de relações com E_{M0} . Para as árvores coníferas $E_{M0} = 0,85 E_{C0}$ e para as dicotiledôneas $E_{M0} = 0,90 E_{C0}$.

Pfeil (2003) denomina f_M por tensão resistente nominal pois é obtida com uma equação válida em regime elástico aplicada ao valor M_{max} para o qual as tensões de tração e compressão já se encontram em regime inelástico.

O diagrama tensão de flexão x deformação apresenta um trecho linear e outro não-linear. Após ser atingida a tensão limite de proporcionalidade ocorre a plastificação da região comprimida. A ruptura se inicia então por flambagem local das fibras mais comprimidas, o que provoca rebaixamento da linha neutra e conseqüente aumento de tensão nas fibras tracionadas seguido da ruptura destas fibras. A peça rompe afinal por tração na fibra inferior.

Segundo Pfeil (2003) o processo de flambagem progressiva das fibras depende da altura da região comprimida, de forma que ensaios com vigas de menor altura resultam em maiores valores de f_M para uma mesma espécie de madeira. Portanto, o uso em projeto de estruturas dos valores de f_M obtidos em ensaios de pequenas peças requer a correção por um fator de escala, como de fato recomendam as normas européia e norte-americana.

7 DUREZA

7.1 OBJETIVO

Determinação da dureza da madeira pelo método de Janka.

7.2 DEFINIÇÕES

A dureza da madeira (f_H) proposta por Janka é determinada convencionalmente pela tensão que, atuante em uma das faces de um corpo-de-prova prismático, produz a penetração de uma semi-esfera de aço com área diametral de 1 cm^2 , sendo dada por:

$$f_H = \frac{F_{max}}{A_{sec\ aodiametral}} \quad (6)$$

F_{max} é a máxima força aplicada ao corpo-de-prova necessária à penetração de uma semi-esfera de seção diametral com 1 cm^2 de área na profundidade igual ao seu raio (5,64 mm), em newtons;

$A_{seção\ diametral}$ é a área da seção diametral da esfera, igual a $1,0 \text{ cm}^2$;

f_H é a dureza Janka.

A dureza da madeira é medida na direção paralela às fibras (f_{H0}) e na direção normal às fibras (f_{H90}).

7.3 PROCEDIMENTO

O corpo-de-prova deve ter forma prismática de seção quadrada de 5,0 cm e comprimento ao longo das fibras de 15,0 cm.

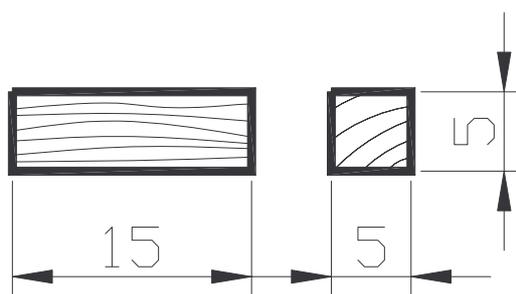


Figura 5 - Corpo-de-prova para o ensaio de dureza.

O corpo-de-prova deve ser fabricado com seus lados menores perpendiculares às direções preferenciais da madeira.

Para a determinação da dureza pelo método de Janka, as medidas dos lados do corpo-de-prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm.

A máquina de ensaio é a Amsler manual, com regulagem para 6000 kg (Pino menor na marca de 6000 kg e o pino maior na marca de 600 kg).

O carregamento deve ser monotônico crescente aplicado até que a esfera penetre a uma profundidade igual ao seu raio (5,64 mm), em um período de pelo menos um minuto (1 mm a cada 10 segundos).

7.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Deve ser feita conforme descreve o item relatório.

8 RESISTÊNCIA AO IMPACTO NA FLEXÃO (ENSAIO DE FLEXÃO DINÂMICA DA MADEIRA)

8.1 OBJETIVO

Determinação da resistência ao impacto na flexão da madeira.

8.2 DEFINIÇÕES

A resistência ao impacto à flexão (f_{bw}) (equação 7) é definida pela razão entre a energia necessária à fratura do corpo-de-prova (W) e a área da seção transversal deste, expressa em quilojoules por metro quadrado.

$$f_{bw} = \frac{1000W}{bh} \quad (7)$$

W é a energia necessária para a fratura do corpo-de-prova, em joules;

b e h são as dimensões da seção transversal do corpo-de-prova, na direção radial e tangencial, em milímetros.

O valor característico da resistência ao impacto à flexão $f_{bw,k}$ deve ser determinado pela expressão (1).

8.3 PROCEDIMENTO

O corpo-de-prova deve ter forma prismática de seção quadrada de 2 cm de lado e comprimento ao longo das fibras de 30 cm.

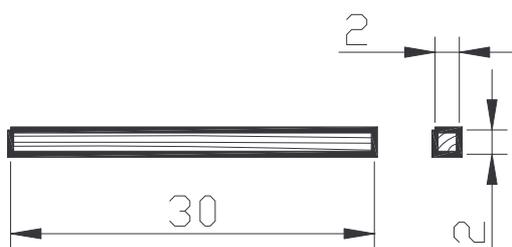


Figura 6 - Corpo-de-prova para o ensaio de flexão dinâmica.

O corpo-de-prova deve ser fabricado com os lados perpendiculares às direções preferenciais (tangencial e radial) da madeira, não se admitindo inclinações das fibras maiores que 6° em relação ao comprimento do corpo-de-prova.

Para a determinação da resistência ao impacto na flexão, as medidas dos lados do corpo-de-prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm.

Para o ensaio de impacto à flexão deve-se utilizar uma máquina de pêndulo (Pêndulo de Charpy) com capacidade três a cinco vezes maior que a energia necessária à ruptura do corpo-de-prova por flexão.

O ensaio deve ser feito para impacto nas direções radial e tangencial da madeira.

O pêndulo age no meio do corpo-de-prova

O corpo-de-prova deve ser apoiado sobre dois apoios cilíndricos de 15 mm de raio, com $24 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$ de distância entre os seus eixos.

Deve-se verificar a aferição da escala de energia consumida para romper o corpo-de-prova (sem colocar o corpo-de-prova entre os apoios e após a liberação do pêndulo, a indicação de energia consumida deve ser nula).

Após a queda do pêndulo, com o corpo-de-prova devidamente ajustado entre os apoios, ler na escala a energia consumida para romper o corpo-de-prova.

8.4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Deve ser feita conforme descreve o item relatório.

8.5 OBSERVAÇÃO

A ruptura do corpo-de-prova é por separação das fibras, com fendilhamento longitudinal.

9 BIBLIOGRAFIA

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

Pfeil, Walter; Pfeil, Michèle . Estruturas de Madeira, 6.^a ed., LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

Calil, Carlito Junior; Lahr, Francisco Antonio Rocco; Dias, Antonio Alves. Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira, 1.^a ed., Manole, Barueri, SP, 2003.

Kitamura, Sérgio. Apostila de resistência dos materiais (prática).

LaMEM - Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras.
<http://www.set.eesc.usp.br/lamem>

Introdução à Extensometria

prof. Flávio de Souza Barbosa (flavio@numec.ufjf.br)

24 de fevereiro de 2006

1 Introdução: Instrumentos de Medições

Existem diversos tipos de dispositivos para medições usados na instrumentação de estruturas, dentre os quais destaca-se:

- Flexímetros - Medidores de deslocamentos. Necessita de ponto fixo e é usado em ensaios estáticos ou dinâmicos com baixa aceleração. São bastante robustos e, em muitos casos, funcionam a partir de acoplamento de engrenagens, podendo apresentar mostradores digitais ou analógicos.
- Extensômetros elétricos ou *strain-gages* - Medidores de deformações. Podem ser resistivos ou a base de cristais (piezoelétricos). Seu princípio de funcionamento é baseado no fato de que deformações impostas a esse tipo de sensor implica em variações na sua resistência elétrica. Sendo assim, uma vez conectados à estrutura, pode-se medir deformações a partir de medidas elétricas extraídas do *strain-gage*. São usados em ensaios estáticos e dinâmicos.
- Acelerômetros - Medidores de aceleração. Não precisam de ponto fixo. São muito usados em ensaios dinâmicos, apresentando resultados bastante confiáveis. Podem ser construídos com strain-gages ou a base de cristais (piezoelétricos). A medição de deslocamentos a partir das acelerações nem sempre fornecem bons resultados (dificuldades na integração).

Os flexímetros e os strain-gages aplicados a medições estáticas serão estudados na cadeira Laboratório de Resistência dos Materiais. Já os ensaios dinâmicos com estes sensores, bem como os acelerômetros, estes serão estudados na cadeira Análise Experimental em Dinâmica das Estruturas (eletiva ETU063 - 2 créditos).

2 Extensômetros Elétricos de Resistência EER ou strain-gages

São extensômetros que utilizam princípios elétricos para seu funcionamento. O tipo mais comum utilizado em ensaios de estruturas são os do tipo fole, conforme mostrado nas figuras 1 e 2. Dependendo do tipo de base e do material metálico resistente, os extensômetros elétricos terão suas características e aplicações caracterizadas.

O princípio básico de funcionamento é que a resistência R de um fio condutor é função do seu comprimento L , da área da seção transversal A e da resistividade ρ do seu material, conforme equação que segue:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

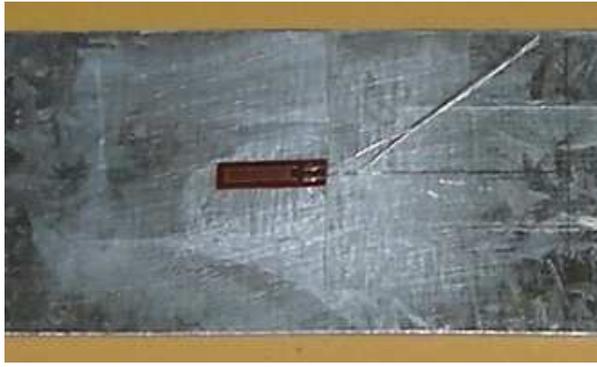


Figura 1: Exemplo de EER

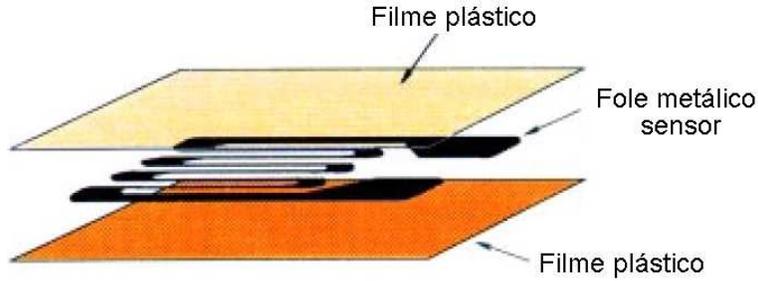


Figura 2: Esquema físico de um EER

A equação 1 permite escrever então que:

$$R = f(\rho, L, A) \quad (2)$$

Diferenciando equação 2 tem-se:

$$dR = \underbrace{\frac{\partial R}{\partial \rho}}_a d\rho + \underbrace{\frac{\partial R}{\partial L}}_b dL + \underbrace{\frac{\partial R}{\partial A}}_c dA \quad (3)$$

Desenvolvendo cada uma das derivadas parciais vem:

$$a \Rightarrow \frac{\partial R}{\partial \rho} = \frac{L}{A} \quad (4)$$

$$b \Rightarrow \frac{\partial R}{\partial L} = \frac{\rho}{A} \quad (5)$$

$$c \Rightarrow \frac{\partial R}{\partial A} = \frac{\partial(\rho LA^{-1})}{\partial A} = -\rho LA^{-2} \quad (6)$$

Substituindo então as derivadas parciais em 3 tem-se então:

$$dR = \frac{L}{A}d\rho + \frac{\rho}{A}dL - \frac{\rho L}{A^2}dA \quad (7)$$

Dividindo a equação 7 por $R = \rho L/A$, tem-se:

$$\frac{dR}{R} = \underbrace{\frac{d\rho}{\rho}}_d + \frac{dL}{L} - \underbrace{\frac{dA}{A}}_e \quad (8)$$

O termo “ e ” da equação 8 pode ser colocado em função de $\frac{dL}{L}$. Supondo-se uma seção transversal retangular de dimensões $y \times z$ do fio condutor ($A = yz$).

Desenvolvendo então tem-se:

$$\begin{aligned}
 dA &= \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\partial A}{\partial z} dz \\
 dA &= ydz + zdy \\
 \frac{dA}{A} &= \frac{ydz}{yz} + \frac{zdy}{yz} \\
 \frac{dA}{A} &= \frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} \\
 \frac{dA}{A} &= \epsilon_z + \epsilon_y \\
 \frac{dA}{A} &= -\nu \frac{dL}{L} - \nu \frac{dL}{L} \\
 \frac{dA}{A} &= -2\nu \frac{dL}{L}
 \end{aligned} \tag{9}$$

onde ν é o coeficiente de Poisson do material do fio condutor.

O termo “ d ” da equação 8 também pode ser escrito em função de $\frac{dL}{L}$. De acordo com as experiências de Bridgman, tem-se

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{dV}{V} \tag{10}$$

onde:

$$V = zyL \tag{11}$$

é o volume do fio condutor e c é a constante de Bridgman.

Desenvolvendo a equação 11:

$$\begin{aligned}
 dV &= \frac{\partial V}{\partial z} dz + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial L} dL \\
 dV &= yLdz + zLdy + zy dL \\
 \frac{dV}{V} &= \frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} + \frac{dL}{L} \\
 \frac{dV}{V} &= -\nu \frac{dL}{L} - \nu \frac{dL}{L} + \frac{dL}{L}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Substituindo equação 12 em 10 tem-se então:

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \left(-\nu \frac{dL}{L} - \nu \frac{dL}{L} + \frac{dL}{L} \right) \tag{13}$$

Levando equações 9 e 13 na equação 8, tem-se então:

$$\begin{aligned}
 \frac{dR}{R} &= c \left(-\nu \frac{dL}{L} - \nu \frac{dL}{L} + \frac{dL}{L} \right) + \frac{dL}{L} + 2\nu \frac{dL}{L} \\
 \frac{dR}{R} &= [(1 + 2\nu) + c(1 - 2\nu)] \frac{dL}{L}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Chamando $k = [(1 + 2\nu) + c(1 - 2\nu)]$, chega-se finalmente a:

$$\frac{dR}{R} = k \frac{dL}{L} \tag{15}$$

ou simplesmente:

$$\frac{dR}{R} = k\epsilon_x \quad (16)$$

A constante k é conhecida pelo seu nome em inglês “*gage-factor*” e é uma característica do EER normalmente fornecida pelo fabricante. Assim sendo, fica claro que é possível conhecer a deformação ϵ_x no ponto onde foi colado o EER, bastando para isso conhecer a variação de sua resistência elétrica.

3 Circuito em ponte de Wheatstone para leitura de deformações via EER

Devido às imprecisões e dificuldades de se fazer leitura direta da variação da resistência elétrica em função de deformações em EER, normalmente utiliza-se circuitos que, a partir de leituras de voltagem, fornecem de forma indireta esta variação de resistência. O circuito em ponte de Wheatstone, por exemplo, desempenha esse papel e pode ser usado para aplicações tanto estáticas como dinâmicas. Seja a figura 3.

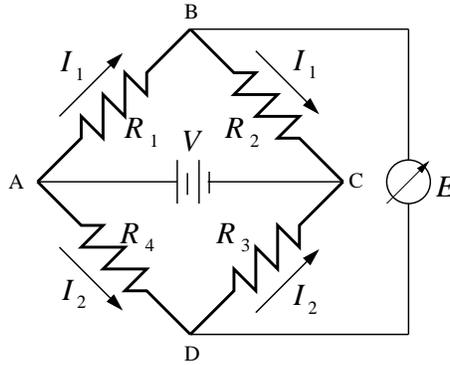


Figura 3: Ponte de Wheatstone

Aplicando-se lei de Ohm, tem-se que:

$$V_{AC} = V = (R_1 + R_2)I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{V}{R_1 + R_2} \quad (17)$$

$$V_{AC} = V = (R_3 + R_4)I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{V}{R_3 + R_4} \quad (18)$$

Ainda aplicando-se lei de Ohm, tem-se também:

$$V_{AB} = R_1 I_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V \quad (19)$$

$$V_{AD} = R_4 I_2 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V \quad (20)$$

Sendo E a leitura realizada, partindo-se das equações anteriores tem-se:

$$E = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V - \frac{R_4}{R_3 + R_4} V \quad (21)$$

$$E = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V = \frac{\begin{vmatrix} R_1 & R_2 \\ R_4 & R_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} (R_1 + R_2) & 0 \\ 0 & (R_3 + R_4) \end{vmatrix}} V \quad (22)$$

A voltagem E lida será igual a zero e a ponte considerada em equilíbrio se:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (23)$$

O balanceamento inicial permite o emprego da ponte de Wheatstone para leituras estáticas e dinâmicas. Após ser balanceada, aplica-se o carregamento na estrutura sensoreada, o que resulta em deformações nos EER. A leitura $E = 0$, obtida para a ponte em equilíbrio, passa então a ser $\Delta E \neq 0$:

$$\Delta E = \frac{\begin{vmatrix} R_1 + \Delta R_1 & R_2 + \Delta R_2 \\ R_4 + \Delta R_4 & R_3 + \Delta R_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} (R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2) & 0 \\ 0 & (R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4) \end{vmatrix}} V = \frac{A}{B} V \quad (24)$$

Desenvolvendo A :

$$\begin{aligned} A &= (R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_4 + \Delta R_4)(R_2 + \Delta R_2) \\ &= R_1 R_3 + R_1 \Delta R_3 + \Delta R_1 R_3 + \underbrace{\Delta R_1 \Delta R_3}_{\text{segunda ordem}} - R_4 R_2 - R_4 \Delta R_2 - \Delta R_4 R_2 - \underbrace{\Delta R_4 \Delta R_2}_{\text{segunda ordem}} \\ &= R_1 \Delta R_3 + \Delta R_1 R_3 - R_4 \Delta R_2 - \Delta R_4 R_2 \\ &= R_1 R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) + R_2 R_4 \left(-\frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \\ &= R_1 R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

Desenvolvendo B :

$$B = (R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4) \quad (26)$$

Desprezando os termos de segunda ordem e os produtos de $\Delta R_i R_j$, ($i, j = 1 \cdots 4$), que são muito pequenos comparados com os produtos $R_i R_j$ tem-se:

$$\begin{aligned} B &= R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4 \\ &= R_1 R_4 + 2R_1 R_3 + R_2 R_3 \\ &= \frac{R_2}{R_2} R_1 R_4 + 2R_1 R_3 + R_2 R_3 \\ &= \frac{R_1}{R_2} R_1 R_3 + 2R_1 R_3 + R_2 R_3 \\ &= \frac{R_1^2 R_3}{R_2} + 2R_1 R_3 + R_2 R_3 \\ &= \frac{R_3}{R_2} (R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2) \\ &= \frac{R_1 R_3}{R_1 R_2} (R_1 + R_2)^2 \end{aligned} \quad (27)$$

Substituindo os valores de A e B e na equação 24:

$$\Delta E = \frac{A}{B}V = \underbrace{R_1 R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)}_A \underbrace{\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2 R_1 R_3}}_{1/B} V$$

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (28)$$

Da equação 16 tem-se $\frac{dR}{R} = k\epsilon_x$, e a equação anterior passa a ser escrita como:

$$\Delta E = V \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} (k_1 \epsilon_{x1} - k_2 \epsilon_{x2} + k_3 \epsilon_{x3} - k_4 \epsilon_{x4}) \quad (29)$$

Normalmente utiliza-se EERs iguais entre si, o que resulta em $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ e $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k$. Assim sendo a última equação pode ser simplificada:

$$\Delta E = V \frac{RR}{(R + R)^2} (k\epsilon_{x1} - k\epsilon_{x2} + k\epsilon_{x3} - k\epsilon_{x4})$$

$$\Delta E = \frac{V}{4} k (\epsilon_{x1} - \epsilon_{x2} + \epsilon_{x3} - \epsilon_{x4}) \quad (30)$$

Uma observação importante é a seguinte: Caso se tenha 4 EERs medindo deformações num “mesmo ponto” da estrutura, ou seja, $\epsilon_{x1} = \epsilon_{x2} = \epsilon_{x3} = \epsilon_{x4} = \epsilon_x$ tem-se:

$$\Delta E = \frac{V}{4} k (\epsilon_x - \epsilon_x + \epsilon_x - \epsilon_x) = 0 \quad (31)$$

e, conseqüentemente, a leitura que se faz com o voltímetro seria nula, o que tornaria o ensaio com esta configuração completamente equivocado.

O que fazer então? Para contornar estes problemas pode-se colar os EER em posições da estrutura com medidas simétricas de deformações, por exemplo, como mostrado na figura 4.

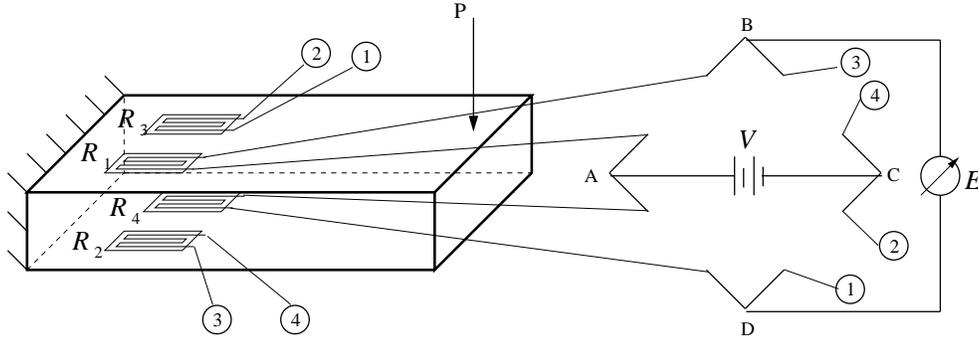


Figura 4: Ensaio de flexão

Neste caso deseja-se medir a deformação longitudinal devida à flexão da barra. Observa-se que as deformações para a carga P nos pontos onde estão colados os EER são idênticas em módulo e iguais a:

$$\begin{aligned} \epsilon_{x1} &= \epsilon_x \\ \epsilon_{x2} &= -\epsilon_x \\ \epsilon_{x3} &= \epsilon_x \\ \epsilon_{x4} &= -\epsilon_x \end{aligned} \quad (32)$$

Levando as equações 32 à equação 30, tem-se

$$\begin{aligned}\Delta E &= \frac{V}{4}k[\epsilon_x - (-\epsilon_x) + \epsilon_x - (-\epsilon_x)] \\ \Delta E &= \frac{V}{4}k 4 \epsilon_x = Vk\epsilon_x\end{aligned}\quad (33)$$

Outra forma de resolver este tipo de problema, pois nem sempre é possível sensorar pontos com valores simétricos de deformação, são os circuitos em 1/4 de ponte (um EER ativo) ou 1/2 de ponte (dois EER ativos).

3.1 Circuito em 1/4 de ponte

Numa medição de deformações, nem sempre são utilizados 4 EER ativos. Pode-se, adotar 3 resistências elétricas fixas e apenas um EER ($R_1 = R$ por exemplo medindo $\epsilon_{x1} = \epsilon_x$, como mostrado na figura 5.

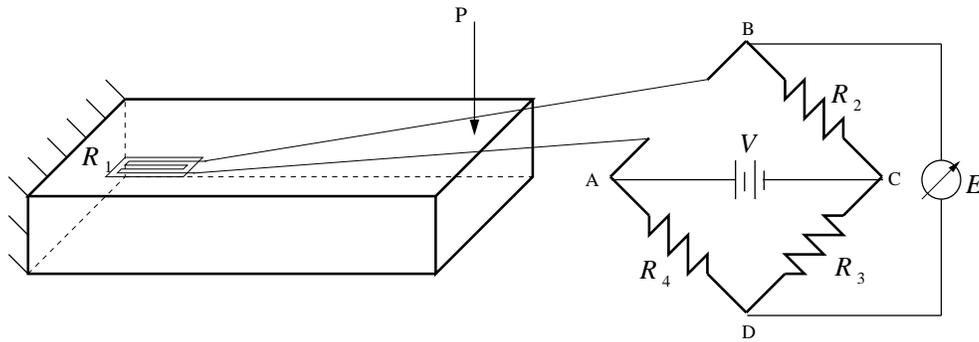


Figura 5: Ensaio de flexão com 1/4 de ponte

Assim sendo, a equação 30 fica:

$$\begin{aligned}\Delta E &= \frac{V}{4}k(\epsilon_{x1} \underbrace{-\epsilon_{x2} + \epsilon_{x3} - \epsilon_{x4}}_{=0}) \\ \Delta E &= \frac{V}{4}k\epsilon_x\end{aligned}\quad (34)$$

3.2 Circuito em 1/2 de ponte

De forma semelhante ao apresentado no item anterior, pode-se, adotar 2 resistências elétricas fixas e dois EER ($R_1 = R_2 = R$) por exemplo medindo $\epsilon_{x1} = -\epsilon_{x2} = \epsilon_x$, conforme mostra figura 6

Assim sendo, a equação 30 fica:

$$\begin{aligned}\Delta E &= \frac{V}{4}k[\epsilon_x - (-\epsilon_x) + \underbrace{\epsilon_{x3}}_{=0} \underbrace{-\epsilon_{x4}}_{=0}] \\ \Delta E &= \frac{V}{2}k\epsilon_x\end{aligned}\quad (35)$$

É importante observar que os EER ativos devem estar em braços opostos da ponte de Wheatstone para não anular mutuamente suas medidas de deformações.

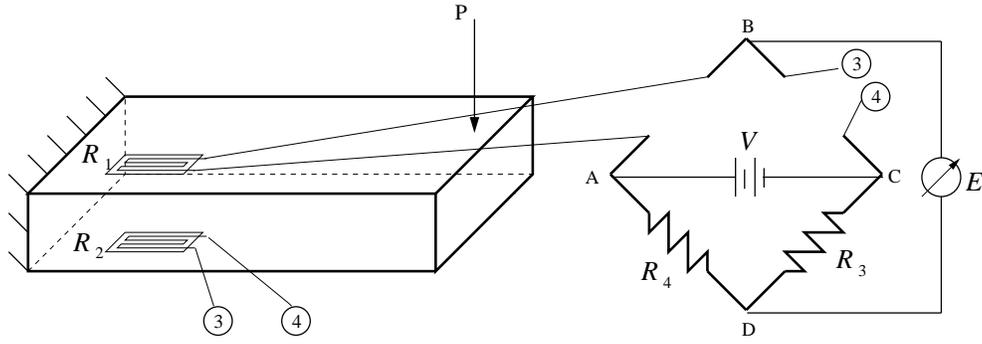


Figura 6: Ensaio de flexão com 1/2 de ponte

3.3 Efeito de temperatura

A sensibilidade de medidas realizadas via EER é bastante grande em geral. Com isso, diferenças de temperatura durante o ensaio podem comprometer os resultados pois os EER irão medir, além da deformação pelo carregamento, deformações providas da variação de temperatura. Assim sendo tem-se:

$$\epsilon_{xi} = \epsilon_{xi}^{carg} + \epsilon_{xi}^{temp} \quad (36)$$

sendo $i = 1 \dots 4$, ϵ_{xi}^{carg} a parcela de deformação provida do carregamento (normalmente o que se deseja medir) e ϵ_{xi}^{temp} a parcela de deformação provida da variação de temperatura.

Para contornar estes problemas, pode-se adotar as seguintes estratégias:

- Usar um EER colado em uma peça de mesmo material da estrutura ensaiada, no mesmo ambiente de ensaio, conforme sugere figura 7.

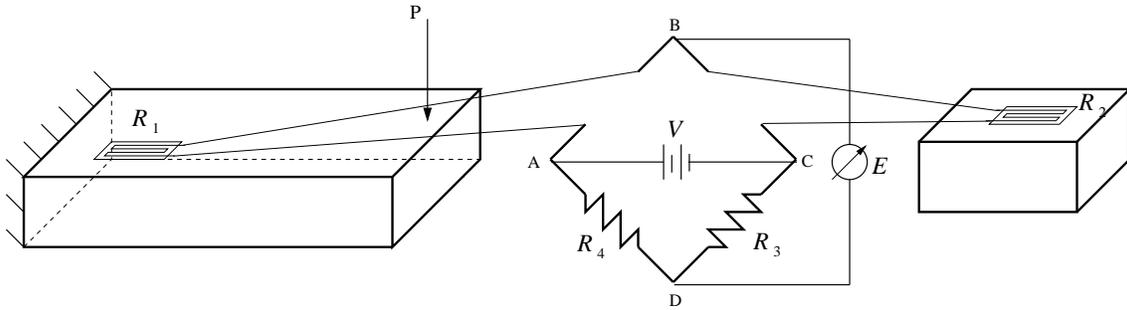


Figura 7: Eliminação do efeito de temperatura

Neste caso tem-se:

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{V}{4} k \left(\underbrace{\epsilon_x}_{\epsilon_x^{carg} + \epsilon_x^{temp}} \underbrace{-\epsilon_x}_{\epsilon_x^{temp}} + \underbrace{\epsilon_{x3}}_{=0} - \underbrace{\epsilon_{x4}}_{=0} \right) \\ \Delta E &= \frac{V}{4} k \epsilon_x^{carg} + \epsilon_x^{temp} - \epsilon_x^{temp} \\ \Delta E &= \frac{V}{4} k \epsilon_x^{carg} \end{aligned} \quad (37)$$

- Colar EER em braços adjacentes (R_1 e R_2 por exemplo) da ponte em pontos de deformações devido ao carregamento simétricas, conforme já mostrado na mostra

figura 6. Neste caso tem-se:

$$\begin{aligned}
 \Delta E &= \frac{V}{4}k \left(\underbrace{\epsilon_x}_{\epsilon_x^{carg} + \epsilon_x^{temp}} - \underbrace{\epsilon_x}_{-\epsilon_x^{carg} + \epsilon_x^{temp}} + \underbrace{\epsilon_{x3}}_{=0} - \underbrace{\epsilon_{x4}}_{=0} \right) \\
 \Delta E &= \frac{V}{4}k (\epsilon_x^{carg} + \epsilon_x^{temp} + \epsilon_x^{carg} - \epsilon_x^{temp}) \\
 \Delta E &= \frac{V}{2}k \epsilon_x^{carg} \tag{38}
 \end{aligned}$$

As páginas que seguem trazem os tipos de ligação em ponte de Wheatstone mais comuns usados nos ensaios de engenharia. Logo em seguida, uma tabela com diversos tipos de extensômetros é apresentada.

How to Form Strain-gage Bridges

No.	Name	Application Sample	Circuit	Output	Remarks	Bridge Box DB-120A/350A
1	1-active-gage 2-wire system Number of gages: 1	 Uniaxial stress (uniform tension/compression)		$\epsilon_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ K _s : Gage factor ε _o : Strain E: Bridge voltage ε _o : Output voltage R _g : Gage resistance R: Fixed resistance	Suitable for use under environment of less ambient temperature changes; no temperature compensation. x1 output	
2	1-active-gage 3-wire system Number of gages: 1	 Uniaxial stress (uniform tension/compression)		$\epsilon_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$	No temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled. x1 output	
3	Dual 1-active-gage 2-wire system in series (to cancel bending strain) Number of gages: 2	 Bending Uniaxial stress (uniform tension/compression)		$\epsilon_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ R _{g1} Strain: ε ₁ R _{g2} Strain: ε ₂ $\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$ R: Fixed resistance R = R _{g1} + R _{g2}	No temperature compensation; bending strain cancelled. x1 output	
4	Dual 1-active-gage 3-wire system in series (to cancel bending strain) Number of gages: 2	 Bending Uniaxial stress (uniform tension/compression)		$\epsilon_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ R _{g1} Strain: ε ₁ R _{g2} Strain: ε ₂ $\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$ R: Fixed resistance R = R _{g1} + R _{g2}	No temperature compensation; bending strain cancelled; thermal effect of leadwires cancelled. x1 output	
5	Active-dummy 2-gage system Number of gages: 2	 Active gage Uniaxial stress (uniform tension/compression) Dummy gage		$\epsilon_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ K _s : Gage factor ε _o : Strain E: Bridge voltage ε _o : Output voltage R _{g1} : Strain: ε _o R _{g2} Strain: 0	Temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled. x1 output	
6	Orthogonal 2-active-gage system Number of gages: 2	 Uniaxial stress (uniform tension/compression)		$\epsilon_o = \frac{(1 + \nu) E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ ν: Poisson's ratio R _{g1} , R _{g2} : Gage resistance R _{g1} Strain: ε _o R _{g2} Strain: -νε _o R: Fixed resistance	Temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled. x(1+ν) output	
7	2-active-gage system (for bending strain measurement) Number of gages: 2	 Bending stress		$\epsilon_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ R _{g1} Strain: ε _o R _{g2} Strain: -ε _o R: Fixed resistance	Temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled; compressive/tensile strain cancelled. x2 output	
8	Opposite side 2-active-gage 2-wire system Number of gages: 2	 Uniaxial stress (uniform tension/compression)		$\epsilon_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ R _{g1} Strain: ε _o R _{g2} Strain: ε _o R: Fixed resistance	No temperature compensation; bending strain cancelled by bonding to the front and rear. x2 output	

No.	Name	Application Sample	Circuit	Output	Remarks	Bridge Box DB-120A/350A
9	Opposite side 2-active-gage 3-wire system Number of gages: 2	 Uniaxial stress (uniform tension/compression)		$\epsilon_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ Rg_1, \dots Strain: ϵ_o Rg_2, \dots Strain: ϵ_o R : Fixed resistance	No temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled; bending strain cancelled by bonding to the front and rear. x2 output	
10	4-active-gage system (for bending strain measurement) Number of gages: 4	 Bending stress		$\epsilon_o = K_s \cdot \epsilon_o \cdot E$ Rg_1, Rg_3, \dots Bending strain: ϵ_o Rg_2, Rg_4, \dots Bending strain: $-\epsilon_o$	Temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled; compressive/tensile strain cancelled. x4 output	
11	Orthogonal 4-active-gage system Number of gages: 4	 Uniaxial stress (uniform tension/compression)		$\epsilon_o = \frac{(1 + \nu) E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ ν : Poisson's ratio Rg_1, Rg_3, \dots Strain: ϵ_o Rg_2, Rg_4, \dots Strain: $-\nu \epsilon_o$	Temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled. x2(1+ ν) output	
12	Active-dummy 4-gage system Number of gages: 4	 Active gages Uniaxial stress (uniform tension/compression) Dummy gages		$\epsilon_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ Rg_1, Rg_3, \dots Strain: ϵ_o Rg_2, Rg_4, \dots Strain: 0	Temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled; bending strain cancelled by bonding to the front and rear. x2 output	
13	2-active-gage system (for bending strain measurement) Number of gages: 2			$\epsilon_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ Rg_1, \dots Bending strain: ϵ_o Rg_2, \dots Bending strain: $-\epsilon_o$ R : Fixed resistance	Temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled. x2 output	
14	4-active-gage system (for bending strain measurement) Number of gages: 4			$\epsilon_o = K_s \cdot \epsilon_o \cdot E$ Rg_1, Rg_3, \dots Bending strain: ϵ_o Rg_2, Rg_4, \dots Bending strain: $-\epsilon_o$	Temperature compensation; thermal effect of leadwires cancelled. x4 output	
15	4-active-1-gage system (for mean strain measurement) Number of gages: 4			$\epsilon_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ $\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4}{4}$ R : Fixed resistance $Rg = R$ $R = Rg_1 = Rg_2 = Rg_3 = Rg_4$	No temperature compensation; mean strain. x1 output	

●Relation between strain and voltage

The output of a strain-gage bridge is expressed as a strain quantity ($\mu\epsilon$) or an output voltage (mV/V or $\mu V/V$) against the bridge voltage. The strain quantity and the output voltage have the following relation:

$$\epsilon_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$$

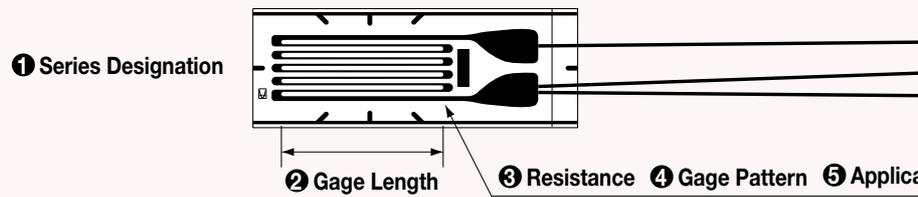
If the bridge voltage $E = 1V$ and the gage factor $K_s = 2.00$,

$$2\epsilon_o = \epsilon_o$$

Thus, a strain output is always 2 times larger than a bridge output voltage.

$$\text{e.g. } 3000\mu\epsilon \rightarrow 1500\mu V/V = 1.5mV/V$$

Strain Gage Model Number Coding System



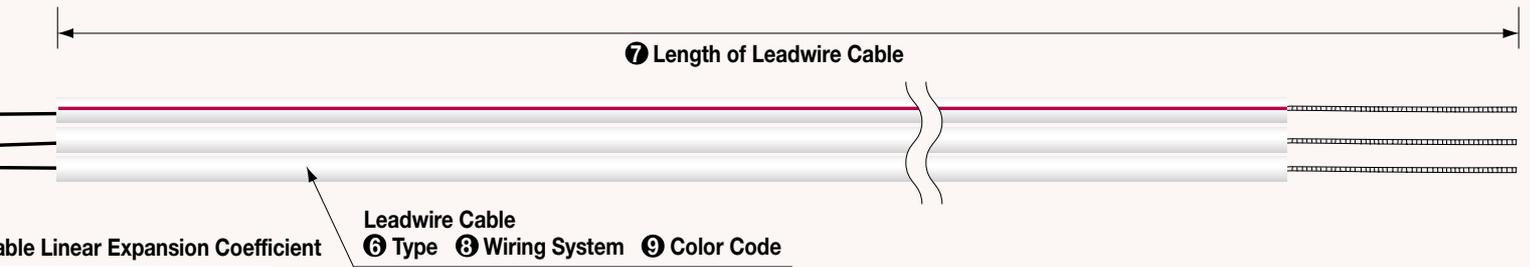
KFG - 2 - 120 - C1

1 Series Designation	2 Gage Length	3 Resistance	4 Gage Pattern
<p>KFG: General-purpose foil strain gage</p> <p>KFGT: Foil strain gage with temp. sensor</p> <p>KFR: Foil strain gage</p> <p>KFW: Waterproof foil strain gage</p> <p>KFWS: Small waterproof foil strain gage</p> <p>KCW: Weldable waterproof foil strain gage</p> <p>KC: Wire strain gage</p> <p>KM: Embedded foil strain gage for concrete</p> <p>KMC: Embedded wire strain gage for concrete</p> <p>KFRP: Foil strain gage for composite materials</p> <p>KFRS: Foil strain gage for printed boards</p> <p>KFP: Foil strain gage for plastics</p> <p>KFML: Foil strain gage for low-elasticity materials</p> <p>KSP: Semiconductor strain gage</p> <p>KSN: Self-temperature-compensation semiconductor strain gage</p> <p>KSPH: High-output semiconductor strain gage</p> <p>KSPH: Ultralinear semiconductor strain gage</p> <p>KHCX: Encapsulated strain gage</p> <p>KHCD: Encapsulated strain gage</p> <p>KHCS: Encapsulated strain gage</p> <p>KHCM: Encapsulated strain gage</p> <p>KHC: Encapsulated strain gage</p> <p>KFU: High-temperature foil strain gage</p> <p>KH: Weldable high-temp. foil strain gage</p> <p>KFH: High-temperature foil strain gage</p> <p>KFL: Low-temperature foil strain gage</p> <p>KLM: Ultrahigh-elongation wire strain gage</p> <p>KFEL: High-elongation foil strain gage</p> <p>KFN: Noninductive foil strain gage</p> <p>KFS: Shielded foil strain gage</p> <p>KFF: Foil bending strain gage</p> <p>KCH: Foil strain gage with protector</p> <p>KMP: Embedded foil strain gage for plastics</p> <p>KTB: Temperature gage</p> <p>KV: Crack gage</p>	<p>015: 0.15mm</p> <p>02N: 0.2mm</p> <p>02: 0.2mm</p> <p>03: 0.3mm</p> <p>05: 0.5mm</p> <p>1N: 1mm</p> <p>1: 1mm</p> <p>1.5: 1.5mm</p> <p>2N: 2mm</p> <p>2: 2mm</p> <p>3: 3mm</p> <p>4N: 4mm</p> <p>4: 4mm</p> <p>5: 5mm</p> <p>6: 6mm</p> <p>7: 7mm</p> <p>9: 9mm</p> <p>10: 10mm</p> <p>20: 20mm</p> <p>30: 30mm</p> <p>60: 60mm</p> <p>70: 70mm</p> <p>80: 80mm</p> <p>120: 120mm</p>	<p>50: 50Ω</p> <p>60: 60Ω</p> <p>120: 120Ω</p> <p>200: 200Ω</p> <p>350: 350Ω</p> <p>500: 500Ω</p> <p>1K: 1000Ω</p> <p>2K: 2000Ω</p> <p>10K: 10000Ω</p>	<p>A1: Uniaxial, leads at one end (KC, KTB gages)</p> <p>A9: Uniaxial, leads at one end (KLM gage)</p> <p>C1: Uniaxial, leads at one end (foil gage)</p> <p>C2: Uniaxial 90°, lead at both ends</p> <p>C3: Uniaxial 0°, lead at both ends</p> <p>C9: Uniaxial, leads at one end (KFN gage)</p> <p>C11: Uniaxial, 2-element, 1mm thick (KFF gage)</p> <p>C12: Uniaxial, 2-element, 2mm thick (KFF gage)</p> <p>C15: Uniaxial right 45°, for shearing strain, leads at one end</p> <p>C16: Uniaxial left 45°, for shearing strain, leads at one end</p> <p>C20: Uniaxial, leads at a side (for bolt axial tension)</p> <p>D1: Biaxial 0°/90°, lead at both ends</p> <p>D2: Biaxial 0°/90°, lead at both ends (for torque)</p> <p>D3: Triaxial 0°/90°/45°, lead at both ends, plane arrangement</p> <p>D4: Triaxial 0°/120°/240°, plane arrangement</p> <p>D6: Quadrxial 0°/30°/90°/150°</p> <p>D9: Uniaxial 5-element 90°</p> <p>D16: Biaxial 0°/90° stacked rosette, round base</p> <p>D17: Triaxial 0°/90°/45° stacked rosette, round base</p> <p>D19: Uniaxial 5-element 0°</p> <p>D20: Biaxial 0°/90° (KFN gage)</p> <p>D22: Triaxial 0°/90°/45°, plane arrangement</p> <p>D25: Triaxial 0°/90°/45°, plane arrangement</p> <p>D28: Triaxial 0°/135°/90°, plane arrangement (for boring)</p> <p>D29: Biaxial 0°/90°, leads at one end, plane arrangement</p> <p>D30: Triaxial 0°/90°/45°, leads at one end, plane arrangement</p> <p>D31: Biaxial 0°/90°, leads at one end (for torque)</p> <p>D39: Biaxial 5-element 0°/90°</p> <p>E3: Uniaxial, lead at both ends (semiconductor gage)</p> <p>E4: Uniaxial, leads at one end (semiconductor gage)</p> <p>E5: Uniaxial, lead at both ends with no base (semiconductor gage)</p> <p>F2: Uniaxial 2-element (semiconductor gage)</p> <p>F3: Biaxial 0°/90° (semiconductor gage)</p> <p>G4: Uniaxial, leads at one end (KH-G4)</p> <p>G8: Uniaxial active/dummy 2-element, Inconel (for KHC)</p> <p>G9: Uniaxial active/dummy 2-element, SUS (for KHC)</p> <p>G10: Uniaxial (for KCW)</p> <p>G11: Uniaxial (for KHCD)</p> <p>G12: Uniaxial active/dummy 2-element (for KHCS)</p> <p>G13: Uniaxial active/dummy 2-element (for KHCS)</p> <p>G14: Full-bridge (for KCW)</p> <p>G15: Uniaxial active/dummy 2-element (for KHCM)</p> <p>H1: Uniaxial (for KM-30)</p> <p>H2: Uniaxial (for KM-120)</p> <p>H3: Uniaxial (for KMC)</p> <p>H4: Uniaxial with T thermocouple (for KMC)</p> <p>J1: Uniaxial (for KFS)</p>

Note: Combination of codes is limited and menu options cannot freely be selected.

To select the most suitable strain gage and related products, refer to Pages 18 to 31.

KYOWA can customize strain gages according to measuring purposes.



5 Applicable Linear Expansion Coefficient	Leadwire Cable			
6 Type	7 Length	8 Wiring System	9 Color Code	
1: CFRP, etc. for composite materials Amber (1.1) Diamond (1.2) 3: GFRP, etc. for composite materials Silicon (2.3) Sulfur (2.7) 5: GFRP, etc. for composite materials Tungsten (4.5) Lumber (5.0) Molybdenum (5.2) Zirconium (5.4) Kobar (5.9) 6: GFRP, etc. for composite materials 28 Tantalum (6.6) 9: CFRP, GFRP, etc. for composite materials Titanium alloy (8.5) Platinum (8.9) Soda-lime glass (9.2) 11: Common steel (11.7) SUS631 (10.3) SUS630 (10.6) Cast iron (10.8) Nickel-molybdenum steel (11.3) Beryllium (11.5) Inconel X (12.1) 13: NCF, etc. for corrosion and heat-resistant alloys Nickel (13.3) Printed board (13.0) 16: Stainless steel SUS304 (16.2) Beryllium steel (16.7) Copper (16.7) 23: 2014-T4 aluminum (23.4) Brass (21.0) Tin (23.0) 2024-T4 aluminum (23.2) 27: Magnesium alloy (27.0) Composite material GFRP (35.0) 65: Acrylic resin (65.0) Polycarbonate (66.6)	B: Glass-coated cable of 3 Ni-clad copper wires C: MI cable (for KHC, KHCD, KHCM, KHCS and KHCX gages) D: Glass-coated cable of 3 FeNi-clad copper wires F: Fluoplastic-coated high/low temp. 3-wire cable (equiv. to L-3 leadwire cable) G: Polyethylene-coated cross-link 3-wire cable H: High/low temp. 3-wire cable (equiv. to L-17 leadwire cable) J: Vinyl-coated normal temp. low-noise 3-wire cable (equiv. to L-13 leadwire cable) L: Vinyl-coated flat 2 or 3-wire cable (L-6, L-7, L-9 or L-10) N: Polyester-coated copper wire cable R: Mid-temp. 2 or 3-wire cable (L-11 or L-12) W: Vinyl-coated flat 3-wire cable (for KM-120) Y: Vinyl-coated flat 2-wire cable (for KM-30)	C: Centimeter e.g. 30C = 30cm M: Meter e.g. 3M = 3m	2: 2-wire system 3: 3-wire system In the case of encapsulated gage Number: Length of soft cable V: With bridge adapter F: With compression fitting FV: With both bridge adapter and compression fitting	Color codes are available for only vinyl-coated flat leadwire cables. 2-wire system R: Red W: White* B: Black* G: Green* Y: Yellow* *Custom-made S: Multi-axial gages (Standard) • Biaxial (D16) 0° (1st axis): Red 90° (2nd axis): White • Triaxial (D17) 0° (1st axis): Red 45° (3rd axis): Green 90° (2nd axis): White 3-wire system The insulator color is white and the stripe color code is as follows. R: Red L: Blue* B: Black* G: Green* Y: Yellow* *Custom-made S: Multi-axial gages (Standard) • Biaxial (D16) 0° (1st axis): Red 90° (2nd axis): Black • Triaxial (D17) 0° (1st axis): Red 45° (3rd axis): Blue 90° (2nd axis): Black

To select a strain gage equipped with leadwire cable, refer to Page 24.

To select a strain gage and leadwire cable separately, refer to Page 26.