

Capítulo 4

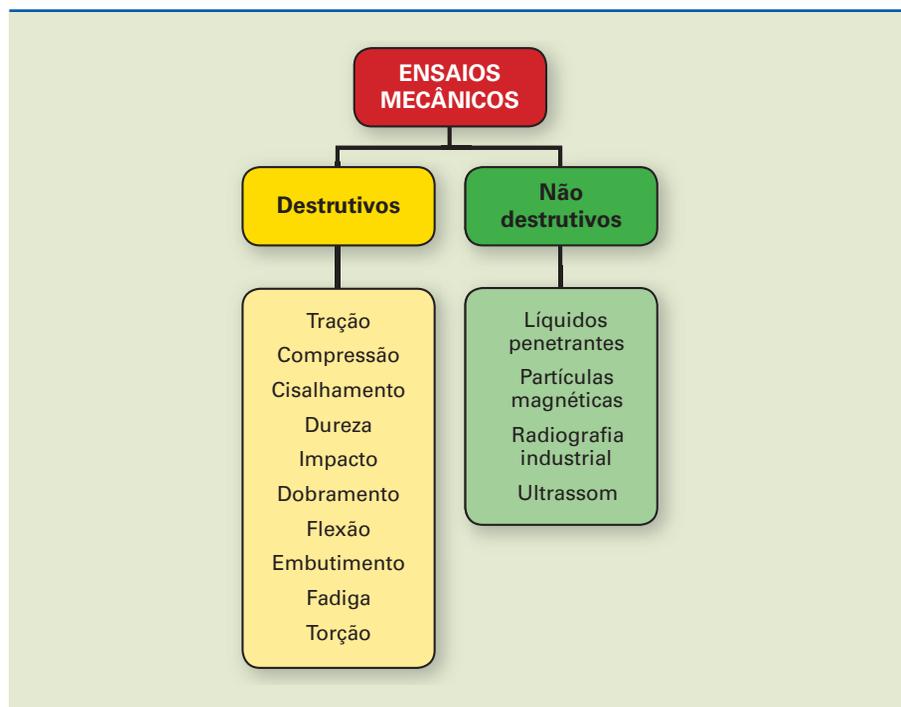
Ensaio mecânico dos materiais

A determinação das propriedades mecânicas, dos defeitos e da descontinuidade de materiais é realizada por meio de vários tipos de ensaio.

Como mostra a figura 4.1, os ensaios podem ser classificados em:

- **destrutivos:** promovem a ruptura ou a inutilização do material a ser ensaiado. Exemplos: tração, compressão, cisalhamento, torção, dureza, dobramento, embutimento, fadiga, impacto, entre outros.
- **não destrutivos:** não danificam o material a ser ensaiado e são capazes de detectar, durante as diversas fases do processo de fabricação, defeitos ou descontinuidades que dificilmente seriam encontradas por meio de ensaios destrutivos. Dessa maneira aumentam a confiabilidade das propriedades dos materiais e, por consequência, dos produtos finais. Exemplos: visuais, por líquido penetrante (visível e fluorescente), por partículas magnéticas (*yoke*, bobina, eletrodo, condutor central e contato direto), por radiações ionizantes (raios X e raios gama) e por ultrassom.

Figura 4.1
Classificação dos ensaios.



Para a realização dos ensaios mecânicos, podemos utilizar corpos de provas (elementos normalmente normalizados) ou o produto.

A determinação do ensaio adequado depende do tipo de sollicitação e situação de trabalho a que o material estará sujeito durante sua utilização. A figura 4.2 mostra esquematicamente os tipos de esforços que atuam nos materiais.

Em todos os casos a aplicação da força deve ser dimensionada de acordo com cada ensaio, para não invalidá-lo.

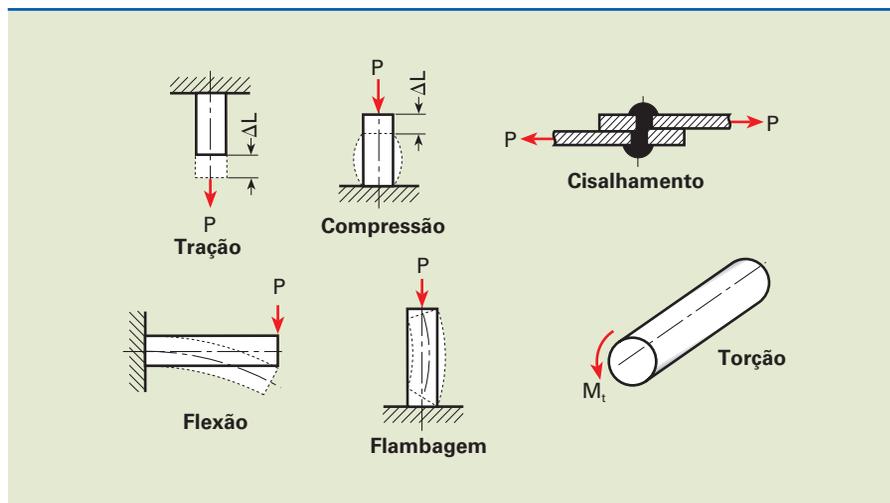


Figura 4.2

Tipos de esforços que atuam nos materiais.

Com base em uma amostragem estatística representativa do volume recebido, as propriedades mecânicas e o comportamento dos materiais nos ensaios mecânicos são definidos sob determinadas condições de esforço e em conformidade com normas técnicas. A normalização é fundamental para que se estabeleça uma linguagem comum entre fornecedores e usuários dos materiais.

Os ensaios dos materiais seguem normas técnicas determinadas por associações como: 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 Engineers), ISO (International Organization for Standardization), JIS (Japanese Industrial Standards), SAE (Society of Automotive Engineers), Copant (Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas), além de diversas normas particulares de indústrias ou companhias governamentais.

4.1 Objetivos dos ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos, de modo geral, têm por objetivo:

- determinar o comportamento dos materiais para fins de projetos;
- determinar as causas de falhas de materiais e componentes em serviço;
- elaborar novos materiais, para conhecer suas propriedades;

- controlar o processo produtivo para poder avaliar se as propriedades dos materiais são mantidas durante o processo, a fim de que haja conformidade entre as especificações do projeto e o produto final.

4.2 Tração

O ensaio de tração avalia as propriedades mecânicas de materiais. O procedimento experimental consiste na aplicação de tensões progressivas ao longo do eixo de um corpo de prova, isto é, perpendicularmente à seção transversal, conforme esquema na figura 4.4.

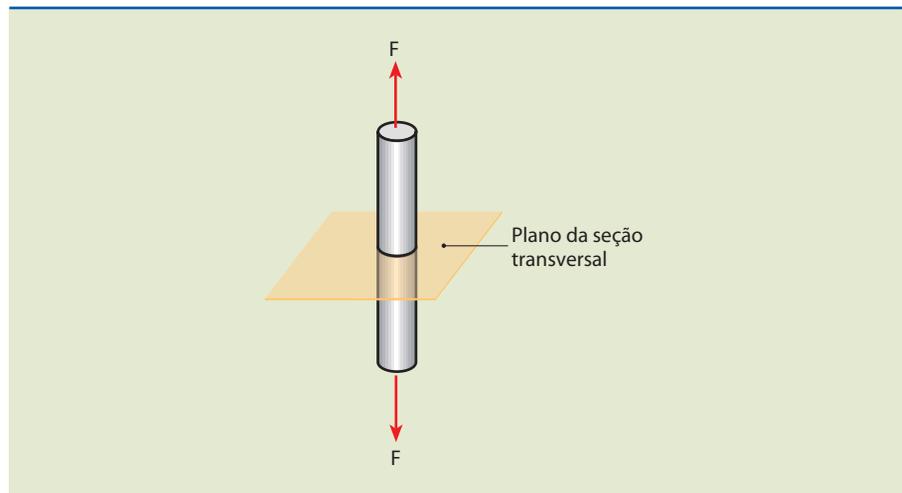
Figura 4.3
Corpos de prova.



ANDREW BROOKES, NATIONAL PHYSICAL LABORATORY/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SPL.DCLATIN/STOCK

Para a aplicação dessa força progressiva, utiliza-se uma máquina específica, que fará o ensaio de tração, como indicado na figura 4.4.

Figura 4.4
Corpo de prova
solicitado à tração.



O ensaio é realizado por meio de aplicação constante de carga de tração. Durante esse processo, o corpo de prova permanece fixado em suas extremidades. A máquina mede, então, a carga aplicada (digital ou analógica) com auxílio de um equipamento eletrônico que mede o alongamento em função da carga.



Figura 4.5

Máquina universal de ensaios.

Os resultados desses ensaios de tração normalmente são registrados por um computador, que mostra gráficos na forma de carga ou força em função do alongamento.

Com esses valores conseguimos traçar o gráfico de tensão por deformação com seus pontos críticos, conforme mostra a figura 4.6.

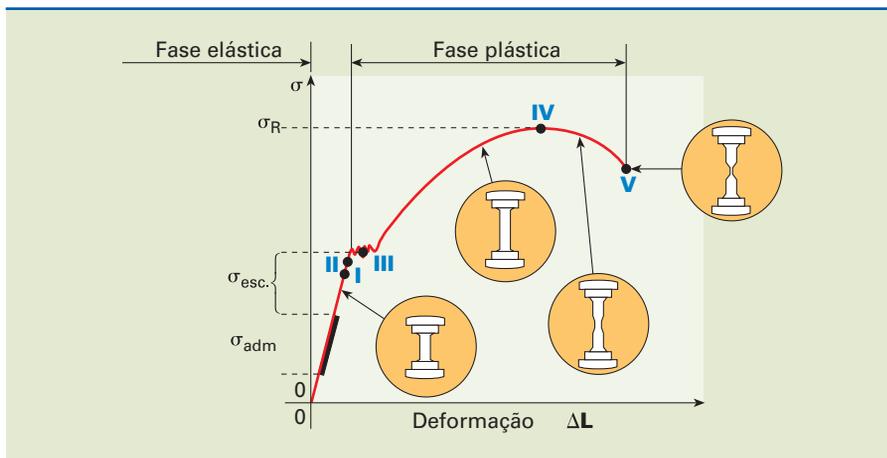


Figura 4.6

Gráfico tensão-deformação e seus pontos críticos.

Na figura:

Ponto I: limite de proporcionalidade (lei de Hooke) – Região onde as deformações são proporcionais às tensões.

Ponto II: limite de elasticidade – Elasticidade é a propriedade do material de retornar a seu tamanho inicial assim que a força deixa de agir sobre ele.

Ponto III: limite de escoamento – Caracteriza a perda da propriedade elástica do material.

Ponto IV: limite de resistência ou tensão de ruptura – Maior tensão que o corpo pode suportar.

Ponto V: limite de ruptura – Instante em que ocorre a ruptura do corpo.

A carga aplicada e a deformação produzida são funções do tamanho do corpo de prova. Em um ensaio, para que a carga necessária não exceda a capacidade da máquina, as dimensões do corpo de prova são definidas de acordo com a tensão estimada para o material em estudo.

A tensão (σ) é definida pela relação:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

em que:

σ = tensão;

F = força aplicada;

A_0 = área da seção inicial do corpo onde a carga é aplicada diretamente.

4.2.1 Limite de elasticidade

Elasticidade é a capacidade de um material de voltar à forma original quando se retira a carga aplicada. A deformação elástica é reversível, ou seja, desaparece quando a carga é removida.

Até certo limite de tensão aplicada, o material trabalha no regime elástico, isto é, segue a lei de Hooke, e a deformação linear específica é proporcional ao esforço aplicado.

A proporcionalidade pode ser observada no trecho retilíneo do diagrama tensão-deformação, e a constante de proporcionalidade é denominada **módulo de deformação longitudinal** ou **módulo de elasticidade**.

Ultrapassado o limite de proporcionalidade, inicia-se a fase plástica, na qual ocorrem deformações crescentes sem variação de tensão (patamar de escoamento). O valor constante dessa tensão, denominado **limite de resistência ao escoamento**, é uma importante característica.

Após o escoamento, verifica-se novamente a variação de tensão com a deformação específica, porém de forma não linear.

À relação entre os valores da tensão e da deformação linear específica, na fase elástica, denomina-se módulo de elasticidade, cujo valor é proporcional às forças

de atração entre os átomos. A expressão matemática para o cálculo dessa constante é dada por:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

em que:

E = módulo de elasticidade

ε = deformação linear ($\varepsilon = \Delta L/L$)

σ = tensão aplicada

4.2.2 Escoamento

Conforme mencionado anteriormente, depois da fase elástica vem a fase plástica. No início dessa fase ocorre uma deformação permanente no material, fenômeno chamado escoamento, que persiste mesmo quando se retira a força aplicada. É causado pelo aumento da velocidade de deformação e não pelo aumento de carga. Durante o escoamento a carga oscila entre valores muito próximos uns dos outros (Ponto III, figura 4.6).

4.2.3 Limite de resistência

Após o escoamento, ocorre o encruamento, endurecimento causado pela deformação a frio dos grãos. O material resiste ainda mais à tração externa impressa pela máquina de ensaio e exige uma tensão crescente para se deformar. O valor máximo de tensão atingido durante esse processo é denominado limite de resistência (L_R – Ponto IV, figura 4.6).

O cálculo do valor do limite de resistência (L_R) pode ser estimado pela equação:

$$L_R = \frac{F_{m\max}}{A_0}$$

4.2.4 Limite de ruptura

Em decorrência da aplicação contínua da tração, o material do corpo de prova se rompe em um ponto chamado limite de ruptura (V).

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

4.2.5 Estricção

A capacidade do material de se deformar sem se romper é denominada **ductilidade** e pode ser avaliada por meio do alongamento (ε) ou da **estricção**.

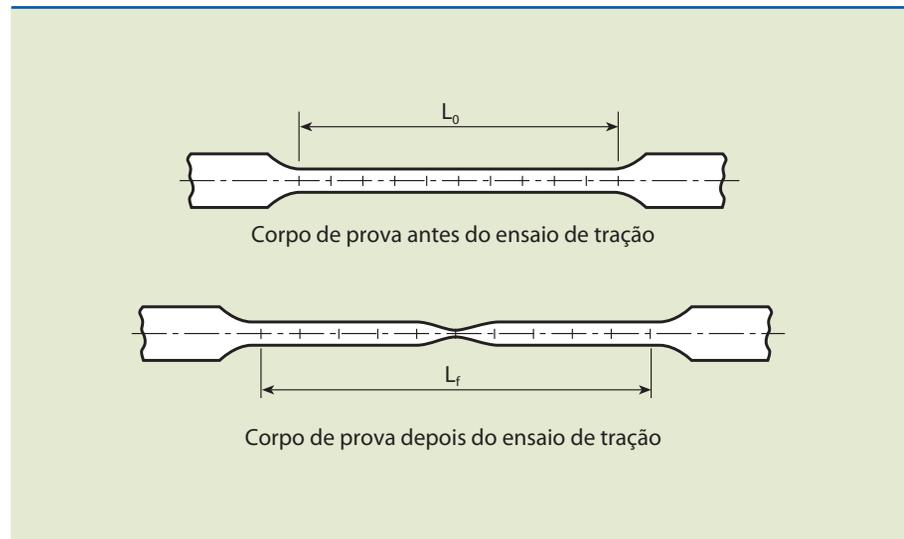
A estrição corresponde à redução na área da seção transversal do corpo de prova submetido a um ensaio de tração. Quanto mais dúctil o material, maior a redução de área antes da ruptura. Portanto, quanto maior a porcentagem de estrição, mais dúctil o material.

4.2.6 Avaliação das propriedades

O **alongamento** é a deformação de um corpo de prova (aumento do comprimento com diminuição da área da seção transversal) pela aplicação de uma força axial. A figura 4.7 mostra esquematicamente o alongamento antes e depois do ensaio de tração.

Figura 4.7

Alongamento do corpo de prova no ensaio de tração.



O alongamento do corpo de prova pode ser calculado de acordo com a equação a seguir:

$$A = \frac{L_f - L_0}{L_0} \left[\frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right] \text{ ou } A = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%]$$

Sendo:

L_f = comprimento final do corpo de prova;

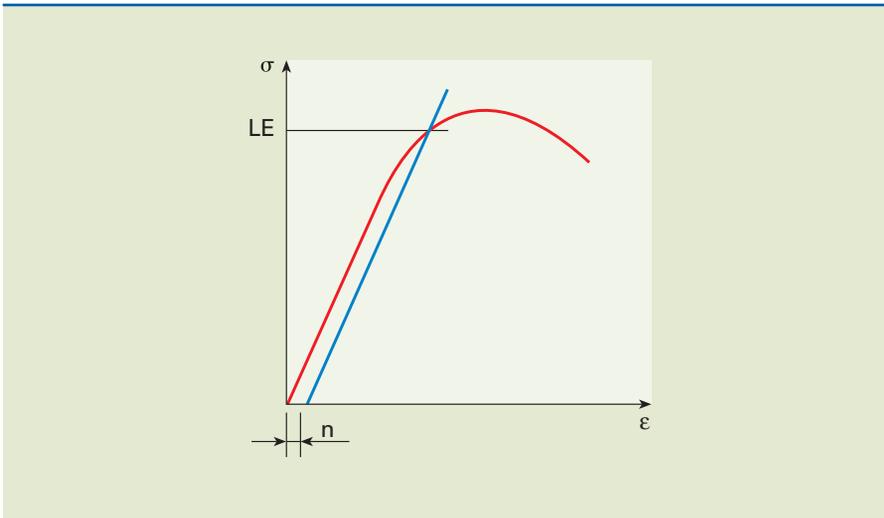
L_0 = comprimento inicial do corpo de prova.

O **limite elástico** é definido convencionando-se um valor n de deformação específica, em função do tipo de material (ver gráfico da figura 4.8):

$n = 0,2\%$ para metais e ligas metálicas em geral;

$n = 0,1\%$ para aços-molas ou ligas não ferrosas mais duras;

$n = 0,01\%$ para aços-molas.

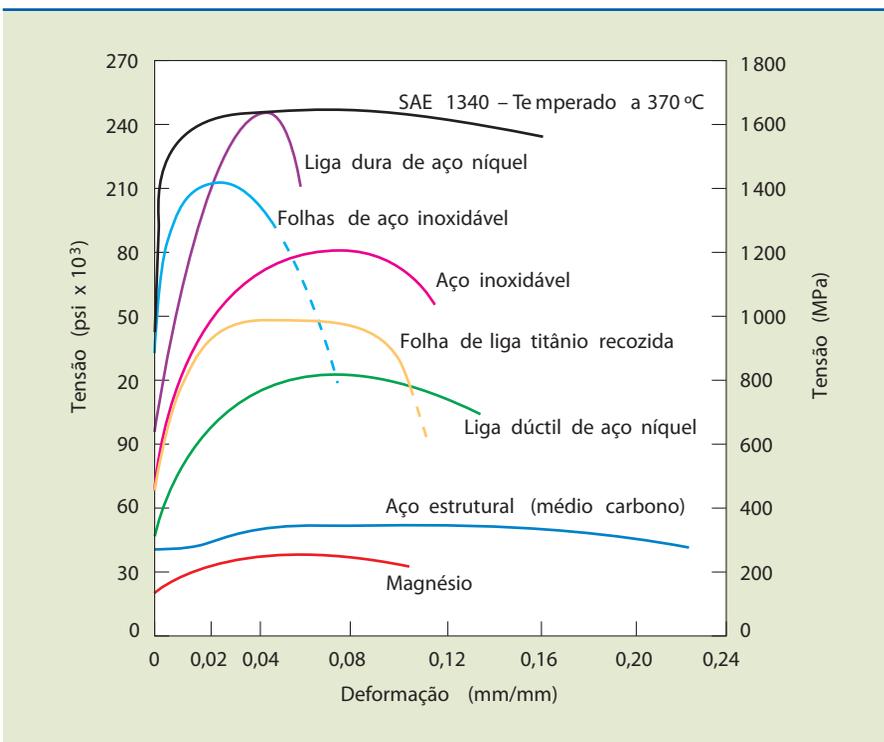
**Figura 4.8**

Localização de n no gráfico de tensão-deformação.

O **módulo de elasticidade** ou **módulo de Young** é a relação constante entre a tensão (σ) e a deformação (ϵ) na fase elástica do material. É a medida da rigidez do material. Quanto maior o módulo, menor a deformação elástica e mais rígido o material. Pode ser calculado de acordo com a equação a seguir:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

É possível observar na figura 4.9 o comportamento de algumas ligas metálicas.

**Figura 4.9**

Relação do comportamento entre tensão e deformação para algumas ligas comerciais.

4.3 Compressão

O ensaio de compressão é semelhante ao de tração quando comparadas as fases elásticas e plásticas, em que também é válida a lei de Hooke. As forças para a deformação do corpo são apontadas para o centro do corpo, como indicado na figura 4.10. O ensaio de compressão também pode ser realizado em uma máquina de ensaio universal ou, então, utiliza-se um equipamento específico, como mostrado na figura 4.11.

Figura 4.10

Material solicitado ao esforço de compressão.

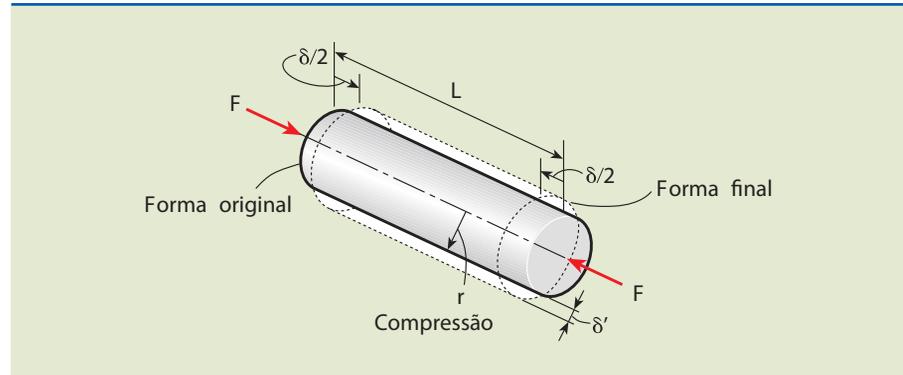
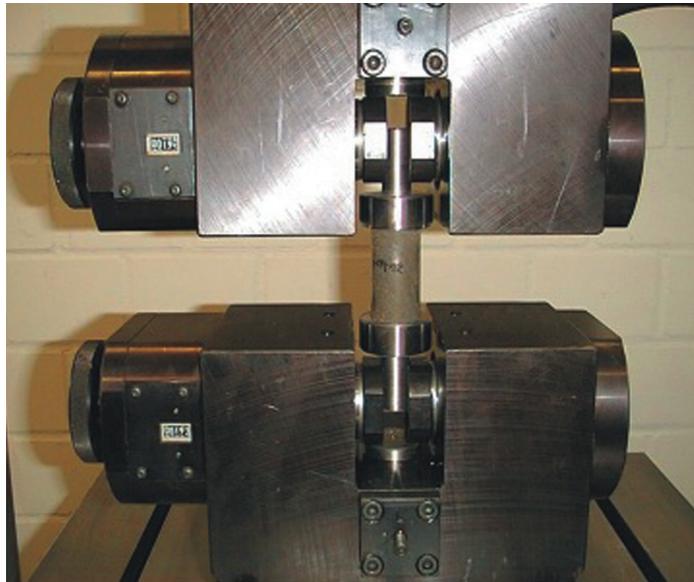


Figura 4.11

Máquina de ensaio de compressão.



Quando ensaiado, o material dúctil comporta-se elasticamente até a tensão de escoamento. Após esse processo, ocorre a deformação plástica. Com o aumento da tensão e da deformação, verifica-se o encruamento, e o diâmetro do material alarga sem ocorrer rupturas, até que o material se transforme em um disco.

Por esse motivo, o ensaio fornece apenas as propriedades referentes à zona elástica, e as propriedades mais avaliadas são o limite de proporcionalidade, o limite de escoamento e o módulo de elasticidade.

O material frágil não é suscetível a grandes deformações laterais. Dessa forma, com o aumento da carga de compressão, ocorre ruptura por cisalhamento em plano inclinado, normalmente a 45° do eixo de aplicação da carga (plano de máximas tensões cortantes). A figura 4.12 indica o comportamento de materiais dúcteis e frágeis sujeitos à compressão. Nesse ensaio avalia-se somente seu limite de resistência à compressão, calculado da mesma forma que no ensaio de tração.

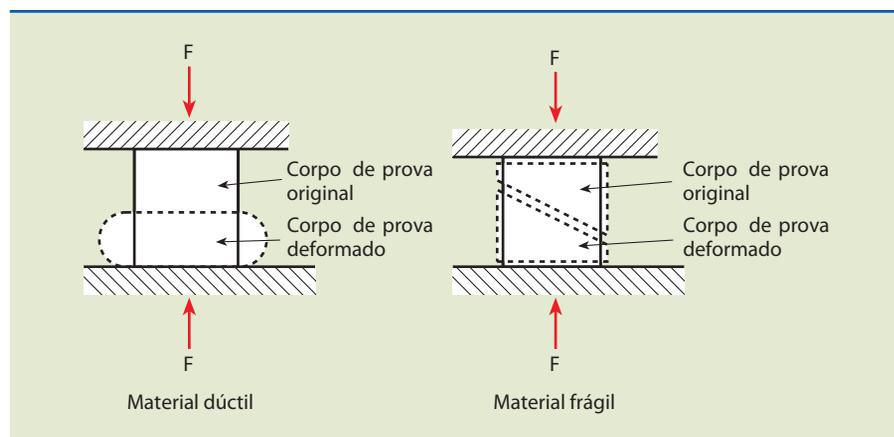


Figura 4.12

Desenho esquemático do comportamento de materiais sujeitos à compressão.

O corpo de prova deve necessariamente ser confeccionado segundo norma técnica ASTM E9-89 A, para que não ceda a esforços de flambagem e flexão. Além disso, o comprimento útil para a medição das deformações tem de estar afastado das superfícies de contato do corpo de prova com a máquina de ensaio. O valor do afastamento é de 1 diâmetro, e o corpo de prova deve ser posicionado de maneira concêntrica, de modo a manter o alinhamento de seu centro em relação ao centro das superfícies de contato da máquina.

As relações L/D (comprimento/diâmetro) são dadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1

Dimensões dos corpos de prova ensaiados em compressão*.

Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Comprimento (L) (mm)	Relação L/D
Pequeno	$30 \pm 0,2$	$25 \pm 0,1$	0,84
	$13 \pm 0,2$	$25 \pm 0,1$	1,92
Médio	$13 \pm 0,2$	$38 \pm 0,1$	2,92
	$20 \pm 0,2$	$60 \pm 3,0$	3
	$25 \pm 0,2$	$75 \pm 3,0$	3
	$30 \pm 0,2$	$85 \pm 3,0$	2,83
Longo	$20 \pm 0,2$	$160 \pm 3,0$	8
	$32 \pm 0,2$	320	10

*Segundo ASTM E9-89 A.

Como no ensaio de tração, no ensaio de compressão também são válidas algumas propriedades para os materiais dúcteis e os materiais frágeis, como mostradas na tabela 4.2.

Tabela 4.2

Tabela de comparação de propriedades de alguns aços na tração e compressão.

- Para materiais dúcteis: o cálculo da tensão (σ), do alongamento (ϵ) e do módulo de elasticidade (E).
- Para materiais frágeis: o limite de resistência à compressão (L_c).

	Tração				Compressão		
	σ_p	σ_e (kgf/mm ²)	σ_r	E	σ_p	σ_e (kgf/mm ²)	E
AISI 1035	44,1	46,9	67,9	21 000	46,9	49,7	21 000
AISI 1046	52,5	56,0	84,0	21 000	54,6	59,5	21 000
Aço 4340	78,4	86,1	94,5	21 000	76,3	88,9	21 000

Sendo:

σ_p = limite de proporcionalidade

σ_e = limite de escoamento

σ_r = limite de resistência

E = módulo de elasticidade longitudinal.*

Geralmente, os materiais como concreto, cerâmicos, metais ferrosos e não ferrosos, compostos injetados ou sinterizados, plásticos etc. são ensaiados por compressão. As fotos *a* e *b* da figura 4.13 apresentam condições em que os materiais são solicitados à compressão.

Figura 4.13

- a) Solicitação por compressão em muros de pedras.
b) Solicitação por compressão na coluna do trem de pouso.



O atrito entre as faces dos cabeçotes da máquina e as faces do corpo de prova indicado na figura 4.14 altera os resultados. Para diminuir esse problema, é necessário revestir as faces, superior e inferior, do corpo de prova com materiais de baixo atrito (parafina, teflon etc.).

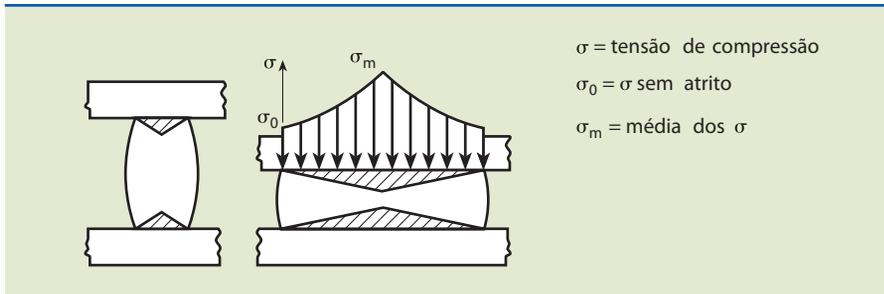


Figura 4.14

Regiões não deformadas devido ao atrito entre as faces do corpo de prova e as faces dos cabeçotes da máquina de ensaio.

O atrito e a relação L/D (comprimento/diâmetro) interferem nos resultados do ensaio. A figura 4.15 mostra como esses fatores se inter-relacionam.

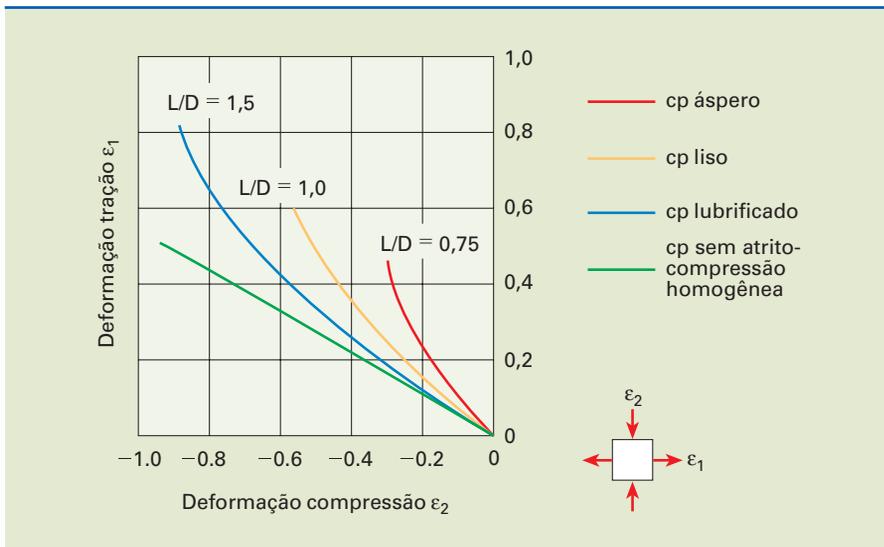


Figura 4.15

Varição das deformações com o atrito e a relação L/D.

A relação L/D também influencia a característica da deformação do corpo de prova, como podemos observar na tabela 4.3.

Tabela 4.3

Relação L/D e características da deformação.

Relação L/D	Deformação
> 5.0	Flambagem
> 2.5	Cisalhamento
> 2.0	Barril duplo
> 2.0 e fricção na superfície de contato	Barril
< 2.0 sem fricção na superfície de contato	Compressão homogênea
Caso especial	Instabilidade compressiva devido ao amolecimento do material por efeito de carga

4.3.1 Limitações do ensaio de compressão

- Dificuldade na aplicação da força no centro do material a ser ensaiado.
- Atrito entre corpo de prova e cabeçotes da máquina de ensaio.

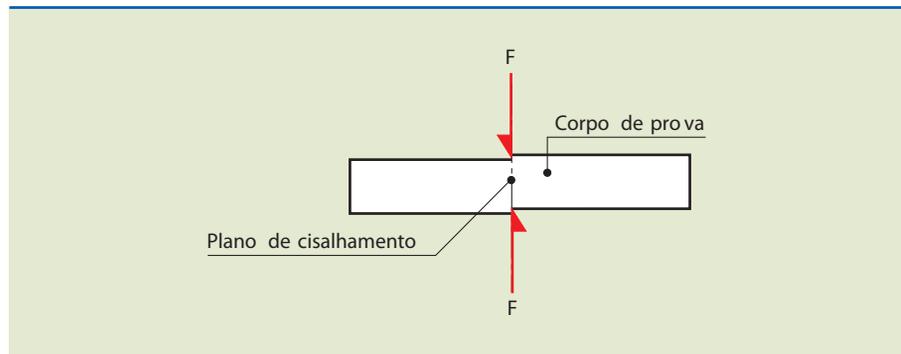
4.4 Cisalhamento

Cisalhamento é o escorregamento, em determinado plano, entre as partículas de um material submetido a forças contrárias que agem sobre a superfície do corpo de prova, como indicado na figura 4.16. O cisalhamento é utilizado para a verificação da resistência ao corte no sentido transversal de pinos, parafusos ou chapas.

A **tensão de cisalhamento** ou **tensão de corte** é gerada por forças aplicadas em sentidos opostos, porém na mesma direção. A figura 4.16 mostra um parafuso submetido a uma tensão de cisalhamento. Constatamos, nesse caso, que o material não foi bem dimensionado ou não foi o indicado e, por isso, sofre o cisalhamento e pode se romper, colocando em risco a estrutura em que estava fixado.

Figura 4.16

Forças opostas e o plano de cisalhamento em relação ao corpo de prova.



Em processos de estampagem, principalmente em ferramentas de corte, determinar a resistência do material ao cisalhamento é bastante útil. Para o cálculo da tensão de cisalhamento é necessário saber a força aplicada para o rompimento do corpo de prova. Dividindo-se a força aplicada pela área cisalhada, obtém-se a tensão de cisalhamento, mostrada pela equação:

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

em que:

τ_c = resistência ao cisalhamento ou corte (N/mm²);

F = força de corte (N);

S = área cisalhada do corpo de prova (mm²).

Na prática, o ensaio de cisalhamento demonstra que a força de corte leva em consideração a espessura inicial do material. Entretanto, quando o corte se inicia, a espessura diminui gradativamente e exige força cada vez menor. Verifica-se que, em aproximadamente um terço da espessura do material, o corte ocorre. Depois

disso, não suporta a força aplicada e se rompe por cisalhamento. A fórmula aplicada para o cálculo da força de corte para uma prensa é a seguinte:

$$F_c = P \cdot e \cdot \tau_c$$

em que:

F_c = força de corte (N);

P = perímetro cortado da peça (mm);

e = espessura do material (mm);

τ_c = resistência ao cisalhamento ou corte (N/mm²).

O ensaio de cisalhamento realizado em chapas utiliza uma ferramenta de cisalhamento do tipo Johnson, conforme indicado na figura 4.17. Nesse dispositivo, uma barra de seção retangular medindo 25 mm × 50 mm, ou cilíndrica de 25 mm de diâmetro, é cortada, submetida à aplicação de uma força direcionada para uma peça móvel que funciona como guilhotina. Essa barra, em seguida, é forçada de encontro ao corpo de prova realizando seu corte. A tensão de cisalhamento é, então, calculada do mesmo modo como foi apresentado anteriormente, dividindo-se a força aplicada pela área cisalhada.

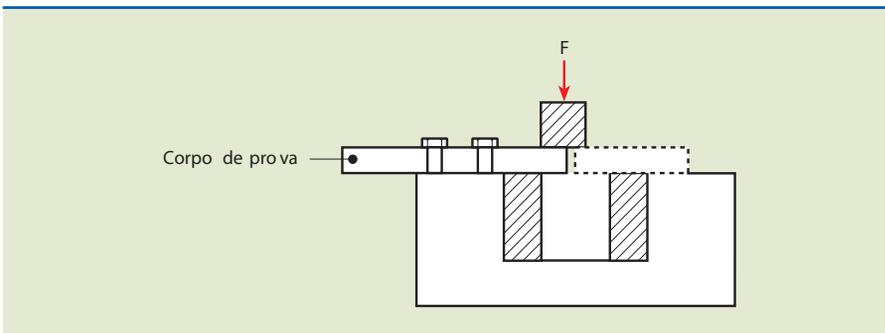


Figura 4.17

Ferramenta de cisalhamento Johnson.

Para o ensaio de chapas finas e punção redondo utiliza-se uma ferramenta de estampas, como indicado na figura 4.18, em que um punção aplica uma força ou carga de encontro ao corpo de prova (material) que está sobre uma matriz. Como nos casos anteriores, a tensão de cisalhamento é calculada dividindo-se a força aplicada pela área cisalhada.

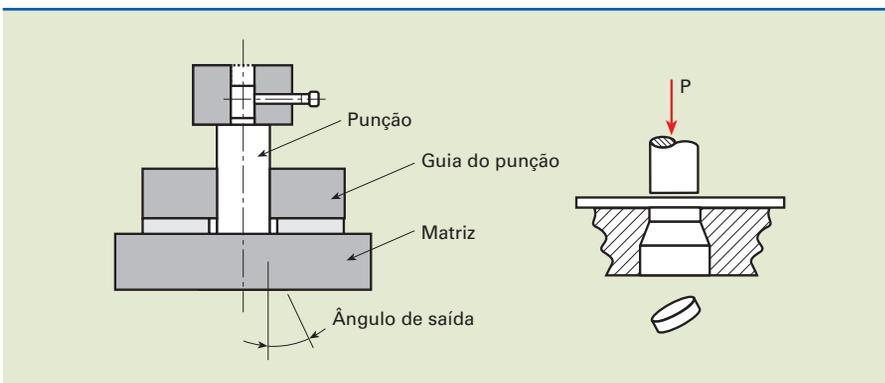


Figura 4.18

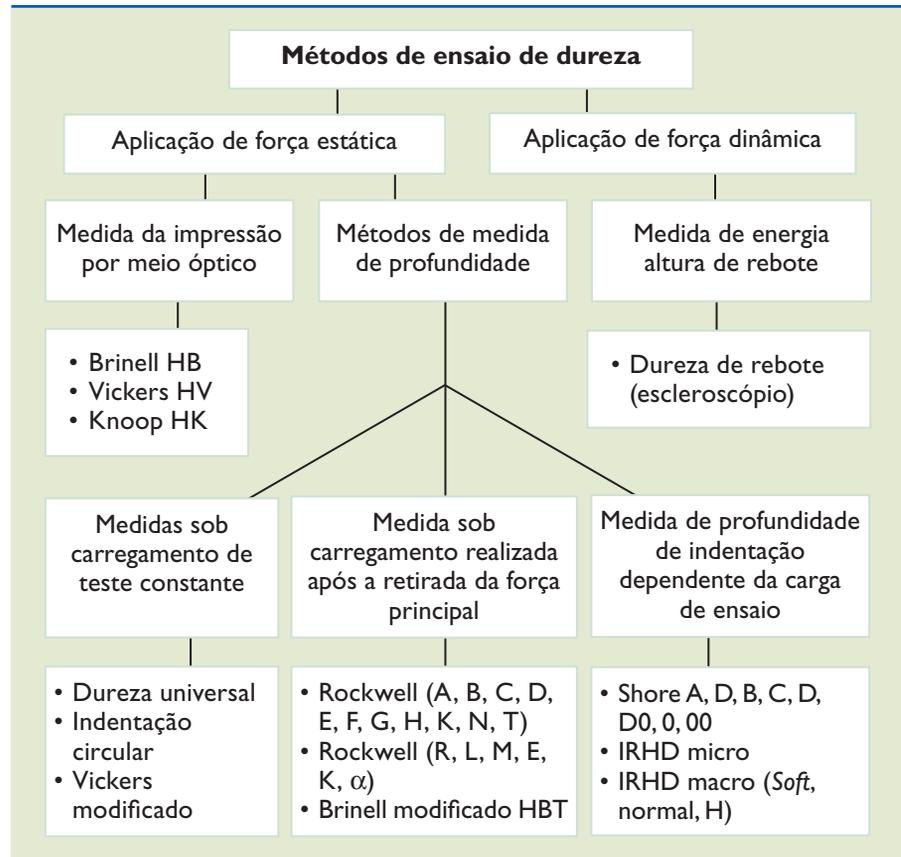
Cisalhamento de chapas.

4.5 Dureza

A dureza é uma propriedade mecânica que tem relação com a resistência de um material que, pressionado por outro ou por penetradores padronizados, apresenta um risco ou uma deformação permanente.

Quanto à aplicação, os métodos de ensaios de dureza podem ser definidos em relação à força aplicada, que pode ser estática ou dinâmica, de acordo com a figura 4.19.

Figura 4.19
Métodos de ensaios de dureza.



O ensaio de dureza se realiza com a utilização de penetradores padronizados de acordo com cada método. Os penetradores pressionam a superfície do material causando deformação elástica e plástica. A dureza do material é relacionada com a área ou a profundidade da marca.

A dureza de um material pode ser aumentada ou diminuída por meio de tratamentos térmicos, de acordo com a necessidade do emprego desse material. Os principais métodos de medir a dureza de um material são mostrados a seguir.

4.5.1 Dureza Brinell

Em 1900, Johan August Brinell propôs um novo método para a determinação da dureza. Em homenagem a ele, esse método é denominado **dureza Brinell** e é simbolizado por **HB**. É o ensaio de dureza mais usado até hoje.

O ensaio de dureza Brinell é realizado comprimindo de maneira controlada uma esfera de aço temperado, de diâmetro D , sobre a superfície do material ensaiado, que deve ser plana, polida e limpa na área do ensaio.

Aplicando uma carga F , durante um tempo t , a esfera produzirá uma marca (calota) de diâmetro d , dimensionada por meio de um micrômetro óptico. A figura 4.20 indica a impressão feita por uma esfera de diâmetro D em uma matriz. O valor d deve ser tomado como a média de duas leituras feitas a 90° uma da outra.

A dureza Brinell é definida, em N/mm^2 ou (kgf/mm^2) , como o quociente entre a carga aplicada, F , e a área de contato (calota esférica impressa), S_c , a qual é relacionada com os valores de D e d , conforme a expressão:

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

em que:

p = profundidade da impressão (mm);
 D = diâmetro do penetrador (mm);
 d = diâmetro da calota ou moosa (mm).

Como há muita dificuldade para a medição da profundidade (p), por ser pequena demais, utiliza-se uma relação matemática entre a profundidade (p) e o diâmetro da calota (d).

Aproveitando as informações da figura 4.20, com auxílio da matemática, podemos determinar uma equação para calcular a 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):

$$HB = \frac{F}{A_c}$$

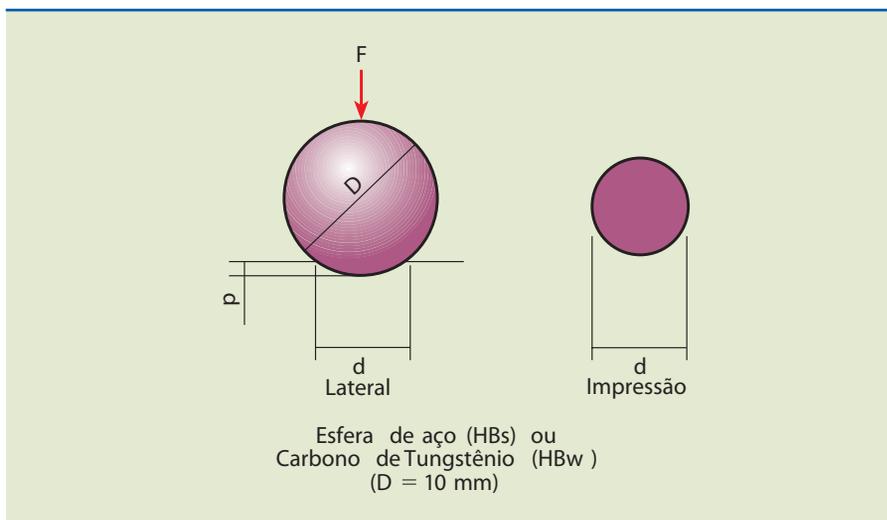


Figura 4.20

Tipos de ensaios de dureza, características de penetração.

Substituindo A_c pela fórmula da área, temos:

$$HB = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot P}$$

Utilizando Pitágoras, determinamos uma relação entre a profundidade (p) e o diâmetro da calota (d). Assim, pode-se chegar à fórmula para o cálculo de HB apresentada a seguir.

$$\begin{array}{ll} \text{Para força em kgf} & \text{Para força em N} \\ HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} & HB = 0,102 \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \end{array}$$

A determinação da espessura mínima (e_{\min}) do corpo de prova deverá ser feita em função da profundidade. Para isso encontramos primeiro a profundidade (p) da calota e , em seguida, a espessura mínima (e_{\min}):

$$p = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \text{ [mm]} \quad e_{\min} = 10 \cdot p \text{ [mm]}$$

Procedimentos

1. Identificar o tipo de material e o processo de fabricação do **cp** (corpo de prova).
2. Avaliar o acabamento superficial do **cp**.
3. Dimensionar **cp** (cilindricidade e/ou paralelismo).
4. Testar a fixação do **cp** e acessórios.
5. Fixar **cp** na máquina.
6. Escolher o diâmetro da esfera.
7. Calcular a espessura mínima.
8. Determinar a constante em função do tipo de material a ensaiar.
9. Determinar a carga.
10. Realizar o ensaio, observar velocidade de acionamento e tempo de aplicação da carga.
11. Término do ensaio.
12. Retirar o **cp**.
13. Medir o diâmetro da impressão.
14. Calcular o valor da dureza ou consultar tabela.
15. Para fazer outro ensaio devem ser observadas as distâncias entre as impressões.

Execução do ensaio

- O ensaio de dureza Brinell deve ser executado em temperatura ambiente entre 18° C e 28° C.
- É recomendável que se empregue a maior esfera permitida pelo corpo de prova.

- O corpo de prova deve repousar de forma rígida sobre o suporte, a fim de evitar deslocamentos no decorrer do ensaio.
- Escolhidas a força e a esfera de ensaio, o corpo de prova é movimentado através do parafuso em direção ao penetrador, até ser alcançada a posição de ensaio, geralmente indicada no manual de utilização do aparelho. A posição de ensaio se caracteriza por um suave contato entre a superfície de ensaio e a esfera, sem provocar, na primeira, deformação perceptível.
- Em seguida é aplicada a força de ensaio de modo uniforme, sem choques. A totalização deve se dar em um intervalo mínimo de 5 segundos.
- Esperar o tempo para realizar a deformação conforme condições de ensaio.
- Obedecer às distâncias entre calotas e entre bordas da peça e calotas.
- Retirar o corpo de prova e medir os diâmetros das impressões.

Resultados

No relatório de ensaio devem constar:

- número da norma utilizada;
- identificação do corpo de prova;
- dureza Brinell obtida, e valores abaixo de 25 HB devem ser arredondados para 0,1 unidade e valores acima, para 1 unidade;
- designação abreviada das condições de ensaio, ilustrada na figura 4.21;
- posição do local de ensaio, caso seja especificado;
- temperatura de ensaio, caso seja divergente daquela estabelecida nessa norma.

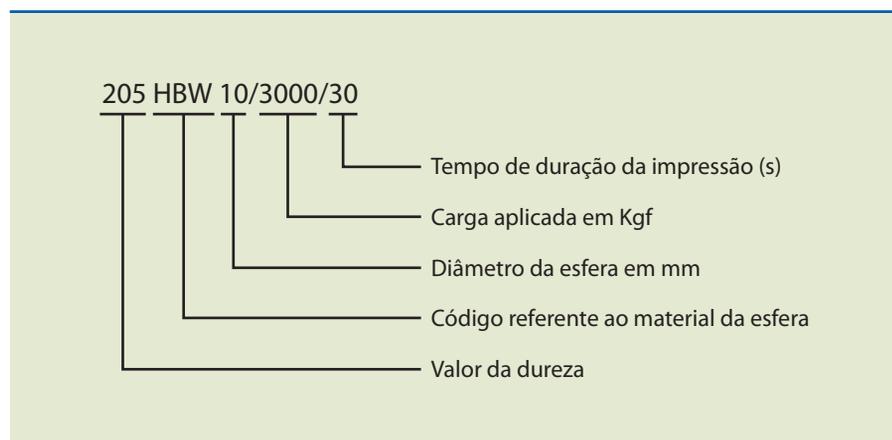


Figura 4.21

Designação abreviada das condições de ensaio.

Corpo de prova padrão

Para melhor aproveitamento e maior grau de confiabilidade, a distância entre centros deve ser de $4 \cdot d$, da calota para os ferrosos e $6 \cdot d$ para os outros materiais. A distância da borda do corpo de prova deve ser de $2,5 \cdot d$ da calota. As figuras 4.22 e 4.23 são exemplos de corpos de prova padrão, para verificar a calibração da máquina.

Para os casos de corpos de prova cilíndricos, o menor diâmetro que pode ser ensaiado é 5 vezes o diâmetro da esfera, devido às imperfeições geradas pelo escor-

regamento do material em relação à esfera, que causam erro na medição do diâmetro da calota.

Figura 4.22

Aproveitamento máximo do corpo de prova padrão.

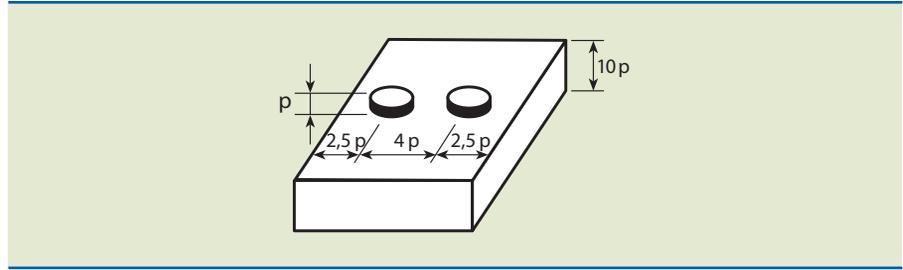


Figura 4.23

Corpo de prova padrão.



A figura 4.24 mostra a calota formada após a remoção da carga, e a figura 4.25 mostra a máquina de medição de dureza Brinell.

Figura 4.24

Calota formada após a remoção da carga.

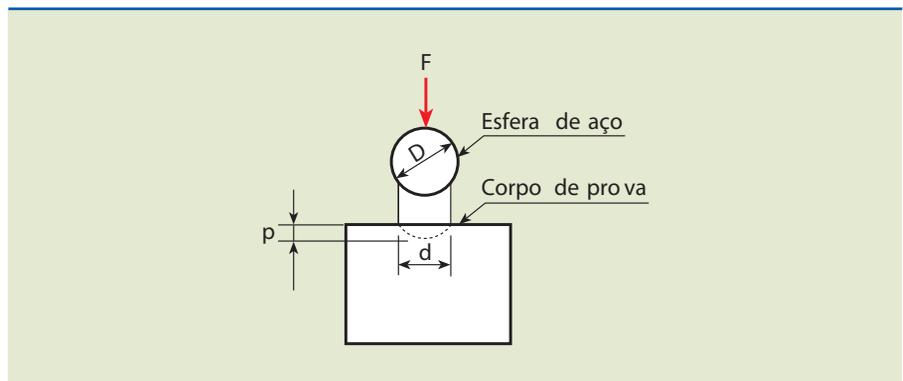




Figura 4.25

Máquina de dureza Brinell.

Na utilização do ensaio, a aplicação da relação que calcula HB é desnecessária, pois existem, por exemplo, as tabelas 4.4 e 4.5, que fornecem o valor da dureza Brinell com base nos diâmetros da impressão formada. Embora a dureza Brinell expresse unidades de carga/área, é prática usual a utilização apenas do número representativo da dureza, seguido do símbolo HB (quando representados em kgf/mm^2). É também prática usual (ASTM E10-93) adotar as notações HBs, no caso de utilizar a esfera de aço temperado, e HBw, no caso de esfera de carboneto de tungstênio; a escolha depende da faixa de dureza do material a ser submetido ao ensaio. A faixa de tempo de aplicação da carga é em geral de 30 segundos, que pode ser elevado até a 60 segundos para metais mais dúcteis ($\text{HB} < 60$). Nesse acréscimo de tempo, o material deforma-se plasticamente por completo, formando uma calota esférica que não interfere na dureza obtida. Existem normas inglesas que estipulam, para metais duros ($\text{HB} > 300$), um tempo de 15 ou 10 segundos. Tanto a carga quanto o diâmetro da esfera dependem do material, e tais parâmetros devem ser adequados ao tamanho, à espessura e à estrutura interna do corpo de prova.

Tabela 4.4

Dureza Brinell em função do diâmetro da impressão (diâmetro da esfera do penetrador: 10 mm)			
d (mm)	HB (F = 3 000 kgf)	d (mm)	HB (F = 3 000 kgf)
2,75	(495)	4,05	223
2,80	(477)	4,10	217
2,85	(461)	4,15	212

Dureza Brinell em função do diâmetro da impressão
(diâmetro da esfera do penetrador: 10 mm)

d (mm)	HB (F = 3 000 kgf)	d (mm)	HB (F = 3 000 kgf)
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

Fonte: <http://www.copertec.com/ensaio_dureza.htm>.



Tabela 4.5

Relação entre carga aplicada e diâmetro da esfera para ser utilizada no ensaio Brinell				
Símbolo	Diâmetro da esfera (mm)	Constante Const. = F/D^2	Força F valor nominal	
HBs (HBw) 10/3 000	10	30	29,42 kN	3 000 kgf
HBs (HBw) 10/1 500	10	15	14,71 kN	1 500 kgf
HBs (HBw) 10/1 000	10	10	9,807 kN	1 000 kgf
HBs (HBw) 10/500	10	5	4,903 kN	500 kgf
HBs (HBw) 10/250	10	2,5	2,452 kN	250 kgf
HBs (HBw) 10/125	10	1,25	1,226 kN	125 kgf
HBs (HBw) 10/100	10	1	980,7 N	100 kgf
HBs (HBw) 5/750	5	30	7,355 kN	750 kgf
HBs (HBw) 5/250	5	10	2,452 kN	250 kgf
HBs (HBw) 5/125	5	5	1,226 kN	125 kgf
HBs (HBw) 5/62,5	5	2,5	612,9 N	62,5 kgf
HBs (HBw) 5/31,25	5	1,25	306,5 N	31,25 kgf
HBs (HBw) 5/25	5	1	245,2 N	25 kgf
HBs (HBw) 2,5/187,5	2,5	30	1,839 kN	187,5 kgf
HBs (HBw) 2,5/62,5	2,5	10	612,9 N	62,5 kgf
HBs (HBw) 2,5/31,25	2,5	5	306,5 N	31,25 kgf
HBs (HBw) 2,5/15,62	2,5	2,5	153,2 N	15,62 kgf
HBs (HBw) 2,5/7,82	2,5	1,25	76,61 N	7,82 kgf
HBs (HBw) 2,5/6,25	2,5	1	61,29 N	6,25 kgf
HBs (HBw) 2/120	2	30	1,177 kN	120 kgf
HBs (HBw) 2/40	2	10	392,3 N	40 kgf
HBs (HBw) 2/20	2	5	196,1 N	20 kgf
HBs (HBw) 2/10	2	2,5	98,07 N	10 kgf
HBs (HBw) 2/5	2	1,25	49,03 N	5 kgf

Relação entre carga aplicada e diâmetro da esfera para ser utilizada no ensaio Brinell				
Símbolo	Diâmetro da esfera (mm)	Constante Const. = F/D^2	Força F valor nominal	
HBs (HBw) 2/4	2	1	39,23 N	4 kgf
HBs (HBw) 1/30	1	30	294,2 N	30 kgf
HBs (HBw) 1/10	1	10	98,07 N	10 kgf
HBs (HBw) 1/5	1	5	49,03 N	5 kgf
HBs (HBw) 1/2,5	1	2,5	24,52 N	2,5 kgf
HBs (HBw) 1/1,25	1	1,25	12,26 N	1,25 kgf
HBs (HBw) 1/1	1	1	9,807 N	1 kgf

Fonte: ASTM E10-93.

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 determinação da carga a ser aplicada deve manter a relação de impressão (d) dentro dos valores de 0,25 a 0,5 do diâmetro da esfera (D). É considerado valor ideal a média entre os valores. Para a obtenção do valor ideal deve-se seguir o fator de carga constante, de acordo com a tabela 4.5.

Para padronizar o ensaio, foram fixados valores de fatores de carga de acordo com a faixa de dureza e o tipo de material.

A tabela 4.6 mostra os principais fatores de carga utilizados, as respectivas faixas de dureza e indicações.

Tabela 4.6

Principais fatores de carga utilizados e suas respectivas faixas de dureza.

(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 patentes



A tabela 4.7 fornece os diâmetros de esfera mais utilizados e os valores de carga para cada caso, em função do fator de carga escolhido.

Diâmetro da esfera (mm)	$F \text{ (kgf)} = 30 \frac{D^2}{D^2}$	$F \text{ (kgf)} = 10 \frac{D^2}{D^2}$	$F \text{ (kgf)} = 5 \frac{D^2}{D^2}$	$F \text{ (kgf)} = 2,5 \frac{D^2}{D^2}$
10	3 000	1 000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,25	15,625

Tabela 4.7

Diâmetro de esferas mais utilizados e seus valores de carga.

A tabela 4.8 apresenta a relação entre microconstituintes e dureza Brinell para aços-carbono.

Microconstituintes	Dureza Brinell (HB)
Ferrita	80
Perlita grosseira	240
Perlita fina	380
Martensita	595

Tabela 4.8

Relação entre microconstituintes e dureza Brinell para aços-carbono.

Relação entre dureza Brinell e o limite de resistência convencional

Nos casos dos aços, existe uma relação entre dureza e tensão de resistência ($\sigma_r = 0,36 \text{ HB}$), sendo σ_r dado em kgf/mm^2 .

Para durezas maiores que $\text{HB} = 380$, essa expressão não é válida e é necessária a utilização de gráficos.

Segundo estudos experimentais, determinou-se:

“O valor 0,36 vale para aços doces, mas para aços-carbono e aços-ligas tratados termicamente, esse valor cai para 0,34 e 0,33 respectivamente. Para alguns metais não ferrosos, o valor dessa constante é 0,49 para níquel recozido, 0,41 para níquel e latão encruados, 0,52 para cobre recozido, 0,55 para latão recozido e aproximadamente 0,40 para alumínio e suas ligas.” (O’NEILL, 1934).

Vantagens e limitação do ensaio de dureza Brinell

Vantagens

- É indicado para ensaios de dureza em materiais não homogêneos por causa do tamanho da impressão;



- é indicado também para ensaios de peças não acabadas, como em partes forjadas, fundidas, laminadas ou tratadas termicamente;
- penetrador simples e robusto.

Limitação

Não é aplicável para peças finas (chapas) e materiais muito duros como aço temperado e metal duro, pois a dureza da peça não pode ser igual ou superior à dureza da esfera.

4.5.2 Dureza Rockwell

O segundo tipo de dureza por penetração foi desenvolvido pelo metalurgista norte-americano Stanley Pickett Rockwell, por volta de 1922. A dureza Rockwell, simbolizada por HR, elimina o tempo necessário para a medição, pois o resultado é lido diretamente no visor da máquina de ensaios Rockwell, diminuindo erros de interpretação e de medição. Por sua rapidez, esse ensaio é muito utilizado em linhas de produção.

O ensaio Rockwell pode ser realizado em dois tipos de máquina:

- máquina padrão, que identifica a dureza Rockwell comum;
- máquina mais precisa ou superficial, que identifica a dureza Rockwell em camada superficial, folhas finas ou lâminas.

Ambas as máquinas possuem procedimentos de utilização iguais. A diferença está nos componentes.

Na máquina padrão, cada divisão da escala equivale a 0,02 mm. Na máquina mais precisa ou superficial, cada divisão da escala equivale a 0,01 mm.

Além dessas máquinas existem também equipamentos digitais que apresentam o valor da dureza diretamente no visor.

Figura 4.26

Máquina de medição de dureza Rockwell.



WIKIMEDIA.ORG

Descrição do processo

Os penetradores usados no equipamento são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120° de conicidade).

Em ambos os penetradores a pré-carga é aplicada para fixar o corpo de prova e garantir o perfeito contato com o penetrador. Depois de aplicada e retirada a carga maior, a profundidade é dada no visor da máquina em forma de número de dureza. A leitura deve ser feita em uma escala apropriada ao penetrador e à carga, como informado nas tabelas 4.9 e 4.10.

As leituras para cada tipo de penetrador em equipamentos analógicos devem ser feitas:

- na escala externa do mostrador de cor preta no penetrador cônico de diamante;
- na escala vermelha no penetrador esférico.

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

Tabela 4.9

Escalas de dureza Rockwell normal e aplicações.

Escala	Cor da escala	Carga maior (kgf)	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	Cor da escala	Carga maior (kgf)	Penetrador	Faixa de utilização	Campo de aplicação
15 N	preta	15	diamante cone 120°	65 a 90 HR 15 N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
30 N	preta	30	diamante	40 a 80 HR 30 N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
45 N	preta	45	diamante	35 a 70 HR 45 N	Uso em aplicações similares às escalas HRC, HRA, HRD
15 T	vermelha	15	esfera aço 1,5875 mm	50 a 94 HR 15 T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
30 T	vermelha	30	esfera aço 1,5875 mm	10 a 84 HR 30 T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG
45 T	vermelha	45	esfera aço 1,5875 mm	10 a 75 HR 45 T	Uso em aplicações similares às escalas HRB, HRF, HRG

Tabela 4.10

Escalas de dureza Rockwell superficial e aplicações.

Escala de dureza

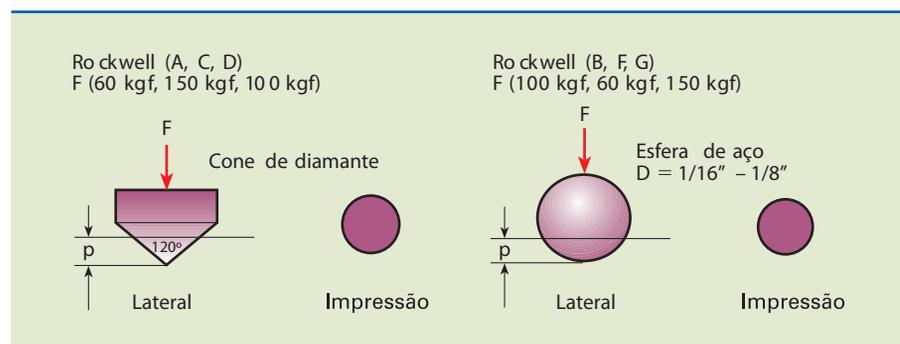
A dureza Rockwell comum ou normal emprega várias escalas com diferentes graus de penetração. Um número alto de dureza implica uma pequena profundidade de penetração.

A dureza Rockwell superficial emprega várias escalas e é usada para corpos de prova de pequenas espessuras, como lâminas e materiais que sofreram algum tipo de tratamento superficial, por exemplo, cementação.

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.

Figura 4.27

Cargas de acordo com os tipos de dureza Rockwell.



Essas 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 em uma escala só pode ser comparado a outro material ensaiado na mesma escala.

Profundidade de penetração

A profundidade que o penetrador atinge durante o ensaio é importante para definir a espessura mínima do corpo de prova. De modo geral, a espessura mínima deve ser 10 vezes a profundidade atingida pelo penetrador.

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

Para saber a profundidade mínima em mm do penetrador, utilizam-se as seguintes fórmulas empíricas:

1) Para penetrador de diamante:

$$\text{HR comum} \rightarrow \text{profundidade} = 0,002 \cdot (100 - \text{HR})$$

$$\text{HR superficial} \rightarrow \text{profundidade} = 0,001 \cdot (100 - \text{HR})$$

2) Para penetrador esférico:

$$\text{HR comum} \rightarrow \text{profundidade} = 0,002 \cdot (130 - \text{HR})$$

$$\text{HR superficial} \rightarrow \text{profundidade} = 0,001 \cdot (130 - \text{HR})$$

Para melhor aproveitamento e maior grau de confiabilidade do ensaio Rockwell, o corpo de prova deve possuir distância entre centros da calota igual a $(3 \cdot p)$ e bordas $(2,5 \cdot p)$, e sua espessura deve ser 10 vezes a maior profundidade da impressão.

Preparação da amostra

A superfície da amostra precisa ser preparada para eliminar irregularidades que possam ocasionar erros. A carga menor, porém, serve também para minimizar os efeitos das irregularidades. A primeira leitura deve ser desprezada, porque a amostra serve apenas para ajuste do penetrador. Se a superfície não é plana, deve ser feita a correção dos valores, pois a dureza Rockwell analisa a profundidade de penetração e não a área. A correção deve ser feita de acordo com as normas da E-18 da ASTM, MB 358 da ABNT.

Em materiais desconhecidos deve-se realizar o ensaio partindo de escalas mais altas para as escalas mais baixas, para evitar danos no penetrador.

Vantagens e limitações do ensaio de dureza Rockwell

Vantagens

- Tempo reduzido para realização do teste e rapidez de leitura;
- possibilidade de automatização;



- baixo custo do equipamento devido à ausência de componentes ópticos;
- não há influência do operador, pois a leitura de dureza é realizada diretamente no equipamento.

Limitações

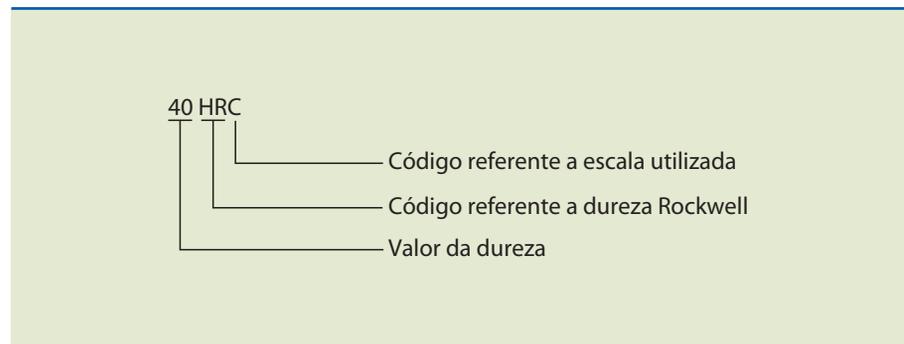
- Não utiliza escala única de dureza;
- penetrador de diamante sujeito a danos, podendo causar medidas erradas;
- influência do tipo de penetrador no valor da dureza.

Apresentação dos resultados

Os resultados são apresentados como mostra a figura 4.28.

Figura 4.28

Forma de apresentação dos resultados.



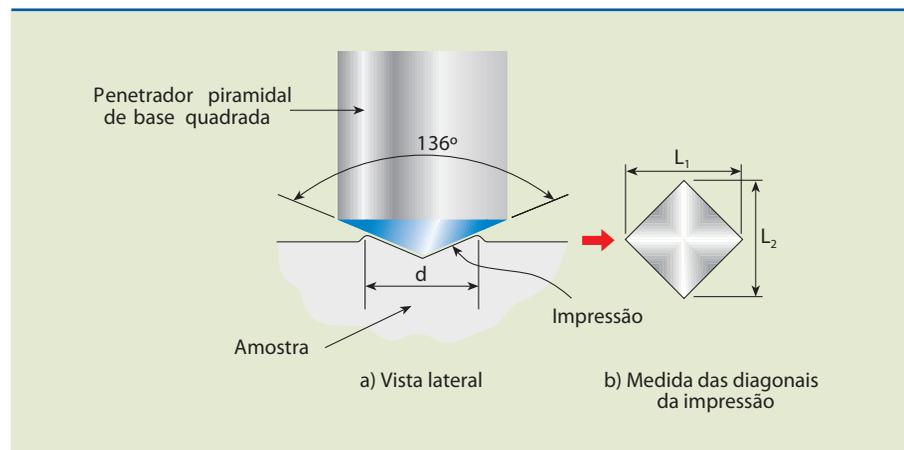
4.5.3 Dureza Vickers

Introduzida em 1925 por Smith e Sandland, tem o nome Vickers porque a máquina mais conhecida para operar a dureza foi produzida pela empresa Vickers-Armstrong. A dureza Vickers possibilita medir qualquer valor de dureza, desde os materiais mais duros até os mais moles.

O penetrador é uma pirâmide de base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces opostas, como mostra o esquema da figura 4.29.

Figura 4.29

Penetrador e impressão Vickers.



Esse ângulo possui valores semelhantes aos da dureza Brinell (relação ideal d/D da Brinell, sendo 0,375 dessa relação correspondente a um ângulo de 136°). Sendo um diamante, o penetrador é praticamente indeformável e independente da carga aplicada.

O valor de dureza é o mesmo para materiais homogêneos. Para esse tipo de dureza a carga varia de 1 a 100 ou 120 kgf. Por 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 mm ou 2 mm de diâmetro no mesmo equipamento. Nesse caso, o ensaio feito na máquina Vickers é o de dureza Brinell.

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

O ensaio de microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, porém usa cargas menores que 1 kgf. A carga, por exemplo, pode ter valores muito pequenos, como 10 gf.



Figura 4.30
Microdureza Vickers.

A mudança de carga é necessária para obter uma impressão regular que é medida no visor do equipamento, onde as diagonais L_1 e L_2 formam a média L , utilizada na equação a seguir.

Determinação da dureza Vickers por meio de cálculos

A equação para o cálculo da dureza Vickers é dada por:

$$HV = \frac{\text{carga}}{\text{área da superfície piramidal}} = \frac{2Q \operatorname{sen} \frac{136^\circ}{2}}{L^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow HV = \frac{1,8544 \cdot F}{L^2}$$

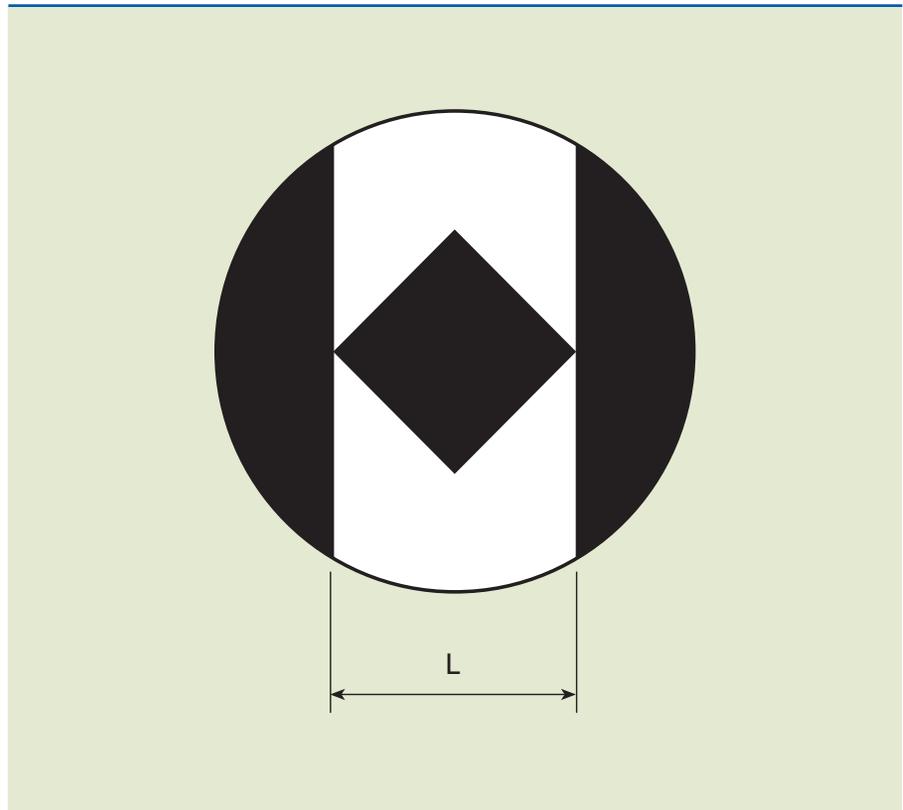
em que F é dado em kgf ou N, L em mm e a dimensão da dureza em N/mm^2 ou kgf/mm^2 .

A dureza Vickers fornece, assim, uma escala contínua (de $HV = 5$ até $HV = 1\,000$ kgf/mm^2) para a carga usada. Para as muito pequenas, pode variar de uma carga para outra. Nesse caso é necessário mencionar a carga usada toda vez que ensaiar o metal. A área deve ser medida com exatidão e, por esse motivo, utiliza-se um microscópio acoplado ao visor da máquina para determinar as diagonais L com precisão de 1 micron (aproximadamente).

As figuras 4.31 e 4.32 mostram, respectivamente, o visor da máquina e a máquina.

Figura 4.31

Visor da máquina de ensaios Vickers.



**Figura 4.32**

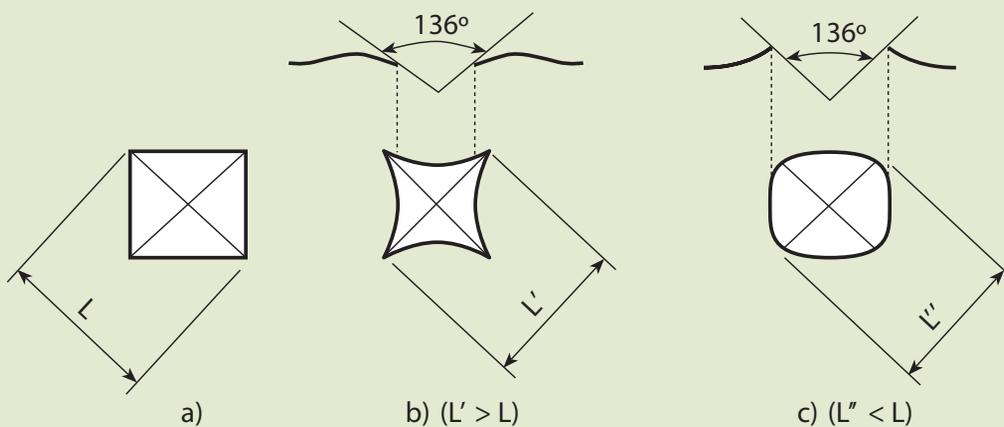
Máquina de ensaios Vickers.

Defeitos da impressão

Uma impressão ideal, no ensaio Vickers, deve apresentar os lados retos. Entretanto, podem ocorrer defeitos, como esquema indicado na figura 4.33. Esses defeitos são devidos ao afundamento ou à aderência do metal em volta das faces do penetrador.

Figura 4.33

Impressões produzidas no ensaio de dureza Vickers:
 a) impressão perfeita;
 b) impressão com afundamento;
 c) impressão com aderência.



A dureza Vickers é calculada com relação às diagonais da impressão. Os defeitos causam variação em relação à dureza real: menores quando houver aderência e maiores quando houver afundamento.

Para solucionar esse problema, o valor da carga deve ser alterado. Em geral, nos casos de impressão com afundamento aumenta-se a carga e nos casos de impressão com aderência diminui-se a carga.

Vantagens e limitações do ensaio Vickers

Vantagens

- Praticamente não há limite de uso em função da dureza da amostra;
- possibilidade de realização de ensaios em chapas finas, amostras pequenas, tubos de paredes finas, medições de camadas finas;
- impressões reduzidas;
- não sofre influência em função da carga utilizada (carga de ensaio > 5 kgf).

Limitações

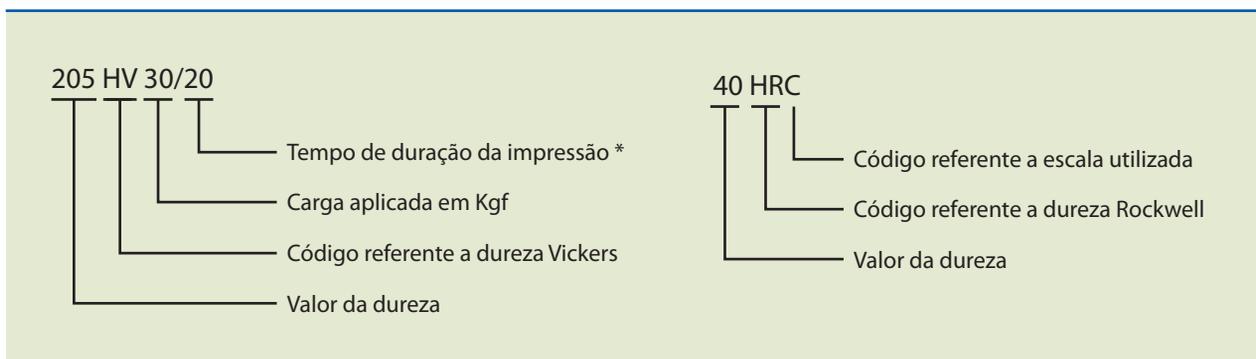
- A superfície da amostra deve ter preparação adequada;
- consumo de tempo para realização das medidas das diagonais;
- penetrador sensível a danos;
- pequenas impressões podem ser influenciadas por desvios de forma do penetrador ou pela preparação da superfície;
- sensível a vibrações, especialmente em microdureza;
- influência do operador sobre o valor da dureza.

Figura 4.34

Apresentação dos resultados do ensaio Vickers.

Apresentação dos resultados

Os resultados são apresentados como indicado na figura 4.34.



4.6 Impacto

O ensaio de impacto é um dos primeiros e, até hoje, o mais utilizado no estudo da fratura frágil de metais. Trata-se de um ensaio dinâmico, aplicado principalmente em materiais empregados em baixa temperatura.



Nesse ensaio, os corpos de prova padronizados apresentam um entalhe onde se dá a ruptura no momento de aplicação da carga, desferida por um martelo pendular.

Nos equipamentos mostrados nas figuras 4.35 e 4.36 existe uma escala que registra a quantidade de energia absorvida pelo corpo no momento do impacto. O valor registrado determina se o corpo é dúctil ou frágil: mais frágil se absorver menos energia e mais dúctil se absorver mais energia antes da ruptura.

O ensaio possui limitações, pois não se pode medir com exatidão as tensões envolvidas no momento do impacto. As tensões podem variar de acordo com o material ensaiado e também com sua estrutura interna.

No entanto, esse ensaio torna-se útil na comparação de dois materiais ensaiados nas mesmas condições, principalmente quando se pesquisa o material a ser utilizado em ambientes expostos a variações de temperatura e tensões de trabalho. No ensaio de materiais de média e baixa resistência, os resultados apresentados têm variação bastante significativa, especialmente em condições próximas às da temperatura de transição.

O ensaio de impacto identifica materiais que têm capacidade de absorver energia e dissipá-la, para que a ruptura não aconteça, ou seja, materiais que apresentam tenacidade. Essa propriedade, que está diretamente relacionada à fase plástica dos materiais, quando o material se mostra resistente, possui boas características de alongamento para suportar esforços consideráveis de tração, torção ou flexão, sem se romperem. São características apresentadas pelas ligas metálicas dúcteis.

Contudo, mesmo nessas condições, verifica-se que materiais dúcteis podem se romper de forma frágil e que essa ruptura pode ser influenciada pela sensibilidade do material à alta velocidade do choque.

A formação de uma fratura frágil no material pode ser altamente perigosa na prática, causar a falência repentina do material ou, nos ensaios de impacto, gerar interpretações erradas dos dados. Tem como principal agravante as microtrincas e trincas, que fazem com que as tensões elevadas sejam concentradas nessa região da peça ou corpo de prova e mudem consideravelmente o comportamento do material dúctil.

Os resultados obtidos com vários corpos de prova de um mesmo metal são bastante diversos. Para chegar a conclusões confiáveis, é recomendável repetir o ensaio em pelo menos em três corpos de prova diferentes.

A energia necessária para fraturar o corpo de prova é dada por:

$$E = G (h - h') \text{ [Nm]}$$



em que:

E = energia em [Nm]

G = peso do martelo em [N]

h = posição inicial do martelo [m]

h' = posição final do martelo [m]

Figura 4.35
Esquema da máquina de ensaio.

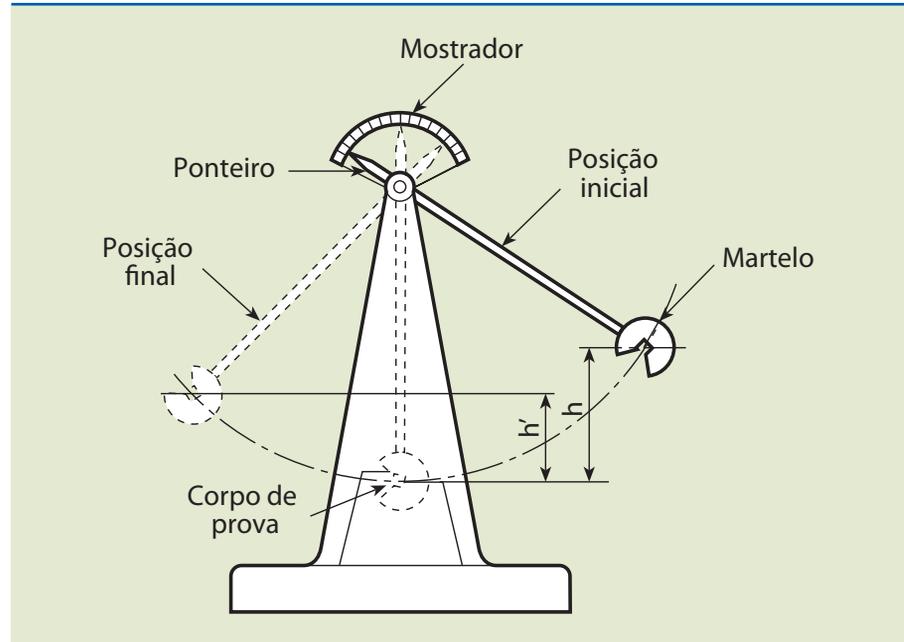


Figura 4.36
Máquina de ensaio Charpy.



GETTY IMAGES/FUCKR RM

4.6.1 Corpos de provas

De acordo com a norma norte-americana E-23 da ASTM, os corpos de prova para os ensaios Charpy (indicados na figura 4.37) são classificados, de acordo com o tipo de entalhe, da seguinte maneira:

- tipo A (entalhe em V) → para materiais de menor resistência;
- tipo B (entalhe “Ferradura”) → para materiais de média resistência;
- tipo C (entalhe em U) → para materiais de maior resistência.

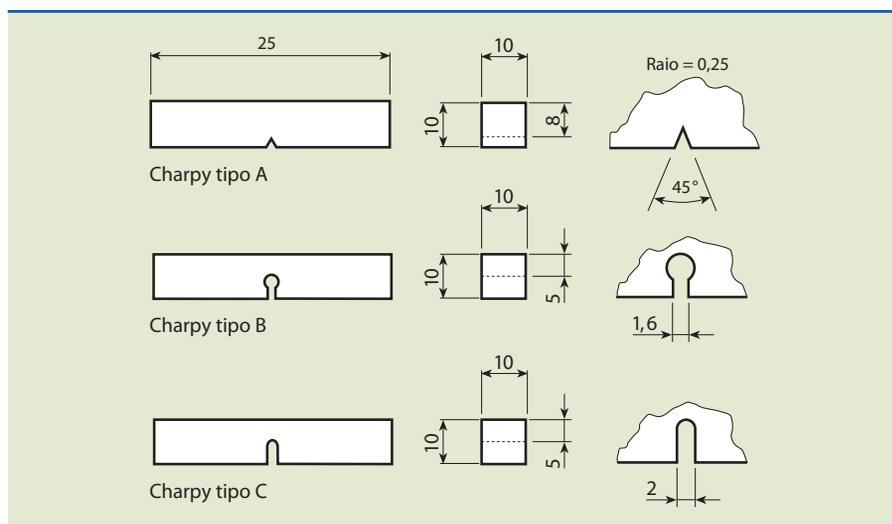


Figura 4.37

Corpos de prova tipo Charpy (recomendados pela ASTM e ABNT).

O corpo de prova para o ensaio de impacto tipo Izod (figura 4.38) possui a seção quadrada de 10 mm de lado e é igual ao ensaio Charpy, com variação no comprimento, que é de 75 mm, e na posição do entalhe, que muda para a distância de 28 mm de uma das extremidades. É característica desse ensaio somente o entalhe em V.

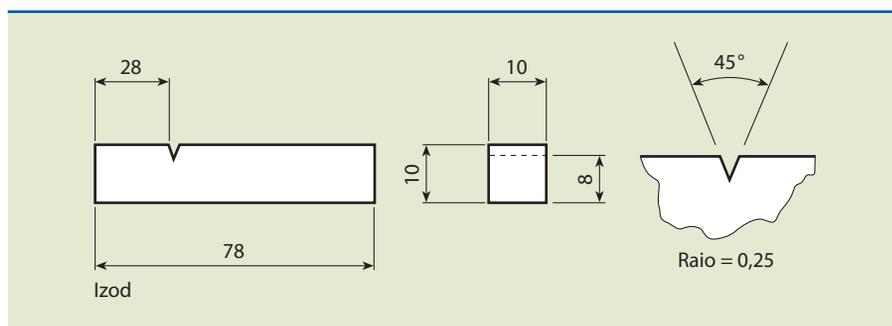


Figura 4.38

Corpos de prova tipo Izod (recomendados pela ASTM e ABNT).

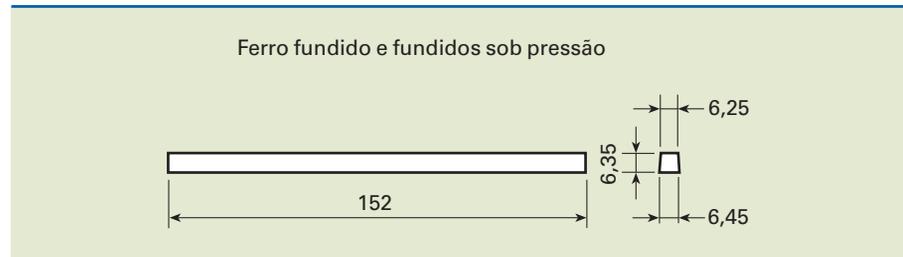
De acordo com a norma E-23 da ASTM, para ensaios em ferro fundido ou metais fundidos, o corpo de prova não é entalhado, conforme mostra figura 4.39.

Caso não seja possível retirar um corpo de prova nas dimensões padronizadas por causa do tamanho da peça ou do tipo de material, a norma citada anteriormente contempla um corpo de prova de dimensões reduzidas, lembrando que os

resultados dos ensaios obtidos com esses corpos somente podem ser comparados a resultados obtidos com corpos de prova da mesma dimensão.

Figura 4.39

Corpos de prova para ferro fundido e fundidos sob pressão (recomendados pela ASTM e ABNT).



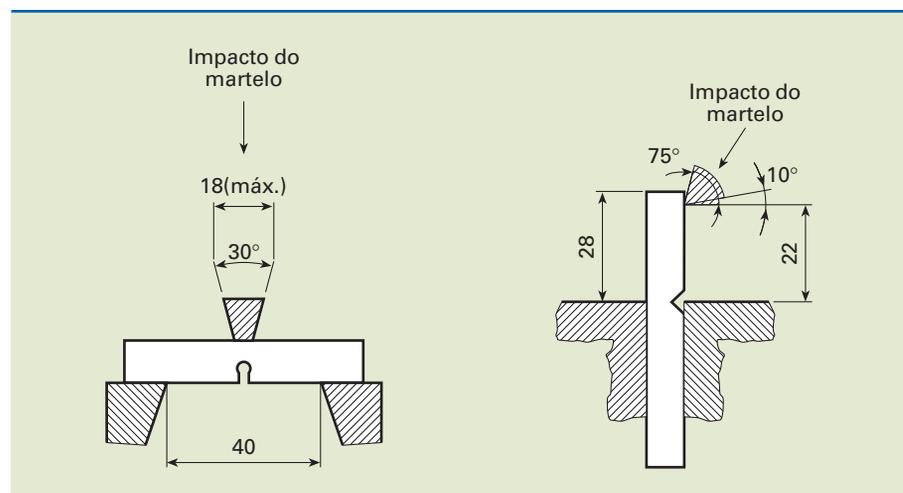
Para a realização do ensaio Charpy, o corpo de prova é apoiado livremente na máquina de ensaio (não é fixado), e a distância entre os apoios é de 40 mm, conforme mostra a figura 4.40.

No ensaio de impacto tipo Izod, o corpo de prova é engastado, deixando que o centro do entalhe se alinhe à superfície de engaste, como indicado à direita na figura 4.40.

Tanto no ensaio Charpy quanto no ensaio Izod existe o impacto do martelo no corpo de prova. No ensaio Charpy, o corpo de prova é posicionado de maneira que o impacto do martelo ocorra na face oposta ao entalhe. No ensaio Izod, o corpo de prova é colocado de maneira a permitir o impacto na mesma face do entalhe.

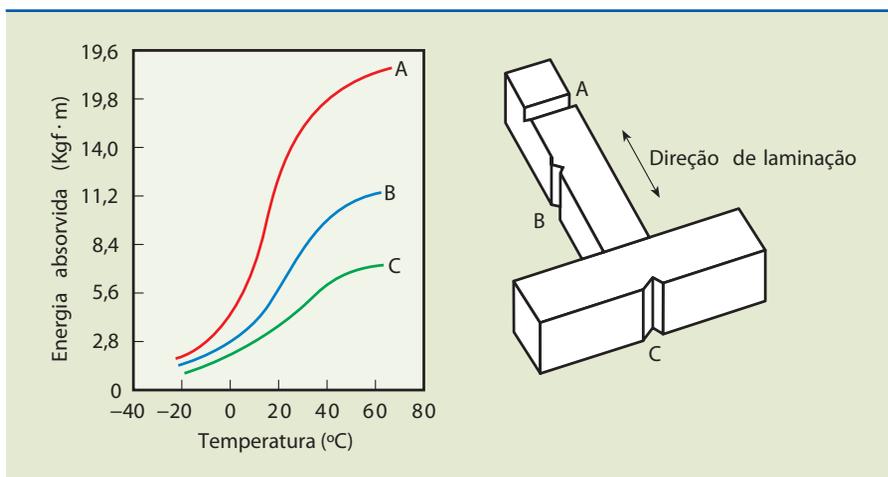
Figura 4.40

Diferença quanto ao impacto do martelo (recomendado pela ASTM e ABNT).



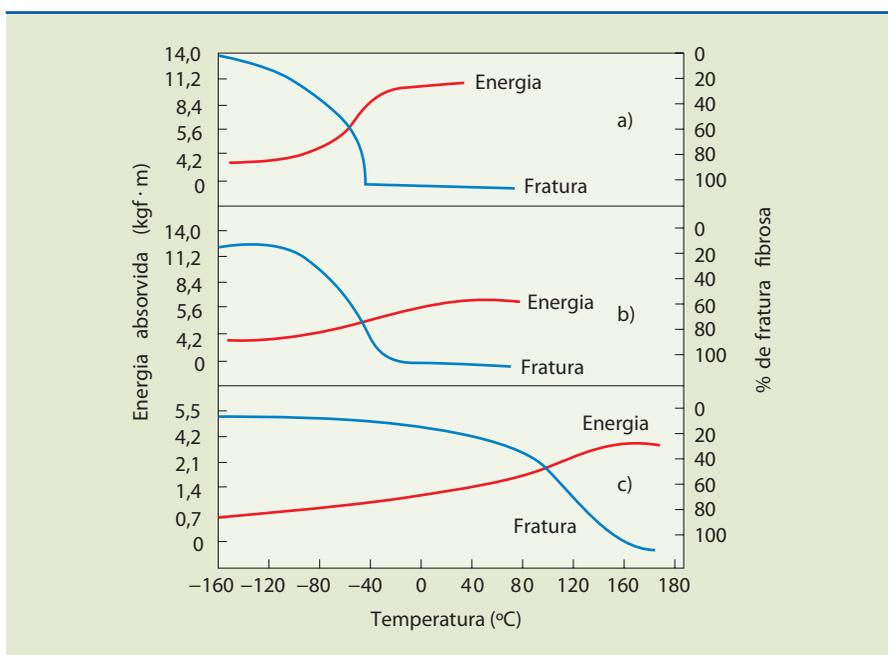
4.6.2 Corpo de prova e sentido de laminação

A construção do corpo de prova deve seguir alguns critérios que levam em consideração o sentido da laminação e, por consequência, a direção das fibras do material. A posição em que o corpo de prova for retirado do material a ser ensaiado fará com que tenha resultados diferentes para o mesmo ensaio. A influência do sentido de laminação para o mesmo material é indicado na figura 4.41.

**Figura 4.41**

Efeito de direcionalidade nas curvas de impacto de corpos de prova Charpy retirados de três locais diferentes em um aço doce.

Para o ensaio apresentado a seguir (figura 4.42), nota-se que, em determinadas coordenadas, uma variação pequena de temperatura tem influência significativa na capacidade de energia absorvida.

**Figura 4.42**

Efeito da temperatura em aço 4340:
a) de baixa resistência;
b) de média resistência;
c) de alta resistência. Vê-se também que aparece a porcentagem de fratura fibrosa (dúctil).

4.7 Dobramento

O ensaio de dobramento permite avaliar a ductilidade do material de forma qualitativa. Portanto, não fornece valor numérico. Pode ser realizado em máquina de ensaio universal ou em prensa comum, obviamente com algumas adaptações. O corpo de prova é apoiado em dois roletes, distanciados de acordo com o tamanho do corpo. Em seguida, um cutelo exerce um esforço no centro do material ensaiado, de modo que o elemento possa fletir, dobrando-se de acordo com a carga aplicada e o ângulo de severidade α , que geralmente é de 90° , 120° ou 180° , como mostram as figuras 4.43 e 4.44.

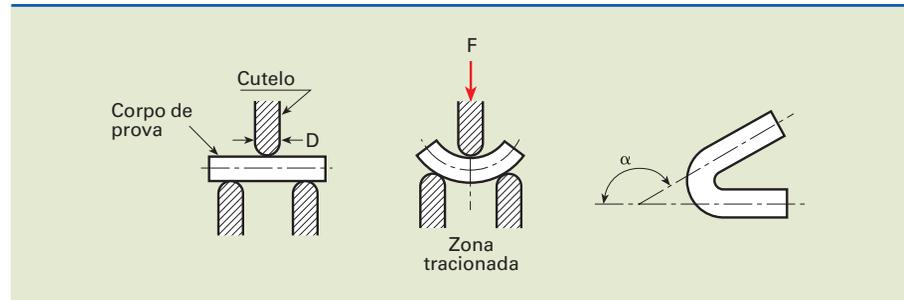
O ensaio termina quando o ângulo α é atingido. Logo em seguida, verifica-se o material, que não deve apresentar fissuras ou rachaduras na zona tracionada.

Os corpos de prova a serem ensaiados devem ter forma cilíndrica retilínea, tubular, retangular ou quadrada.

Quanto menor o diâmetro do cutelo, mais severo é o ensaio. Existem materiais que se dobram sem o cutelo, em um processo denominado dobramento sobre si mesmo.

Figura 4.43

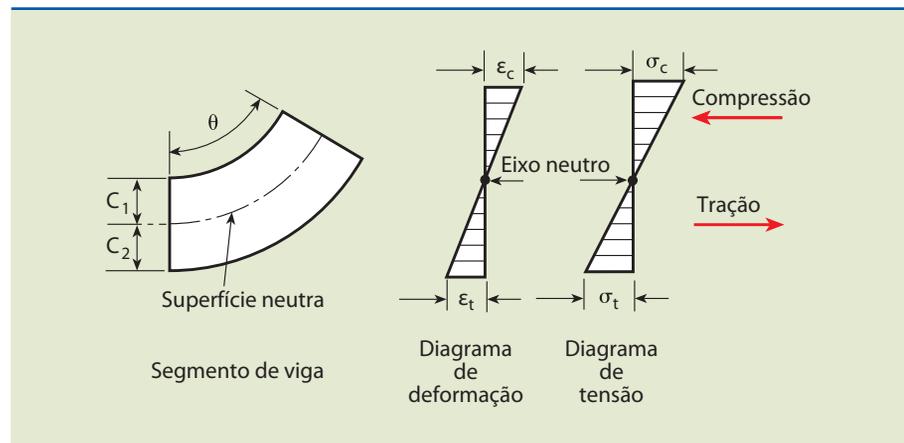
Severidade do ensaio de acordo com ângulo α .



As fibras internas do material ensaiado são solicitadas de maneira a se esticarem ou se comprimirem, conforme podemos observar na figura 4.44. As fibras do lado da força aplicada são de compressão, e as fibras em posição oposta são de tração. Existe uma posição intermediária do material na qual as fibras não estão sujeitas nem a compressão nem a tração. Essa posição é denominada linha neutra. A localização dessa linha (C_1 e C_2 na figura) varia de acordo com o raio de curvatura.

Figura 4.44

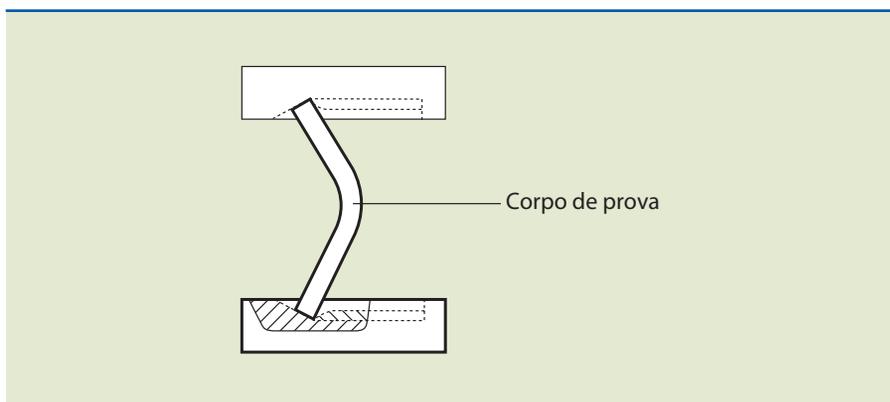
Análise das fibras do material.



4.7.1 Tipos de processo de dobramento

Há duas variantes no processo de dobramento:

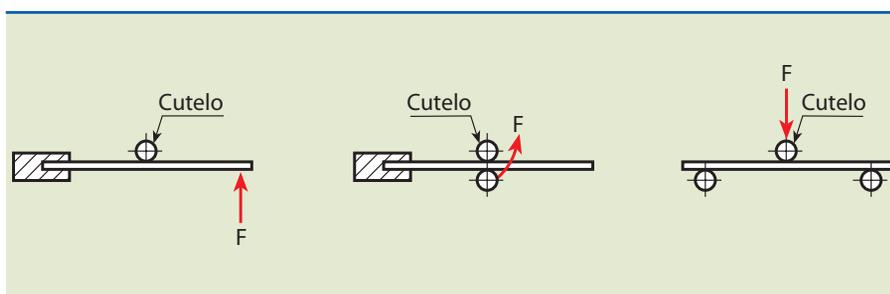
- Dobramento livre: obtido pela aplicação da força nas extremidades do corpo de prova, sem aplicação de força no ponto máximo de dobramento, como no exemplo indicado na figura 4.45.

**Figura 4.45**

Corpo de prova apoiado para dobramento livre.

- Dobramento semiguiado: ocorre em uma região determinada pela posição do cutelo, como indicado na figura 4.46.

Esses ensaios são utilizados para barras destinadas à armadura de proteção e baseiam-se nas especificações EB-780 e métodos MB-782 da ABNT.

**Figura 4.46**

Posição do cutelo nos dobramentos semiguiados.

4.7.2 Dobramento em barras para construção civil

Esse tipo de ensaio é muito útil para a área da construção civil devido às solicitações a que as barras são submetidas na prática, exigindo resistência do material sem que apresente fissuras ou rachaduras. O ensaio é realizado com ângulo de severidade α de 180° e, para cada categoria de barras, é estipulado um diâmetro de cutelo.

As barras são divididas nas seguintes categorias: CA-25, CA-32, CA-40, CA-50 e CA-60, de acordo com a especificação brasileira EB-1980. O número da categoria refere-se ao valor mínimo do limite de escoamento que a barra deve possuir, em kgf/mm^2 .

4.7.3 Ensaio de dobramento em corpo de prova soldado

O ensaio de dobramento em corpos de prova soldados tem a finalidade de avaliar ou qualificar profissionais e é também usado na aprovação de processos na área de soldagem. Nesses casos emprega-se o ensaio de dobramento guiado. No caso específico de avaliação da qualidade da solda empregada no processo utiliza-se o método de dobramento livre.

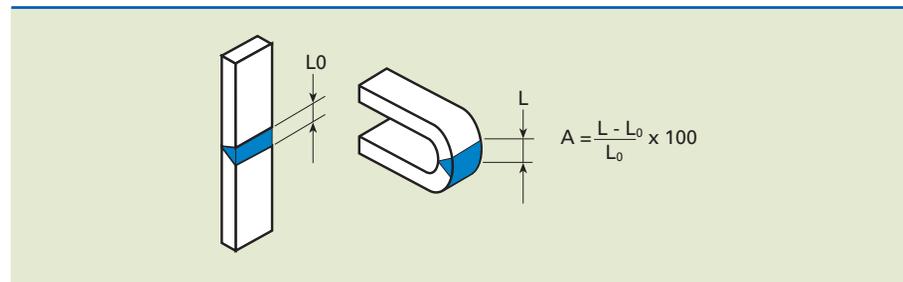
Os corpos de prova para o ensaio deverão ser retirados de peças soldadas em que o cordão de solda tenha boa qualidade. Aplica-se o dobramento livre e de acordo com normas específicas. A largura do corpo de prova deverá ter, no mínimo, o valor da espessura mais a metade.

O ângulo de severidade α do ensaio é sempre de 180° , de modo que o cutelo não toque a região soldada no início do ensaio, evitando a concentração de tensões indesejadas.

Os resultados são avaliados verificando-se a existência ou não de fendas, fissuras, rachaduras ou rupturas na zona tracionada do corpo de prova. A posição da retirada dos corpos de prova é sempre indicada nas normas técnicas, que prescrevem também que os ensaios de tração sempre devem acompanhar os corpos de prova para o dobramento.

Para calcular o alongamento da área soldada, utiliza-se a equação indicada na figura 4.47.

Figura 4.47
Cálculo do alongamento da área soldada.

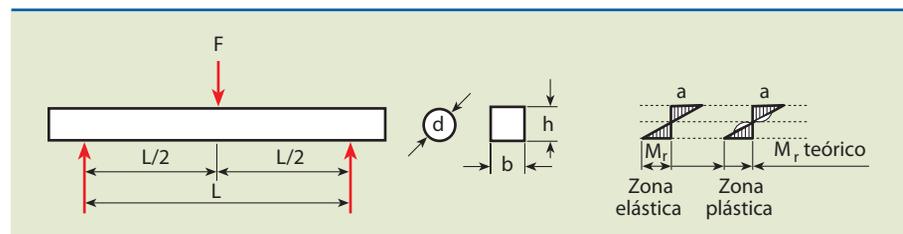


4.8 Flexão

O ensaio de dobramento aplicado em materiais frágeis é denominado ensaio de flexão. Materiais como ferro fundido cinzento, aços-ferramentas ou carbonetos sinterizados são ensaiados por dobramento transversal, que determina sua resistência e ductilidade, como indicado na figura 4.48.

O corpo de prova para o ensaio é preferencialmente circular ou retangular para simplificar os cálculos. Caso o corpo de prova tenha forma irregular, deve-se fazer correções de acordo com a norma A-438 da ASTM. Nesse tipo de ensaio, podemos obter divergências na medição de até 25% entre ensaios. Dessa forma, torna-se necessária a realização de diversos ensaios até que se obtenha um valor médio confiável.

Figura 4.48
Ensaio de dobramento-flexão em materiais frágeis.



O ensaio de flexão fornece o valor do módulo de ruptura (M_r) ou módulo de resistência ao dobramento, que pode ser calculado utilizando a equação:

$$M_r = \frac{M \cdot c}{J}$$

em que:

M_r = módulo de ruptura (kgf/mm^2)

M = momento de resistência, relativo à carga F em relação à distância $L/2$.

c = distância do eixo neutro (mm)

J = momento de inércia da seção (mm^2)

Como:

$$M = \frac{P \cdot L}{4}$$

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \rightarrow \text{para seção circular, em que } d \text{ é o diâmetro}$$

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} \rightarrow \text{para seção retangular de base } b \text{ e altura } h$$

deduz-se:

$$M_r = \frac{2,55P \cdot L}{d^3} \rightarrow \text{para seções circulares}$$

$$M_r = \frac{3P \cdot L}{2b \cdot h^2} \rightarrow \text{para seções retangulares}$$

O ensaio de flexão permite que seja medida a deformação vertical da viga (corpo de prova) em função da força aplicada. Essa deformação é comumente denominada flecha. A medida é obtida por um defletômetro, de forma que é possível traçar um diagrama carga-flexão para diversos tipos de materiais, como indicado na figura 4.49. A flecha também varia com o tipo de perfil e dureza do material ensaiado, como pode ser observado na figura 4.50.

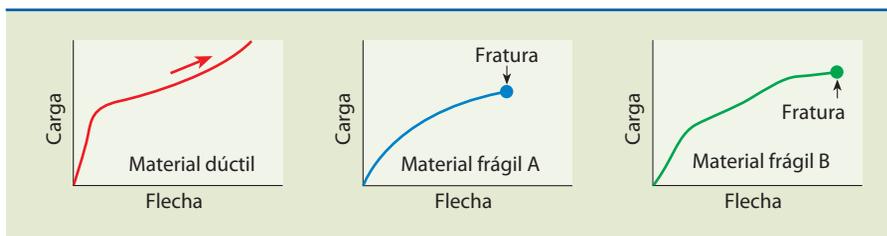
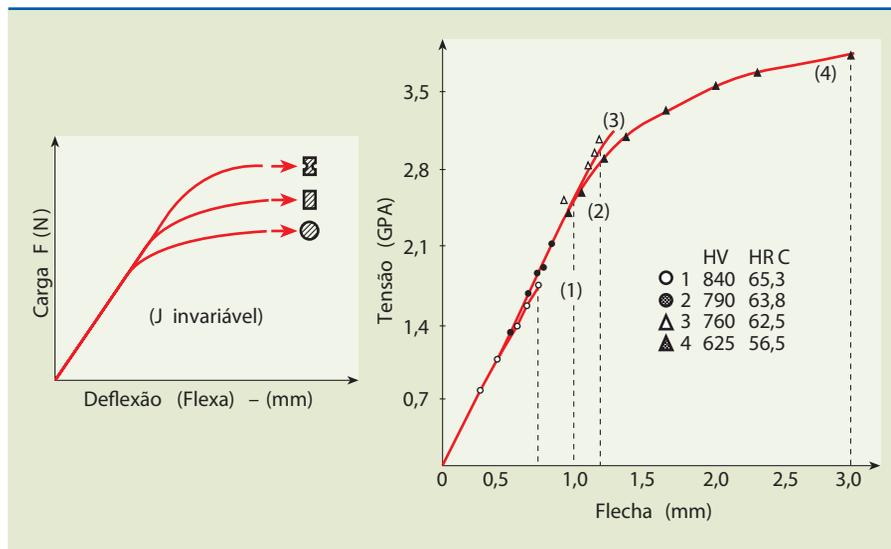


Figura 4.49

Diagrama carga-flexão para três diferentes materiais.

Figura 4.50

Varição da flecha em função do perfil e da dureza do material ensaiado.



A rigidez do material também pode ser determinada pela equação:

$$E = \frac{M \cdot L}{3J} \text{ em que:}$$

E = rigidez na flexão (kgf/mm²)

M = momento de dobramento (kgf·mm)

L = distância entre apoios (mm)

J = momento de inércia da seção (mm⁴)

∫ = deflexão angular (radianos)

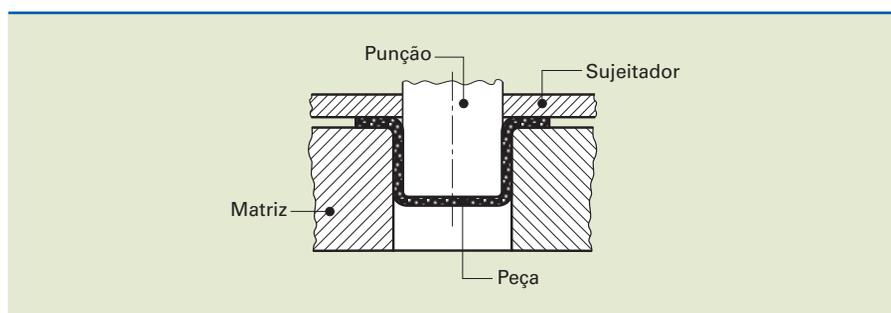
4.9 Embutimento

O ensaio de embutimento tem grande aplicação na área metalúrgica, automobilística etc. Essas áreas possuem diversas peças produzidas por processos de estampagem.

Para a conformação das peças são necessárias ferramentas (matrizes e punções) que, em alguns casos, podem ter cinco estágios ou mais, isto é, quantas ferramentas serão utilizadas para obter o produto final. Para essa conformação gradual é preciso um material bastante dúctil. A figura 4.51 mostra esquema de uma ferramenta de estampagem.

Figura 4.51

Ferramenta para estampagem.



Durante o processo de estampagem, existem ocorrências de defeitos nos produtos que podem estar relacionados às ferramentas, máquinas e manuseio envolvidos no processo. Além disso, há defeitos relacionados ao material que devem estar dentro de limites especificados pelo laboratório de ensaio. Os defeitos não podem afetar a qualidade do produto no que diz respeito à resistência para peças de estrutura visual e de tato para peças de acabamento.

A estampabilidade, ou capacidade de estampagem, é definida em ensaios de embutimentos adronizados chamados Erichsen (figura 4.52) e Olsen (figura 4.53). Esses ensaios são de natureza qualitativa, realizados no recebimento do lote, e indicam o desempenho que o material apresentará durante o processo produtivo. Se ocorrerem problemas durante a produção, novos ensaios serão necessários para verificar a homogeneidade do lote.

Os ensaios Erichsen e Olsen diferenciam-se pelo diâmetro da esfera e do corpo de prova utilizado.

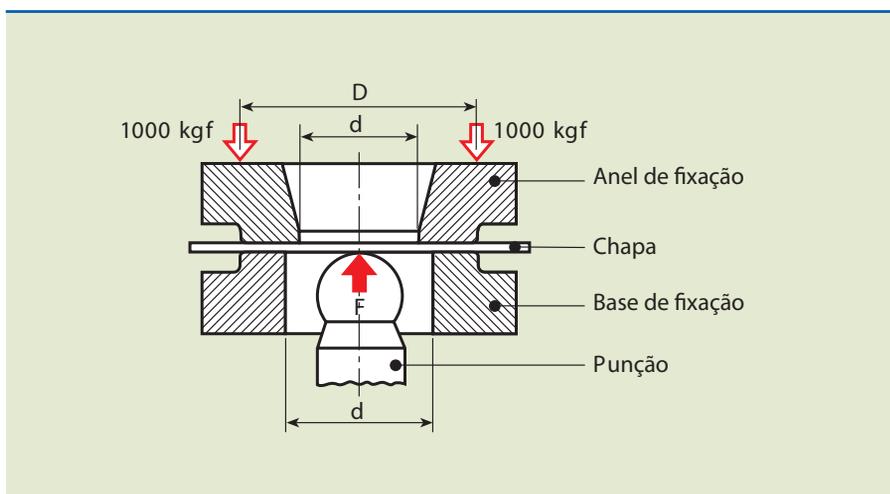


Figura 4.52

Esquema do ensaio de embutimento Erichsen (NBR 5902).

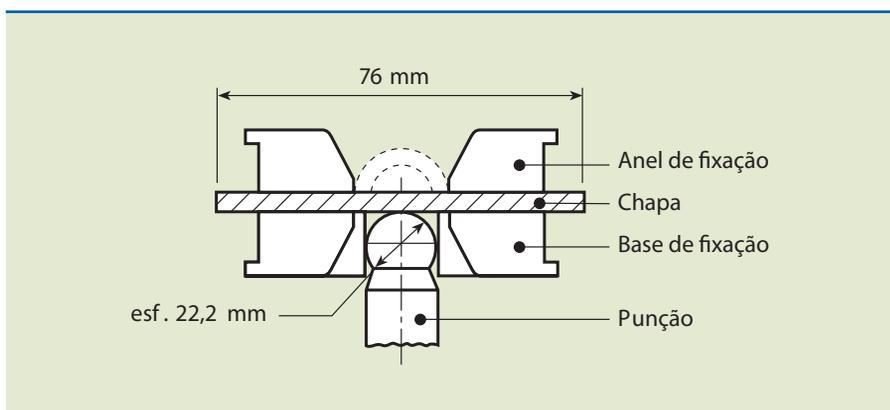


Figura 4.53

Esquema do ensaio de embutimento Olsen (NBR 5902).

Nos dois casos, o ensaio consiste em forçar uma esfera, acionada por um pistão hidráulico, de encontro a um corpo de prova extraído de uma chapa metálica, preso por um dispositivo de fixação. O esforço produz, sob a

forma de uma elevação (calota esférica) na superfície da chapa, uma deformação plástica que progride à medida que a esfera avança. O ensaio termina quando ocorre a ruptura da chapa, com um som característico (estalo). O índice de estampabilidade, dado pela altura da calota esférica formada, depende, além da constituição metalúrgica da chapa, também de sua espessura. Quanto maior a altura da calota esférica, maior a estampabilidade da chapa. Os fabricantes costumam classificar chapas de aço e de outros metais não ferrosos (latão, alumínio) para estampagem segundo o índice de estampabilidade e espessura.

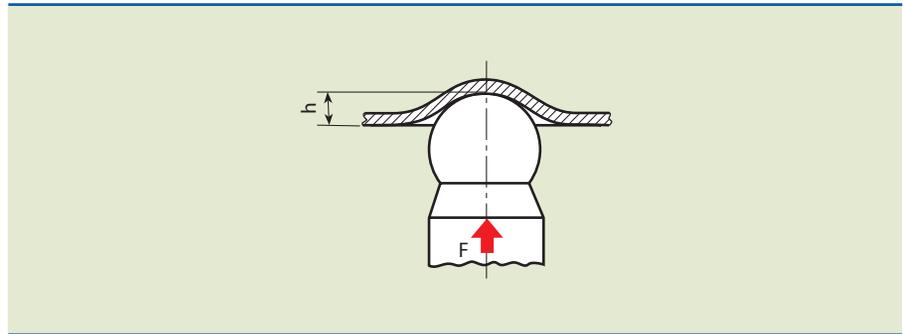
Recomenda-se que a carga de fixação da chapa seja de 10 000 N. A chapa e o corpo esférico devem ser untados com um composto à base de graxa, grafite e óleo mineral.

Depois de realizado o ensaio, a altura h , que é a deformação causada no corpo de prova pela esfera, é denominada índice Erichsen de embutimento (ver figura 4.54).

As máquinas de ensaio para embutimento variam em dimensão, conforme as espessuras das chapas que podem ser ensaiadas, variam também caso a máquina seja manual ou automática.

Figura 4.54

Índice Erichsen de embutimento (NBR 5902).



4.10 Fadiga

Quando um metal está sujeito a ciclos repetidos de tensões ou deformações específicas, é esperado que se rompa em um número específico de ciclos. Esse processo é denominado **fadiga** e é usualmente responsável por um grande percentual de falhas em elementos sujeitos a carregamentos cíclicos. Em todos os casos, a fadiga ocorre com um nível de tensão abaixo da tensão de escoamento do material.

Aparentemente, essa falha ocorre pelo fato de existirem regiões microscópicas, em geral na superfície do elemento, onde a tensão localizada torna-se muito maior do que a tensão média atuante ao longo da seção transversal do elemento. Sendo cíclica, essa tensão provoca o aparecimento de microtrincas, que causam um aumento da tensão no entorno, fazendo com que se estendam para o interior do material. Eventualmente, a área da seção transversal do

elemento é reduzida a ponto de não mais resistir à carga e resulta na fratura súbita do elemento. Assim, o material, originalmente conhecido como dúctil, comporta-se como frágil.

Limite de resistência à fadiga: tensão abaixo da qual o material, sendo carregado por um número infinito de ciclos, nunca se rompe.

O limite de resistência à fadiga é determinado colocando-se um corpo de prova em um equipamento que aplica uma sollicitação de flexão enquanto o corpo gira. A consequência disso é as fibras do corpo de prova sofrerem sollicitações variáveis ao longo de uma volta completa. Uma fibra do material começa, por exemplo, com sollicitação de tração e, ao girar 90° , a sollicitação zera. Girando mais 90° , a sollicitação inverte seu sentido e passa a sollicitar o material por compressão; mais 90° e zera novamente; e, por fim, mais 90° e volta à sollicitação de tração. Dessa forma, temos um carregamento como indicado no gráfico *c* da figura 4.55.

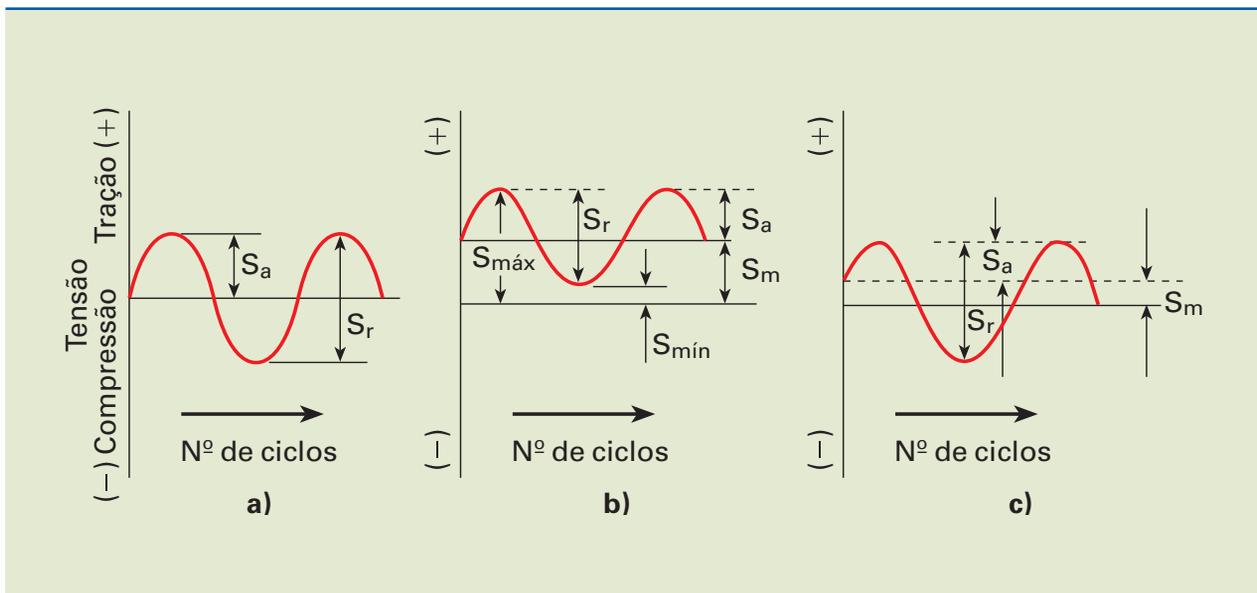
No caso de flexão alternada, no gráfico *a*, temos um ciclo em que as tensões máximas e mínimas são iguais e de sinais opostos; e para o caso indicado no gráfico *b* todas as tensões são positivas, e as tensões máximas e mínimas são desiguais. Existem diversos tipos de tensão (*stress*) possíveis para os ensaios de fadiga.

Nos gráficos de N-S (número de ciclos em função da tensão), como mostra a figura 4.56, as tensões a que o corpo está submetido estão representadas por:

- $\sigma_{\text{máx}}$ = tensão máxima;
- $\sigma_{\text{mín}}$ = tensão mínima;
- σ_r = diferença entre $\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$;
- σ_a = amplitude de tensão alternativa (é a metade de σ_r);
- σ_m = tensão média (é a média algébrica entre $\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$).

Figura 4.55

Ciclos regulares de tensões:
 a) tensão reversa;
 b) tensão repetida (campo de tração);
 c) tensão repetida (campos de tração-compressão).



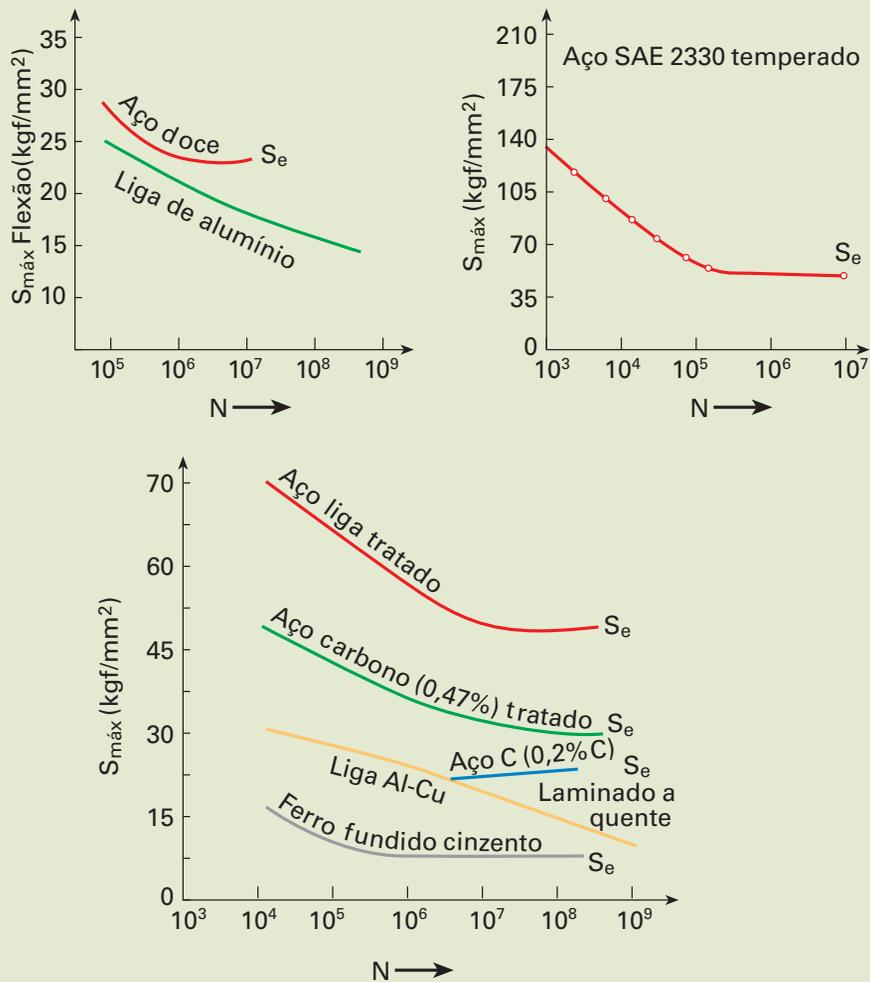


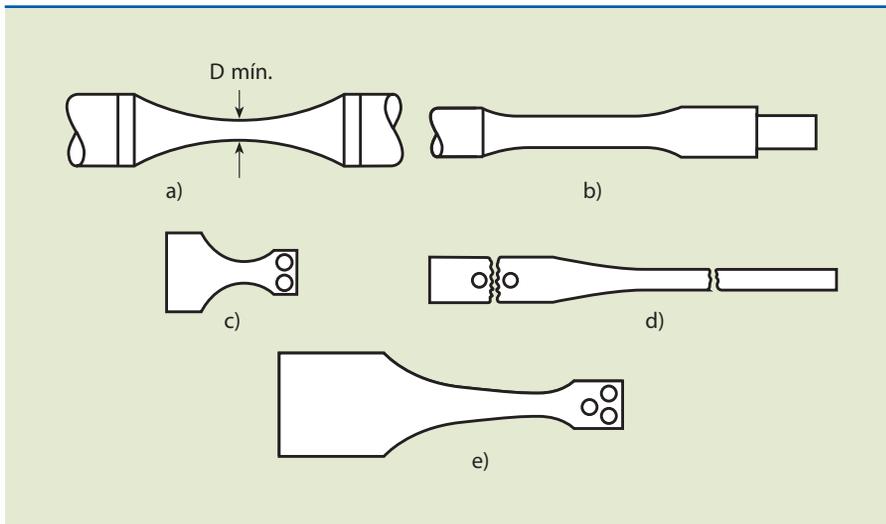
Figura 4.56

Exemplos práticos de algumas curvas N-S.

O ensaio é realizado de diversas maneiras. De acordo com o tipo de sollicitação que se deseja aplicar são utilizados corpos de prova específicos, como mostra a figura 4.57.

Os principais tipos são:

- torção;
- tração-compressão;
- flexão;
- flexão rotativa.

**Figura 4.57**

Desenhos esquemáticos de alguns tipos de corpos de prova:

a) para ensaio de fadiga por flexão rotativa ou qualquer outro carregamento axial;

b) tipo paralelo, para flexão rotativa;

c) retirado de lâminas;

d) retirado de chapas finas;

e) retirado de chapas grossas. O esquema **b** também serve para fadiga por torção, e os esquemas **c, d, e** podem ser usados para fadiga por torção-compressão.

O acabamento superficial de componentes submetidos a esforços repetitivos é significativo, pois, devido às concentrações de tensões, a maioria dos defeitos ou falências se inicia nas imperfeições de superfície. Assim, com o polimento podemos melhorar a resistência do material à fadiga.

Além disso, outro processo, conhecido como *shot peening*, consegue melhorar a vida em fadiga do material. Ele consiste no bombardeamento da superfície do material com pequenas esferas metálicas (granalhas), as quais geram tensões residuais de compressão, amenizando as tensões de tração da sollicitação cíclica e amplificando a resistência à fadiga. Esse processo consegue aumentar em até 15% a resistência às tensões de tração e dobrar a vida em fadiga de um componente. Essa técnica é muito utilizada nas indústrias automobilística e aeronáutica. Outras técnicas também usadas são mostradas na tabela 4.11.

Tabela 4.11

Influência do acabamento superficial no limite de fadiga.

Acabamento	Aço 0,4%C temperado e trefilado (flexão rotativa)		Aço 0,02%C recozido (flexão rotativa)		Aço 0,33%C (cantiléver rotativo)		Aço SAE 1045 (flexão rotativa)	
	Limite de fadiga (kgf/mm ²)	% de desvio do acabamento padrão	Limite de fadiga (kgf/mm ²)	% de desvio do acabamento padrão	Limite de fadiga (kgf/mm ²)	% de desvio do acabamento padrão	Limite de fadiga (kgf/mm ²)	% de desvio do acabamento padrão
Alto polimento longitudinal	35,5	103	–	–	29,0	102	21,7	100
Polimento padrão (pó de esmeril fino)	34,3	100	18,2	100	28,3	100	21,7	100
Esmeril grosso	–	–	–	–	27,3	100	–	–
Esmerilhado	31,5	93	–	–	–	–	–	–

Acabamento	Aço 0,4%C temperado e trefilado (flexão rotativa)		Aço 0,02%C recozido (flexão rotativa)		Aço 0,33%C (cantiléver rotativo)		Aço SAE 1045 (flexão rotativa)	
	Limite de fadiga (kgf/mm ²)	% de desvio do acabamento padrão	Limite de fadiga (kgf/mm ²)	% de desvio do acabamento padrão	Limite de fadiga (kgf/mm ²)	% de desvio do acabamento padrão	Limite de fadiga (kgf/mm ²)	% de desvio do acabamento padrão
Lima fina	–	–	–	–	26,9	95	26,6	90
Torneamento fino	30,1	88	16,8	92	25,5	95	26,6	90
Torneamento grosso	29,0	85	16,1	88	–	–	–	–
Lima bastarda	–	–	–	–	24,8	88	–	–
Lima grossa	–	–	–	–	23,0	81	–	–

Fonte: SOUZA, 1982.

É muito comum testar a vida útil dos componentes e conjuntos mecânicos. Existem dispositivos especiais que simulam seu funcionamento sob condições de uso. Os dispositivos são na maioria das vezes criados dentro da própria empresa com a finalidade de desenvolvimento e certificação.

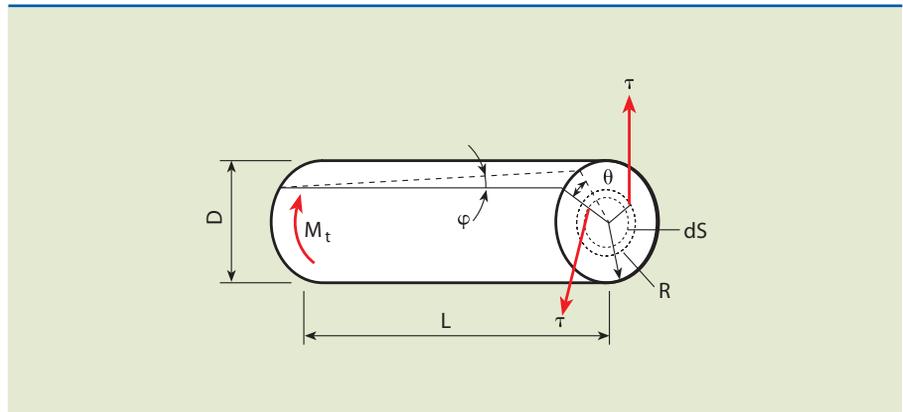
4.11 Torção

O ensaio de torção é indispensável em peças que sofrem esforços de giro em torno do próprio eixo, como molas em espiral, barras de torção, brocas e certos tipos de aços-ferramentas, conforme mostra a figura 4.58.

O procedimento de ensaio de torção é simples de realizar, mesmo assim pode-se sempre substituir esse ensaio pelo de tração, uma vez que fornece as mesmas propriedades e com maior facilidade de cálculo.

Figura 4.58

Análise dos esforços de torção.



Além disso, o corpo de prova para o ensaio de torção necessita de melhor preparação, fator que o torna inviável para uso rotineiro. Para a determinação das propriedades fornecidas no ensaio de torção, tais como no ensaio de tração, também são gerados gráficos de tensão-deformação. O ensaio de torção apresenta maiores vantagens quando aplicado aos materiais frágeis.

A máquina de ensaio por torção mede a variação angular de um ponto específico do corpo de prova em relação a um ponto fixo no dispositivo de ensaio. Quando utilizado um **troptômetro**, consegue ainda medir o encurtamento do corpo de prova.

Troptômetro:
aparelho especial de medição usado em máquinas de ensaio de torção.

Os corpos de prova, quando usados no lugar das peças, são cilindros maciços ou cilindros tubulares, com estrangulamento na região central, como indicado em desenho esquemático na figura 4.59. A geometria cilíndrica do corpo de prova favorece a aplicação da teoria elementar de torção, em que a tensão tem seu valor máximo na periferia do corpo e seu valor tende a zero à medida que se aproxima do centro.

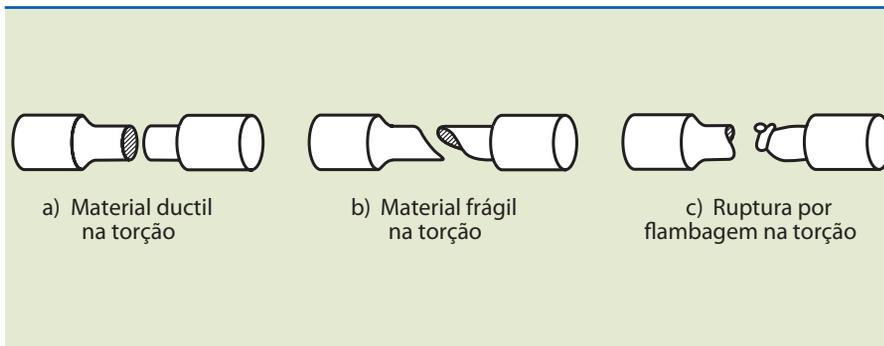


Figura 4.59

Corpos de prova para torção.

Para as equações a seguir, admite-se que haja proporcionalidade entre as tensões e as distâncias da periferia ao centro do corpo de prova.

em que:

$$M_t = \frac{\tau \cdot J_p}{r} \quad \tau = \text{tensão de cisalhamento (kgf/mm}^2\text{)}$$

$$M_t = \text{momento de torção (kgf} \cdot \text{mm)}$$

Ou

$$r = \text{raio da seção transversal (mm)}$$

$$\tau = \frac{M_{t,r}}{J_p}$$

$$J_p = \text{momento polar de inércia da seção (mm}^4\text{)}$$

Para um corpo de prova cilíndrico maciço, temos:

$$\tau = \frac{2 \cdot M_t}{\pi \cdot r^3}$$

Para corpos cilíndricos tubulares, com diâmetro externo D_1 e diâmetro interno D_2 , ou de raios r_1 e r_2 , temos:

$$\tau = \frac{16 \cdot M_t \cdot D_1}{\pi(D_1^4 - D_2^4)} = \frac{2 \cdot M_t \cdot r_1}{\pi(r_1^4 - r_2^4)}$$

A deformação por torção γ é causada pelo cisalhamento interno do material em que as fibras escorregam uma sobre a outra. Pode ser calculada pelo ângulo de torção θ utilizando a unidade em radianos ou por φ utilizando a unidade em graus.

$$\gamma = \text{tg}\theta = \frac{r\theta}{L}$$

em que:

L = comprimento útil do corpo de prova (mm).

O módulo de elasticidade transversal G de um material, quando solicitado à torção, é obtido analogamente ao módulo de elasticidade E , quando ensaiado à tração. O material na zona elástica, obedecendo à lei de Hooke, também apresenta proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento τ e a deformação por torção γ , que pode ser calculada pela fórmula:

em que:

$$G = \frac{M_t \cdot L}{J_p \cdot \theta}$$

G = módulo de elasticidade transversal (kgf/mm²)
 M_t = momento de torção (kgf · mm)
 L = comprimento útil do corpo de prova (mm)
 J_p = momento polar de inércia da seção (kgf/mm⁴)
 θ = ângulo de torção (rad)

Existe uma relação entre o módulo de elasticidade transversal G e o módulo de elasticidade E , que vale dentro da zona elástica do material, expresso da seguinte forma:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

em que:

ν = coeficiente de Poisson no ensaio de tração.

Módulo de ruptura sob torção:

$$\tau_r = \frac{3M_{m\text{-}x}}{2\pi r^3}$$



em que:

$M_{\text{máx}}$ = momento máximo ou torque máximo verificado no ensaio.

4.12 Líquidos penetrantes

O ensaio de líquidos penetrantes teve início em 1942, então usado nas indústrias férrea e aeronáutica devido principalmente ao trabalho com ligas não ferrosas.

O método é utilizado em materiais não magnéticos (alumínio, magnésio, aço etc.) e em alguns materiais magnéticos, cerâmicas vitrificadas, vidros, plásticos e outros não porosos (devido ao efeito capilaridade).

Uma das vantagens desse ensaio está na rápida visualização da descontinuidade superficial do material. Com isso diminui a margem de erros para aprovação ou reprovação de peças na linha de produção.

Esse método possui limitações, pois não é possível determinar o nível de profundidade da falha. Além disso, não é utilizado em equipamentos das indústrias alimentícias e farmacêuticas por haver probabilidade de contaminação do produto final.

4.12.1 Classificação dos penetrantes, processos e materiais

(de acordo com a ASTM 1417)

Classificação dos penetrantes

Tipo I – fluorescente

Tipo II – visível

Classificação dos métodos

Método A – lavável com água

Método B – pós-emulsificável, lipofílico

Método C – removível com solvente

Método D – pós-emulsificável, hidrofílico

Classificação por sensibilidade

(Os níveis de sensibilidade aplicam-se somente aos sistemas de penetrante do Tipo I)

Sensibilidade nível 1/2 – muito baixa

Sensibilidade nível 1 – baixa

Sensibilidade nível 2 – média

Sensibilidade nível 3 – alta

Sensibilidade nível 4 – ultra-alta



Classificação dos reveladores

- Forma a – pó seco
- Forma b – solúvel em água
- Forma c – suspenso em água
- Forma d – não aquoso
- Forma e – aplicação específica

Classificação dos solventes

- Classe 1 – halogenados
- Classe 2 – não halogenados
- Classe 3 – aplicação específica

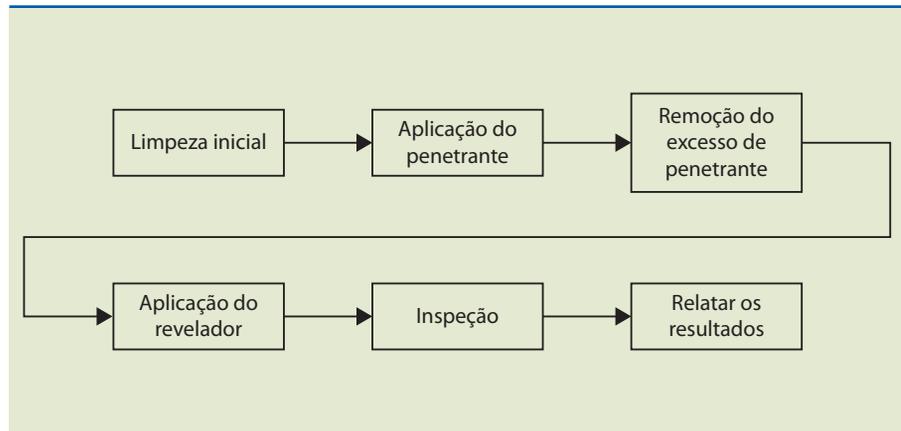
Quanto ao penetrante líquido empregado nesses métodos, temos dois tipos principais:

- 1) Inspeção por penetrante fluorescente: agrega-se ao penetrante uma tintura que fluoresce ao ser examinado sob luz ultravioleta.
- 2) Inspeção por penetrante líquido colorido: o penetrante possui uma coloração vermelha que facilmente é visualizada no contraste.

Segundo a norma norte-americana ASTM E165-65, os métodos de inspeção por penetrantes líquidos podem ser descritos conforme procedimento descrito na figura 4.60.

Figura 4.60

Procedimento para a realização do ensaio de líquidos penetrantes.



A figura 4.61 mostra o resultado obtido em um teste utilizando o processo de líquidos penetrantes em uma junta soldada.

4.13 Partículas magnéticas

Ensaio de partículas magnéticas é utilizado em indústrias para verificar possíveis descontinuidades superficiais e internas de até aproximadamente 3 mm de profundidade em materiais ferromagnéticos.

O ensaio é realizado por meio do magnetismo produzido por uma corrente elétrica em um material condutor no momento em que entra em contato com a peça, gerando as linhas de força características do campo magnético, como indicado na figura 4.61.

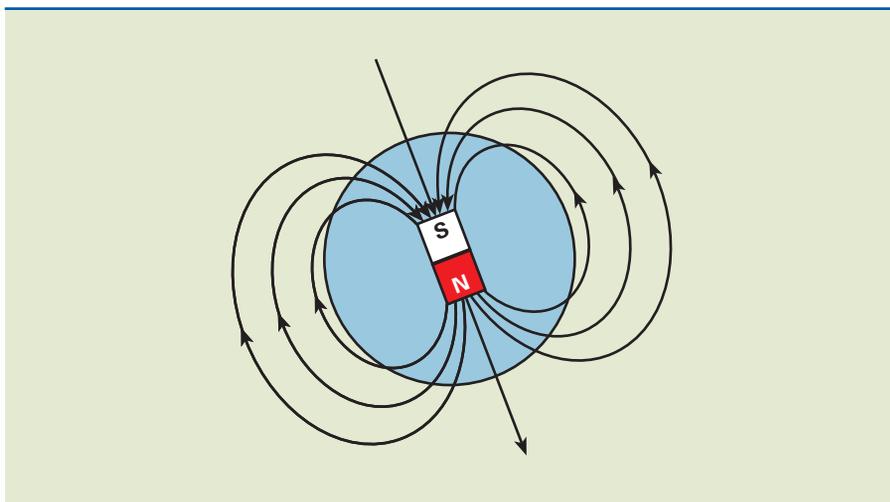


Figura 4.61

Linhas características do campo magnético.

A identificação da descontinuidade se dá por meio de limalhas de ferro espalhadas sobre a peça (via seca). As limalhas se alinham de acordo com o campo magnético gerado pelo condutor, conforme pode ser observado na figura 4.62.

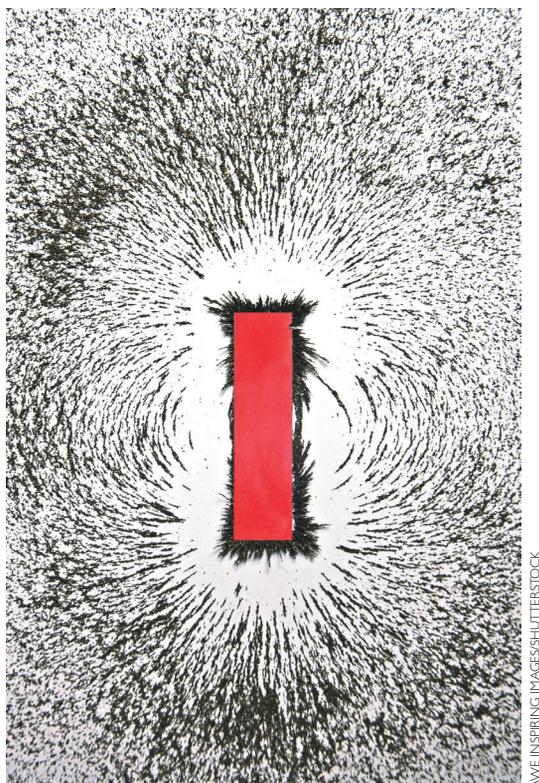


Figura 4.62

Representação dos tipos de linhas de forças magnéticas.

Onde há descontinuidade as linhas sofrem desvios e atraem uma quantidade maior de limalha, facilitando a localização de problemas. Para melhor identificar essas alterações, as magnetizações da peça devem ocorrer em ângulo de 90°, uma em relação à outra, no mesmo local magnetizado anteriormente. Para esse procedimento, utilizam-se equipamentos denominados de *yokes* (máquinas portáteis), como mostra a figura 4.63.

Figura 4.63
Máquina yoke para ensaios de campo.



Existem duas maneiras de realizar o ensaio de partículas magnéticas:

- via seca, em que as partículas magnéticas são utilizadas a seco;
- via úmida, em que as partículas magnéticas são utilizadas em suspensão em um líquido, por exemplo, água ou óleos minerais de fina viscosidade, ou em peças usinadas com acabamento liso, quando se requer do ensaio maior sensibilidade.

A técnica de via úmida detecta microdescontinuidades superficiais. A técnica de via seca é mais usada em superfícies não usinadas quando não se requer tanta sensibilidade. Nesse caso, utilizam-se equipamentos portáteis e semiportáteis para ensaios de campo.

Para visualizar melhor as descontinuidades, as partículas ferromagnéticas podem ser pigmentadas ou fluorescentes. De acordo com cada técnica de ensaio, a sensibilidade requerida e, principalmente, a cor de fundo das peças ensaiadas, as cores dos pigmentos variam (vermelho, cinza, amarelo, preto etc.).

Os tipos de descontinuidades a serem encontrados determinam os tipos de corrente elétrica utilizados na magnetização: CA (corrente alternada), CC (corrente contínua) ou CA retificada. A CA é mais empregada para a localização de descontinuidades superficiais, e as outras se destinam às descontinuidades subsuperficiais.

A geometria das peças define os tipos de condições de ensaios. Pode ser:

- fixa, ou de bancada (máquinas estacionárias);
- móvel (máquinas de eletrodo) ou portáteis (*yokes*).

Nas instalações fixas é mais fácil a utilização da técnica da via úmida. As máquinas portáteis podem usar tanto a técnica da via seca como a da via úmida, dependendo das necessidades do ensaio.

Limitações dos ensaios de partículas magnéticas

- Técnicas utilizadas somente para materiais ferromagnéticos.
- Possuem baixa sensibilidade para a detecção de descontinuidade esférica.
- Requerem especialistas para a análise dos resultados.
- Podem aparecer elementos subjetivos na interpretação de um ensaio.
- Requerem normalmente áreas de fácil acesso.
- A faixa de temperatura de trabalho é de até 60 °C na técnica de via úmida e de até 300 °C na técnica de via seca.

Classificação das descontinuidades

Segundo a norma norte-americana ASTM E125-63, 2008, pode-se classificar as descontinuidades, reveladas pelos métodos magnéticos, em oito grupos:

1) **Descontinuidades lineares (trincas):** são linhas sem orientação preferencial, de largura variável. Usualmente, as trincas se originam na superfície dos fundidos e, em geral, diminuem à medida que se aprofundam no material.

2) **Contração:** aparece como uma área recortada, com contorno irregular. É uma falha subsuperficial que pode ser levada à superfície do material por usinagem ou trabalho mecânico.

3) **Inclusões:** aparecem como variações isoladas, irregulares ou alongadas, de ocorrência individual, em distribuição linear ou espalhadas aleatoriamente em listras. Sua ocorrência é indicativa da presença de areia, escória ou ácidos na superfície do metal.

4) **Resfriamentos internos e chapelines não fundidos:** têm o aspecto de uma linha ou faixa que contorna o objeto e indica falta de difusão entre o objeto de metal e o fundido.

5) **Porosidade:** tem o aspecto de segregação de partículas magnéticas de vários tamanhos, distribuídas aleatoriamente.

6) **Defeitos de solda**, que podem ser devidos a:

- porosidade na solda;
- penetração incompleta;
- mordeduras;
- inclusões na solda;
- trincas.



A penetração incompleta apresenta uma disposição linear contínua ou intermitente. As porosidades, inclusões e trincas têm o aspecto já descrito, e as mordeduras aparecem como sulcos ou canais na superfície da peça, ao longo das bordas da solda.

7) **Indicações falsas:**

- riscos;
- rugas;
- pó depositado em depressões superficiais;
- partículas respingadas;
- marcas de talhadeira.

8) **Anomalias magnéticas:**

- camadas de óxido aderente;
- “escrita” magnética;
- campo magnético externo alto;
- junção de materiais de permeabilidade diferente;
- partículas aglomeradas em filetes agudos.

Tipos de magnetização

Magnetização circular: mais utilizada em tubos, ocorre em torno da peça.

Magnetização longitudinal: a peça é colocada entre os polos de um eletroímã ou no espaço interno de uma bobina.

4.14 Radiografia industrial

O ensaio radiográfico é um dos principais métodos aplicados na indústria, pois permite a visualização e a inspeção da peça inteira. É utilizado para identificar principalmente problemas internos, tais como: bolhas, descontinuidade, inclusões, entre outros. A identificação é possível por causa da absorção diferenciada da radiação pela matéria: quanto maior a quantidade de massa, maior a quantidade de radiação absorvida. A quantidade de radiação absorvida é quantificada por meio de filme, tubo de imagens ou, ainda, por detectores eletrônicos de radiação.

Esse ensaio é bastante sensível e é capaz de detectar diferenças volumétricas em regiões vizinhas na mesma peça. Os defeitos são visivelmente detectados desde que seu volume não seja muito pequeno em relação ao volume da peça analisada.

4.14.1 Utilização do raio X

Utiliza-se o raio X:

- quando há uma diferença visível na espessura, densidade ou composição do material;
- para materiais com homogeneidade considerável;



- para peças que permitam acessos laterais e diametralmente opostos para tubos.

Exemplos de aplicação

- Para detectar descontinuidades em diversos tipos de materiais;
- na inspeção de peças fundidas, soldadas e componentes montados em conjuntos;
- em vários metais ferrosos e não ferrosos, e em materiais não metálicos, tais como cerâmicas e plásticos.

Equipamento para o ensaio de raios X

Os raios X são produzidos no tubo de Coolidge, que constitui a parte principal do equipamento e varia em função da tensão máxima de operação.

Esse equipamento é constituído de painel de controle e cabeçote ou unidade geradora. No painel de controle estão todas as funções de comando, e no cabeçote está localizado o tubo (emissor de raios) e os dispositivos de refrigeração. A conexão entre painel de controle e cabeçote é feita por meio de cabos especiais de alta tensão.

Os equipamentos podem ser portáteis, com uma tensão máxima de 400 kV, e pesar de 40 a 80 kg. Alguns modelos possuem refrigeração dos tubos por meio de gases e são mais leves que os equipamentos refrigerados a óleo.

Radiografia

Para que a radiografia tenha resultado confiável, não deve apresentar imperfeições, principalmente nas áreas de maior interesse. Para assegurar a qualidade e a sensibilidade da imagem, utiliza-se o penetrômetro, ou IQI (indicador da qualidade de imagem).

Filme

A maneira de utilização se assemelha à de um filme fotográfico. Durante o processo é necessário que incida sobre o filme somente a radiação. A exposição à radiação da camada chamada emulsão contendo sais de prata fará com que o filme seja sensibilizado. O filme indicará, nas áreas escuras, maior quantidade de radiação que passou pela região sensibilizada, correspondente à da peça ensaiada.

Instalações

Para a liberação da construção de uma área para ensaios de emissões radioativas, o projeto deve ser encaminhado para a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), para aprovação.

Entre os itens avaliados estão:

- monitoramento e classificação das áreas;
- blindagem das paredes;
- blindagem das portas;
- sinalização luminosa;
- interruptores no interior da sala onde ficará o aparelho (para interromper a irradiação em caso de emergência);
- *interlock* nas portas (interrompe a irradiação se a porta for aberta);
- medidores de radiação;
- monitores de área (sonoro);
- plano de radioproteção;
- pessoal treinado e qualificado pela CNEN de acordo com as normas NAS 410.

Figura 4.64

Placa de risco de radiação.



4.14.2 Equipamento de raios gama

Para usar a radiação gama, a preocupação com segurança deve ser redobrada, pois, uma vez instalado, o aparelho passa a emitir radiação constantemente. Como proteção, deve-se utilizar uma blindagem (material para blindagem, chumbo ou urânio exaurido), que permite retirar a fonte de emissão do interior do aparelho, realizando a radiografia de forma segura. O conjunto é denominado irradiador. A diferença entre os irradiadores são os dispositivos para exposição da fonte de irradiação, que podem ser mecânicos, pneumáticos ou elétricos. Todos permitem a operação segura do aparelho, sem expor o operador às fontes radioativas.

O irradiador deve suportar choques bruscos, enchentes, incêndios, sem que a blindagem sofra danos que possam expor as pessoas à fonte radioativa. Por esse motivo, sua construção deve seguir as normas internacionais de energia nuclear.

A blindagem é especialmente projetada para conter determinado elemento radioativo. Portanto, não se deve utilizar a blindagem para elementos para os quais não foi projetada. A blindagem do equipamento não pode ser feita e tampouco alterada pelo operador da máquina. Somente um profissional especializado tem condições de realizar essa operação.

As fontes de radiação mais usadas pelas indústrias atualmente são:

- cobalto 60 (Co-60, $Z = 27$);
- irídio 192 (Ir-192, $Z = 77$);
- túlio 170 (Tu-170, $Z = 69$);
- selênio 75 (Se-75), radioisótopo de uso recente na indústria.

4.15 Ultrassom

O ensaio por ultrassom é realizado por meio da reflexão de ondas acústicas, que encontram dificuldades de propagação dentro do material. É utilizado na verificação de descontinuidades internas e em algumas superficiais, em qualquer tipo de material.

O ultrassom trabalha com frequência acima do limite audível, na faixa de 0,5 a 25 MHz.

As ondas acústicas geradas e transmitidas por um transdutor especial encostado ou acoplado ao material devem ser direcionadas no sentido favorável em relação à descontinuidade (interface). Essa descontinuidade reflete as ondas que são representadas, na tela do aparelho ou em um tubo de raios catódicos (TRC), como picos em um gráfico. Em geral, as descontinuidades internas são mensuradas com precisão razoável. Essa informação é comparada com parâmetros de engenharia e padrão de qualidade da própria empresa.

O ensaio de ultrassom também pode ser utilizado com facilidade, rapidez e precisão na detecção de corrosão e medição de espessura.

O ensaio possui uma extensa variação de aplicações, entre elas: vidros, borrachas, materiais compostos, ferrosos e não ferrosos, soldas, laminados, fundidos e forjados. É largamente empregado em usinas siderúrgicas, indústrias de transformação, indústria automobilística, marítima, ferroviária, rodoviária, aérea e aeroespacial.

4.15.1 Produção do ultrassom

A produção do ultrassom se dá pela aplicação de cargas elétricas em cristais piezolétricos, como o sulfato de lítio, o titanato de bário e o quartzo. A corrente elétrica alternada faz com que o cristal vibre na mesma frequência da corrente (emissão), gerando assim o ultrassom. No receptor ocorre de maneira inversa: o ultrassom faz vibrar o cristal, gerando um sinal elétrico de alta frequência. Esse processo de conversão de formas de energia acontece no próprio transdutor. A tabela 4.12 apresenta alguns tipos de transdutores.

Tabela 4.12

Tipos de transdutores.

TM 510 CL	Aplicação: peças metálicas com fácil propagação sônica. Faixa de medição: 1,00 a 200,00 mm (em aço). Temperatura: ambiente/controlada – até 60°. Área de contato: 10 mm. Frequência: 5 MHz.
TM 510 TB	Aplicação: medida de peças de fácil propagação sônica. Faixa de medição: 1,00 a 200,00 mm (em aço). Temperatura: ambiente/controlada – até 60°. Área de contato: 10 mm. Frequência: 5 MHz.
TM 1008 CM	Aplicação: superfícies planas ou cilíndricas. Faixa de medição: 1,00 a 200,00 mm (em aço). Temperatura: ambiente/controlada – até 60°. Área de contato: 10 mm. Frequência: 5 MHz.
TM 216 CL	Aplicação: peças com espessura alta e/ou de difícil penetração. Faixa de medição: 3,00 a 200,00 mm (em aço). Temperatura: ambiente/controlada – até 60°. Área de contato: 16 mm. Frequência: 2 MHz.
TM 116 CL	Aplicação: peças com espessura alta e/ou de difícil penetração. Faixa de medição: 3,00 a 150,00 mm (em aço). Temperatura: ambiente/controlada – até 60°. Área de contato: 16 mm. Frequência: 1 MHz.
TM 410 a.t.	Aplicação: peças metálicas com alta temperatura. Faixa de medição: 3,00 a 100,00 mm (em aço). Temperatura: –10° a 250°. Área de contato: 10 mm. Frequência: 4 MHz

Os transdutores podem ser classificados, quanto ao ângulo de emissão/recepção do ultrassom, em normais e angulares. Podem ser construídos com um cristal (emissor/receptor) ou dois cristais (um cristal emissor e outro receptor). Essa diferença de forma de construção é necessária para que as possíveis variações da descontinuidade sejam analisadas com maior rapidez, segurança e qualidade.

4.15.2 Acoplante

Produto líquido, gel ou graxa, dependendo das condições do ensaio, utilizado para favorecer a transmissão das ondas sônicas para a peça analisada, não deixando ar entre as duas superfícies. Deve-se tomar cuidado ao escolher o acoplante para evitar possíveis danos à peça ensaiada.

Após a utilização do ultrassom, a peça e o transdutor devem ser completamente limpos de acordo com as especificações técnicas de cada produto ensaiado.



4.15.3 Aparelhos de ultrassom

Diferenciados em relação à tecnologia utilizada, de maneira geral, os aparelhos de ultrassom com recursos de informática e eletrônica fornecem excelentes resultados, pois são capazes de armazenar dados referentes ao ensaio.

Ajustes do aparelho de ultrassom

Para a utilização do aparelho de ultrassom são necessários os ajustes a seguir.

Ganho (dB)

O ajuste do ganho é tão importante quanto o ajuste da escala a ser utilizada no ensaio. Existem dois ajustes de ganho: grosso e fino.

Os ajustes possuem a função de regular a recepção do sinal, têm influência direta na altura do eco na tela e determinam a amplitude de todas as reflexões. Sua unidade de trabalho é o decibel (dB). Uma descontinuidade produz alterações nas amplitudes de reflexão, que são comparadas à amplitude de uma reflexão padrão. A amplitude de reflexão é ainda avaliada em relação à quantidade dB acima ou abaixo da reflexão padrão.

Escala

A escala permite posicionar a reflexão na tela do aparelho, controla a espessura ou percurso sônico (parte horizontal da tela do aparelho) e a distância percorrida pelo feixe sônico dentro do material ensaiado.

A escala varia de aparelho para aparelho, e alguns podem chegar a 5 m. Em aparelhos portáteis chega a até 2 m. Da mesma forma que o ganho, na escala também temos dois botões para controle grosso com posições de 25, 50, 100, 250, 500 e 1 500 mm, indo até o limite de escala, e o ajuste fino, que permite posicionar o eco de fundo na escala horizontal da tela, possibilitando trabalhar com escalas de 132,0 mm, 856 mm. Esse ajuste permite aproximar ou distanciar os ecos e trabalhar com um ou mais ecos de fundo.

Como o eixo horizontal é graduado de 0 (zero) a 10, para uma espessura de 530 mm, posicionando o eco inicial em zero e o eco de fundo, que representa a espessura de 530 mm, em 10, obtemos a escala de 530 mm divididos em dez partes.

Ponto zero

Controle que posiciona os ecos para a direita ou para a esquerda na tela do aparelho, sem alterar a distância entre eles. Permite ajustar o eco inicial em zero e, com o controle da escala que afasta ou aproxima os ecos, posicionar os outros ecos de acordo com a calibração utilizada, facilitando a interpretação dos dados.

Frequência

A frequência é ajustada de acordo com o transdutor utilizado. Nos aparelhos mais modernos, esse ajuste acontece automaticamente.

Velocidade de propagação

Esse ajuste pode comparar as velocidades de reflexão do som para vários materiais.

Supressor de ruídos

Funciona como filtro, eliminando ecos de pequenas reflexões que podem estar relacionados ao próprio aparelho ou ao material de granulação grosseira. Deve-se tomar cuidado para que a regulagem do filtro não mascare pequenos defeitos do material ensaiado.

Blocos de calibração

Conhecidos como bloco V1 e bloco V2, são blocos padronizados para verificar as características dos transdutores e ajustar a escala. Devem ser de material compatível com os materiais a serem ensaiados ou similar no que diz respeito ao ultrassom. Devem ter as dimensões calibradas e podem ou não conter descontinuidades naturais ou artificiais.

Blocos de referência

No ensaio de ultrassom, em que, diferentemente daquele de raio X, não se pode “visualizar” o interior da peça, temos de comparar as peças produzidas com os blocos de referência, para identificar diferenças entre as propagações dos ecos na tela do aparelho. O melhor material para o bloco de referência é aquele confeccionado do mesmo material ensaiado. E ainda, se possível, contendo as descontinuidades naturais para servirem de comparação. Com isso traçam-se as curvas de referência de um bloco conhecido, que são, então, utilizadas para comparar com o material ensaiado.

Linearidade vertical e horizontal do aparelho

A linearidade vertical e horizontal precisa ser verificada sempre antes de cada ensaio. Deve estar dentro de 2% da escala utilizada. A calibração horizontal utiliza o bloco V1, com escala de 100,0 mm e um transdutor de 25,0 mm. O posicionamento dos picos tem de ficar em 0 – 2,5 – 5 – 7,5 – 10.

Verificação do ponto de saída do feixe sônico

A localização do transdutor deve ser direcionada para o raio de 100 mm no bloco V1. Obtém-se, então, a maior amplitude de pico (eco) e faz-se uma referência no bloco V1 e outra na mesma direção na carcaça do transdutor, determinando-se, assim, o ponto de saída do feixe sônico.

Verificação do ângulo do transdutor

Utilizam-se os blocos V1 ou V2 para identificar a marcação do ângulo correspondente ao ângulo do transdutor.

Temperatura

O aparelho deve ter bom desempenho nas seguintes faixas de temperatura:

- aparelhos: de 5 a 40 °C;
- transdutores: de 5 a 85 °C.

Determinação de uma grande descontinuidade

O ensaio de ultrassom descrito destina-se a verificar pequenas descontinuidades. Para grandes descontinuidades utilizam-se os métodos de 6, 12 e 20 dB.

Vantagens do ensaio por ultrassom

- Localização precisa das descontinuidades existentes nas peças.
- Alta sensibilidade na detecção de pequenas descontinuidades.
- Redução dos custos com inspeção e com sucata.
- Aumento da detecção de falhas.
- Controle e otimização de processos.
- Não é necessário parar ou desligar o sistema a ser ensaiado.
- Penetração possível para detectar descontinuidades internas na peça.
- Possibilita uso estacionário ou móvel.
- Possibilita inspeção em superfícies pintadas.
- Excelentes possibilidades de documentar o processo de inspeção.
- Respostas imediatas.

Limitações do ensaio por ultrassom

- Exigência de operador especializado para interpretar os ensaios.
- Ensaio sensível a choque e vibrações.
- Calibração constante do equipamento.





Referências

bibliográficas

Elementos de Máquinas

BRASIL, H. V. *Máquinas de levantamento*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1988.

CIMAF. *Catálogos Cabos de Aço*. Catálogo C-9, 1989.

DOBROVOLSKI, V. *Elementos de Máquinas*. Editora MIR, 1970.

FERRARESI, D. *Máquinas de elevação e transporte*. Apostila Cabos de Aço, 1978.

MELCONIAN, S. *Elementos de Máquinas*. 9. ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.

OLIVEIRA, N. C. G. *Mancais de deslizamento*. Escola Politécnica USP, 1969.

PIRES, O. A. L. *Elementos de Máquinas*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1980.

SHIGLEY, J. E. *Elementos de Máquina Volume 1*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

STIPKOVIC, M. *Engrenagens*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1983.

Ensaio Mecânicos dos Materiais

BRECIANI, E. F. *Propriedades e Ensaio Industriais dos Materiais*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1968).

BRECIANI, E. F.; CAVAGLIA, C. A. C.; BUTTON, S. T. *Conformação Plástica dos Metais*. UNICAMP, Campinas (1991).

CAMPOS FILHO, M. P.; DAVIES, G. J. *Solidificação de Metais e suas Ligas*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (1978).

COLPAERT, H. *Metrologia*. Editora Edgard Blucher Ltda (1969).

CALLISTER JR., W. D. *Materials Science and Engineering – Na Introduction*. John Wiley & Sons, Inc., 3. ed. (1994).

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. *Ensaio dos materiais*. Editora LTC (1999).

Mecânica Básica

ARANHA, A. Z.; RODRIGUES, M. B. *Exercícios de Matemática vol. 1*. 2. ed. São Paulo: Editora Policarpo, 1998.



BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. *Os Fundamentos da Física 1*. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1991.

GUELLI, C. A.; IEZZI, G.; DOLCE, O. *Álgebra I*. São Paulo: Editora Moderna, 1975.

IEZZI, G.; *Fundamentos de Matemática Elementar*. 7. ed. São Paulo: Atual Editora, 2005.

RAMALHO JR., F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. *Matemática*. 9. ed. São Paulo: Editora Moderna, 2008.

MELCONIAN, S. *Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais*. São Paulo: Editora Érica, 1999.

PROVENZA, F. *Projetista de Máquinas*. São Paulo: Editora F. Provenza, 1990.

SANGIORGI, O. *Matemática*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1968.

TIZZIOTTI, J. G.; SCHOR, D. *Matemática 2º grau – Volume 1*. 6. ed. São Paulo: Editora Ática, 1980.

TIMOSHENKO, S.; YOUNG, D. H. *Mecânica Técnica*. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Ao livro técnico, 1959.

Resistência dos Materiais

ALMEIDA, L. D. F. *Resistência dos materiais*. 7. ed. São Paulo: Editora Érica, 1999.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R. *Resistência dos Materiais*. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1982.

MELCONIAN, S. *Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais*. São Paulo: Editora Érica, 1999.

NASH, W. A. *Resistência dos Materiais*. 2. ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1989.

SILVA, J. F. *Resistência dos Materiais*. 2. ed. São Paulo: Editora Ao livro técnico, 1966.

TIMOSHENKO, S. D. *Resistência dos Materiais*. São Paulo: Editora Ao livro técnico, 1971.



Sites

ABENDE. “Radiografia, Radioscopia e Gamagrafia”. Disponível em: <http://www.abende.org.br/info_end_oquesao_radiografia.php?w=1152&h=864>. Acesso em: 30 jun. 2011.

ABNT: <<http://www.abnt.org.br>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

ASTM: <<http://www.astm.org>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

CAPPELLI, N. L. *Materiais e tecnologia mecânica*. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/50187482/Ensaio-Mecanicos>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

Centro de Informação Metal Mecânica. Material didático. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico>. Acesso em: 30 jun. 2011.

DIN: <<http://www.din.de>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

Infra-estrutura – equipamentos: <<http://www.ufff.br/lrm/infra-estrutura/>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

Instrumento para ensaio de embutimento. Disponível em: <<http://www.nei.com.br/lancamentos/lancamento.aspx?i=4954>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

Laboratório de resistência dos materiais: <<http://www.ufff.br/lrm>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

Máquina automática de ensaio de embutimento: <http://www.arotec.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=110&Itemid=119>. Acesso em: 30 jun. 2011.

MULTICLAD: <www.multiclad.com.br/12.html>. Acesso em: 30 jun. 2011.

OLIVEIRA, L. S. R. “Os princípios e fundamentos da radiologia industrial”. Disponível em: <http://www.tecnologiaradiologica.com/materia_riconceito.htm>. Acesso em: 30 jun. 2011.

QUALIDADE AERONÁUTICA. “Ensaio radiográfico”. Disponível em: <<http://www.qualidadeaeronautica.com.br/princ.RX.htm>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

Transdutores especiais:

<<http://www.tecnomedicao.com.br/?p=transdutores>>. Acesso em: 30 jun. 2011.

CENTRO PAULA SOUZA

