

CAPÍTULO 10

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS

Sumário

Objetivos deste capítulo	232
10.1 Introdução	232
10.2 Conceitos de tensão e deformação	233
10.3 Discordâncias e sistemas de escorregamento	233
10.4 Deformação elástica.....	234
10.5 Deformação plástica.....	236
10.6 Tensão nominal e deformação nominal.....	237
10.6.1 Tensão nominal.....	237
10.6.2 Deformação nominal	238
10.7 Ensaio de tração	238
10.7.1 Valores das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração e diagrama tensão nominal-deformação nominal.....	239
10.8 Resistência à fratura	242
10.9 Ensaio de flexão.....	242
10.10 Dureza.....	243
10.10.1 Ensaio de dureza Rockwell	244
10.10.2 Ensaio de dureza Brinell.....	244
10.10.3 Ensaio de microdureza Knoop e Vickers	244
10.11 Resistência ao cisalhamento e à torção.....	245
10.12 Fluência.....	245
10.13 Resistência ao choque e ao impacto.....	246
10.14 Fadiga	246
10.15 Referências bibliográficas do capítulo	247
Exercícios.....	248

10 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS

Objetivos deste capítulo

Finalizado o capítulo o aluno será capaz de:

- definir o que são deformações e tensões em materiais;
- entender o que são sistemas de escorregamento;
- saber diferenciar entre tensão/deformação verdadeira e nominal;
- observar gráficos de tensão x deformação e obter varias propriedades mecânicas dos materiais;
- entender os conceitos de dureza, fluência, resistência ao choque e fadiga.

10.1 Introdução

Por que estudar as propriedades mecânicas dos materiais?

É de obrigação dos engenheiros compreenderem como as várias propriedades mecânicas são medidas e o que essas propriedades representam: elas podem ser necessárias para o projeto de estruturas/componentes materiais predeterminados, a fim de que não ocorram níveis inaceitáveis de deformação e/ou falhas.

Muitos materiais, quando em serviço, estão sujeitos a forças ou cargas: um exemplo é a liga de alumínio a partir da qual a asa de um avião é construída e o aço no eixo de um automóvel. Em tais situações, torna-se necessário conhecer as características do material e projetar o membro a partir do qual ele é feito, de tal maneira que qualquer deformação resultante não seja excessiva e não ocorra fratura. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência, a dureza, a ductibilidade e a rigidez.

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de experimentos de laboratório cuidadosamente programados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Dentre os fatores a serem considerados incluem-se a natureza da carga aplicada e a duração da sua aplicação, bem como as condições ambientais. A carga pode ser de tração, compressiva, ou de cisalhamento, e a sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou então flutuar continuamente.

Desse modo as propriedades são muito importantes nas estruturas dos materiais, e elas são alvo da atenção e estudo de vários grupos de pessoas.

O papel dos engenheiros estruturais é o de determinar as tensões e as distribuições de tensão dentro dos membros que estão sujeitos a cargas bem definidas. Isso pode ser obtido mediante técnicas experimentais de ensaio e/ou através de análises teóricas matemáticas de tensão. Esses tópicos são tratados em livros sobre análises tradicionais de tensão e sobre resistência dos materiais.

Engenheiros de materiais e engenheiros metalúrgicos, por outro lado, estão preocupados com a produção e fabricação de materiais para atender as exigências de serviços conforme previsto por essas análises de tensão. Isso envolve

necessariamente uma compreensão das relações entre microestrutura dos materiais e suas propriedades mecânicas.

Deste modo, esse texto visa mostrar de forma clara as principais propriedades mecânicas dos materiais:

- resistência à tração;
- elasticidade;
- ductilidade;
- fluência;
- fadiga;
- dureza;
- tenacidade entre outras.

10.2 Conceitos de tensão e deformação

Se uma carga é estática ou se ela se altera de uma maneira relativamente lenta ao longo do tempo e é aplicada uniformemente sobre uma seção reta ou superfície de um membro, o comportamento mecânico pode ser verificado mediante um simples ensaio de tensão-deformação. Existem três maneiras principais segundo uma carga pode ser aplicada: tração, compressão e cisalhamento. Em engenharia, muitas cargas são de natureza torcional, e não de natureza puramente cisalhante.

10.3 Discordâncias e sistemas de escorregamento

Discordâncias existem em materiais cristalinos devido às imperfeições no cristal. Essas imperfeições possibilitam o escorregamento de planos dentro do cristal.

A movimentação de discordâncias é o principal fator envolvido na deformação plástica de metais e ligas. A mobilidade de discordâncias pode ser alterada por diversos fatores (composição, processamento...) manipulação das propriedades mecânicas do material.

E as discordâncias também afetam outras propriedades do material, além das mecânicas. Como a condutividade em materiais semicondutores.

No nosso estudo vale ressaltar: nos materiais cristalinos o principal mecanismo de deformação plástica geralmente consiste no escorregamento de planos atômicos através da movimentação de discordâncias. Na Figura 10.1 são ilustrados os sistemas de escorregamento.

**SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO OBSERVÁVEIS EM
METAIS CCC E CFC**

ESTRUTURA	PLANOS DE ESCORREGAMENTO	DIREÇÕES DE ESCORREGAMENTO	SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO
CFC Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γ Fe, ...	{111}	$\langle 110 \rangle$	$4 \times 3 = 12$
CCC α Fe, W, Mo, β Brass	{110}	$\langle 111 \rangle$	$6 \times 2 = 12$
α Fe, Mo, W, Na	{211}	$\langle 111 \rangle$	$12 \times 1 = 12$
α Fe, K	{321}	$\langle 111 \rangle$	$24 \times 1 = 24$

Figura 10.1 - Sistemas de escorregamento.

As discordâncias não se movem com a mesma facilidade em todos os planos cristalinos e em todas as direções cristalinas. A movimentação das discordâncias se dá preferencialmente através de planos específicos e, dentro desses planos, em direções específicas, ambos com a maior densidade atômica de um dado reticulado cristalino. Essa combinação de um plano e uma direção é chamada de sistema de escorregamento (“slip system”).

Um sistema de escorregamento é definido por um plano e por uma direção de escorregamento, ambos com a maior densidade atômica em um dado reticulado cristalino.

10.4 Deformação elástica

O grau ao qual uma estrutura se deforma ou se esforça depende da magnitude da tensão imposta. Para a maioria dos metais que são submetidos a uma tensão de tração em níveis baixos, são proporcionais entre si:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (10.1)$$

Esta relação é conhecida por lei de Hooke, e a constante de proporcionalidade E (GPa ou psi) é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young.

O processo de deformação no qual a tensão e a deformação são proporcionais entre si é chamada de deformação-elástica, com o gráfico de $\sigma \times \varepsilon$ resultando em uma reta, conforme mostrado na Figura 10.2.

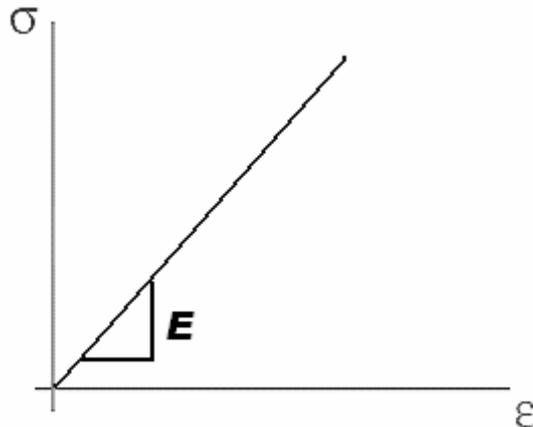


Figura 10.2 - Lei de Hooke.

Porém a lei de Hooke não é válida para todos os valores de deformação, ela é uma aproximação quando a tensão é relativamente baixa. Também, a deformação elástica não é permanente o que significa que quando a carga aplicada é liberada, a peça retorna a sua forma original.

Em uma escala atômica, a deformação elástica macroscópica é manifestada como pequenas alterações no espaçamento interatômico e na extensão das ligações interatômicas. Como consequência, a magnitude do módulo de elasticidade representa uma medida da resistência à separação de átomos adjacentes, isto é, as forças de ligação interatômicas.

Tabela 10.1 - Módulos de elasticidade, de cisalhamento e coeficiente de Poisson para algumas ligas metálicas.

Módulos de elasticidade e de cisalhamento e coeficiente de Poisson					
Liga Metálica	Módulo de Elasticidade		Módulo de Cisalhamento		Coeficiente de Poisson
	GPa	10 ⁶ psi	GPa	10 ⁶ psi	
Alumínio	69	10	25	3,6	0,33
Latão	97	14	37	5,4	0,34
Cobre	110	16	46	6,7	0,34
Magnésio	45	6,5	19	2,5	0,29
Níquel	207	30	76	11	0,31
Aço	207	30	93	12	0,30
Titânio	107	15,5	45	6,5	0,34
Tungstênio	407	59	160	23,2	0,28

Os valores dos módulos de elasticidade para materiais cerâmicos são características maiores do que para os metais, e para os polímeros são menores. Essas diferenças são consequências diretas dos diferentes tipos de ligação atômica nesses três tipos de materiais. Ademais, com o aumento da temperatura, o módulo de elasticidade tende a diminuir.

A imposição de tensões compressivas, de cisalhamento ou torcionais também induzem um comportamento elástico. As características tensão-deformação a baixos níveis de tensão são as mesmas, tanto para uma situação de tração quando de compressão, proporcionais ao módulo de elasticidade. A tensão e a deformação de cisalhamento são proporcionais uma à outra através da seguinte expressão:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (10.2)$$

onde G representa o módulo de cisalhamento.

Exemplo 1 Uma barra de aço 1040 de diâmetro 10 mm, cujo módulo de elasticidade é 200 GPa se submete a uma carga C pressão de tensão de 50.000 N levando-la um pouco mais do seu limite de proporcionalidade.

Calcule a recuperação elástica que ocorre uma vez eliminada a tensão.

Calcule a tensão $\sigma = P/A$

$$\sigma = \frac{50.000 \text{ N}}{\pi (5 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 637 \times 10^6 \quad = \quad 637 \text{ MPa}$$

Entre Y.S (600 MPa) e T.S (750 Mpa)

Recuperação Elástica

$$C = \frac{\sigma}{E} = \frac{637 \times 10^6 \text{ Pa}}{200 \times 10^9 \text{ Pa}} = 3,19 \times 10^{-3}$$

10.5 Deformação plástica

Para a maioria dos materiais metálicos, o regime elástico persiste até deformações de aproximadamente 0,005. A medida que o material é deformado além desse ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação, ocorrendo então uma deformação permanente não recuperável, ou, deformação plástica. (A lei de Hooke não é mais válida).

A Figura 10.3 mostra os gráficos de tensão x deformação típicos para alguns tipos de aço. Percebe-se que a baixas tensões existe uma região linear, que aos poucos entra em uma região não-linear, a chamada região de deformação plástica.

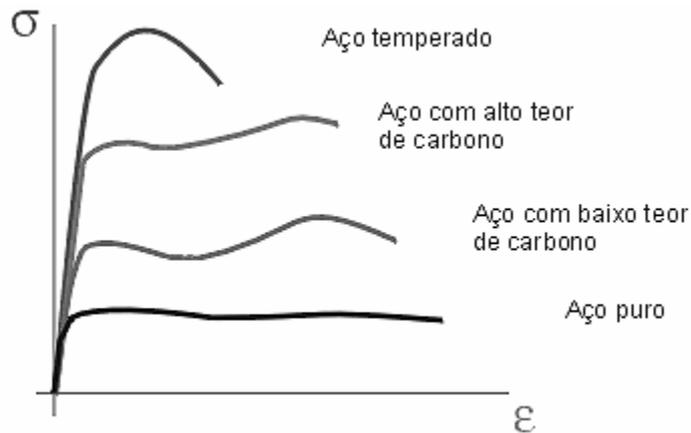


Figura 10.3 - Gráfico tensão x deformação para deformação plástica.

A partir de uma perspectiva atômica, a deformação plástica corresponde à quebra de ligações com os átomos vizinhos originais e em seguida formação de novas ligações com novos átomos vizinhos, uma vez que um grande número de átomos ou moléculas se move em relação uns aos outros; com a remoção da tensão, eles não retornam às suas posições originais. O mecanismo dessa deformação é diferente para materiais cristalinos amorfos. No caso de sólidos cristalinos, a deformação ocorre mediante um processo chamado de escorregamento, que envolve o movimento de discordâncias, que será discutido mais a frente.

10.6 Tensão nominal e deformação nominal

Também chamados de tensão de engenharia e deformação de engenharia. Quando é feito um ensaio de tração, as grandezas que são medidas são a força aplicada (carga) e o alongamento da peça. Para se encontrar a tensão precisa-se levar em conta a área do corpo de prova. O problema é que durante o ensaio, a seção reta do corpo de prova diminui, devido ao alongamento do mesmo, dificultando a medição da tensão. Para isso utiliza-se a tensão nominal e deformação nominal. Que são calculados a partir da área inicial, considerando que ela se mantenha constante durante todo o ensaio.

10.6.1 Tensão nominal

A tensão de engenharia, ou tensão nominal, como definida anteriormente, é representada pelo caractere σ , e é definida pela relação:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (10.3)$$

sendo: σ a tensão (em MPa), F a força aplicada e A_0 a área da seção inicial do corpo onde é diretamente aplicada a carga.

10.6.2 Deformação nominal

A deformação nominal, ou deformação de engenharia, como foi definido anteriormente, é representada pelo caractere ε , e é definida pela relação:

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (10.4)$$

sendo: l_o o comprimento original antes de ser aplicada carga e l_i o comprimento instantâneo antes de ser aplicada carga. Algumas vezes a grandeza $l_i - l_o$ é substituída por Δl , e representa o alongamento da deformação ou variação no comprimento a um dado instante, conforme referência ao comprimento original.

10.7 Ensaio de tração

Um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais comuns é executado sobre tração. Como será visto, o ensaio de tração pode ser usado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais que são importantes em projetos.

Uma amostra é deformada, geralmente até sua fratura, mediante uma carga de tração gradativamente crescente, que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo mais comprido de um corpo de prova. Normalmente a seção reta é circular, porém corpos de prova retangulares também são usados.

Durante os ensaios, a deformação fica confinada a região central, mais estreita do corpo de prova, que possui uma seção reta uniforme ao longo do seu comprimento. O corpo de prova é preso pelas suas extremidades nas garras de fixação do dispositivo de testes.

A máquina de ensaios de tração alonga o corpo de prova a uma taxa constante, e também mede contínua e simultaneamente a carga e os alongamentos resultantes. Tipicamente, um ensaio de tensão-deformação leva vários minutos para ser executado e é destrutivo, isto é, até a ruptura do corpo de prova.

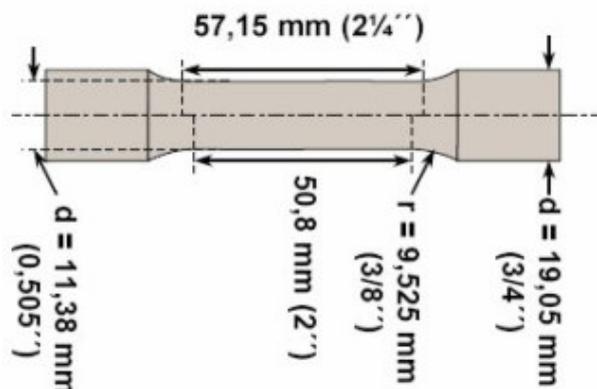


Figura 10.4 - Corpo de prova padrão para ensaio de tração.

Os resultados de um ensaio de tração são anotados em um gráfico de tensão x deformação (Figura 10.5).

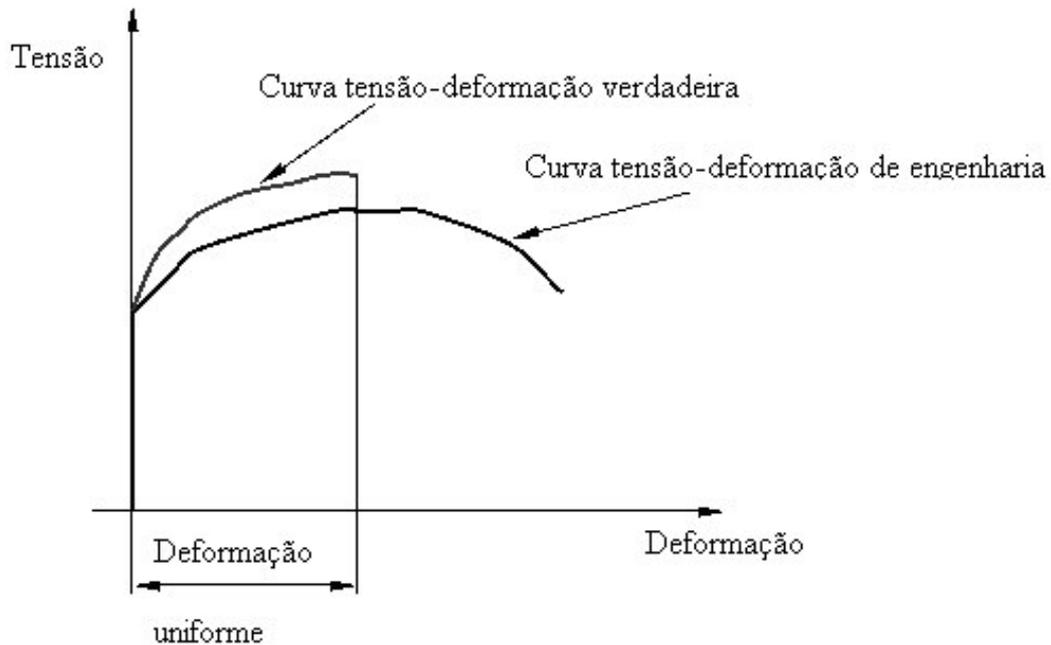


Figura 10.5 - Gráfico tensão nominal x deformação nominal.

Como visto, a relação entre tensão, força aplicada e a área da seção $\sigma = \frac{F}{A_0}$. Em ensaios de tração convencionou-se que área da seção utilizada para os cálculos é a da seção inicial (A_0). Aplicando essa relação obtêm-se os valores de tensão que relatados num gráfico demonstram as relações entre tensão nominal e deformação nominal no decorrer do ensaio.

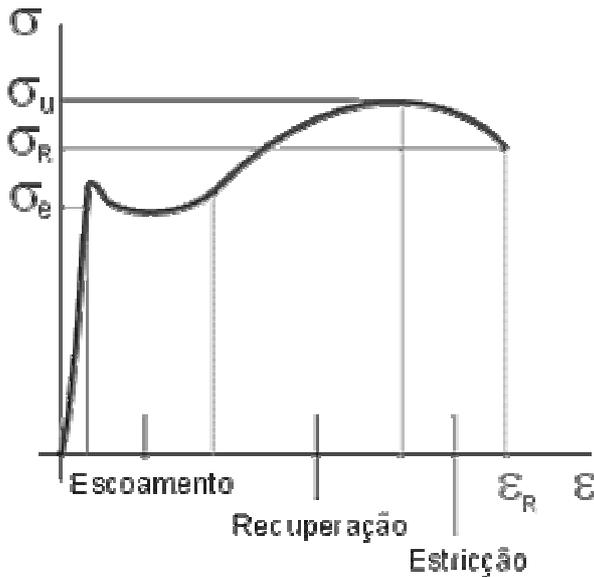
10.7.1 Valores das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração e diagrama tensão nominal-deformação nominal

A partir de um gráfico de tensão x deformação é possível obter muitas propriedades sobre o material. A seguir, nas Figuras 10.6 e 10.7, serão mostrados os gráficos de dois grupos de materiais, os materiais dúcteis e os materiais frágeis. Materiais dúcteis têm a propriedades de que quando estão sob a ação de uma força, podem esticar-se sem romper-se, transformando-se num fio. Exemplos de materiais dúcteis são o ouro, o cobre e o alumínio.

Por outro lado, um material frágil é um material que não pode se deformar muito. Com deformações relativamente baixas o material já se rompe. Um exemplo de material frágil é o vidro.

As propriedades desses materiais obtidas a partir de um diagrama de tensão x deformação são mostradas a seguir:

- Materiais dúcteis (aço estrutural e outros metais):



σ_u : tensão última (máxima tensão que se atinge)

σ_R : tensão de ruptura (tensão que, se atingida, provoca a ruptura do material)

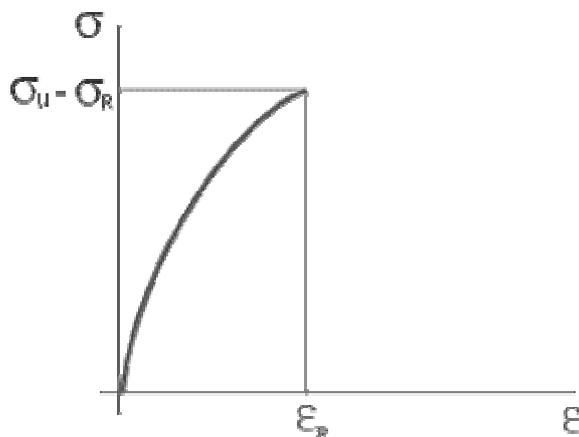
σ_e : tensão de escoamento

ϵ_R : deformação de ruptura (deformação que, se atingida, provoca a ruptura do material)

Figura 10.6 - Diagrama $\sigma \times \epsilon$ para material dúctil.

Fases de evolução do diagrama (Figura 10.6):

1. Aumento lento do comprimento (pequena deformação), diretamente proporcional a uma grande carga aplicada (trecho reto da origem até a tensão de escoamento - σ_e), com grande coeficiente angular (reta "quase" na vertical).
 2. Longa deformação com pouco aumento da carga aplicada, ou seja, pequena variação da tensão (escoamento).
 3. Aumento da deformação proporcional ao aumento da carga aplicada, ou seja, da tensão. Este aumento ocorre até que a carga aplicada atinja um valor máximo, ou, uma tensão última - σ_u (recuperação).
 4. Diminuição do diâmetro do corpo (estricção). Uma diminuição da carga aplicada é suficiente para manter a deformação até a ruptura. (σ_R : tensão de ruptura; ϵ_R : deformação de ruptura).
- Materiais frágeis (ferro fundido, vidro, pedra...):



σ_u : tensão última (máxima tensão que se atinge)

σ_R : tensão de ruptura (tensão que, se atingida, provoca a ruptura do material)

ϵ_R : deformação de ruptura (deformação que, se atingida, provoca a ruptura do material)

Figura 10.7 - Diagrama $\sigma \times \epsilon$ para material frágil.

Evolução do diagrama (Figura 10.7): aumento da deformação proporcional ao aumento da carga aplicada até que se atinja a deformação de ruptura (ϵ_R) que corresponde à tensão de ruptura (σ_R) que é igual à tensão última (σ_u).

Módulo de elasticidade: O módulo de elasticidade, denotado por ε , é obtido na parte linear dos gráficos, sendo mais evidente para o material dúctil. A região linear é parte que vai do valor zero, até o valor de σ_e (tensão de escoamento). Ao obter o valor numérico referente a inclinação dessa reta se obtém o valor de ε .

Tensão de escoamento: Existente somente para o material dúctil, e marca o ponto onde o material entra na região de escoamento. Esse fenômeno, nitidamente observado em metais de natureza dúctil, como aços baixo teor de carbono e caracteriza-se por um grande alongamento sem acréscimo de carga.

Tensão de ruptura: σ_R , como o próprio nome já diz, é a tensão com a qual o material se rompe. Porém é importante observar que nem sempre a tensão de ruptura é a tensão máxima que pode ser aplicada. Ao observar a Figura 10.6, percebe-se que o material pode chegar ao mesmo nível da tensão de ruptura e mesmo assim não se romper. Ele somente se rompe se tensão máxima já tiver sido ultrapassada, e então o material se alongaria novamente até romper, com um decréscimo na tensão, chegando em σ_R .

Alongamento percentual: O alongamento percentual AL% é porcentagem da deformação plástica quando do momento da fratura, ou

$$AL\% = \left(\frac{l_f - l_o}{l_o} \right) \cdot 100 = \varepsilon \cdot 100 \quad (10.5)$$

onde l_f representa o comprimento no momento da fratura e l_o representa o comprimento original.

Uma vez que uma proporção significativa da deformação plástica no momento da fratura está confinada à região do pescoço, a magnitude do AL% dependerá do comprimento útil do corpo de prova.

Esse alongamento é muito mais evidente em materiais dúcteis, como pode ser observado na Figura 10.8, e ele serve para determinar a ductilidade em termos do alongamento.

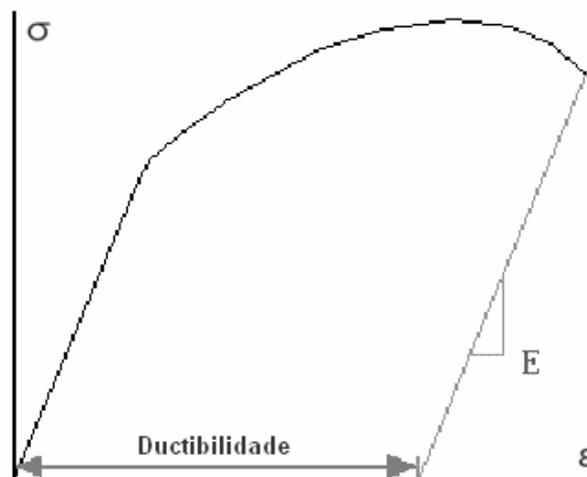


Figura 10.8 - Diagrama $\sigma \times \varepsilon$, evidenciando a ductilidade.

Porcentagem de redução da área: Semelhante ao alongamento percentual, também é uma medida que pode definir a ductilidade do material, porém medindo-se a área. É definida por:

$$RA\% = \left(\frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \cdot 100 \quad (10.6)$$

sendo A_o a área original da seção reta e A_f a área da seção reta no momento da fratura

A maioria dos materiais possui pelo menos um grau modulado de ductibilidade a temperatura ambiente, contudo, alguns se tornam frágeis à medida que a temperatura é reduzida.

10.8 Resistência à fratura

A resistência à fratura de um material é determinada pela tenacidade. A tenacidade é um termo mecânico que é usado em vários contextos: livremente falando, ela representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até sua fratura.

Para uma situação estática (pequena taxa de deformação), a tenacidade pode ser determinada a partir dos resultados de um ensaio tensão-deformação. Ela é a área sob a curva $\sigma \times \varepsilon$ até o ponto de fratura. As unidades de tenacidade são: energia por unidade de volume do material. Para que um material seja tenaz, ele deve apresentar tanto resistência como ductibilidade. E frequentemente materiais dúcteis são mais tenazes que materiais frágeis.

10.9 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão foi adotado com o objetivo de ser utilizado em materiais frágeis para determinar a tensão e flecha de ruptura, e também permitir avaliar outras propriedades mecânicas, como o módulo de elasticidade à flexão.

A técnica de ensaio consiste em apoiar o corpo de prova em dois pontos distanciados de um comprimento (L) e aplicar lentamente uma força de flexão (F) no centro deste.

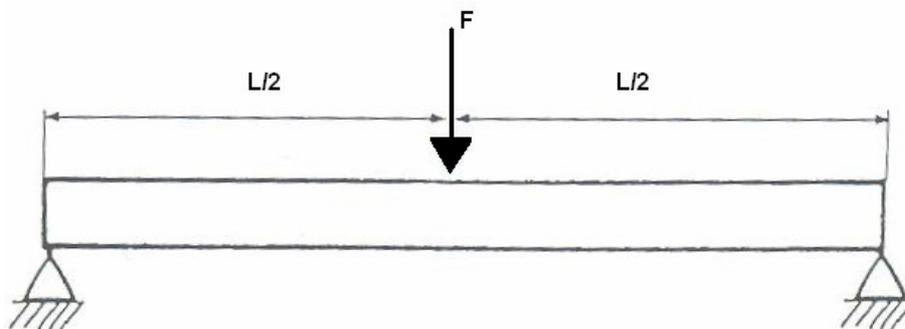


Figura 10.9 - Ensaio de flexão.

Deste ensaio pode ainda retirar-se o módulo de ruptura (M_r), que significa o valor máximo da tensão de tração ou de compressão nas fibras externas do corpo de prova e que pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$M_r = \frac{Y \cdot M_r}{I} \quad (10.7)$$

onde, M é o momento máximo de flexão igual a $(F_{\max}L/2)$ expresso em $[Nmm^2]$, Y é a distância do eixo à fibra externa em mm e I o momento de inércia inicial da secção transversal do corpo de prova em relação ao seu eixo, em mm^4 .

Outra propriedade possível de obter no ensaio de flexão é o módulo de elasticidade à flexão (E) através da seguinte expressão:

$$E = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot y \cdot I} \quad (10.8)$$

em que, y é a flecha medida para a força (F) aplicada a meio vão, L é o tamanho do corpo de prova e I é o momento de inércia.

Os momentos de inércia do corpo de prova podem ser calculados a partir de sua geometria:

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (10.9a)$$

para secção circular, e

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (10.9b)$$

para secção retangular.

A grande vantagem do ensaio de flexão é a de permitir utilizar corpos de prova mais fáceis de preparar do que os corpos de prova para o ensaio de tração, tem mais aplicação quanto mais duro for o material. No entanto, para materiais muito frágeis, os resultados obtidos apresentam grande dispersão, de modo que nestes casos devem realizar-se sempre vários ensaios para estabelecer um valor médio.

10.10 Dureza

Outra propriedade mecânica que pode ser importante considerar é a dureza, que é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou risco). Os primeiros ensaios de dureza eram baseados em minerais naturais, com uma escala construída unicamente em função da habilidade de um material em riscar outro mais macio. Técnicas quantitativas para a determinação da dureza foram desenvolvidas ao longo dos anos, nas quais um pequeno penetrador é forçado contra a superfície de um material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação. Faz-se a medida da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual pó usa vez é relacionada a um número índice de dureza: quanto mais macio o material, maior e mais profunda é a impressão e menor é o número índice de dureza. As durezas medidas são apenas relativas (ao invés de absolutas), e deve-se tomar cuidado ao se comparar valores determinados segundo técnicas diferentes.

Os ensaios de dureza são realizados com mais freqüência do que qualquer outro ensaio mecânico por diversas razões:

- simples e barato;
- não-destrutivo;
- pode-se estimar outras propriedades a partir da dureza do material.

10.10.1 Ensaios de dureza Rockwell

Os ensaios Rockwell constituem o método mais comumente utilizado para medir a dureza, pois eles são muito simples de executar e não exigem qualquer habilidade especial. Os penetradores incluem bolas de aço esféricas endurecidas, com diâmetros de 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 polegada, e um penetrador cônico de diamante para os metais mais duros.

O número índice de dureza é determinado pela diferença na profundidade de penetração que resulta da aplicação de uma carga inicial menor seguida por uma carga principal maior: a utilização de uma carga menor aumenta a precisão do ensaio. Com base na magnitude de ambas as cargas, a menor e a principal, existem dois tipos de ensaios: Rockwell e Rock Superficial (Superficial Rockwell).

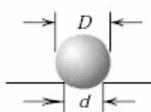
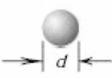
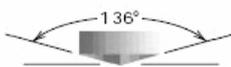
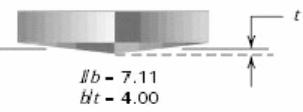
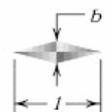
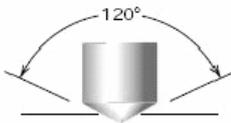
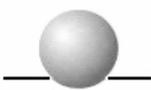
10.10.2 Ensaios de dureza Brinell

Nos ensaios de dureza Brinell, como nas medições Rockwell, um penetrador esférico e duro é forçado contra a superfície do material a ser testado. O diâmetro do penetrador de aço endurecido (ou carbeto de tungstênio) é de 10,00 mm. As cargas padrões variam entre 50 e 3000 kg, em incrementos de 500 kg. Durante o ensaio a carga é mantida constante durante um tempo específico (entre 10 e 30 s). O índice de dureza Brinell é função tanto da magnitude da carga como do diâmetro de impressão resultante (ver Tabela 10.2).

10.10.3 Ensaios de microdureza Knoop e Vickers

Para cada ensaio, um penetrador de diamante muito pequeno, com geometria piramidal, é forçado contra a superfície do corpo de prova. As cargas aplicadas são muito menores que nos ensaios Rockwell e Brinell, variando entre 1 g e 1 kg. A impressão resultante é observada sob um microscópio e medida, essa medição é então convertida em um número índice de dureza.

Tabela 10.2 - Técnicas de ensaio de dureza.

Ensaio	Penetrador	Forma de Impressão		Carga	Fórmula para o Índice de Dureza
		Vista Lateral	Vista Superior		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	{ Diamond cone $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres			P	$\left. \begin{array}{l} 60 \text{ kg} \\ 100 \text{ kg} \\ 150 \text{ kg} \end{array} \right\} \text{Rockwell}$ $\left. \begin{array}{l} 15 \text{ kg} \\ 30 \text{ kg} \\ 45 \text{ kg} \end{array} \right\} \text{Superficial Rockwell}$
					

10.11 Resistência ao cisalhamento e à torção

Obviamente, os metais podem experimentar deformação plástica sob a influência da aplicação de cargas cisalhantes e torcionais. O comportamento tensão-deformação resultante é semelhante a componente de tração. Com um gráfico linear quando sob a influência de cargas relativamente baixas, e também apresentará deformação plástica (variando de acordo com o material), e terá um ponto de ruptura respectivo a tensão de ruptura.

10.12 Fluência

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

A fluência ocorre devido à movimentação de falhas, que sempre existem na estrutura cristalina dos metais. Não haveria fluência se estas falhas não existissem. Existem metais que exibem o fenômeno de fluência mesmo à temperatura ambiente, enquanto outros resistem a essa deformação mesmo a temperatura elevadas. As exigências de uso têm levado ao desenvolvimento de novas ligas que resistam melhor a esse tipo de deformação. A necessidade de testar esses novos materiais, expostos a altas temperaturas ao longo do tempo, define a importância deste ensaio.

Os ensaios que analisamos anteriormente são feitos num curto espaço de tempo, isto é, os corpos de prova ou peças são submetidos a um determinado esforço por alguns segundos ou, no máximo, minutos. Porém, nas condições reais de uso, os produtos sofrem solicitações diversas por longos períodos de tempo. O

uso mostra que, em algumas situações, os produtos apresentam deformação permanente mesmo sofrendo solicitações abaixo do seu limite elástico.

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

Nos ensaios de fluência, o controle da temperatura é muito importante. Verificou-se que pequenas variações de temperatura podem causar significativas alterações na velocidade de fluência. Exemplo disso é o aço carbono submetido ao ensaio de fluência, a uma tensão de $3,5 \text{ kgf/mm}^2$, durante 1.000 horas: à temperatura de $500 \text{ }^\circ\text{C}$, apresenta uma deformação de 0,04% e à temperatura de $540 \text{ }^\circ\text{C}$ apresenta uma deformação de 4%.

10.13 Resistência ao choque e ao impacto

Choque ou impacto é um esforço de natureza dinâmica. O comportamento dos materiais sob ação de cargas dinâmicas é diferente de quando está sujeito à cargas estáticas.

A capacidade de um determinado material de absorver energia do impacto está ligada à sua tenacidade, que por sua vez está relacionada com a sua resistência e ductilidade.

O ensaio de resistência ao choque dá informações da capacidade do material absorver e dissipar essa energia. Como resultado do ensaio de choque obtém-se a energia absorvida pelo material até sua fratura, caracterizando assim o comportamento dúctil ou frágil.

Em relação à resistência ao impacto:

- Materiais Polímeros: São frágeis à baixas temperaturas porque a rotação dos átomos na molécula requer energia térmica. A maioria dos polímeros apresentam transição dúctil-frágil que é geralmente abaixo da ambiente.
- Materiais CFC: Permanecem dúcteis (não-apresenta transição dúctil-frágil) porque nesta estrutura há muitos planos de escorregamento disponíveis. Exemplo: alumínio e suas ligas e cobre e suas ligas
- Materiais HC: São frágeis porque nesta estrutura há poucos planos de escorregamento disponíveis. Alguns materiais HC apresentam transição dúctil-frágil. Exemplo: zinco.

10.14 Fadiga

É o efeito observado em estruturas com estado de tensões bem abaixo da tensão de ruptura quando se pode desenvolver um acúmulo do dano com cargas cíclicas continuadas conduzindo a uma falha do componente ou estrutura.

Todos dos materiais são anisotrópicos e não homogêneos. Metais de engenharia são compostos por agregados de pequenos grãos de cristal. Dentro de cada grão a estrutura também é anisotrópica devido aos planos do cristal e se a fronteira do grão é fechada, a orientação destes planos muda. Estas não homogeneidades existem não somente pela estrutura de grãos, mas também por causa de inclusões de outros materiais. Como resultado da não homogeneidade tem-se uma distribuição de tensões não uniforme. Regiões da microestrutura onde

os níveis de tensão são altos normalmente são os pontos onde o dano de fadiga se inicia.

Para metais dúcteis de engenharia, grãos de cristal que possuem uma orientação desfavorável relativa ao carregamento aplicado desenvolvem primeiro 'slip bands' (são regiões onde há intensa deformação devido ao movimento entre os planos do cristal).

Materiais com alguma limitação de ductibilidade como são os metais de alta resistência, o dano microestrutural é menos espalhado tendendo a ser concentrado nos defeitos no material. Uma pequena trinca desenvolve-se a partir de uma lacuna, inclusão, 'slip band', contorno do grão. Esta trinca cresce então num plano geralmente normal à tensão de tração até causar uma falha, algumas vezes juntando-se com outras trincas durante o processo. Assim, o processo em materiais com ductibilidade limitada é caracterizada pela propagação de poucos efeitos, em contraste com danos intensificados mais espalhados que ocorrem em materiais altamente dúcteis. Em materiais de fibra composta, a fadiga é geralmente caracterizada pelo crescimento de trincas e de laminações espalhadas desenvolvendo acima de uma relativa área.

Quando a falha é dominada pelo crescimento da trinca, a fratura resultante, quando vista macroscopicamente, geralmente exibe uma superfície polida próximo à área em que se originou. Superfícies rugosas normalmente indicam um crescimento mais rápido da trinca. Linhas curvas concêntricas à origem da trinca são freqüentemente vistas e marcam o progresso da trinca em vários estágios.

Após a trinca ter caminhado um determinado comprimento a falha poderá ser dúctil (envolvendo grandes deslocamentos) ou frágil (pequenos deslocamentos).

10.15 Referências bibliográficas do capítulo

CALLISTER, W. D. JR. **Ciência de Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 5. ed.

Disponível em: <http://www.supertrat.com.br/SuperTrat/Informacoes_Tecnicas_files/pmm20.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2008.

Disponível em: <<http://www.lami.pucpr.br/cursos/estruturas/parte03/Mod23/Curso1/Mod23-03.htm>>. Acesso em: 30 maio 2008.

Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/choque%5B1%5D.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2008.

Disponível em: <http://www.dem.isel.ipl.pt/seccoes/pagspm/disciplinas/EP/laboratorio/Ensaio_de_flexao.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2008.

Disponível em: <<http://www.angelfire.com/ma/Mnzs/fadiga.html>>. Acesso em: 5 jun. 2008.

Disponível em: <http://www.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula08_2005%201p.pdf>. Acesso em: 4 jun. 08.

Exercícios

- 1) Uma barra de aço 1040 de diâmetro 10mm, cujo módulo de elasticidade é 200GPa se submete a uma carga de tensão 50000N, levando-a um pouco mais do seu limite de proporcionalidade. Calcule a recuperação elástica que ocorre uma vez eliminada a tensão. $\epsilon = 3,19$
- 2) Faça um resumo das principais propriedades mecânicas de materiais.
- 3) Na ausência de esforço a distância interatômica dos átomos de Fe é 0,248 nm ao longo da direção [111]. Quando aplicada uma tensão de 1000 MPa ao longo dessa direção $d=0,2489$ nm. Calcule o módulo de elasticidade ao longo dessas direções. $E = 280$ GPa
- 4) Uma peça de cobre com comprimento original de 305 mm é tracionada com uma tensão de 276 MPa. Se a deformação é completamente elástica, calcule o alongamento resultante. $\Delta l = 77\%$