



# PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE ENGENHARIA

Prof. Me. Fabio Tofoli

# PROPRIEDADES DE TRAÇÃO

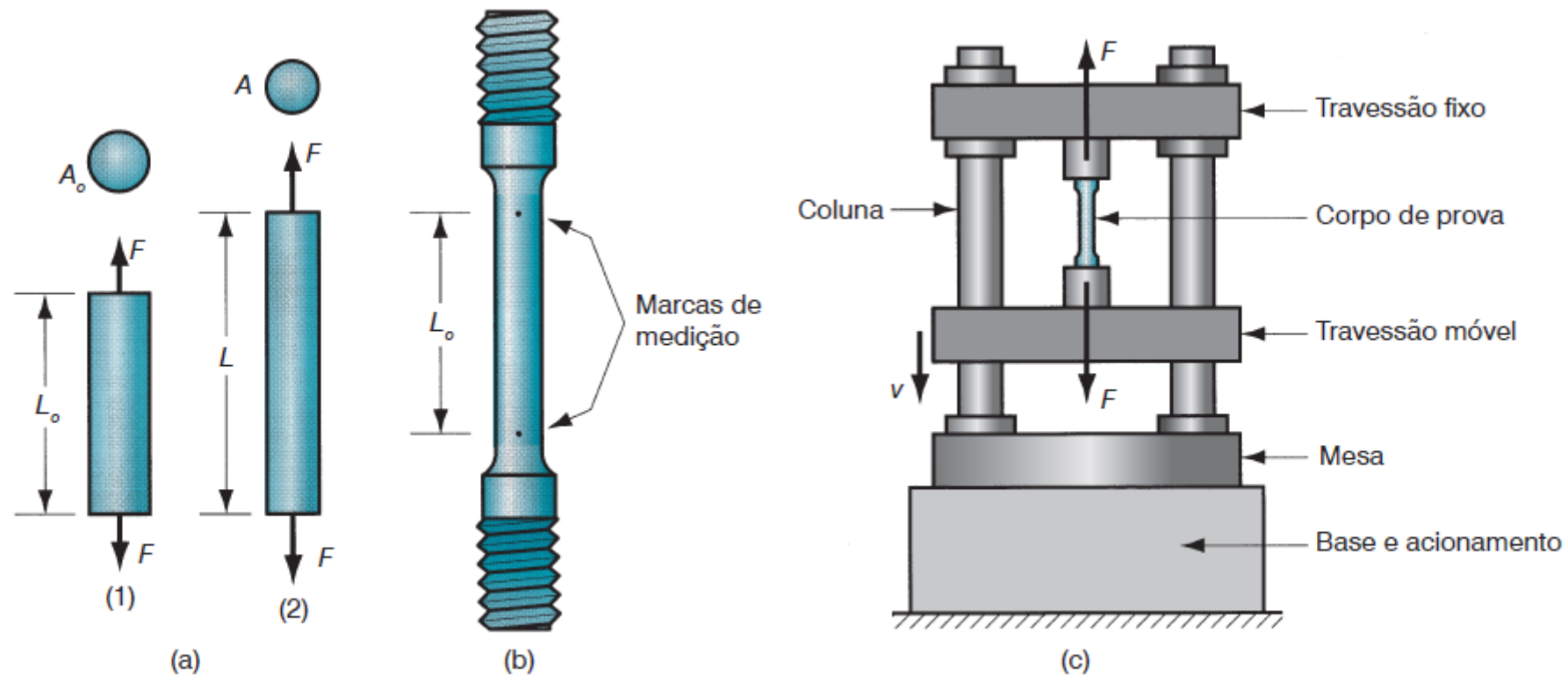


FIGURA 3.1 Ensaio de tração: (a) força de tração aplicada em (1) e (2) o alongamento resultante do material; (b) corpo de prova típico; e (c) configuração do ensaio de tração. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão da John Wiley & Sons, Inc.)



# SEQUÊNCIA DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Antes de começar o ensaio, o corpo de prova tem comprimento de referência inicial  $L_0$  e área inicial  $A_0$ . O comprimento de referência é medido como a distância entre duas marcas, e a área é medida como a seção transversal do corpo de prova (normalmente circular). Durante o teste de um metal, o corpo de prova alonga até que experimenta, em seguida, uma estricção e, ao final, se rompe

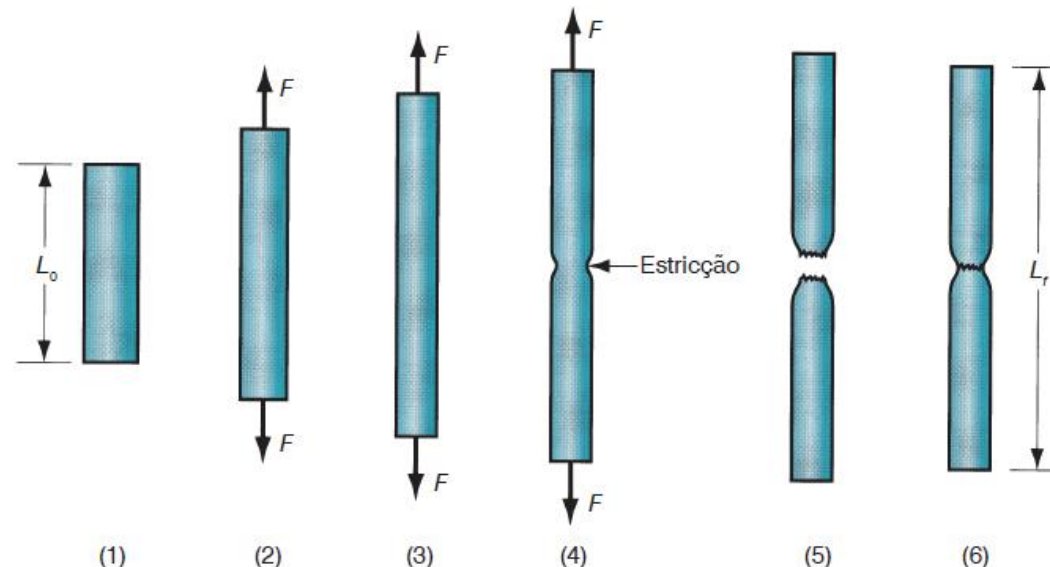


FIGURA 3.2 Desenvolvimento típico de um ensaio de tração: (1) início do ensaio, sem carga; (2) alongamento uniforme e redução da área da seção transversal; (3) o alongamento prossegue e a carga máxima é atinida; (4) início da estricção, a carga começa a cair; e (5) rompimento do corpo de prova. Se os pedaços forem colocados juntos como em (6), o comprimento final pode ser medido.

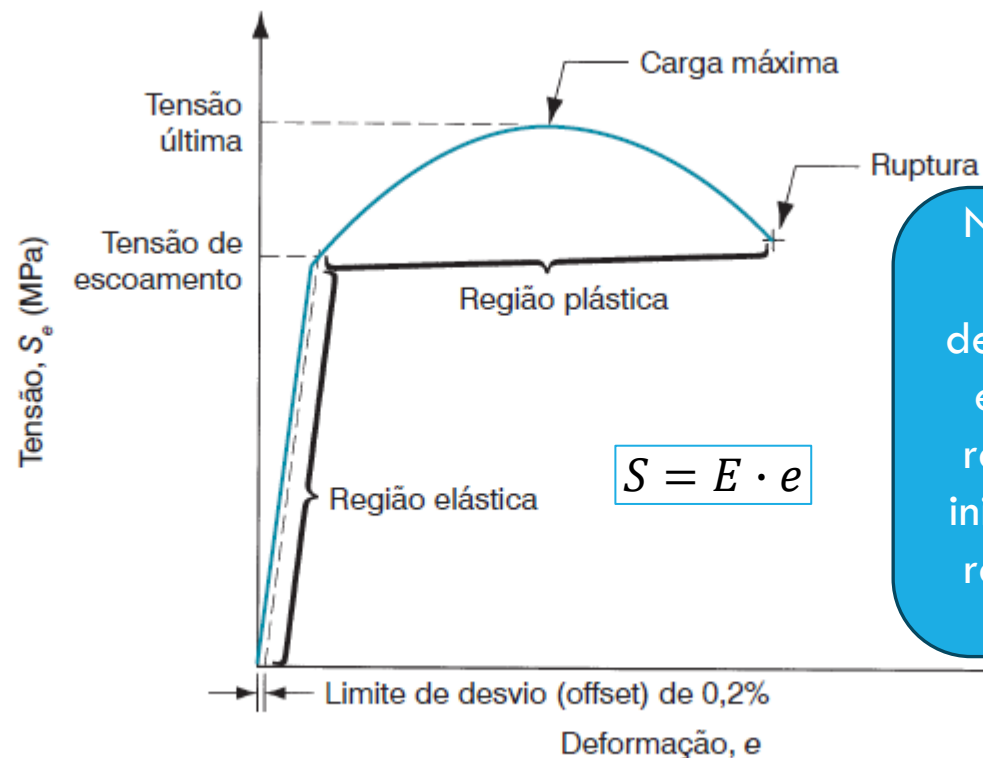
# CURVAS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

A carga e a variação do comprimento do corpo de prova são registrados à medida que o ensaio se desenvolve, de modo a fornecer os dados necessários para determinar a relação tensão-deformação. Dois tipos diferentes de curvas tensão-deformação podem ser definidos: (1) tensão-deformação de engenharia e (2) tensão-deformação verdadeira. A primeira é mais importante para projeto mecânico e a segunda é mais importante para a fabricação.

# CURVA DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA

As tensões e deformações de engenharia em um ensaio de tração são definidas em relação à área e comprimento originais do corpo de prova. Estes valores são importantes para o projeto mecânico porque o projetista espera que as deformações que se desenvolvem em qualquer componente do produto não alterem significativamente a sua forma. Os componentes são projetados para resistir às tensões previstas que ocorrem em serviço.

$$S = \frac{F}{A_0} \quad e = \frac{L - L_0}{L_0}$$



Na região elástica da figura, a relação entre a tensão e a deformação é linear e o material exibe comportamento elástico, retornando ao seu comprimento inicial quando a carga (tensão) é removida. A relação é definida pela Lei de Hooke

FIGURA 3.3 Curva tensão-deformação de engenharia típica de um ensaio de tração de um metal. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão da John Wiley & Sons, Inc.)

# MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)

**TABELA 3.1** Módulo de elasticidade de alguns materiais selecionados

Metais	Módulo de Elasticidade	
	MPa	lb/in <sup>2</sup>
Alumínio e suas ligas	$69 \times 10^3$	$10 \times 10^6$
Ferro fundido	$138 \times 10^3$	$20 \times 10^6$
Cobre e suas ligas	$110 \times 10^3$	$16 \times 10^6$
Ferro	$209 \times 10^3$	$30 \times 10^6$
Chumbo	$21 \times 10^3$	$3 \times 10^6$
Magnésio	$48 \times 10^3$	$7 \times 10^6$
Níquel	$209 \times 10^3$	$30 \times 10^6$
Aço	$209 \times 10^3$	$30 \times 10^6$

# DUCTILIDADE

A quantidade de deformação que o material é capaz de experimentar antes de falhar também é uma propriedade mecânica de interesse em muitos processos de fabricação. A medida mais comum para esta propriedade é a ductilidade, a capacidade do material desenvolver deformação plástica sem fratura.

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

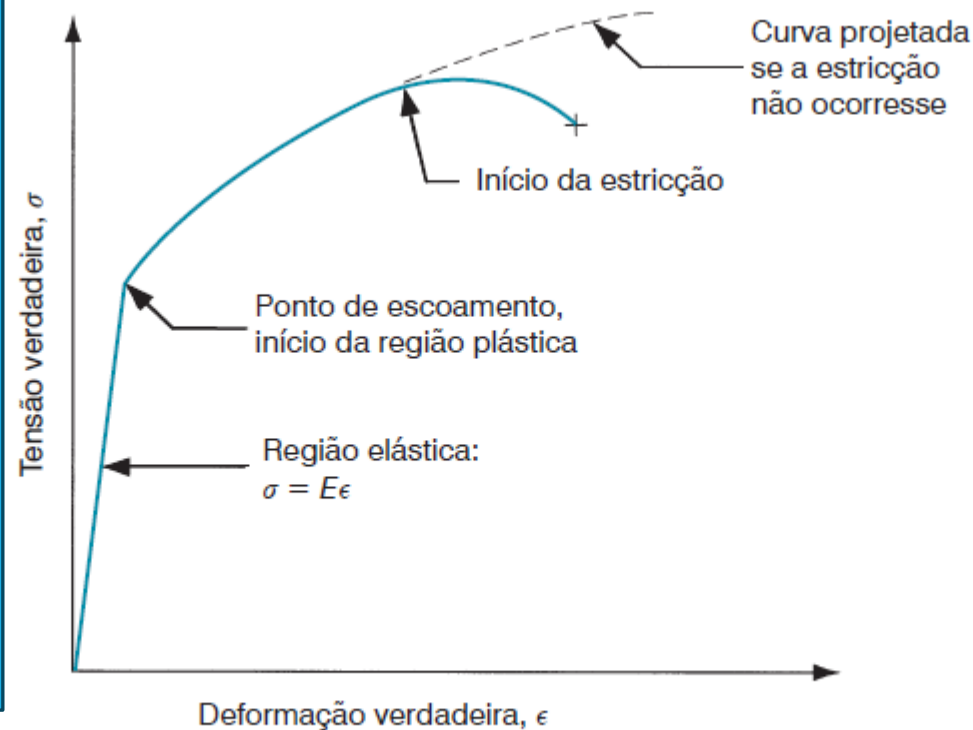
$$RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$$

TABELA 3.3 Ductilidade como valor % do alongamento (valores típicos) para vários materiais selecionados	
Material	Alongamento
<i>Metals</i>	
Alumínio, recozido	40%
Alumínio, trabalhado a frio	8%
Ligas de alumínio, recozidas <sup>a</sup>	20%
Ligas de alumínio, com tratamento térmico <sup>a</sup>	8%
Ligas de alumínio, fundidas <sup>a</sup>	4%



# CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO VERDADEIRA

A diferença entre a curva tensão-deformação verdadeira e sua correspondente de engenharia ocorre na região plástica. Os valores de tensão são mais elevados na região plástica, uma vez que a área transversal instantânea do corpo de prova, a qual sofre uma redução contínua durante o alongamento, é agora utilizada no cálculo. Assim como na curva anterior, uma inversão da inclinação da curva ocorre como resultado da estricção. Uma linha tracejada é utilizada na figura para indicar a continuação projetada da curva tensão-deformação verdadeira que se desenvolveria se a estricção não ocorresse.



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

$$\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

FIGURA 3.4 Curva tensão-deformação verdadeira para o gráfico de tensão-deformação de engenharia mostrado previamente na Figura 3.3. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão da John Wiley & Sons, Inc.)

# RELAÇÃO ENTRE DEFORMAÇÃO VERDADEIRA E DE ENGENHARIA

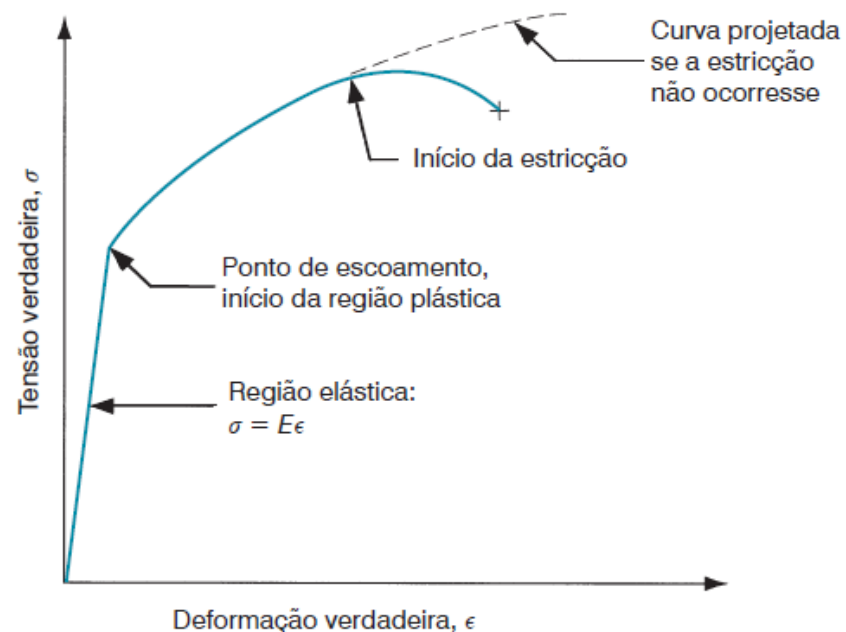
À medida que a deformação torna-se significativa na região plástica, os valores de deformação verdadeira e deformação de engenharia passam a divergir. Pode-se estabelecer uma relação entre a deformação verdadeira e a deformação de engenharia por meio de:

$$\epsilon = \ln(1 + e)$$

$$\sigma = S(1 + e)$$

# ENCRUAMENTO

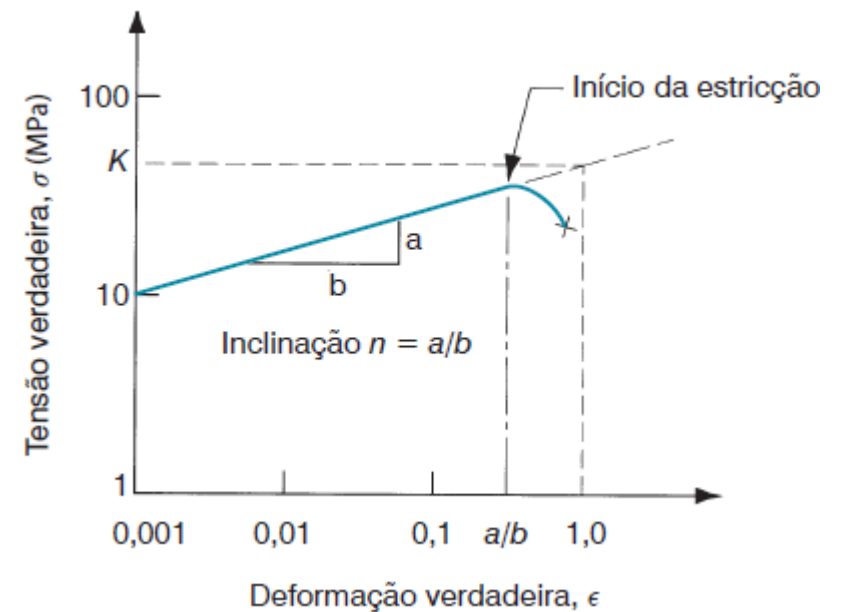
Ao analisarmos a curva verdadeira, podemos observar que após a região elástica, a curva tensão x deformação aumenta indicando que a resistência do material está aumentando conforme a deformação aumenta. Esta é uma propriedade conhecida como encruamento, que a maioria dos metais exibe com maior ou menor grau.



# ENCRUAMENTO

O encruamento, ou endurecimento por trabalho mecânico como muitas vezes é chamado, tem importante influência em determinados processos de fabricação, particularmente na conformação de metais. Considere o comportamento de um metal à medida que é afetado pelo encruamento. Se a parte da curva tensão-deformação verdadeira representando a região plástica fosse representada em um gráfico com escala log-log, o resultado seria uma relação linear. Uma vez se obtém uma linha reta com esta transformação, a relação entre tensão verdadeira e deformação verdadeira na deformação plástica pode ser expressa como

$$\sigma = K\epsilon^n$$



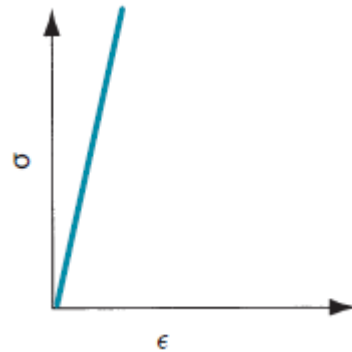
# COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA E EXPONENTE DE ENCRUAMENTO

**TABELA 3.4** Valores típicos do coeficiente de resistência  $K$  e do expoente de encruamento  $n$  para metais selecionados

Material	Coeficiente de Resistência, $K$		Expoente de Encruamento, $n$	
	MPa	lb/in <sup>2</sup>		
Alumínio, puro, recozido		175	25.000	0,20
Alumínio, liga, recozido <sup>a</sup>		240	35.000	0,15
Alumínio, liga, com tratamento térmico		400	60.000	0,10
Cobre, puro, recozido		300	45.000	0,50
Ligas de cobre, bronze <sup>a</sup>		700	100.000	0,35
Aço, baixo C, recozido <sup>a</sup>		500	75.000	0,25
Aço, alto C, recozido <sup>a</sup>		850	125.000	0,15
Aço-liga recozido <sup>a</sup>		700	100.000	0,15

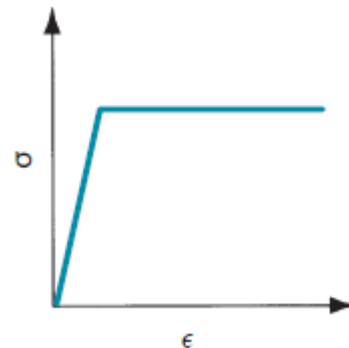
# RELAÇÕES TENSÃO X DEFORMAÇÃO

**Perfeitamente elástico:** O comportamento deste material é completamente definido pela sua rigidez, indicada pelo módulo de elasticidade  $E$ . Ele desenvolve ruptura ao invés de escoar como na plasticidade. Materiais frágeis, como os cerâmicos, muitos ferros fundidos e polímeros termorrígidos, possuem curvas tensão-deformação que caem nesta categoria. Estes materiais não são bons candidatos para operações de conformação.



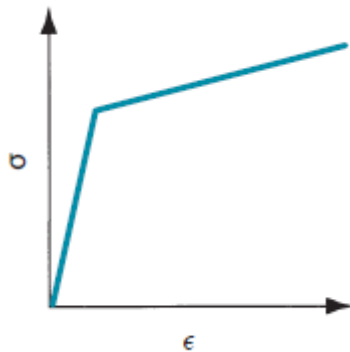
# RELAÇÕES TENSÃO X DEFORMAÇÃO

**Elástico perfeitamente plástico:** Este material tem uma rigidez definida por  $E$ . Uma vez que a tensão de escoamento  $S_e$  é atingida, o material deforma-se plasticamente em um mesmo nível de tensão. A curva de fluxo é dada por  $K = S_e$  e  $n = 0$ . Os metais se comportam desta forma quando são aquecidos a temperaturas bastante altas que permitem que os grãos recristalizem ao invés de encruar durante a deformação. O chumbo apresenta este comportamento na temperatura ambiente, uma vez que a temperatura ambiente está acima do ponto de recristalização do chumbo.



# RELAÇÕES TENSÃO X DEFORMAÇÃO

**Elástico e encruamento:** Este material obedece à Lei de Hooke na região elástica. Ele começa a escoar na sua tensão de escoamento  $S_e$ . O aumento da deformação requer permanente aumento de tensão, dado por uma curva de fluxo cujo coeficiente de resistência  $K$  é maior que  $S_e$  e cujo expoente de encruamento  $n$  é maior que zero. A curva de escoamento de fluxo é geralmente representada como uma função linear em um gráfico com escala de logaritmo natural. A maioria dos metais dúcteis se comporta desta forma quando trabalhados a frio.





# PROPRIEDADES DE COMPRESSÃO

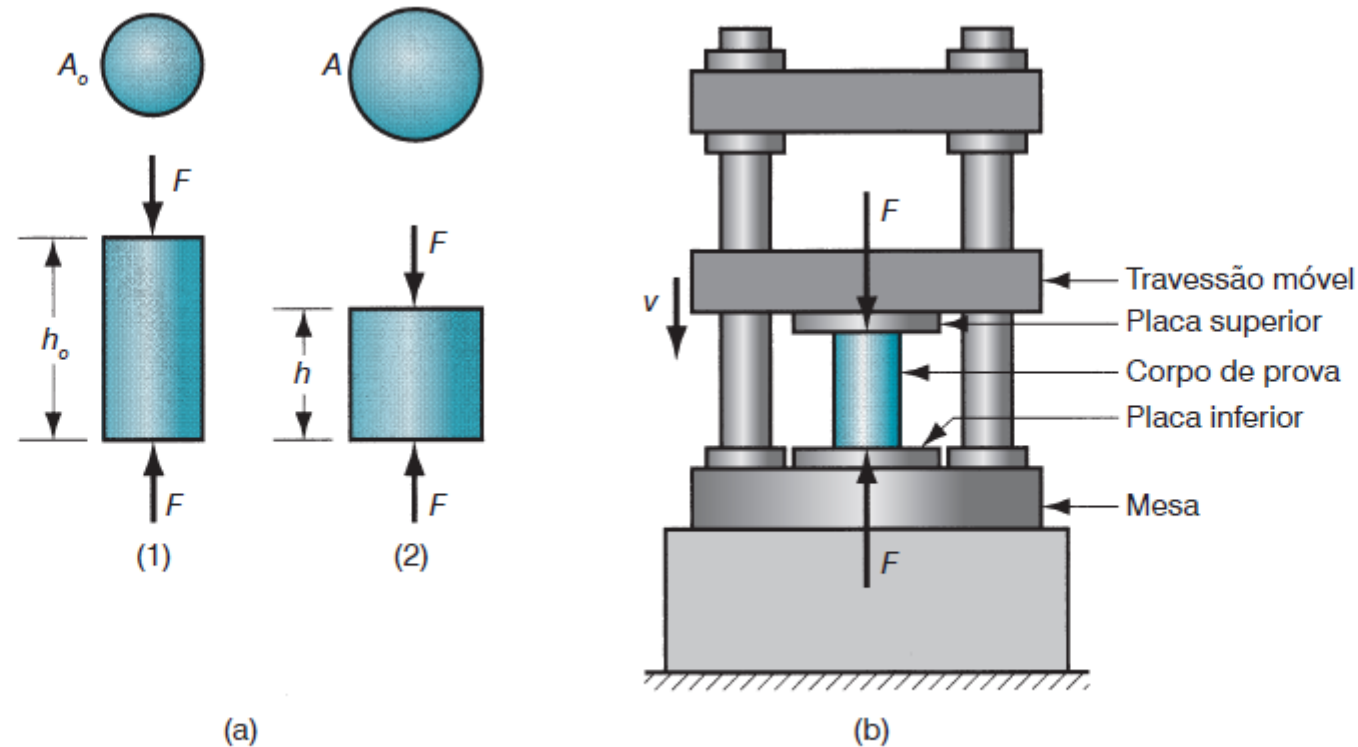
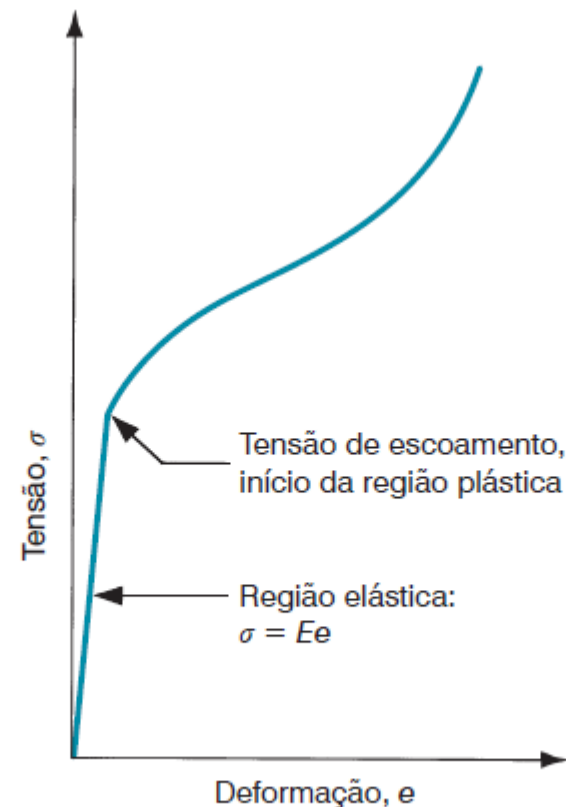


FIGURA 3.7 Ensaio de compressão: (a) força de compressão aplicada para testar uma peça em (1) e (2) a alteração resultante na altura; e (b) a montagem para o ensaio, com tamanho exagerado para o corpo de prova. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão da John Wiley & Sons, Inc.)



# CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA

engenharia em função da deformação de engenharia de um ensaio de compressão em um gráfico, obtém-se a aparência mostrada na Figura ao lado. Assim como apresentado anteriormente, a curva é dividida nas regiões elástica e plástica, mas a forma da curva na parte plástica é diferente da observada no ensaio de tração. Uma vez que a compressão faz com que a seção transversal aumente (em vez de diminuir como no ensaio de tração), a carga aumenta mais rápido que para o caso de tração. Isto resulta em maior valor calculado de tensão de engenharia.



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

$$e = \frac{h - h_0}{h_0}$$

FIGURA 3.8 Curva tensão-deformação de engenharia típica para um ensaio de compressão. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão da John Wiley & Sons, Inc.)

# EMBARRILHAMENTO

Outra consequência do atrito entre as superfícies é que o material próximo à parte central do corpo de prova está muito mais livre para aumentar a sua área que o material nas extremidades. Isto resulta no embarrilhamento característico do corpo de prova, como pode ser observado na Figura.

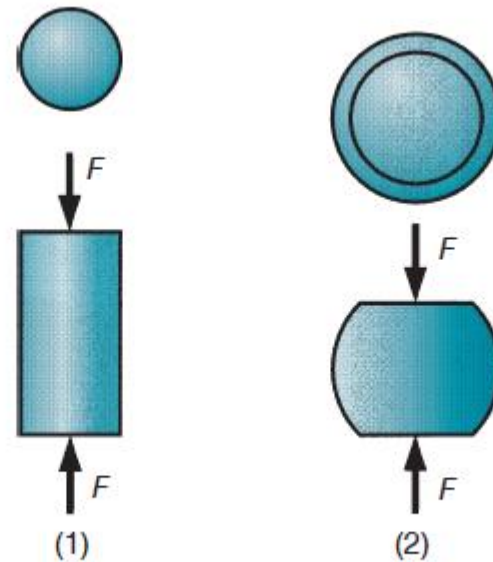


FIGURA 3.9 Efeito de embarrilhamento em um ensaio de compressão: (1) início do ensaio; e (2) após o desenvolvimento de uma compressão considerável. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão da John Wiley & Sons, Inc.)

# EFEITO DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES

**Dureza a quente** é apenas a capacidade do material em reter dureza em temperaturas elevadas; é normalmente apresentada ou como uma lista de valores de dureza para diferentes temperaturas, ou por meio de um gráfico de dureza versus temperatura. Os aços com elementos de liga podem apresentar melhorias significativas na dureza a quente. Os cerâmicos exibem propriedades superiores em temperaturas elevadas e, portanto, estes materiais são frequentemente escolhidos para aplicações em alta temperatura, como componentes de turbinas, ferramentas de corte e aplicações com refratários. A superfície externa de um ônibus espacial é coberta com tijolos cerâmicos para suportar o calor do atrito promovido pela reentrada em alta velocidade na atmosfera.

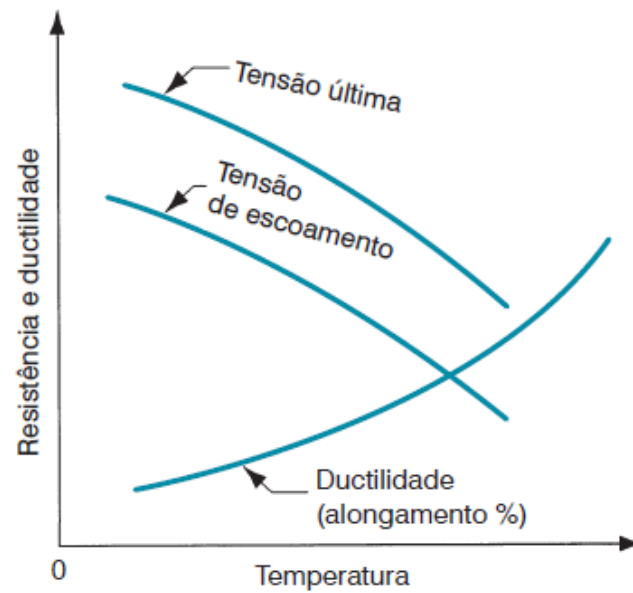


FIGURA 3.15 Efeito geral da temperatura na resistência e na ductilidade. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão da John Wiley & Sons, Inc.)

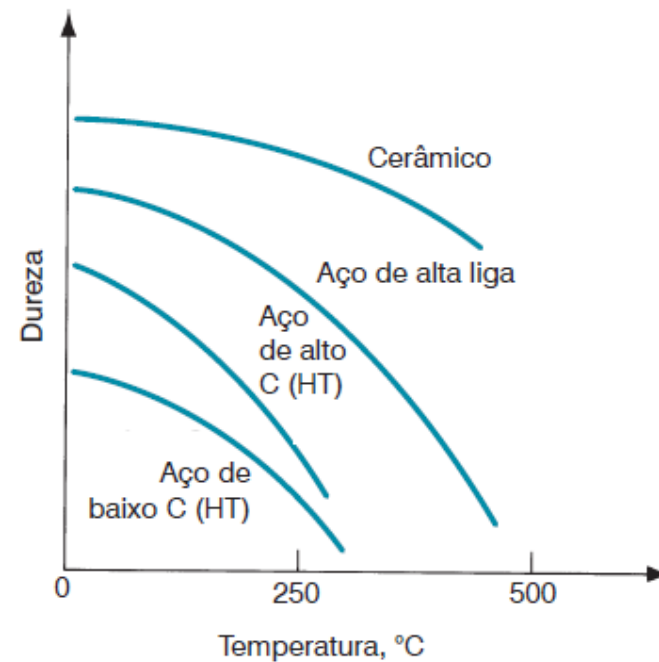


FIGURA 3.16 Dureza a quente — dureza típica em função da temperatura para diversos materiais. (Crédito: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4ª Edição por Mikell P. Groover, 2010. Reimpresso com permissão da John Wiley & Sons, Inc.)

# EFEITO DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES

**Recristalização** A maioria dos metais se comporta de acordo com a curva de fluxo para a região plástica na temperatura ambiente. À medida que o material é deformado, ele aumenta sua resistência devido ao encruamento (expoente de encruamento  $n > 0$ ). No entanto, se o metal for aquecido a uma temperatura bastante elevada e então deformado, o encruamento não ocorrerá. Ao invés disso, novos grãos livres de deformação se formam, e o metal se comporta como um material perfeitamente plástico; isto é, com um expoente de encruamento  $n = 0$ . A formação de novos grãos livres de deformação é um processo chamado de recristalização, e a temperatura na qual ele ocorre é quase igual à metade do ponto de fusão ( $0,50 T_f$ ), medida em uma escala absoluta (R ou K). Ela é chamada temperatura de recristalização. A recristalização necessita de tempo. A temperatura de recristalização para um determinado metal é usualmente especificada como a temperatura necessária para que a formação completa de novos grãos ocorra em 1 hora.

# EFEITO DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES

Recristalização é uma característica dos metais dependente da temperatura que pode ser explorada na fabricação. Aquecendo-se o metal até a temperatura de recristalização antes da deformação, pode-se aumentar substancialmente a quantidade de deformação que o metal é capaz de desenvolver, e as forças e a potência necessárias para o desenvolvimento do processo são significativamente reduzidas. A conformação de metais em temperaturas acima da temperatura de recristalização é chamada trabalho a quente.



# TEMPERATURA DE CONFORMAÇÃO DOS METAIS

**Trabalho a frio** (também conhecido como conformação a frio) é a conformação dos metais realizada à temperatura ambiente ou ligeiramente acima. As vantagens significativas da conformação a frio em comparação com o trabalho a quente são (1) maior precisão, logo, tolerâncias mais estreitas que podem ser obtidas; (2) melhor acabamento de superfície; (3) maiores resistência e dureza da peça devido ao encruamento; (4) a orientação de grãos desenvolvida durante a deformação faz com que possam ser obtidas propriedades direcionais desejáveis no produto final; e (5) nenhum aquecimento do metal é necessário, o que economiza custos de equipamentos e combustíveis de fornos e permite maiores taxas de produção.

# DESVANTAGENS DA CONFORMAÇÃO A FRIO

1. elevadas forças e potências são exigidas para realizar a operação;
2. cuidado deve ser tomado para assegurar que as superfícies do esboço inicial de trabalho estejam livres de carepas e sujeiras;
3. a ductilidade e o encruamento do metal de trabalho limitam o quanto de conformação pode ser feito na peça. Em algumas operações, o metal deve ser recozido para permitir que deformação adicional seja realizada. Em outros casos, o metal não é dúctil o suficiente para ser trabalhado a frio.

Para solucionar o problema do encruamento e reduzir as demandas de força e potência, muitas operações de conformação são realizadas em temperaturas elevadas. Existem duas faixas de temperaturas acima da temperatura ambiente, que dão origem aos termos de trabalho a morno e trabalho a quente.

# TEMPERATURA DE CONFORMAÇÃO DOS METAIS

**Trabalho a Morno:** Considerando que as propriedades do material no escoamento são normalmente melhoradas pelo aumento da temperatura da peça ou esboço de trabalho, as operações de conformação são, algumas vezes, realizadas em temperaturas acima da temperatura ambiente, mas abaixo da temperatura de recristalização.

O termo trabalho a morno é aplicado a esta segunda gama de temperaturas. A linha divisória entre o trabalho a frio e o trabalho a morno é com frequência expressa em termos do ponto de fusão do metal. Esta divisória é usualmente tomada por  $0,3 T_f$ , em que  $T_f$  é o ponto de fusão (temperatura absoluta) do metal em questão.

Os menores valores de resistência mecânica e encruamento em temperaturas intermediárias, assim como a maior ductilidade, asseguram vantagens do trabalho a morno sobre o trabalho a frio: (1) forças e potências mais baixas, (2) possibilidade de geometrias mais complexas e (3) necessidade de recozimento pode ser reduzida ou eliminada.

# TEMPERATURA DE CONFORMAÇÃO DOS METAIS

**Trabalho a Quente:** Trabalho a quente (também chamado conformação a quente) envolve deformação em temperaturas acima da temperatura de recristalização. A temperatura de recristalização de um dado metal é cerca de metade do seu ponto de fusão em escala absoluta. Na prática, o trabalho a quente é usualmente conduzido em temperaturas um pouco acima de  $0,5 T_f$ . O metal de trabalho continua a amaciar à medida que a temperatura é aumentada acima de  $0,5 T_f$ , aumentando assim a vantagem do trabalho a quente acima deste nível. Entretanto, o próprio processo de deformação gera calor, o qual, por conseguinte, aumenta as temperaturas de trabalho em regiões localizadas da peça. Isto pode conduzir à fusão do metal nestas regiões, o que é extremamente indesejável. Ainda, a formação de carepa na superfície do metal é acelerada em temperaturas mais elevadas. Por conseguinte, as temperaturas de trabalho a quente são de modo usual mantidas dentro da gama  $0,5 T_f$  a  $0,75 T_f$ .

# VANTAGEM DA CONFORMAÇÃO A QUENTE

A vantagem mais significativa do trabalho a quente é a capacidade de promover considerável deformação plástica do metal — muito mais do que é possível com o trabalho a frio ou o trabalho a morno. A principal razão para isto é que a curva de escoamento do metal trabalhado a quente tem um coeficiente de resistência que é consideravelmente menor que aquele à temperatura ambiente, o expoente de encruamento é (em termos teóricos) zero e a ductilidade do metal é aumentada de maneira significativa. Tudo isto resulta nas seguintes vantagens com relação ao trabalho a frio: (1) a forma da peça de trabalho pode ser significativamente alterada, (2) forças e potências mais baixas são necessárias para deformar o metal, (3) os metais que usualmente fraturam no trabalho a frio podem ser conformados a quente, (4) as propriedades de resistência mecânica são, em geral, isotrópicas devido à ausência de estrutura de grãos orientados comumente formados no trabalho a frio e (5) nenhum aumento da resistência da peça decorre do encruamento.

# DESVANTAGENS NA CONFORMAÇÃO A QUENTE

Esta última vantagem pode parecer inconsistente, pois o aumento de resistência do metal é com frequência considerado uma vantagem para o trabalho a frio. Contudo, existem aplicações nas quais é indesejável que o metal esteja encruado, porque isto reduz a ductilidade, por exemplo, se a peça for posteriormente processada por conformação a frio. As desvantagens do trabalho a quente englobam: (1) menor precisão dimensional, (2) maior energia total exigida (devido à energia térmica para aquecer o esboço de trabalho), (3) oxidação da superfície do metal (carepa), (4) acabamento superficial mais pobre e (5) vida mais curta do ferramental.

# TEMPERATURA DE CONFORMAÇÃO DOS METAIS

A **conformação isotérmica** refere-se às operações de conformação que são realizadas de modo a eliminar o resfriamento superficial e os gradientes térmicos resultantes na peça de trabalho. Esta é realizada por meio de pré-aquecimento das ferramentas, que entram em contato com a peça na mesma temperatura do metal de trabalho. Isto enfraquece as ferramentas e reduz sua vida, porém evita os problemas quando estes metais de difícil trabalho são conformados por métodos convencionais. Em alguns casos, a conformação isotérmica representa a única opção pela qual estes materiais podem ser conformados. Este procedimento é mais bem associado com o forjamento;

# PERGUNTAS

1. Qual é a diferença entre tensão de engenharia e tensão verdadeira em um ensaio de tração?
2. O que é encruamento?
3. Como a variação da área da seção transversal de um corpo de prova em um ensaio de compressão difere do seu correspondente corpo de prova em um ensaio de tração?
4. Enuncie algumas vantagens do trabalho a frio em comparação aos trabalhos a morno e a quente.
5. O que é conformação isotérmica?