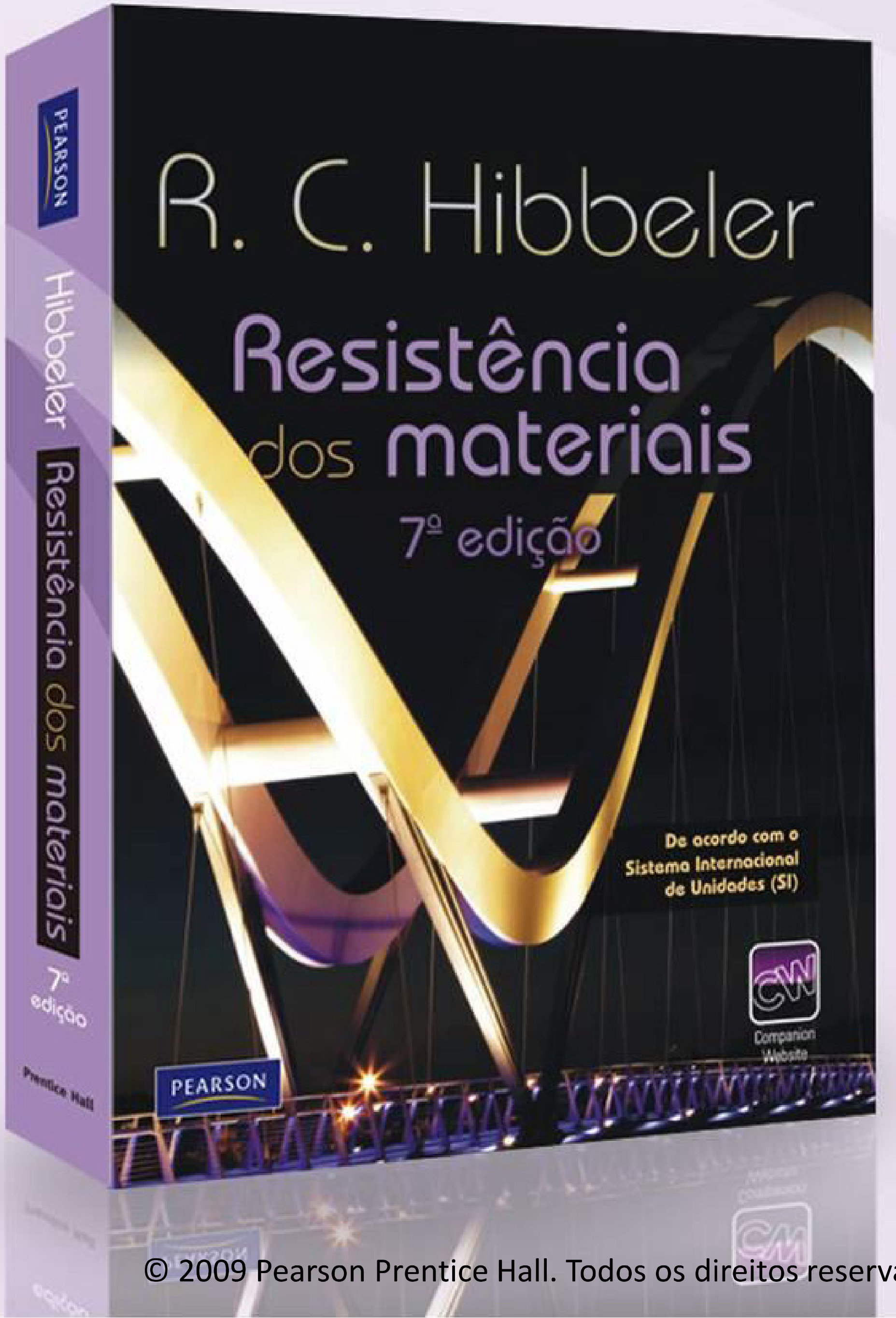
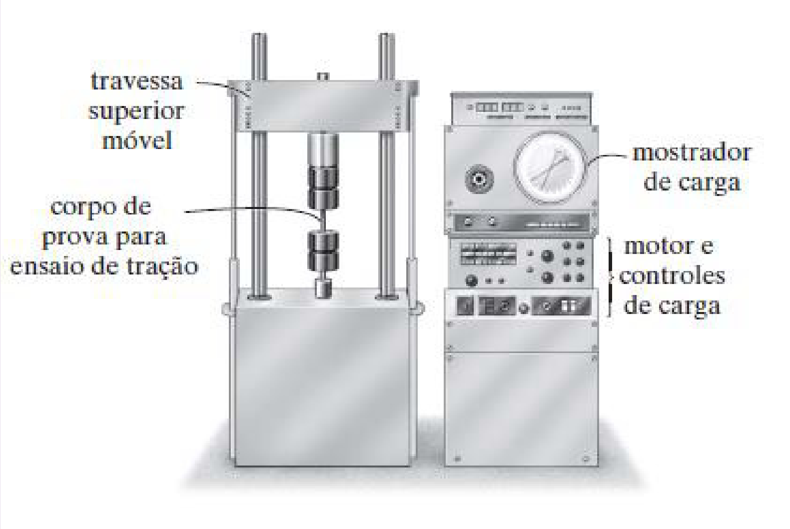
Capítulo 3

Propriedades mecânicas dos materiais



O ensaio de tração e compressão

- A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura.
- Essa propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada por *métodos experimentais*, como o ensaio de ***tração ou compressão***.
- Uma máquina de teste é projetada para ler a carga exigida para manter o alongamento uniforme.



O diagrama tensão–deformação

Diagrama tensão–deformação convencional

- A ***tensão nominal***, ou ***tensão de engenharia***, é determinada pela divisão da carga aplicada *P* pela área *original* da seção transversal do corpo de prova, A_0.

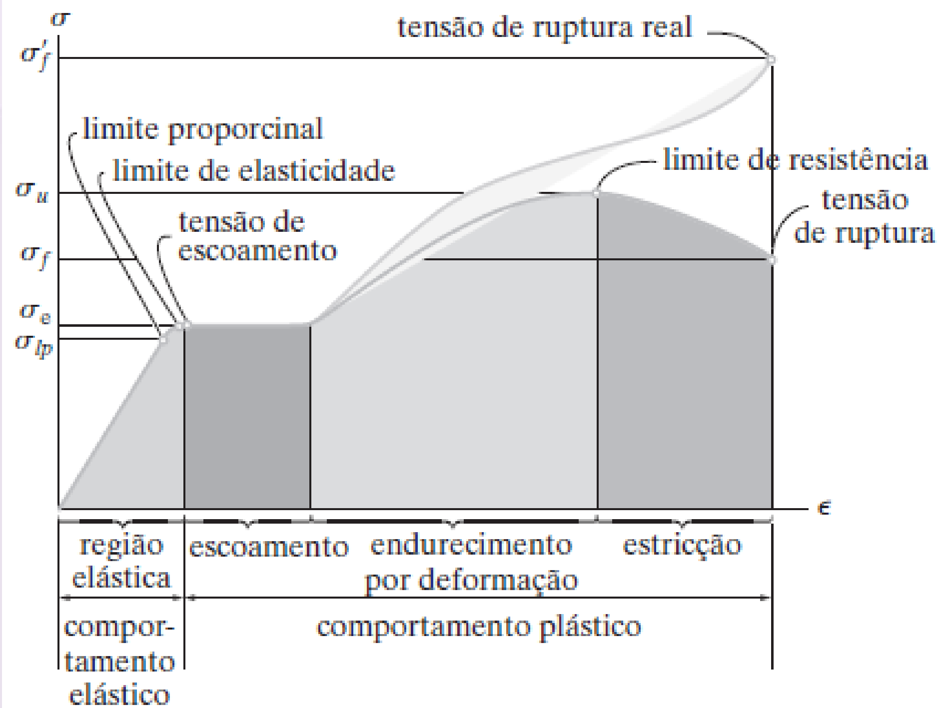
$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

- A **deformação n*ominal***, ou ***deformação de engenharia***, é determinada pela divisão da variação, δ, no comprimento de referência do corpo de prova, pelo comprimento de referência original do corpo de prova, L_0.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

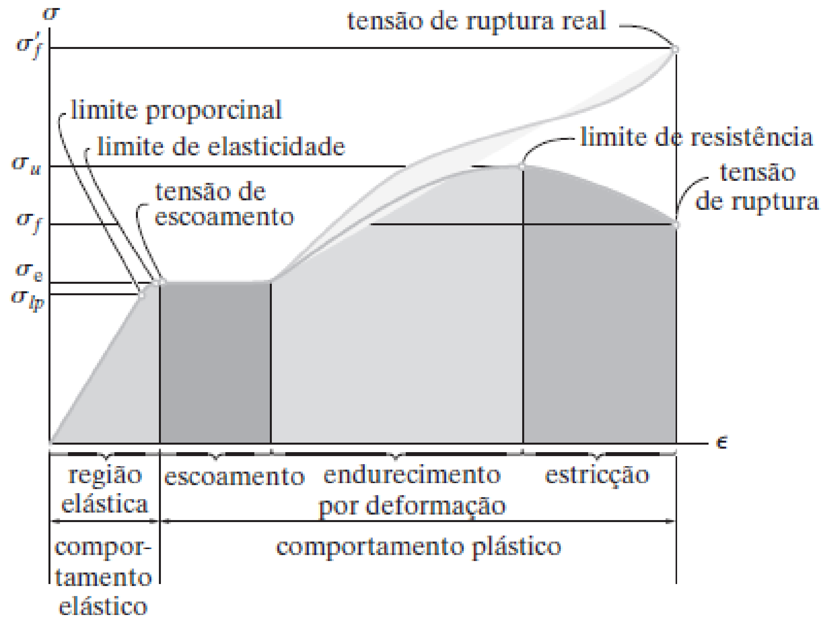
- *Comportamento elástico*
  - A tensão é *proporcional* à deformação.
  - O material é *linearmente elástico.*

- *Escoamento*
  - Um pequeno aumento na tensão acima do limite de elasticidade resultará no colapso do material e fará com que ele se *deforme permanentemente*.



Diagramas de tensão–deformação convecional e real para um material dúctil (aço)(não está em escala)

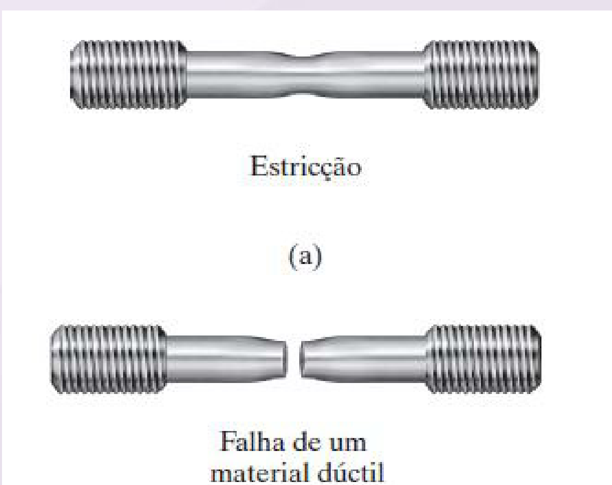
- *Endurecimento por deformação*
  - Quando o escoamento tiver terminado, pode-se aplicar uma carga adicional ao corpo de prova, o que resulta em uma curva que cresce continuamente, mas torna-se mais achatada até atingir uma tensão máxima denominada ***limite de resistência***.
- *Estricção*
  - No limite de resistência, a área da seção transversal começa a diminuir em uma região *localizada* do corpo de prova.
  - O corpo de prova quebra quando atinge a ***tensão de ruptura***.



Diagramas de tensão–deformação convecional e real para um material dúctil (aço)(não está em escala)

Diagrama tensão–deformação real

- Os valores da tensão e da deformação calculados por essas medições são denominados *tensão real* e *deformação real*.
- Use este diagrama já que a maioria dos projetos de engenharia é feito dentro da faixa elástica.



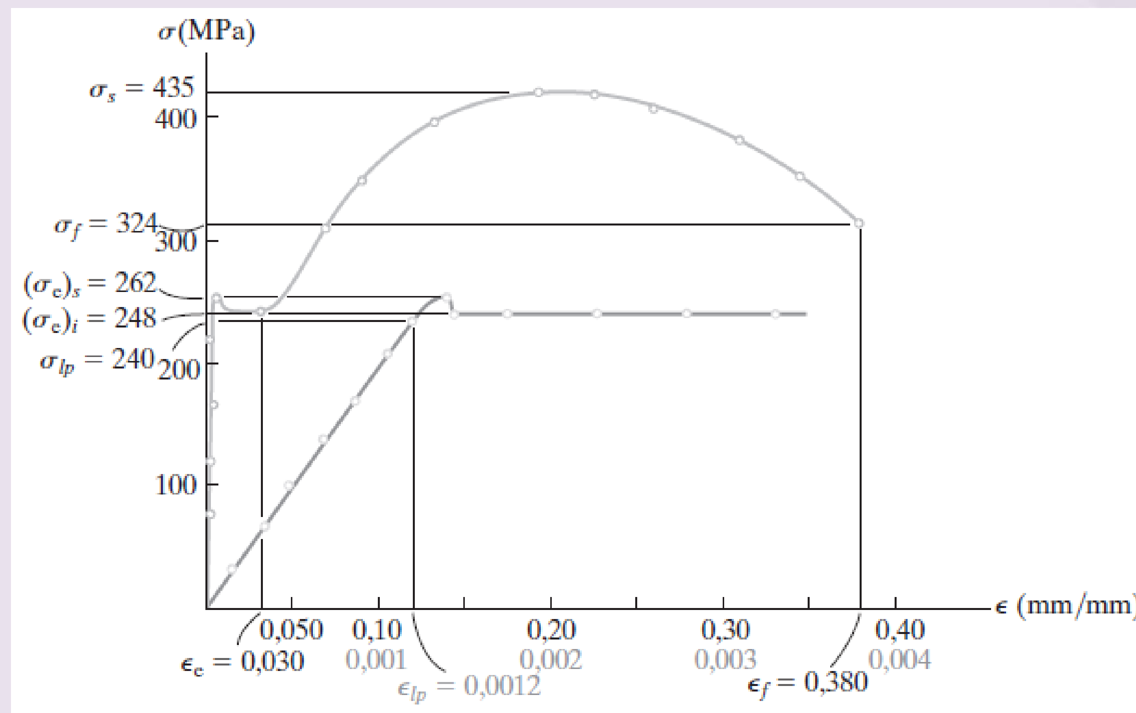


Diagrama tensão–deformação para aço doce

O comportamento da tensão–deformação de materiais dúcteis e frágeis

Materiais dúcteis

- Material que possa ser submetido a grandes deformações antes de sofrer ruptura é denominado ***material dúctil***.

Materiais frágeis

- Materiais que exibem pouco ou nenhum escoamento antes da falha são denominados ***materiais frágeis***.

Lei de Hooke

- A *lei de Hooke* define a *relação linear* entre tensão e deformação dentro da região elástica.

$$\sigma = E\varepsilon$$

σ = tensão

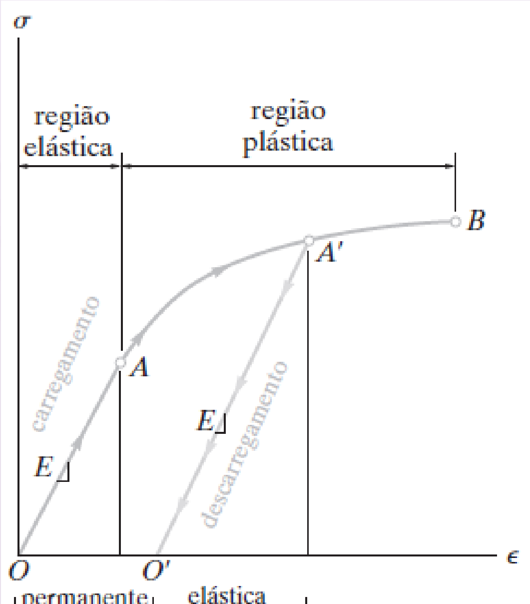
E = ***módulo de elasticidade*** ou ***módulo de Young***

ε = deformação

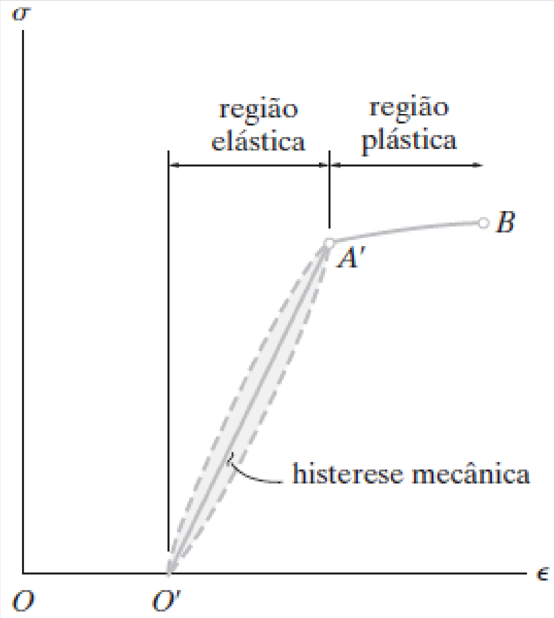
- *E* pode ser usado somente se o material tiver relação *linear–elástica*.

Endurecimento por deformação

- Se um corpo de prova de material dúctil for carregado na *região plástica* e, então, descarregado, a *deformação elástica é recuperada.*
- Entretanto, a *deformação plástica permanece*, e o resultado é que o material fica submetido a uma ***deformação permanente***.



(a)



(b)

Resistência dos materiais

7ª edição

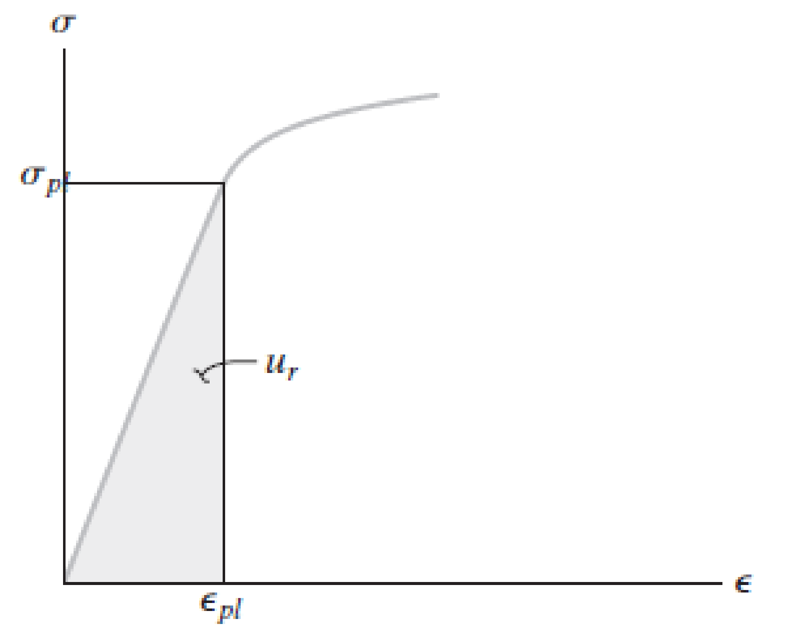
Energia de deformação

- Quando um material é deformado por uma carga externa, tende a armazenar energia *internamente* em todo o seu volume.
- Essa energia está relacionada com as deformações no material, e é denominada ***energia de deformação***.

Módulo de resiliência

- Quando a tensão atinge o limite de proporcionalidade, a densidade da energia de deformação é denominada **módulo de resiliência, u_r.**

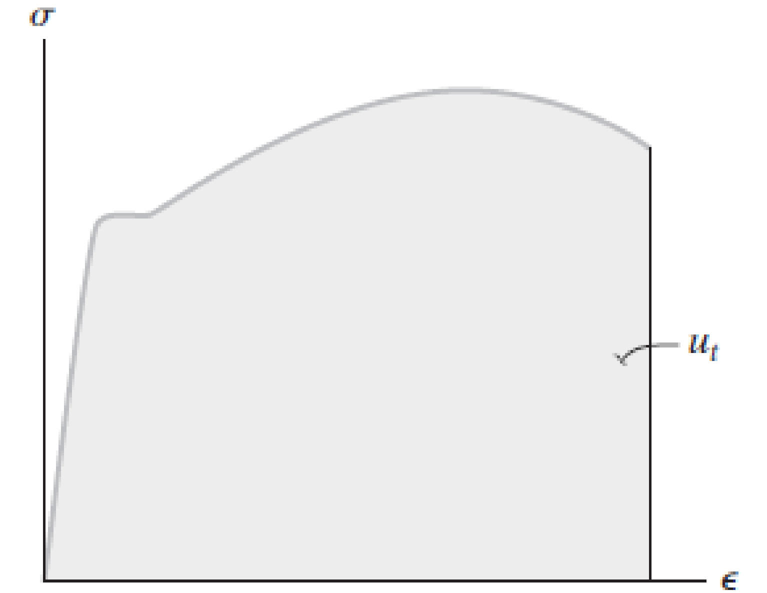
$$u_r = \frac{1}{2}\sigma_{pl}\varepsilon_{pl} = \frac{1}{2}\frac{\sigma_{pl}^2}{E}$$



Módulo de resiliência u_r

Módulo de tenacidade

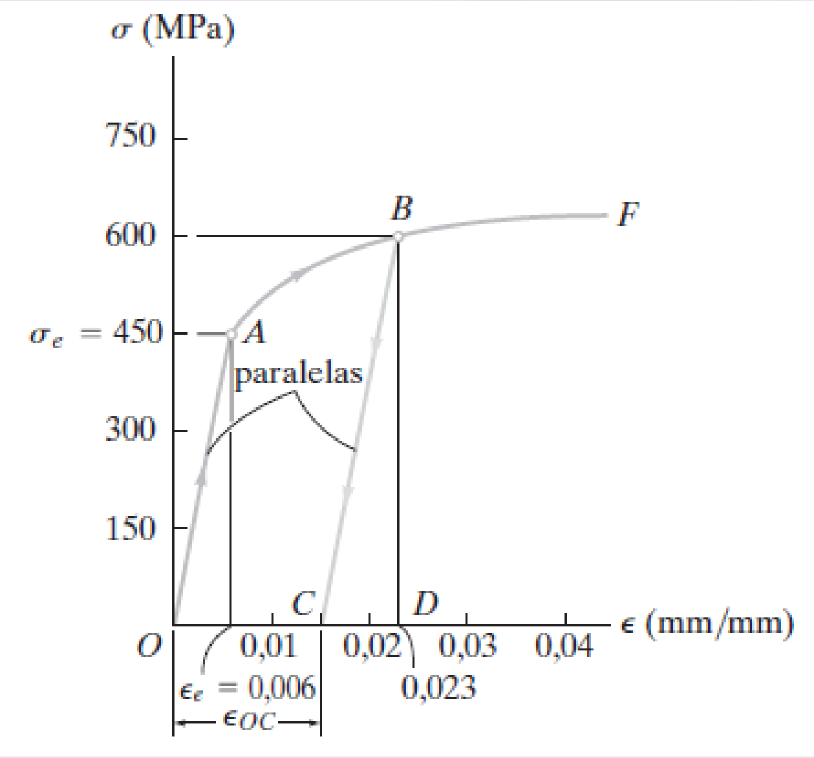
- ***Módulo de tenacidade***, $\boldsymbol{u_t}$, representa a *área inteira* sob o diagrama tensão-deformação.
- Indica a densidade de energia de deformação do material um pouco antes da ruptura.



Módulo de tenacidade u_t

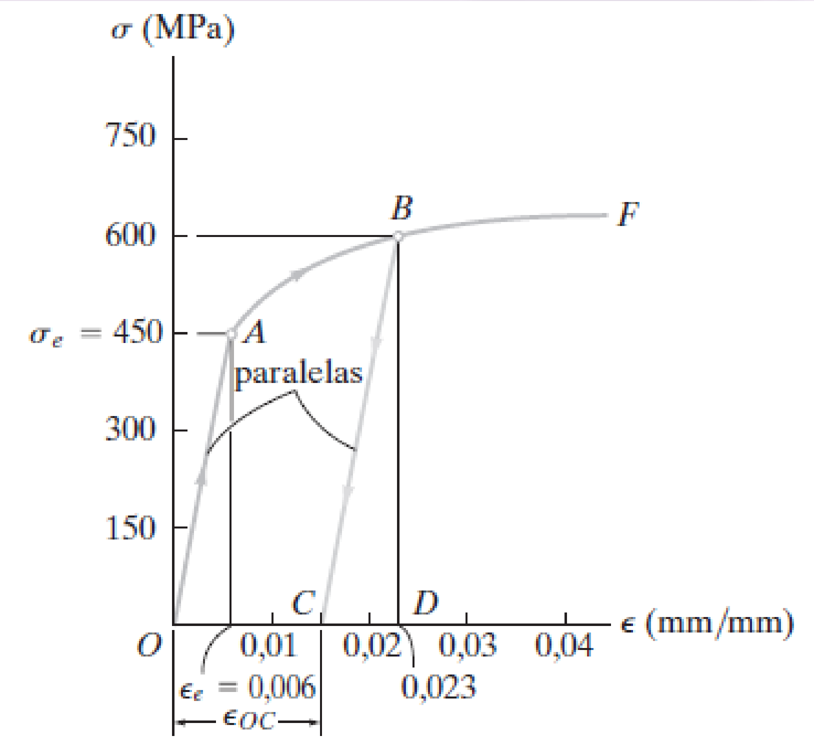
Exemplo 3.2

O diagrama tensão-deformação para uma liga de alumínio utilizada na fabricação de peças de aeronaves é mostrado ao lado. Se um corpo de prova desse material for submetido à tensão de tração de 600 MPa, determine a deformação permanente no corpo de prova quando a carga é retirada. Calcule também o módulo de resiliência antes e depois da aplicação da carga.



Solução:

Quando o corpo de prova é submetido à carga, a deformação é aproximadamente 0,023 mm/mm.



A inclinação da reta *OA* é o módulo de elasticidade, isto é,

$$E = \frac{450}{0{,}006} = 75{,}0\,\text{GPa}$$

Pelo triângulo *CBD*, temos que

$$E = \frac{BD}{CD} = \frac{600\left(10^{6}\right)}{CD} = 75{,}0\left(10^{9}\right) \Rightarrow CD = 0{,}008\,\text{mm/mm}$$

A deformação representa a quantidade de *deformação elástica recuperada*.

Assim, a deformação permanente é

$$\varepsilon_{OC} = 0{,}023 - 0{,}008 = 0{,}0150\,\text{mm/mm} \quad \text{(Resposta)}$$

Calculando o módulo de resiliência,

$$\left(u_r\right)_{início} = \frac{1}{2}\sigma_{lp}\varepsilon_{lp} = \frac{1}{2}(450)(0{,}006) = 1{,}35\,\text{MJ/m}^3 \quad \text{(Resposta)}$$

$$\left(u_r\right)_{fim} = \frac{1}{2}\sigma_{lp}\varepsilon_{lp} = \frac{1}{2}(600)(0{,}008) = 2{,}40\,\text{MJ/m}^3 \quad \text{(Resposta)}$$

Note que no sistema SI, o trabalho é medido em joules, onde 1 J = 1 N • m.

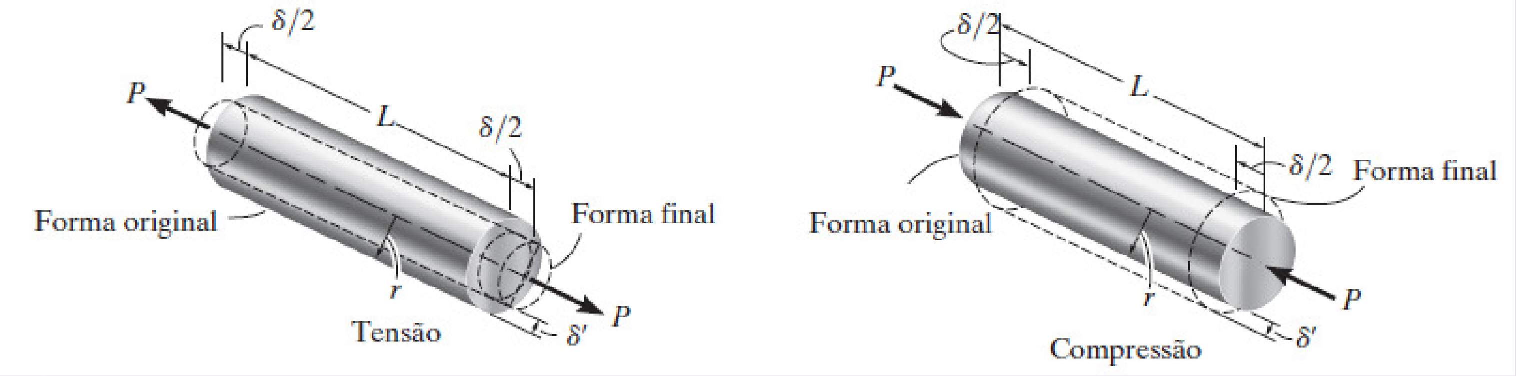
Coeficiente de Poisson

- ***Coeficiente de Poisson***, *v* (nu), estabelece que dentro da *faixa elástica,* a *razão* entre essas deformações é uma *constante*, já que estas são proporcionais.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{lat}}}{\varepsilon_{\text{long}}}$$

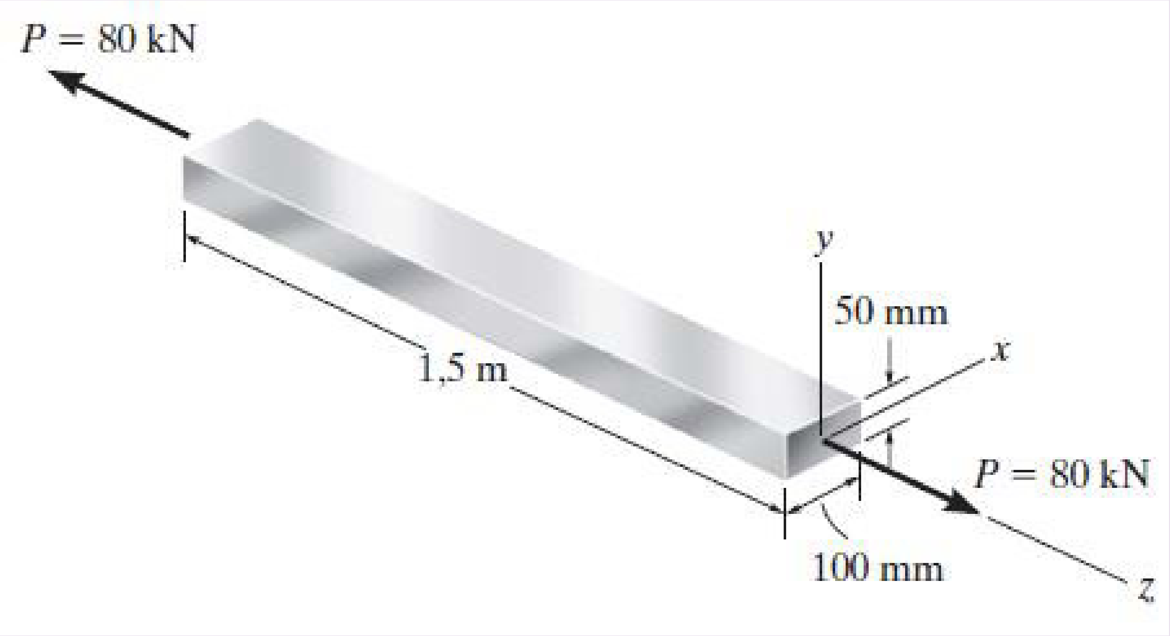
O coeficiente de Poisson é *adimensional*. Valores típicos são 1/3 ou 1/4.

- A expressão acima tem sinal negativo porque o *alongamento longitudinal* (deformação positiva) provoca *contração lateral* (deformação negativa) e vice-versa.



Exemplo 3.4

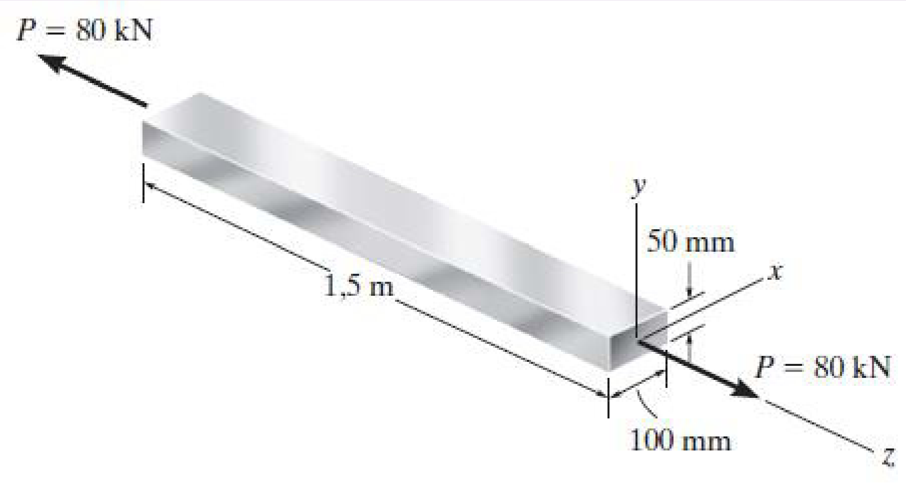
Uma barra de aço A-36 tem as dimensões mostradas abaixo. Se uma força axial P = 80 kN for aplicada à barra, determine a mudança em seu comprimento e a mudança nas dimensões da área de sua seção transversal após a aplicação da carga. O material comporta-se elasticamente.



Solução:

A tensão normal na barra é

$$\sigma_z = \frac{P}{A} = \frac{80\left(10^3\right)}{(0,1)(0,05)} = 16,0\left(10^6\right)\text{Pa}$$



Da tabela para o aço A-36, $E_{\text{aço}}$ = 200 GPa,

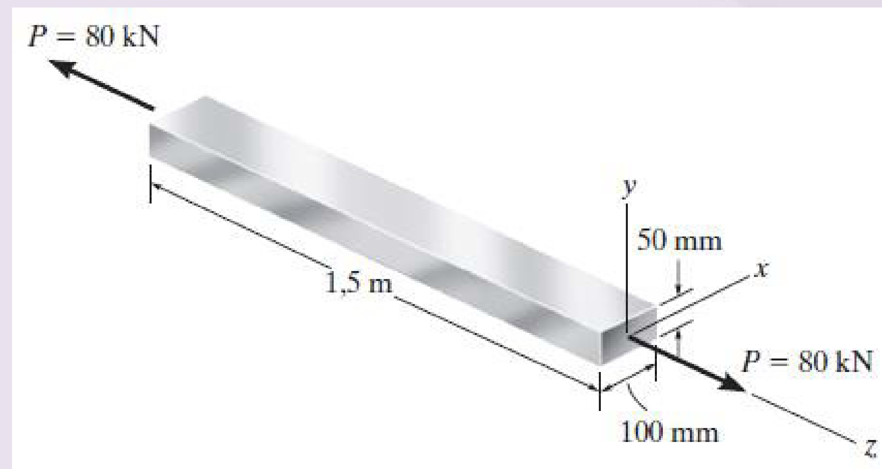
$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_{\text{aço}}} = \frac{16,0\left(10^6\right)}{200\left(10^6\right)} = 80\left(10^{-6}\right)\text{mm/mm}$$

O alongamento axial da barra é, portanto,

$$\delta_z = \varepsilon_z L_z = \left[80\left(10^{-6}\right)(1{,}5)\right] = 120\mu\text{m} \text{ (Resposta)}$$

As deformações de contração em *ambas* as direções *x* e *y* são

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -v_{\text{aço}}\varepsilon_z = -0{,}32\left[80\left(10^{-6}\right)\right] = -25{,}6\ \mu\text{m/m}$$



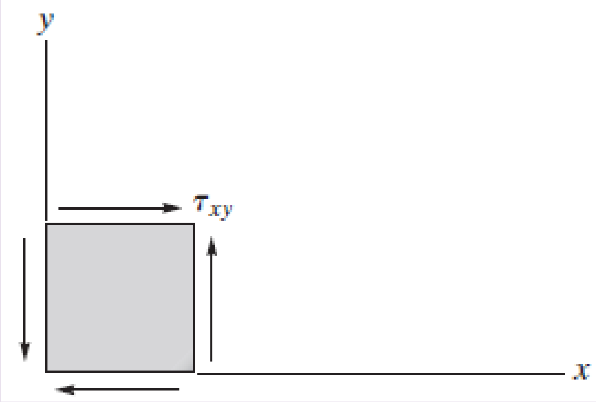
Assim, as mudanças nas dimensões da seção transversal são

$$\delta_x = \varepsilon_x L_x = -\left[25{,}6\left(10^{-6}\right)(0{,}1)\right] = -2{,}56\mu\text{m} \text{ (Resposta)}$$

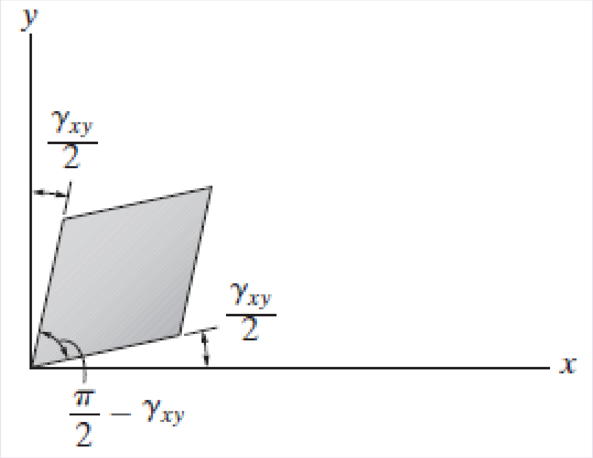
$$\delta_y = \varepsilon_y L_y = -\left[25{,}6\left(10^{-6}\right)(0{,}05)\right] = -1{,}28\mu\text{m} \text{ (Resposta)}$$

O diagrama tensão−deformação de cisalhamento

- Para *cisalhamento puro*, o equilíbrio exige que tensões de cisalhamento iguais sejam desenvolvidas nas quatro faces do elemento.



- Se o material for *homogêneo* e *isotrópico*, a tensão de cisalhamento distorcerá o elemento uniformemente.



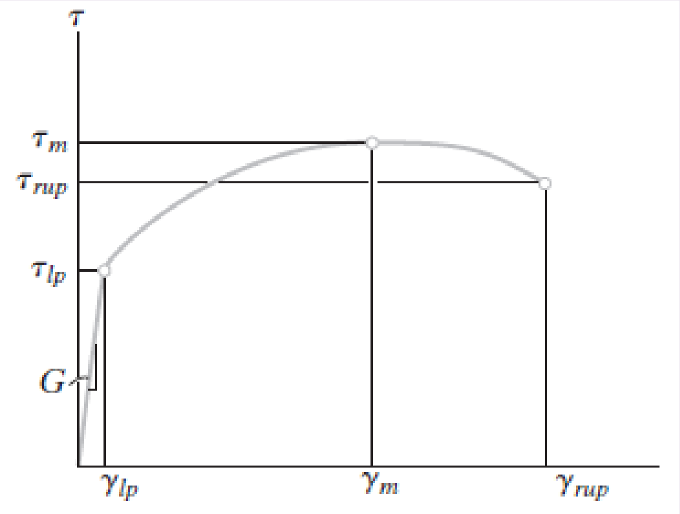
- A maioria dos materiais de engenharia apresenta comportamento elástico *linear*, portanto a lei de Hooke para cisalhamento pode ser expressa por

$$\tau = G\gamma$$

- Três constantes do material, *E*, *v* e *G*, na realidade, estão *relacionadas* pela equação

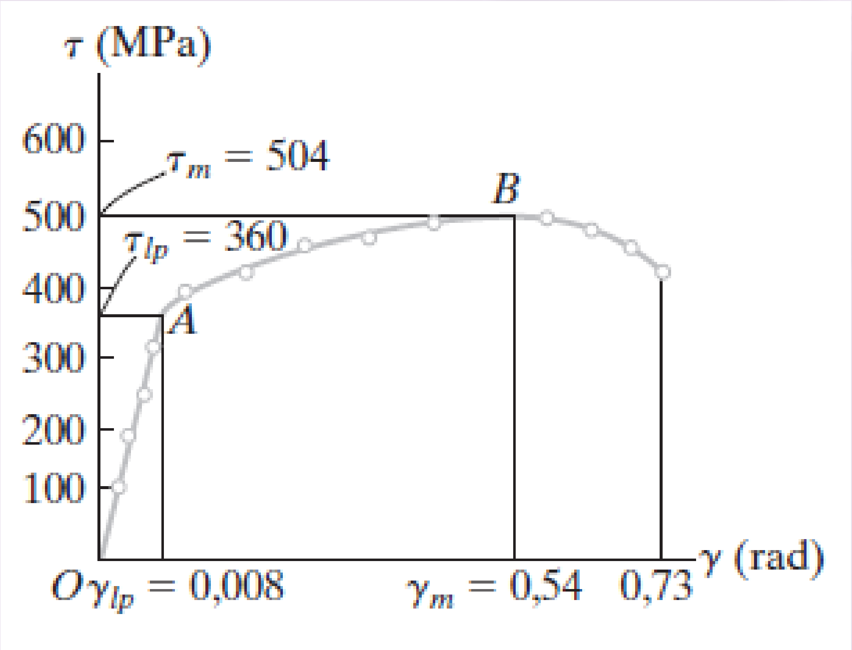
$$G = \frac{E}{2(1+v)}$$

G ***= módulo de elasticidade o cisalhamento*** ou módulo de rigidez.



Exemplo 3.5

Um corpo de liga de titânio é testado em torção e o diagrama tensão-deformação de cisalhamento é mostrado na figura abaixo. Determine o módulo de cisalhamento *G*, o limite de proporcionalidade e o limite de resistência ao cisalhamento. Determine também a máxima distância *d* de deslocamento horizontal da parte superior de um bloco desse material, se ele se comportar elasticamente quando submetido a uma força de cisalhamento **V**. Qual é o valor de **V** necessário para causar esse deslocamento?

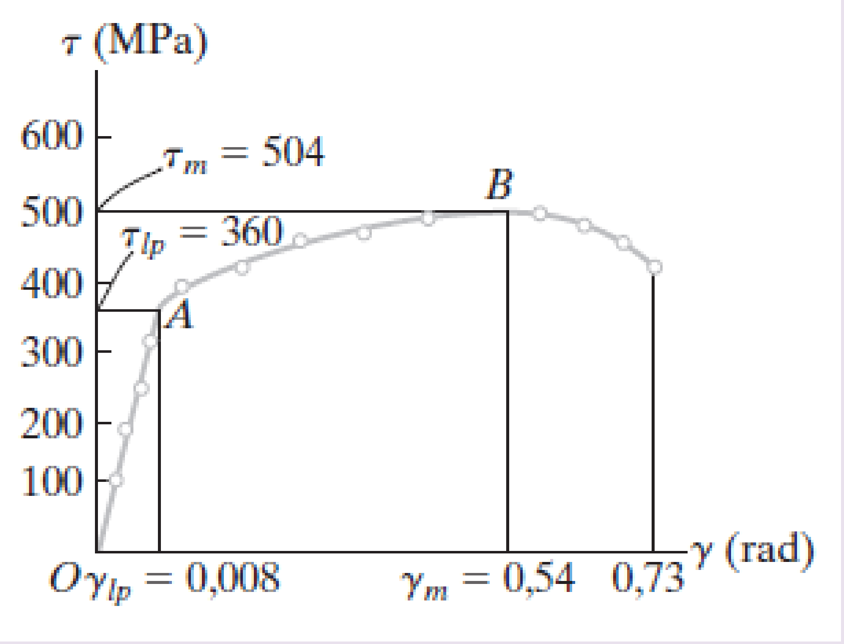


Solução:

As coordenadas do ponto *A* são (0,008 rad, 360 MPa).

Assim, o módulo de cisalhamento é

$$G = \frac{360}{0{,}008} = 45\left(10^3\right)\text{MPa (Resposta)}$$

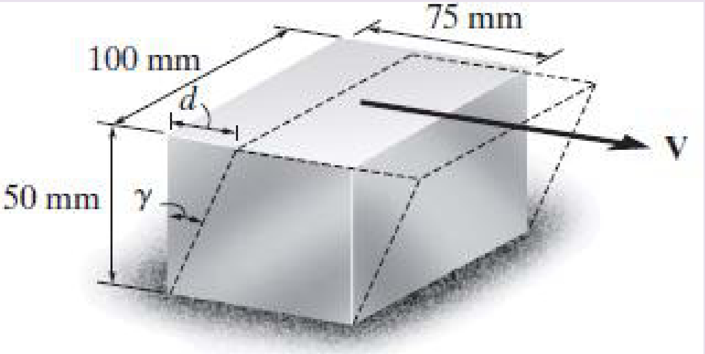


Por inspeção, o gráfico deixa de ser linear no ponto *A*. Assim, o limite de proporcionalidade é $\tau_{lp} = 360\,\text{MPa}$ (Resposta)

Esse valor representa a tensão de cisalhamento máxima, no ponto *B*. Assim, o limite de resistência é $\tau_m = 504\,\text{MPa}$ (Resposta)

Já que o ângulo é pequeno, o deslocamento horizontal da parte superior será

$$\text{tg}(0{,}008\,\text{rad}) \approx 0{,}008 = \frac{d}{50\,\text{mm}} \Rightarrow d = 0{,}4\,\text{mm}$$



A tensão de cisalhamento *V* necessária para causar o deslocamento é

$$\tau_{\text{méd}} = \frac{V}{A}; \quad 360\,\text{MPa} = \frac{V}{(75)(100)} \Rightarrow V = 2.700\,\text{kN (Resposta)}$$