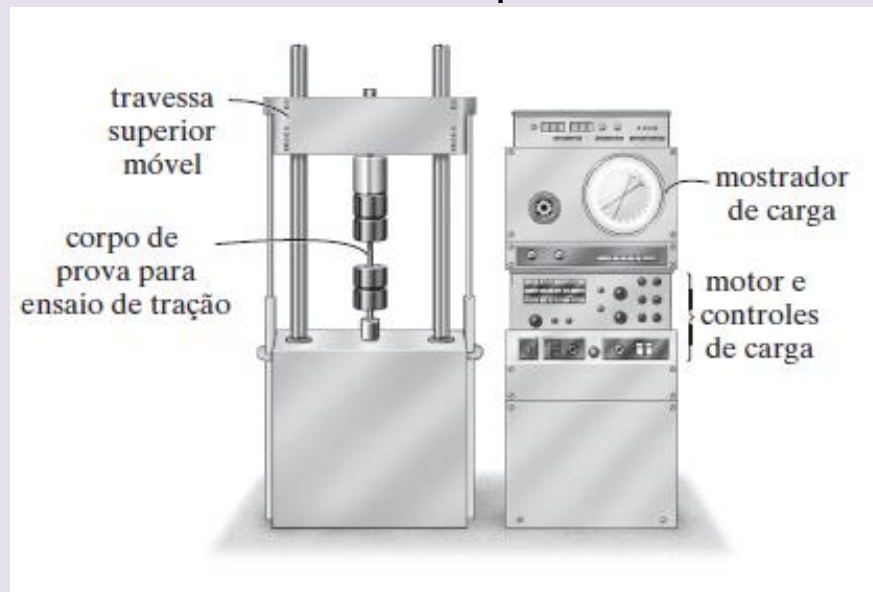


Propriedades mecânicas dos materiais

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 a taxa de alongamento uniforme** até a ruptura.



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 nominal**, 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 .

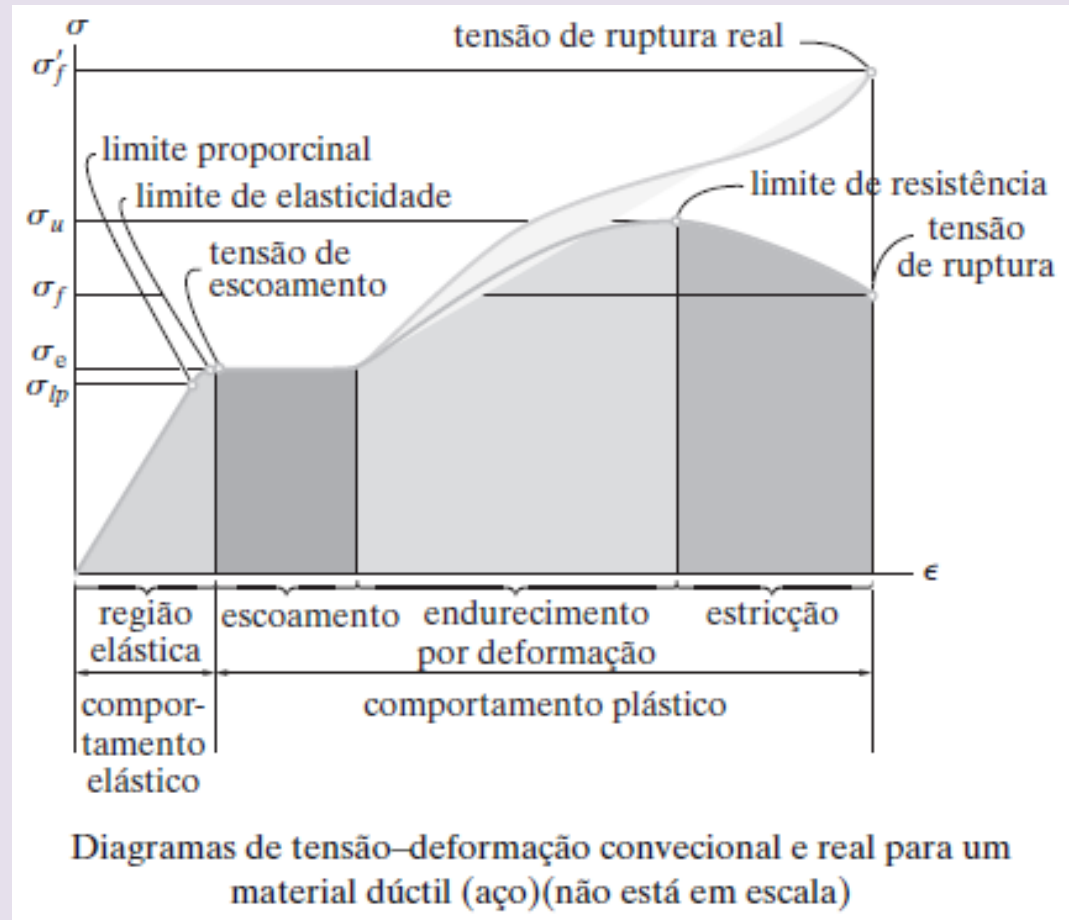
$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

- **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*.



- **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**.

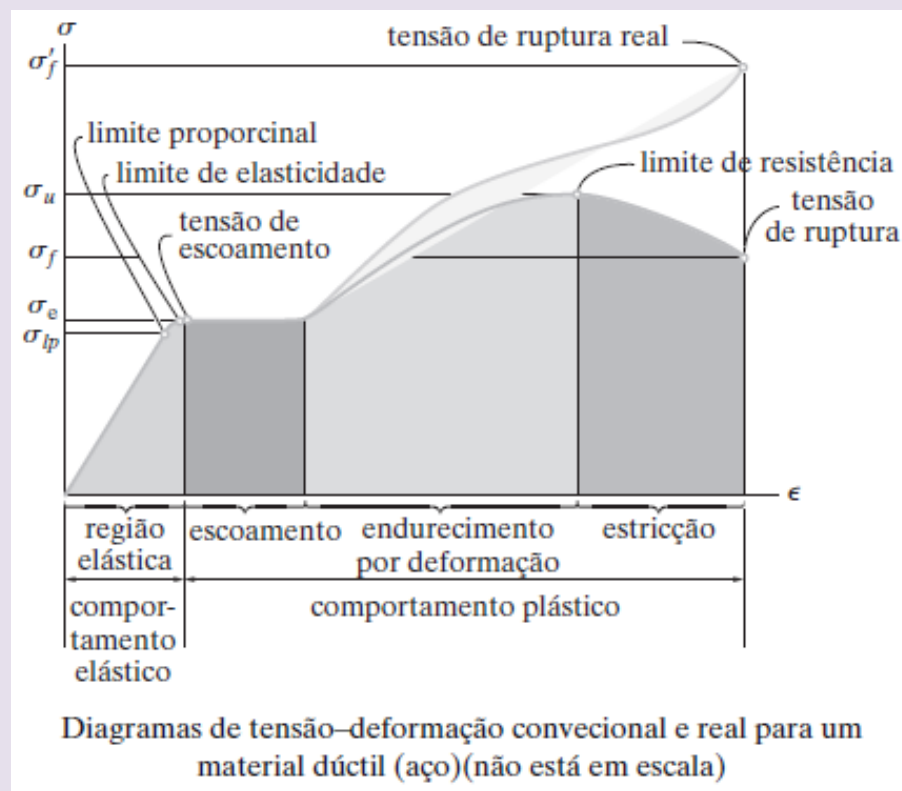
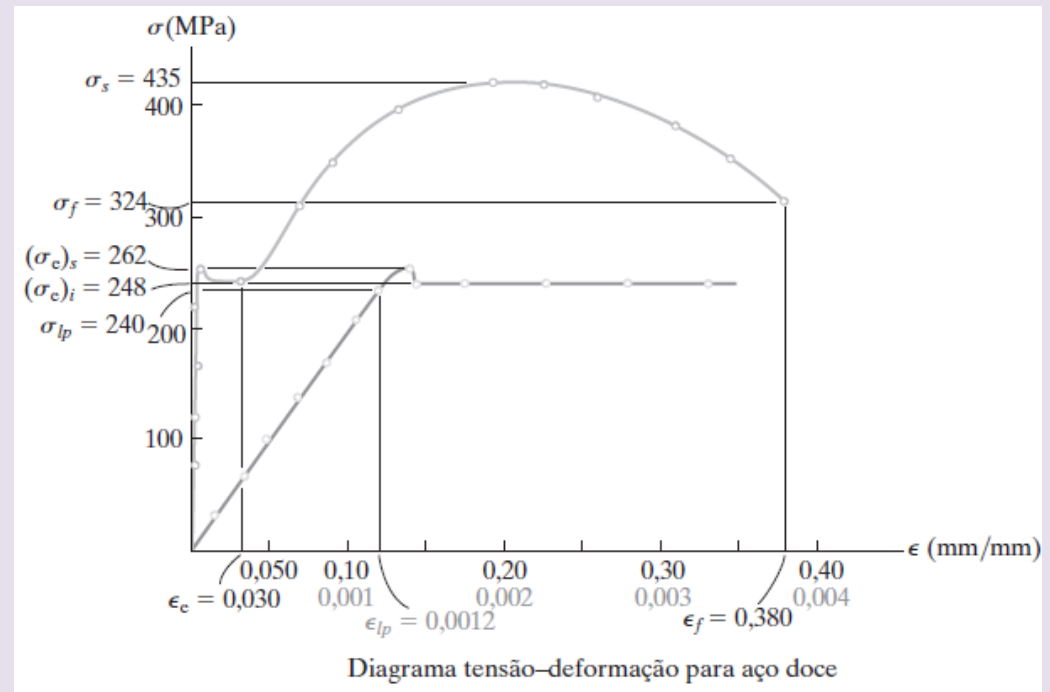
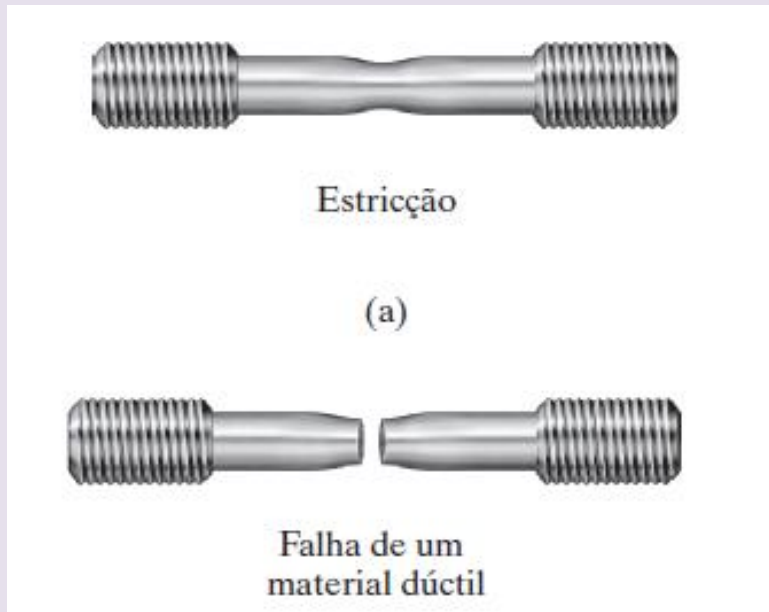


Diagrama tensão–deformação real

- Os valores da tensão e da deformação calculados por essas medições são denominados *tensão real e deformação real*.
- A maioria dos projetos de engenharia são feitos para que as peças trabalhem dentro da *faixa elástica*.



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 a tensão e a deformação dentro da região elástica.

$$\sigma = E\varepsilon$$

σ = tensão

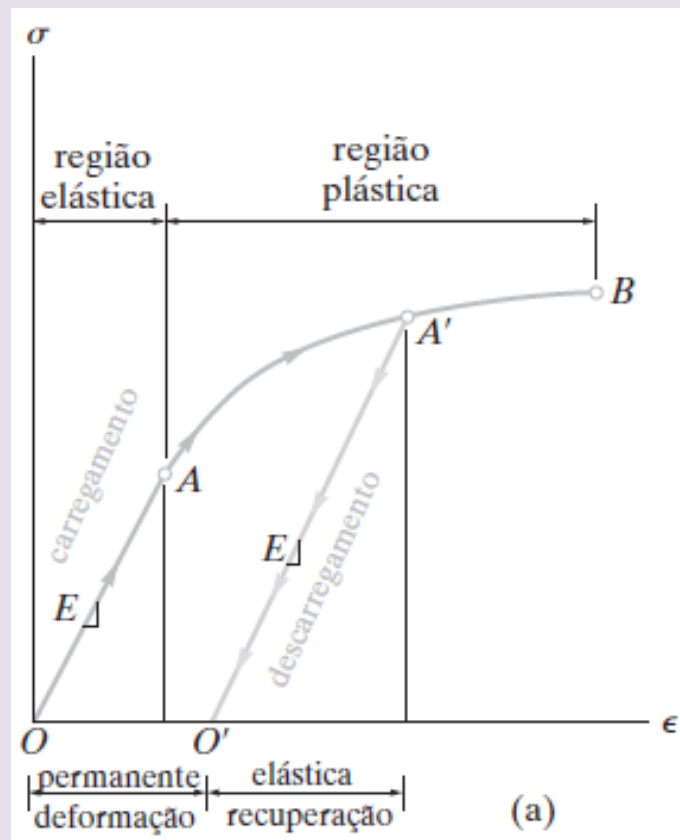
E = **módulo de elasticidade** ou **módulo de Young**

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***.



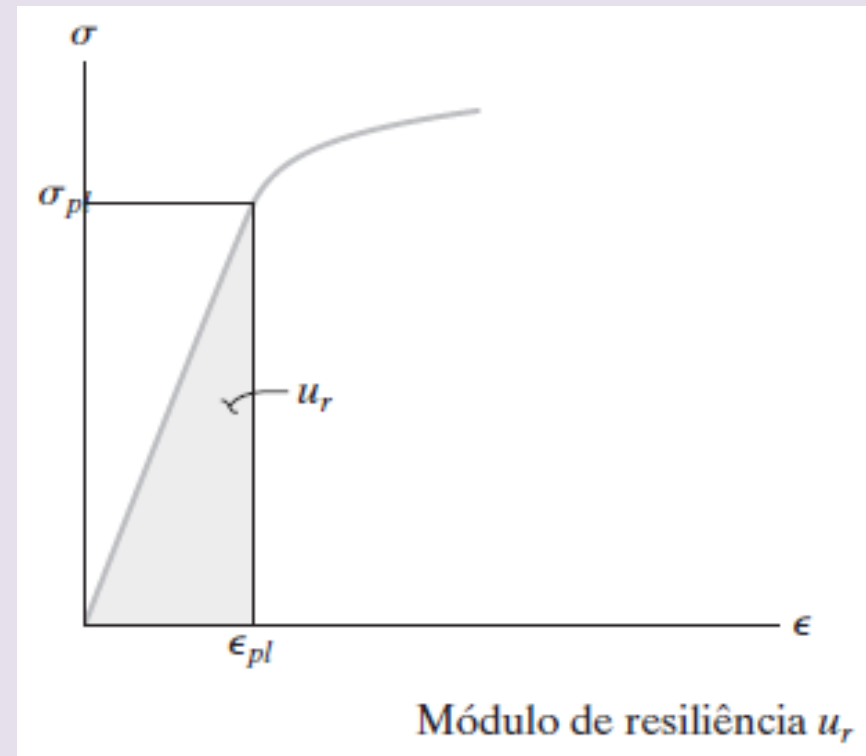
Energia de deformação

- 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

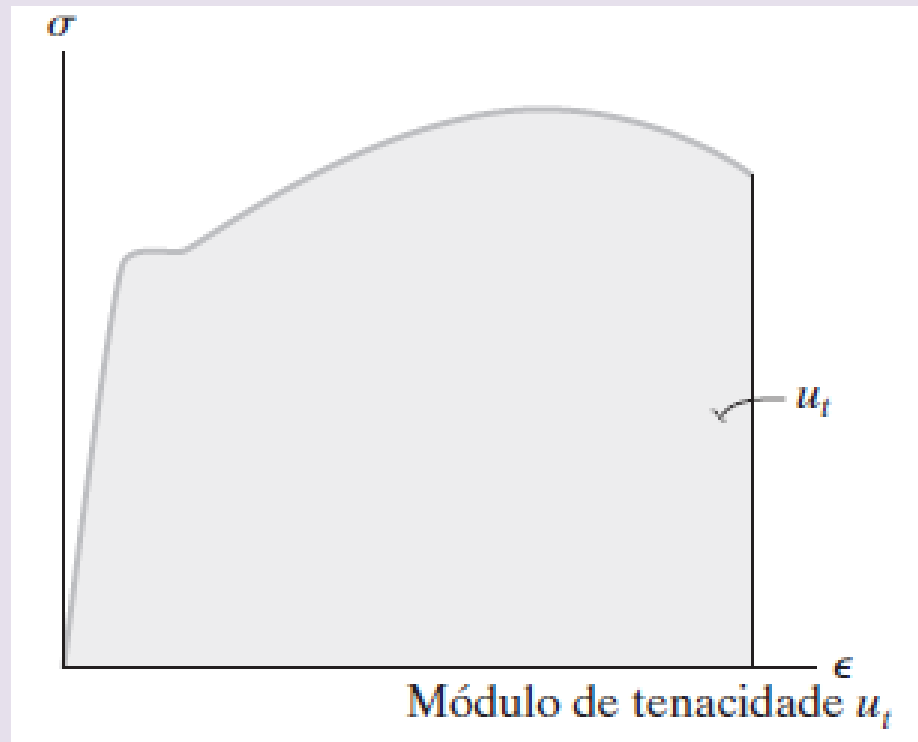
- Quando a tensão atinge o limite de proporcionalidade elástico, a densidade da energia de deformação é denominada **módulo de resiliência, u_r** .

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



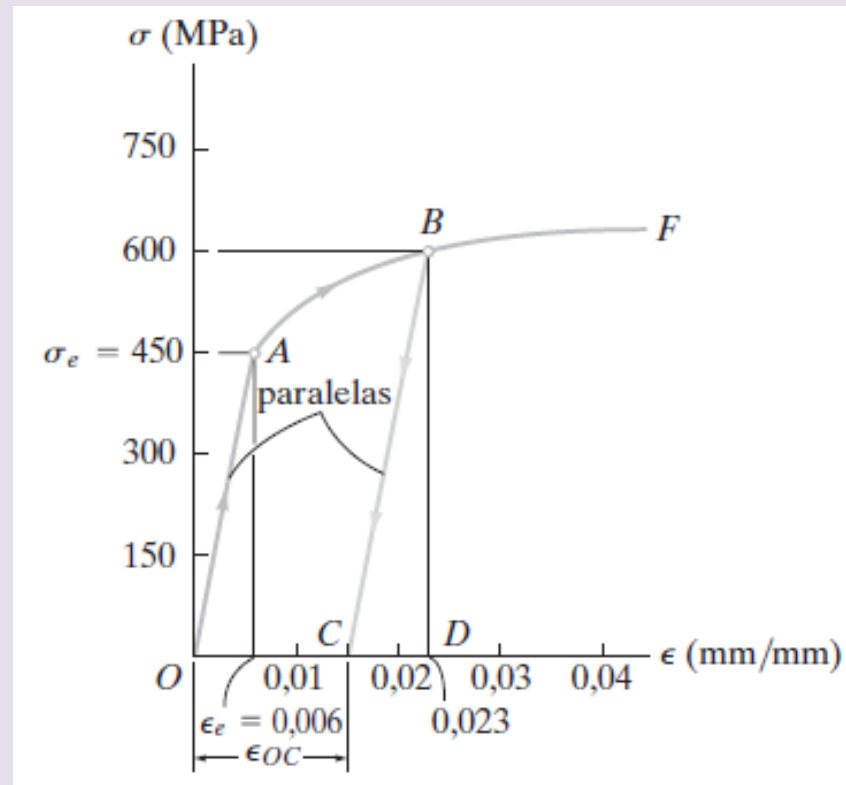
Módulo de tenacidade

- **Módulo de tenacidade**, 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.



Exemplo 1

O diagrama tensão-deformação para uma liga de alumínio utilizada na fabricação de peças de aeronaves é mostrado abaixo. 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.



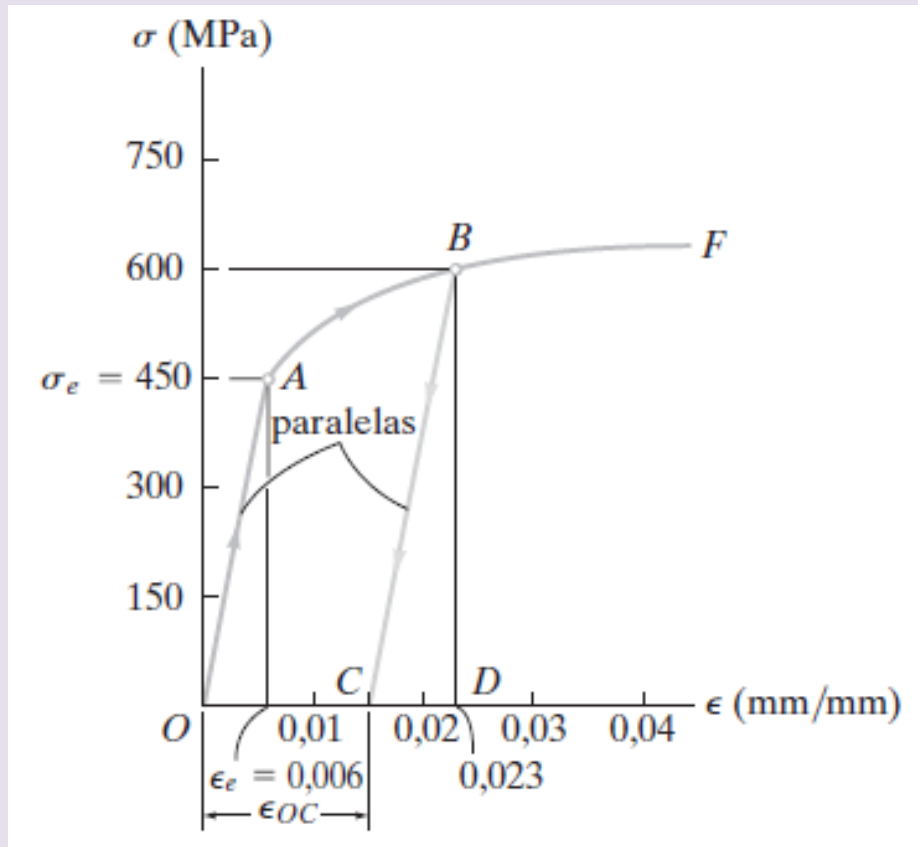
Solução:

Quando o corpo de prova é submetido à carga, endurece até atingir o ponto B, onde a deformação é aproximadamente 0,023 mm/mm.

A inclinação da reta AO é o módulo de elasticidade, isto é, $E = \frac{450}{0,006} = 75,0 \text{ GPa}$

Pelo triângulo CBD , temos que

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



0,008 mm/mm representa a quantidade de *deformação elástica recuperada*.

Assim, a **deformação permanente** é

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

Calculando o **módulo de resiliência** (área),

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

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

Note que no sistema SI, o trabalho é medido em joules, onde $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$.

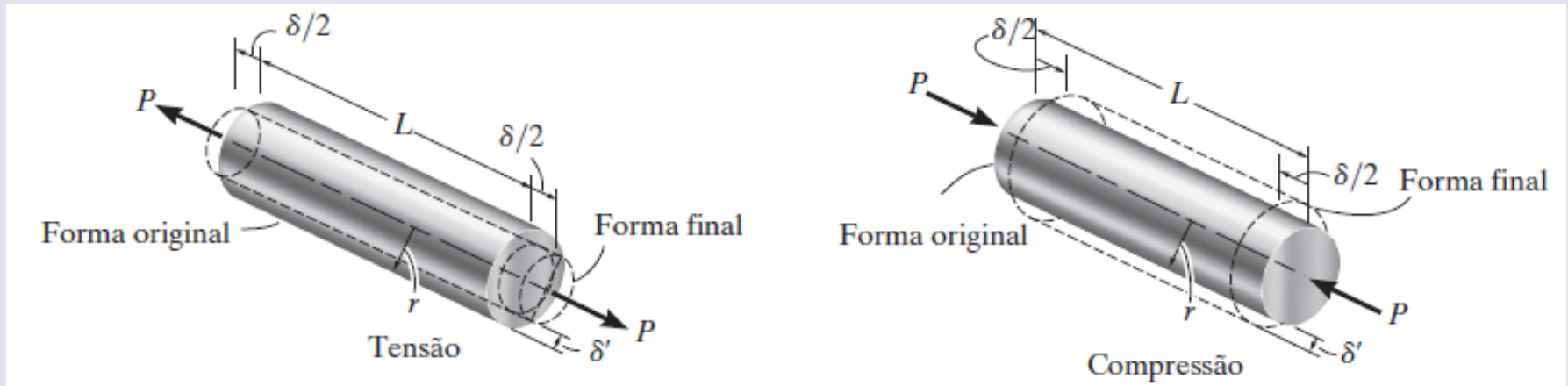
Coeficiente de Poisson

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

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

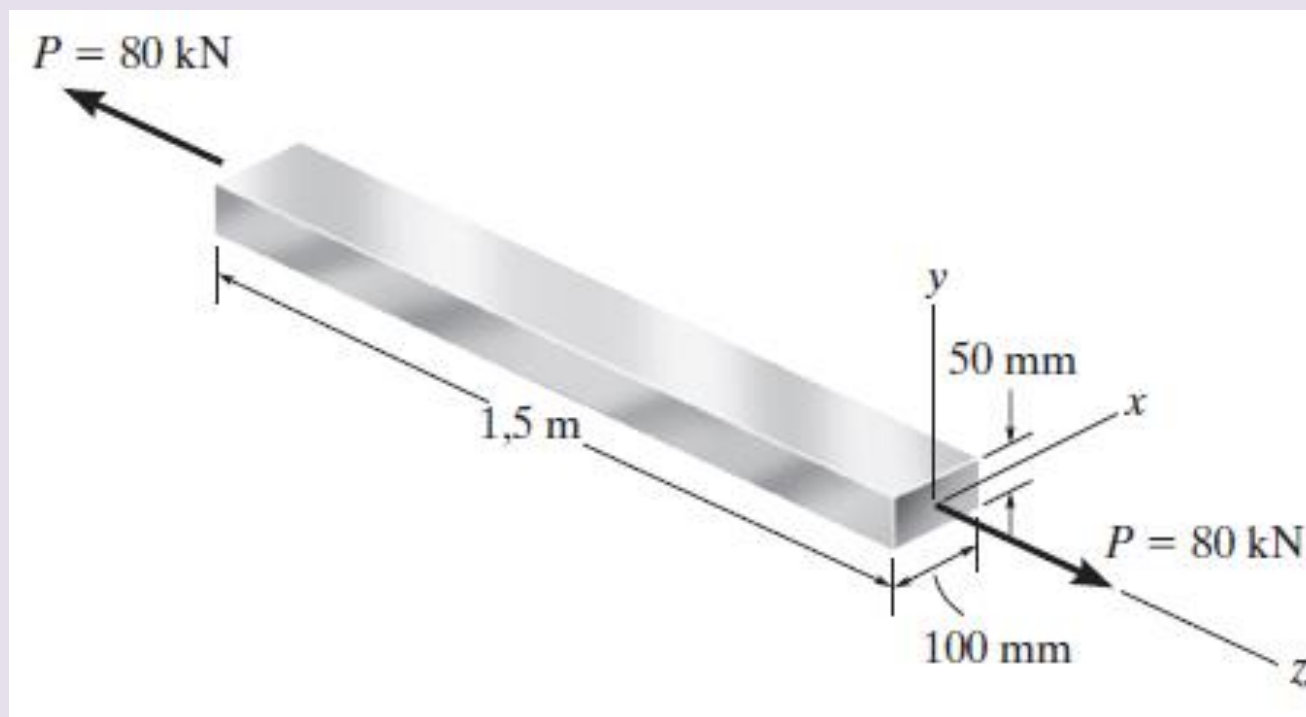
- A expressão acima tem sinal negativo porque o *alongamento longitudinal* (deformação positiva) provoca *contração lateral* (deformação negativa) e vice-versa.

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



Exemplo 2

Uma barra de **aço A-36** ($E_{\text{aço}} = 200 \text{ GPa}$) tem as dimensões mostradas abaixo. Se uma força axial $P = 80 \text{ kN}$ 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.



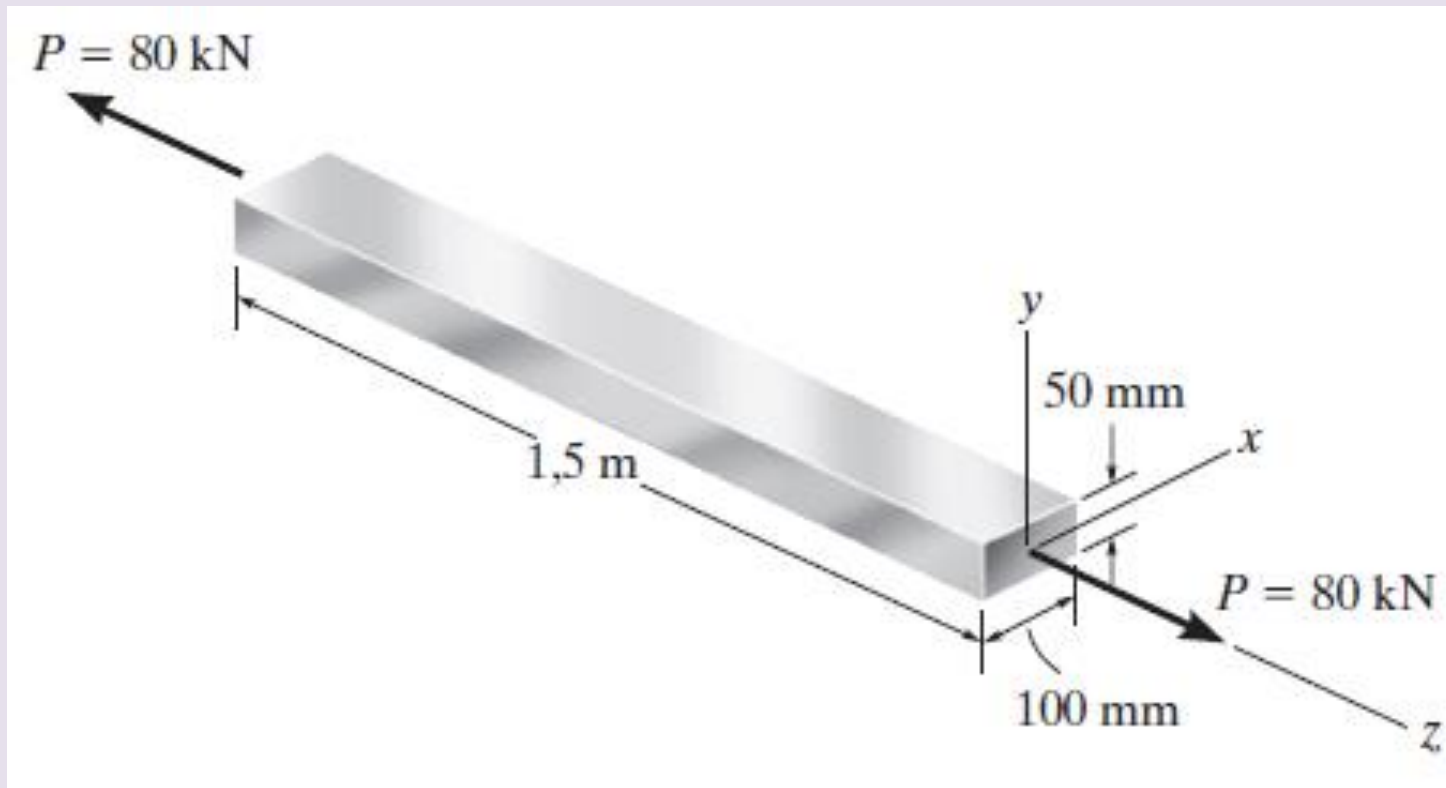
Solução:

A tensão normal na barra é

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

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

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



O alongamento axial da barra é, portanto,

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

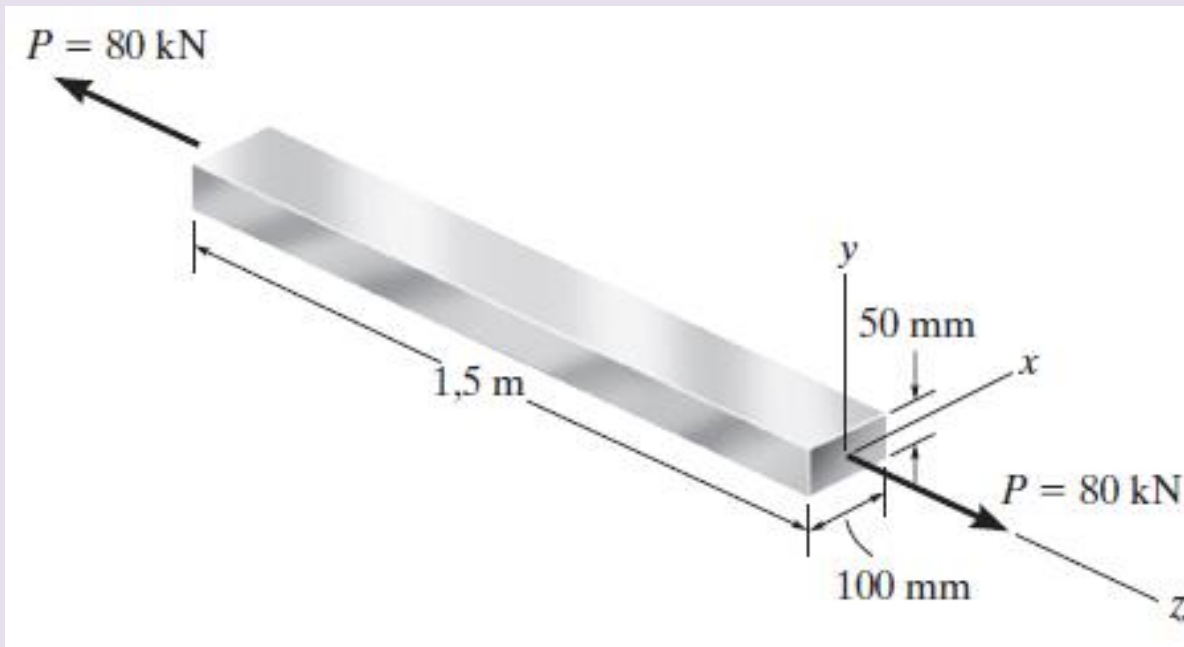
As deformações por contração em *ambas* as direções x e y são

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

Assim, as mudanças nas dimensões da seção transversal são

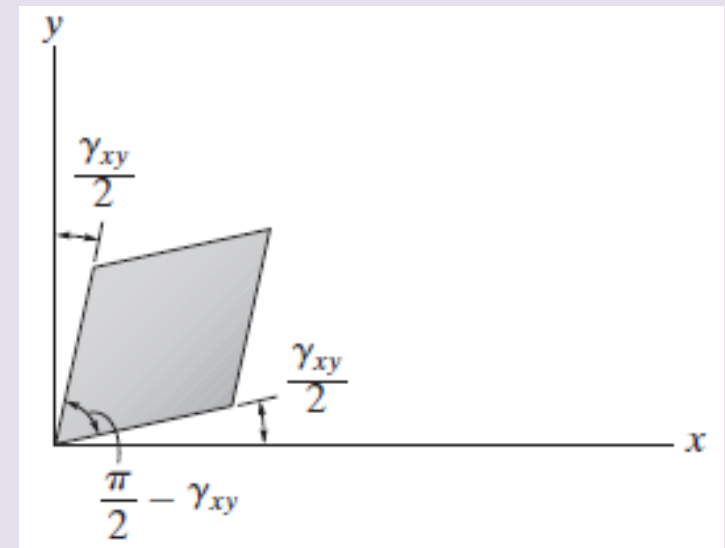
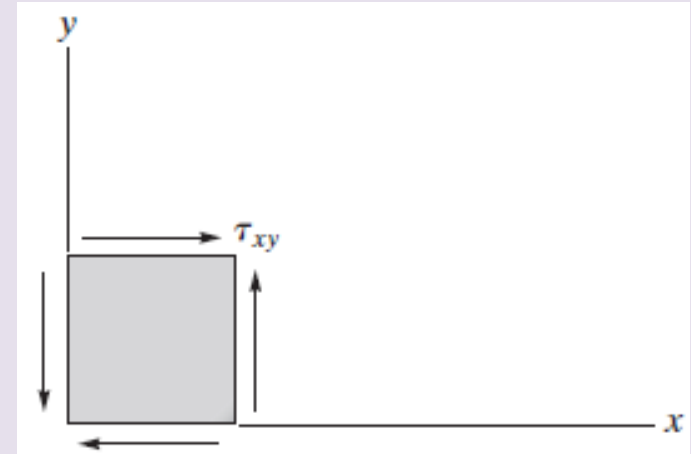
$$\delta_x = \varepsilon_x L_x = -[25,6(10^{-6})(0,1)] = -2,56 \mu\text{m} \text{ (Resposta)}$$

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



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**.



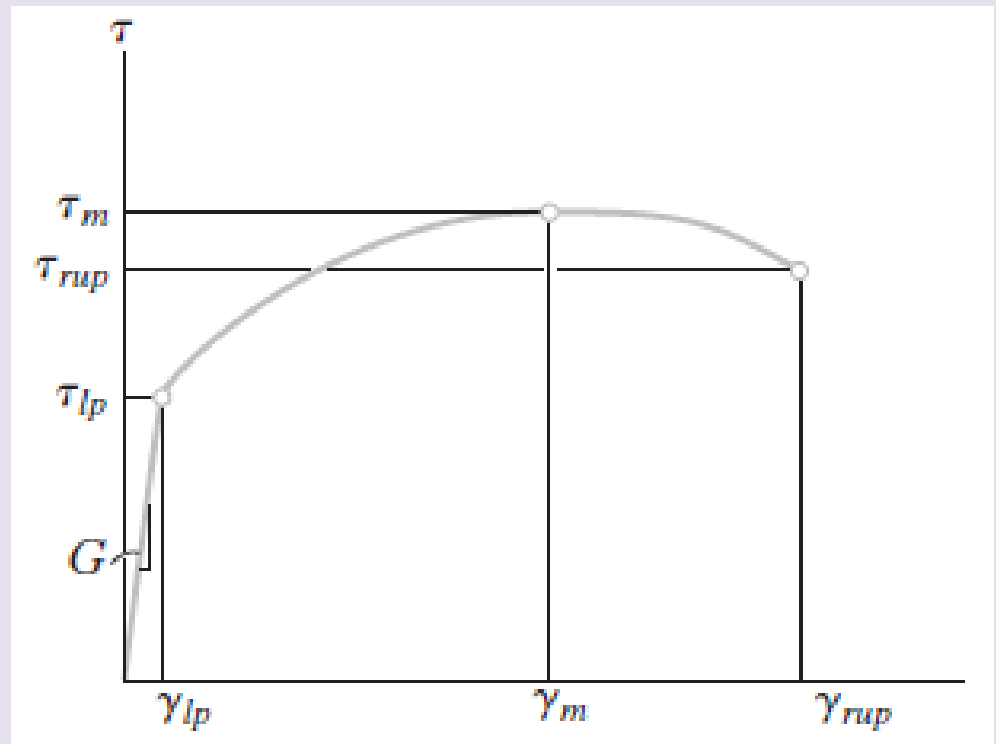
- A maioria dos materiais na engenharia apresenta comportamento elástico *linear*, portanto a lei de Hooke para cisalhamento pode ser expressa por

$$\tau = G\gamma \quad \gamma = \text{deformação de cisalhamento}$$

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

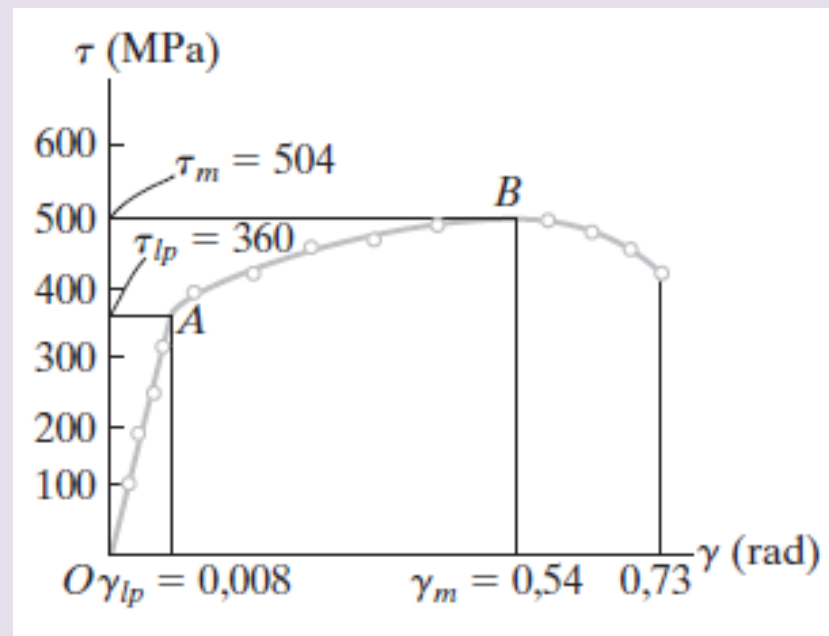
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

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



Exemplo 3

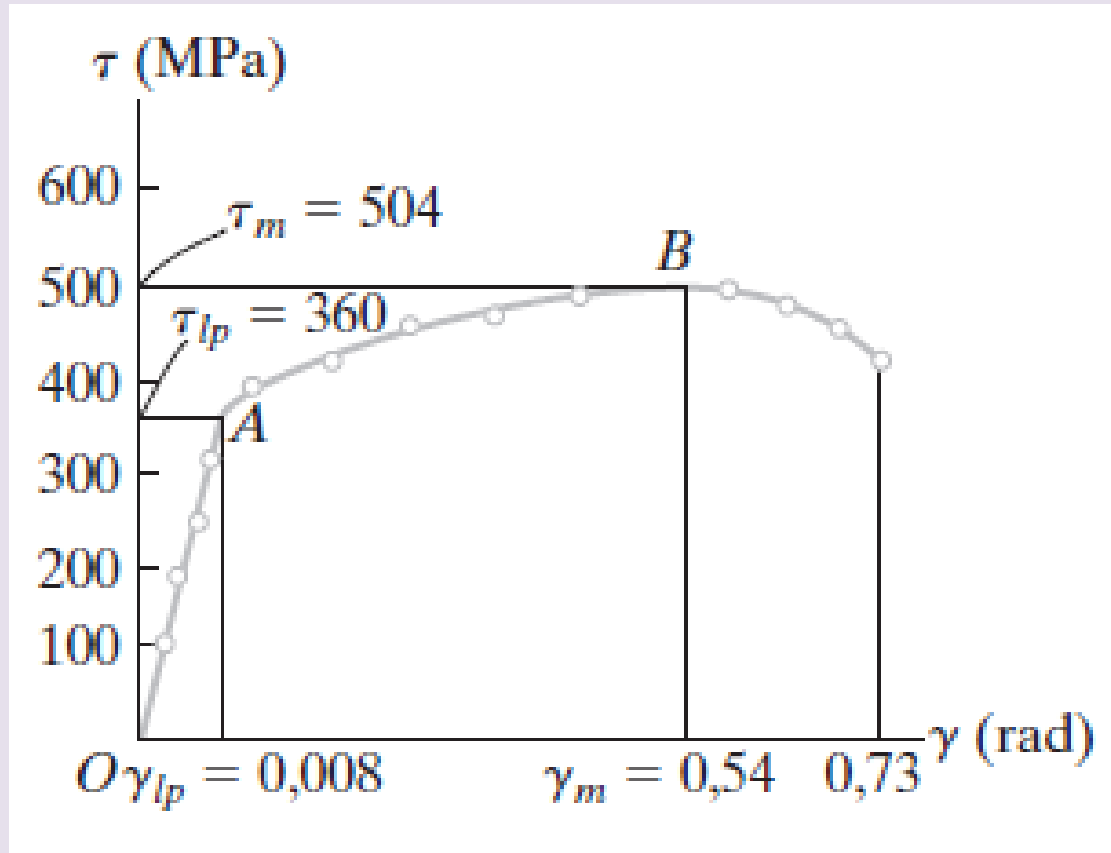
Um corpo de liga de titânio é testado em torção e o diagrama tensão-deformação de cisalhamento é mostrado na figura abaixo. Determine o **módulo de cisalhamento G** , o **limite de proporcionalidade** e o **limite de resistência** ao cisalhamento. Determine também a **máxima distância d** de deslocamento 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 da força de cisalhamento V** necessária para causar esse deslocamento?



Solução:

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

Assim, o módulo de cisalhamento é $G = \frac{360}{0,008} = 45(10^3) \text{ MPa}$ (Resposta)



Por inspeção, o gráfico deixa de ser linear no ponto *A*. Assim, o **limite de proporcionalidade** é

$$\tau_{lp} = 360 \text{ MPa (Resposta)}$$

O limite de resistência representa a tensão de cisalhamento máxima (ponto *B*).

Assim, o **limite de resistência** é

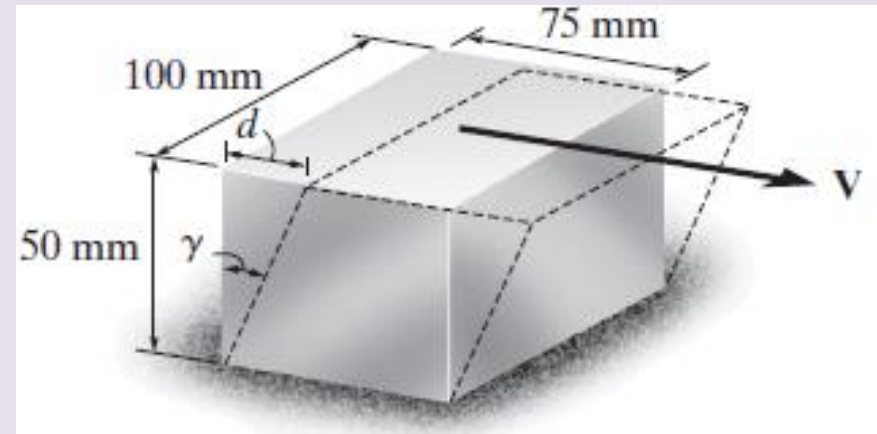
$$\tau_m = 504 \text{ MPa (Resposta)}$$

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 força de cisalhamento *V* necessária para causar o deslocamento é:

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



Exercícios

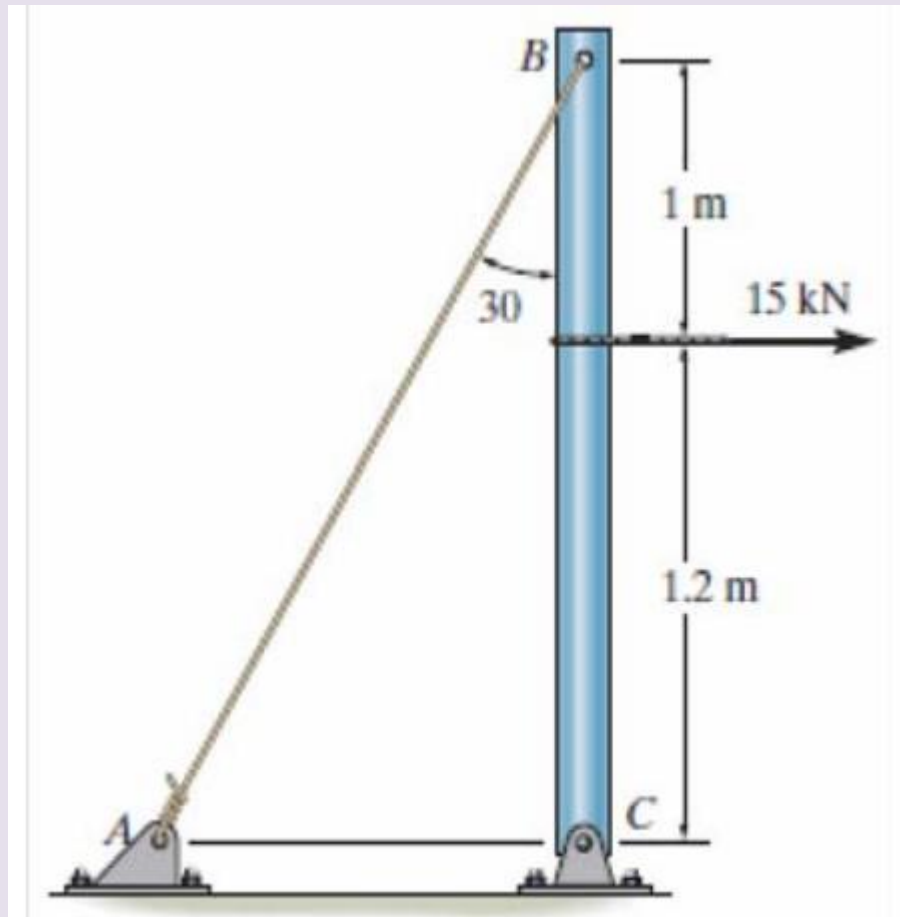
1. Os dados originais de um ensaio de tensão deformação para um material cerâmico são dados na tabela. A curva é linear entre a origem e o primeiro ponto. Represente o diagrama em um gráfico e determine o módulo de elasticidade e o módulo de resiliência. (3.2)

	$\sigma = P/A$ (MPa)	$\epsilon = \delta/L$ (mm/mm)
$\sigma :=$	0.0	0.0000
	232.4	0.0006
	318.5	0.0010
	345.8	0.0014
	360.5	0.0018
	373.8	0.0022

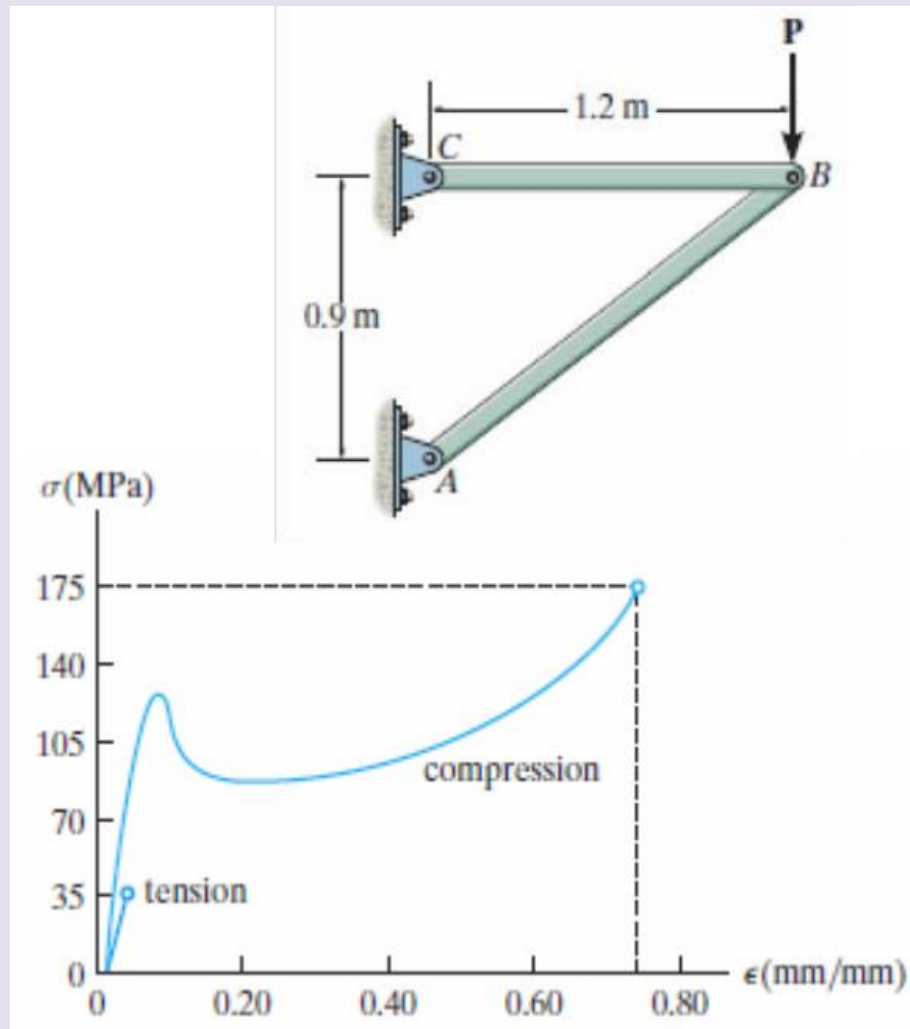
2. Um corpo de prova de aço com diâmetro original de 13 mm e 50 mm de comprimento de referência foi submetido a um ensaio de tração. Os dados resultantes são apresentados na tabela. Construa o gráfico do diagrama tensão-deformação e determine os valores aproximados do módulo de elasticidade, da tensão de escoamento, do limite de resistência e da tensão de ruptura. Use uma escala de 10 mm = 209 Mpa e 10 mm = 0,05 mm/mm. Desenhe novamente a região elástica usando a mesma escala de tensão, mas use uma escala de deformação de 10 mm = 0,001 mm/mm (3.4)

	Load (kN)	Elongation (mm)
P :=	0.0	0.0000
	7.5	0.0125
	23.0	0.0375
	40.0	0.0625
	55.0	0.0875
	59.0	0.1250
	59.0	0.2000
	60.0	0.5000
	83.0	1.0000
	100.0	2.5000
	107.5	7.0000
	97.5	10.0000
	92.5	11.5000

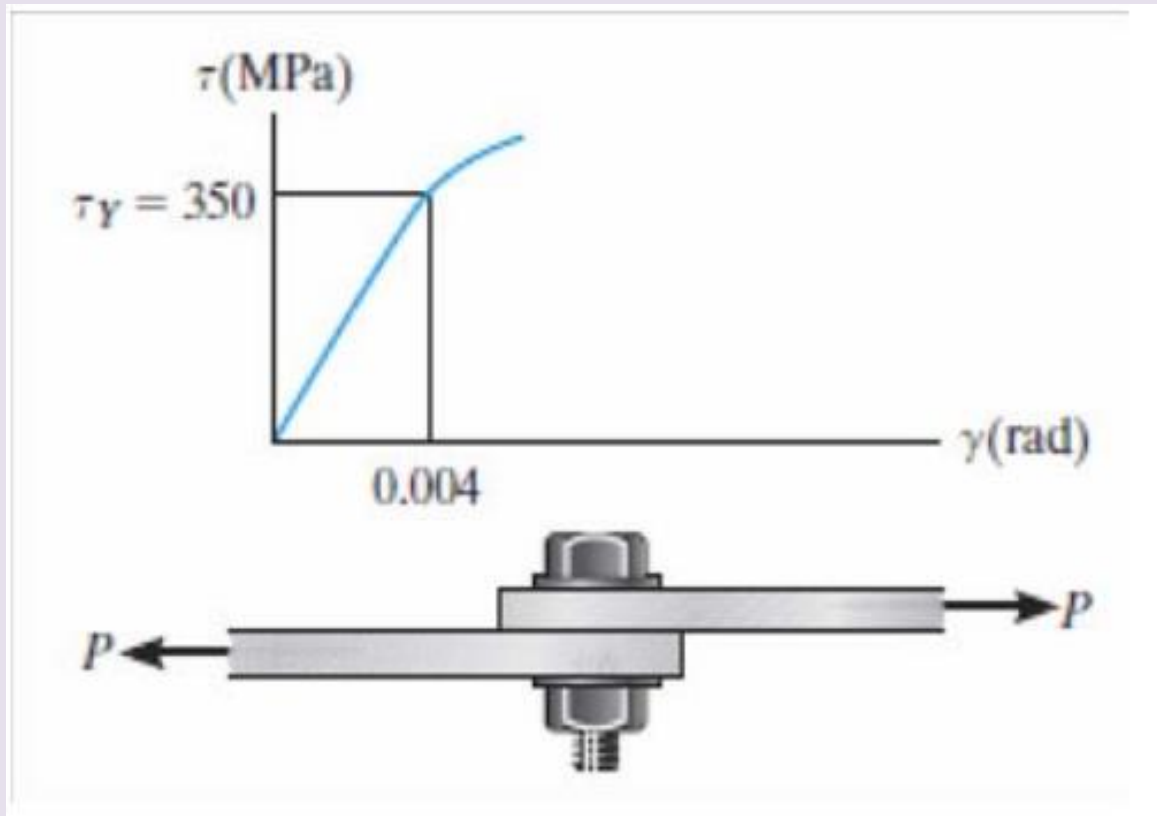
3. O poste é sustentado por um pino em C e por um arame de ancoragem AB de aço A-36 (ver dados deste aço na tabela do livro). Se o diâmetro do arame for 5mm, determine quanto ele se deforma quando uma carga horizontal de 15 kN agir sobre o poste (3.16)



4. A figura mostra o diagrama tensão-deformação para duas barras de poliestireno. Se a área da seção transversal da barra AB for 950 mm^2 e a de BC for 2.500 mm^2 determine a maior força P que pode ser suportada antes que qualquer dos elementos sofra ruptura. Considere que não ocorre nenhuma flambagem (3.19)



5. A figura mostra o diagrama T-D de cisalhamento para um aço-liga. Se um parafuso de 6 mm de diâmetro feito desse material for utilizado em uma junta sobreposta, determine o módulo de elasticidade E e a força P exigida para provocar o escoamento do material. Considere $\nu = 0,3$ (3.31)



6. O tubo rígido é sustentado por um pino em C e um cabo de ancoragem AB de aço A36. Se o diâmetro do cabo for 5 mm, determine a carga P se a extremidade B for deslocada 2,5 mm para a direita (3.39)

