

UNIDADE 9 Propriedades Mecânicas I

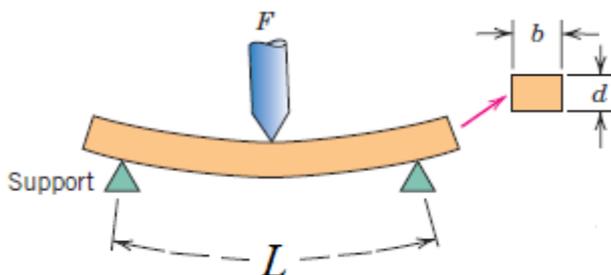
1. Fios de aço carbono com área de seção transversal nominal de $62,9 \text{ mm}^2$ são utilizados para a fabricação de peças pré-moldadas de concreto protendido. Nessas peças, a armação de fios de aço é pré-tensionada (tração) antes de ser imersa na matriz de concreto. Depois que o concreto é adicionado e endurece, a tensão na armação de aço é relaxada; o aço sofre recuperação elástica e comprime o sistema todo, o que aumenta a resistência mecânica do conjunto, pois mantém o concreto sob um esforço de compressão. O valor do módulo de elasticidade desse aço é 200 GPa. Assumindo que esses fios de aço sofreram uma deformação elástica de 1% quando foram pré-tensionados, qual foi a força (em newtons) à qual eles foram submetidos no processo de pré-tensionamento?

2. Um pedaço de arame recozido de aço baixo carbono tem 2 mm de diâmetro, limite de escoamento 210 MPa e módulo de elasticidade 207 GPa.

Pergunta-se:

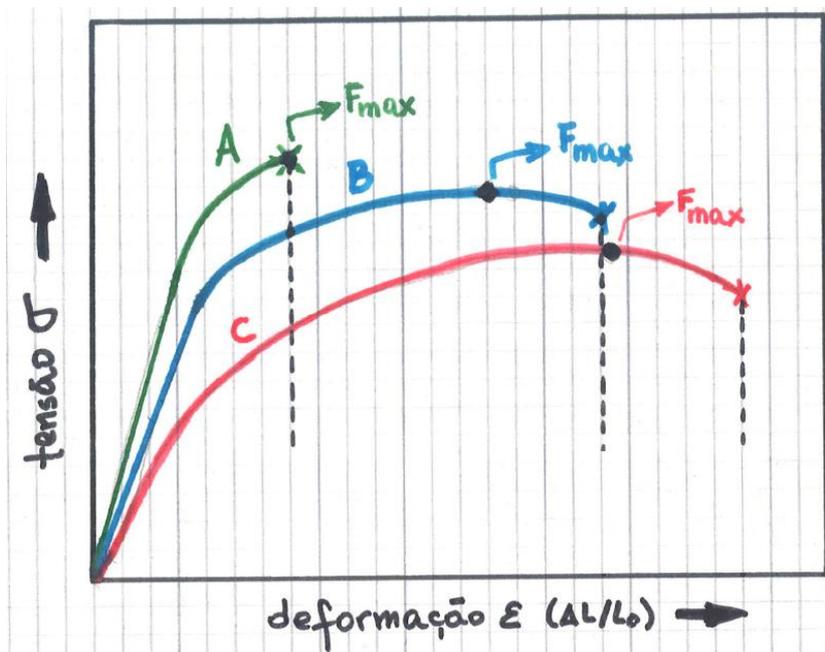
- Se uma garota de 54 kg se dependura neste arame, ocorrerá deformação plástica no arame?
- Se for possível com os dados disponíveis no problema, calcule o alongamento porcentual do arame com a garota dependurada.
- O que aconteceria se o arame fosse de cobre (limite de escoamento = 70 MPa e módulo de elasticidade = 115 GPa) ?

3. Um ensaio de flexão de três pontos foi realizado num corpo de prova de vidro de seção transversal retangular de 50 mm de comprimento, largura 10 mm e espessura 5 cm. A distância entre cada um dos pontos de apoio inferiores é de 45 mm. Assumindo que não aconteceu deformação plástica ao longo de todo o ensaio, e que o corpo rompeu quando uma carga de 290 N foi aplicada, qual é valor da tensão de ruptura à flexão para esse vidro?



$$\sigma = \frac{3 F L}{2 b d^2}$$

4. Considere as curvas tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia para os três materiais (**A**, **B** e **C**) e responda as afirmativas com falso (**F**) ou verdadeiro (**V**).



- Os três materiais têm módulos de elasticidade idênticos. ()
- Os três materiais apresentam módulos de resiliência idênticos. ()
- O material **A** apresenta maior limite de escoamento do que **B** ou **C**. ()
- O material **C** apresenta maior limite de resistência do que **A** ou **B**. ()
- O material **C** apresenta maior alongamento uniforme do que **A** ou **B**. ()
- O material **A** apresenta menor alongamento total (ductilidade) do que o material **B**. ()
- Os materiais **B** e **C** tem maior tenacidade do que o material **A**. ()
- O material **A** é provavelmente mais duro do que **C**. ()
- Os três materiais (**A**, **B** e **C**) são provavelmente materiais cerâmicos. ()

5. Um corpo de prova cilíndrico de alumínio com diâmetro 12,8 mm e comprimento inicial de 50,8 mm é submetido a um ensaio de tração. Os resultados do ensaio de tração (que permitem a construção da curva tensão de engenharia–deformação de engenharia) são apresentados ao lado.

7.29 A cylindrical specimen of aluminum having a diameter of 0.505 in. (12.8 mm) and a gauge length of 2.000 in. (50.800 mm) is pulled in tension. Use the load–elongation characteristics shown in the following table to complete parts (a) through (f).

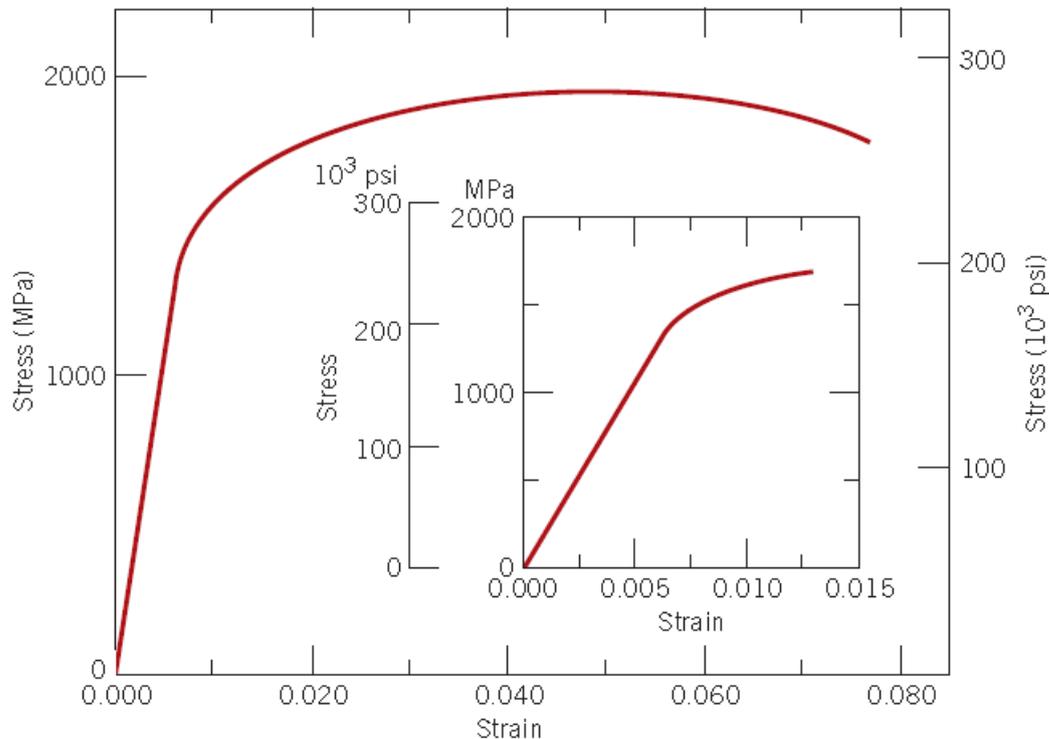
<i>Load</i>		<i>Length</i>	
<i>N</i>	<i>lb_f</i>	<i>mm</i>	<i>in.</i>
0	0	50.800	2.000
7,330	1,650	50.851	2.002
15,100	3,400	50.902	2.004
23,100	5,200	50.952	2.006
30,400	6,850	51.003	2.008
34,400	7,750	51.054	2.010
38,400	8,650	51.308	2.020
41,300	9,300	51.816	2.040
44,800	10,100	52.832	2.080
46,200	10,400	53.848	2.120
47,300	10,650	54.864	2.160
47,500	10,700	55.880	2.200
46,100	10,400	56.896	2.240
44,800	10,100	57.658	2.270
42,600	9,600	58.420	2.300
36,400	8,200	59.182	2.330
Fracture			

(dados retirados do livro de Callister, W.D. e Rethwisch, D.G *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 4th Ed.)

A partir desses resultados:

- construa a curva tensão de engenharia – deformação de engenharia;
- calcule o módulo de elasticidade;
- determine o limite de escoamento, a partir de uma deformação de engenharia 0,002;
- determine o limite de resistência do material;
- determine aproximadamente a ductilidade, expressa em porcentagem de alongamento;
- estime a tenacidade e o módulo de resiliência.

6. Considere um corpo de prova cilíndrico de um aço (curva tensão de engenharia – deformação de engenharia apresentada abaixo) de 8,5 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento que é submetido ao ensaio de tração. Determine seu alongamento quando uma carga de 65.250 N for aplicada

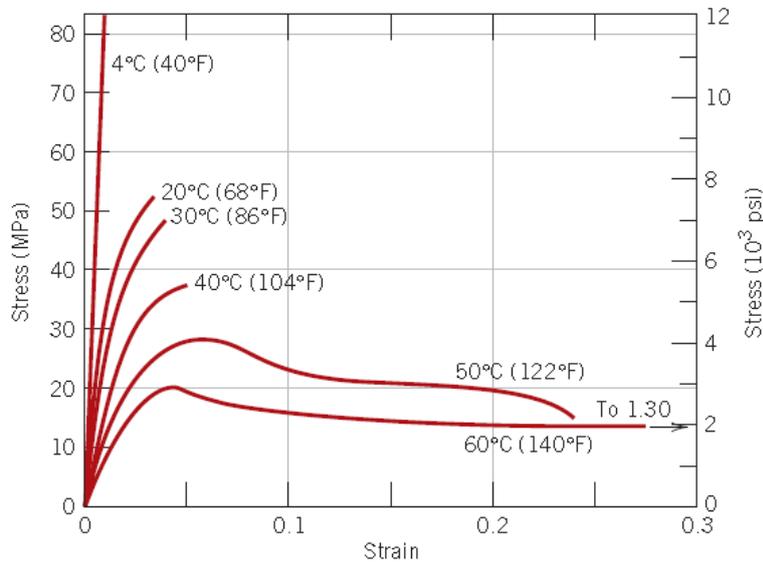


7. Usando a mesma do exercício 6, que mostra o comportamento tensão de engenharia-deformação de engenharia durante o ensaio de tração de um aço, responda:

- Qual é o valor do módulo de elasticidade (*elasticity modulus ou Young modulus*) da liga?
- Qual é o valor do limite de proporcionalidade (*proportional limit*)?
- Qual é o valor do limite de escoamento (*yield strength*) para deformação de engenharia = 0,002 (ou 0,2%)?
- Qual é o valor do limite de resistência à tração (*tensile strength*)?

8. Um corpo de prova cilíndrico (*seção transversal circular*) de MgO foi submetida a um ensaio de flexão em três pontos. Calcular o raio mínimo possível que a seção transversal da amostra deve apresentar para que não ocorra fratura, quando submetida a uma força de 5560 N. Dados: a amostra possui resistência à flexão de 105 MPa e a separação entre pontos de apoio no ensaio de três pontos é de 45 mm.

9. A partir da curva tensão de engenharia-deformação de engenharia do poli(metacrilato de metila) mostrada na figura abaixo, determine o módulo de elasticidade e o limite de resistência à tração (*Tensile Strength*) à temperatura ambiente e compare com os valores fornecidos na Tabela abaixo. Depois, determine o valor aproximado do limite de escoamento - *Yield Strength* a 60°C.



Curvas tensão-deformação para o PMMA.

Propriedades Mecânicas de materiais poliméricos a temperatura ambiente.

<i>Material</i>	<i>Specific Gravity</i>	<i>Tensile Modulus [GPa (ksi)]</i>	<i>Tensile Strength [MPa (ksi)]</i>	<i>Yield Strength [MPa (ksi)]</i>	<i>Elongation at Break (%)</i>
Polyethylene (low density)	0.917–0.932	0.17–0.28 (25–41)	8.3–31.4 (1.2–4.55)	9.0–14.5 (1.3–2.1)	100–650
Polyethylene (high density)	0.952–0.965	1.06–1.09 (155–158)	22.1–31.0 (3.2–4.5)	26.2–33.1 (3.8–4.8)	10–1200
Poly(vinyl chloride)	1.30–1.58	2.4–4.1 (350–600)	40.7–51.7 (5.9–7.5)	40.7–44.8 (5.9–6.5)	40–80
Polytetrafluoroethylene	2.14–2.20	0.40–0.55 (58–80)	20.7–34.5 (3.0–5.0)	—	200–400
Polypropylene	0.90–0.91	1.14–1.55 (165–225)	31–41.4 (4.5–6.0)	31.0–37.2 (4.5–5.4)	100–600
Polystyrene	1.04–1.05	2.28–3.28 (330–475)	35.9–51.7 (5.2–7.5)	—	1.2–2.5
Poly(methyl methacrylate)	1.17–1.20	2.24–3.24 (325–470)	48.3–72.4 (7.0–10.5)	53.8–73.1 (7.8–10.6)	2.0–5.5
Phenol-formaldehyde	1.24–1.32	2.76–4.83 (400–700)	34.5–62.1 (5.0–9.0)	—	1.5–2.0
Nylon 6,6	1.13–1.15	1.58–3.80 (230–550)	75.9–94.5 (11.0–13.7)	44.8–82.8 (6.5–12)	15–300
Polyester (PET)	1.29–1.40	2.8–4.1 (400–600)	48.3–72.4 (7.0–10.5)	59.3 (8.6)	30–300
Polycarbonate	1.20	2.38 (345)	62.8–72.4 (9.1–10.5)	62.1 (9.0)	110–150

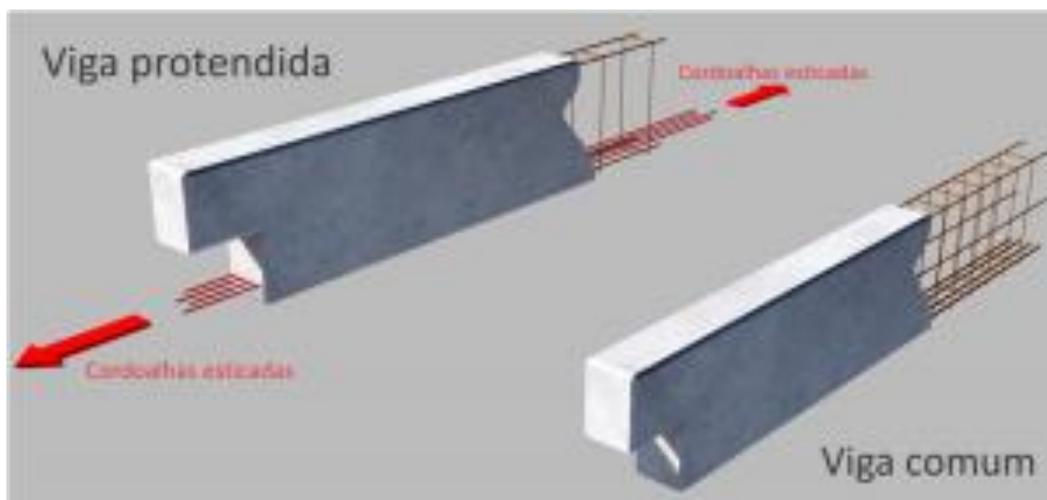
Source: *Modern Plastics Encyclopedia '96*. Copyright 1995, The McGraw-Hill Companies. Reprinted with permission.

GABARITO

UNIDADE 9 Propriedades Mecânicas I

1. Fios de aço carbono com área de seção transversal nominal de $62,9 \text{ mm}^2$ são utilizados para a fabricação de peças pré-moldadas de concreto protendido. Nessa peças, a armação de fios de aço é pré-tensionada (tração) antes de ser imersa na matriz de concreto. Depois que o concreto é adicionado e endurece, a tensão na armação de aço é retirada, o aço sofre recuperação elástica e comprime o sistema todo, o que aumenta a resistência mecânica do conjunto pois mantém o concreto sob um esforço de compressão. O valor do módulo de elasticidade desse aço é 200 GPa. Assumindo que esses fios de aço sofreram uma deformação elástica de 1% quando foram pré-tensionados, qual foi a força (em newtons) à qual eles foram submetidos no processo de pré-tensionamento?

Abaixo é apresentado um esquema de uma viga protendida, na qual são colocados fios de aço (denominados “cordoalha”, na figura), que são tensionados por tração.



O módulo de elasticidade é dado ($E=200 \text{ GPa}$), e a deformação também é conhecida (1% de deformação, que corresponde a uma deformação $\varepsilon = 0,01 \text{ mm/mm}$).

Como é dito que os fios de aço são tracionados dentro da região de deformações elásticas, vale a relação abaixo:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = 200 \text{ GPa} \cdot 0,01 = 2 \text{ GPa} = 2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

Assumiremos, idealmente, que a tensão de tração é aplicada de forma perfeitamente perpendicular à seção transversal dos fios de aço. A tensão é igual, portanto, à força aplicada dividida pela área da seção transversal dos fios.

Assim sendo:

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

$$2 \times 10^9 \text{ N/m}^2 = \frac{F}{62,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2}$$

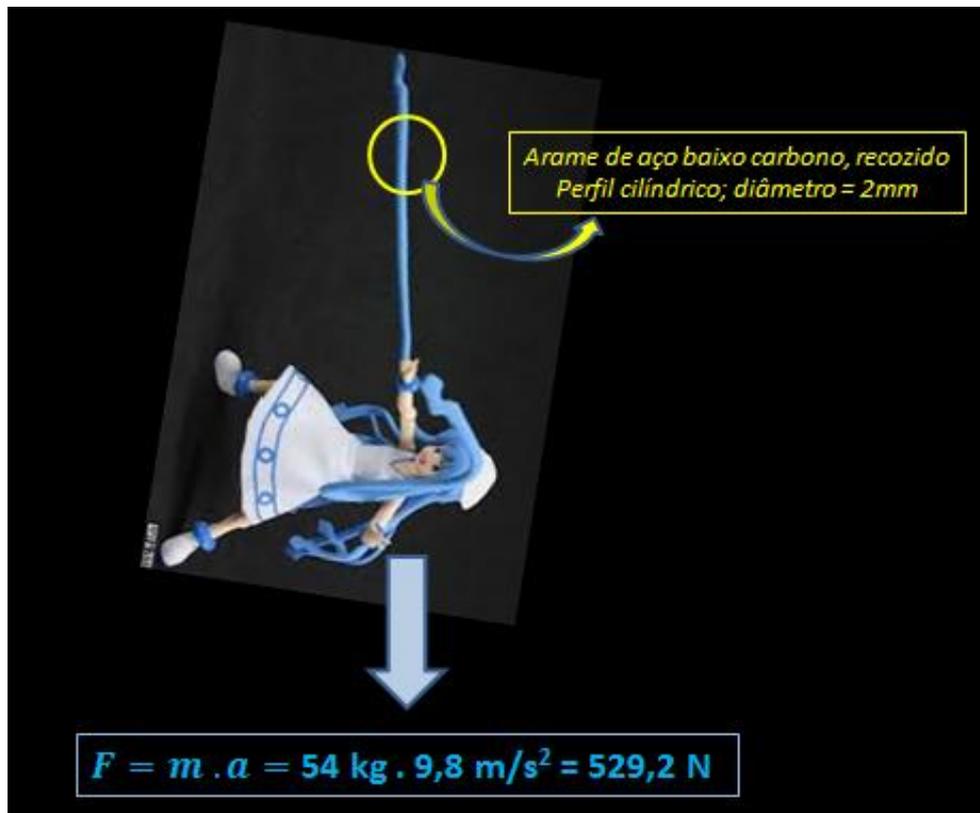
$$F = 125,8 \times 10^3 \text{ N} = 125,8 \text{ kN}$$

2. Um pedaço de arame recozido de aço baixo carbono tem 2 mm de diâmetro, limite de escoamento 210 MPa e módulo de elasticidade 207 GPa.

Pergunta-se:

- Se uma garota de 54 kg se dependura neste arame, ocorrerá deformação plástica no arame?
- Se for possível com os dados disponíveis no problema, calcule o alongamento porcentual do arame com a garota dependurada.
- O que aconteceria se o arame fosse de cobre (limite de escoamento = 70 MPa e módulo de elasticidade = 115 GPa) ?

2a



Sabe-se que o arame tem perfil cilíndrico, e diâmetro 2 mm (e, portanto, raio = 1 mm). Podemos, portanto, calcular a área da seção transversal A e a tensão σ à qual o fio está submetido:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{529,2 \text{ N}}{\pi \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 168,4 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 168,4 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 168,4 \text{ MPa}$$

2b

Como a **solicitação no fio** (168,4 MPa) é **inferior ao limite de escoamento** (210 MPa), ocorrerá **apenas deformação elástica** e, portanto, é possível calcular o alongamento porcentual que ocorrerá no fio.

Para a deformação elástica, vale a relação $\sigma = E \cdot \varepsilon$, onde E é o **módulo de elasticidade**.

Assim:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{168,4 \text{ MPa}}{207 \text{ GPa}} = 0,000814$$

Como o exercício pelo o alongamento porcentual, basta multiplicar o valor acima por 100, e teremos:

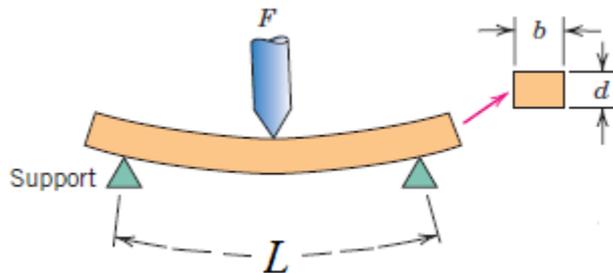
$$\varepsilon = \mathbf{0,0814 \%}$$

2c

Se o arame tivesse o mesmo diâmetro e fosse feito de cobre, como o **limite de escoamento do cobre** (70 MPa) é **inferior à tensão à qual o fio é submetido** (168,4 MPa), haveria deformação elástica seguida de **deformação plástica**.

Nesse caso, somente com os dados disponíveis, não seria possível calcular o alongamento porcentual que ocorrerá no fio, porque a deformação não é mais puramente elástica.

3. Um ensaio de flexão de três pontos foi realizado num corpo de prova de vidro de seção transversal retangular de 50 mm de comprimento, largura 10 mm e espessura 5 mm. A distância entre cada um dos pontos de apoio inferiores é de 45 mm. Assumindo que não aconteceu deformação plástica ao longo de todo o ensaio, e que o corpo rompeu quando uma carga de 290 N foi aplicada, qual é valor da tensão de ruptura à flexão para esse vidro?



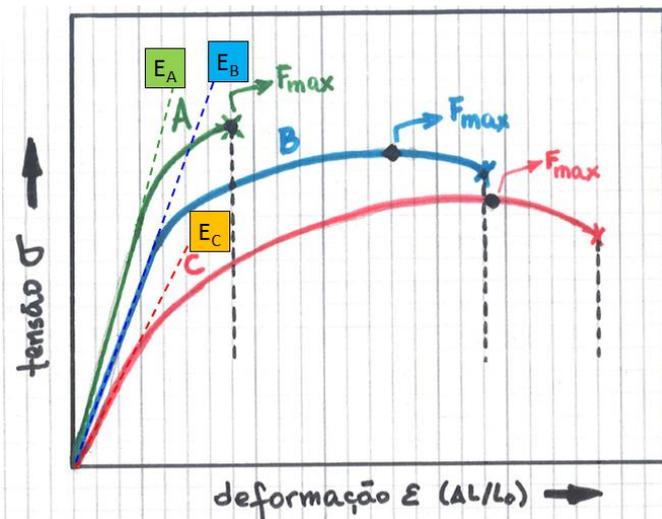
$$\sigma = \frac{3 F L}{2 b d^2}$$

A resolução do exercício passa simplesmente pela aplicação da fórmula apresentada acima, que permite o cálculo da tensão de ruptura à flexão para um corpo com perfil retangular:

$$\sigma = \frac{3 F L}{2 b d^2} = \frac{3 \times 290 \times 0,045}{2 \times 0,01 \times 0,005^2} = 78,3 \text{ MPa}$$

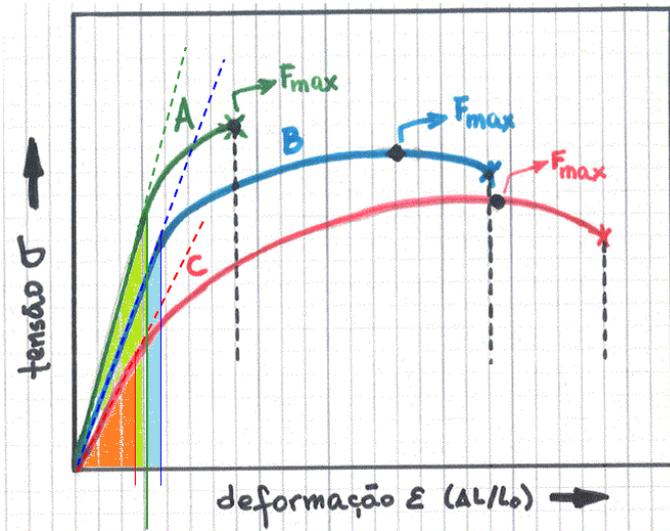
4. Considere as curvas tensão de engenharia versus deformação de engenharia para os três materiais (A, B e C) e responda as afirmativas com falso (F) ou verdadeiro (V).

a) Os três materiais têm módulos de elasticidade idênticos. (F)



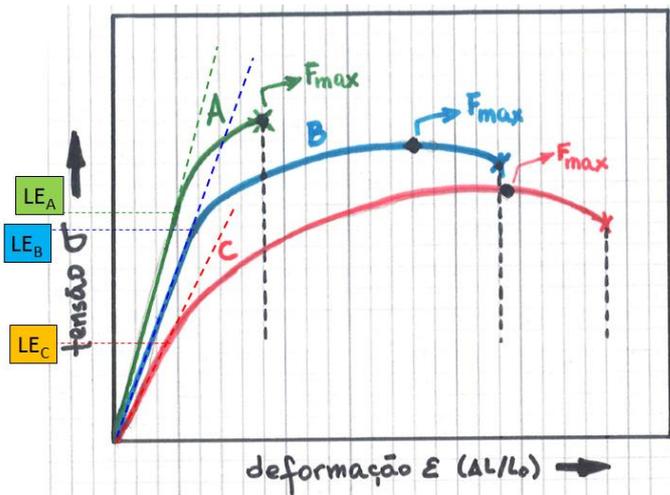
O **MÓDULO DE ELASTICIDADE** é dado pela inclinação da curva tensão-deformação na região onde a deformação é puramente elástica, ou seja, na faixa de valores pequenos de ϵ . Observando a figura, é evidente que as inclinações das curvas A, B e C são diferentes (na ordem decrescente: $A > B > C$), o que indica que os módulos de elasticidade são diferentes, e apresentam a mesma ordem: $E_A > E_B > E_C$.

b) Os três materiais apresentam módulos de resiliência idênticos. (F)



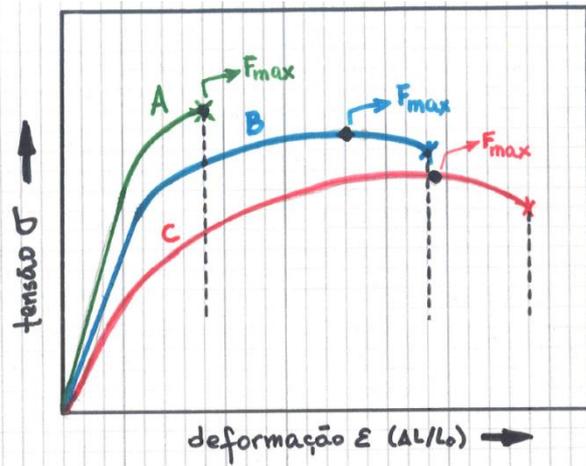
O **MÓDULO DE RESILIÊNCIA** é dado pela área abaixo da curva tensão-deformação na região onde a deformação é puramente elástica → ele representa o quanto qual é a energia que o sólido é capaz de absorver deformando-se de forma puramente elástica. Observando a figura, é evidente que esses valores são diferentes. A ordem dos módulos de resiliência, segundo a figura, é a seguinte: $MR_B \approx MR_A > MR_C$.

c) O material A apresenta maior limite de escoamento do que B ou C. (V)



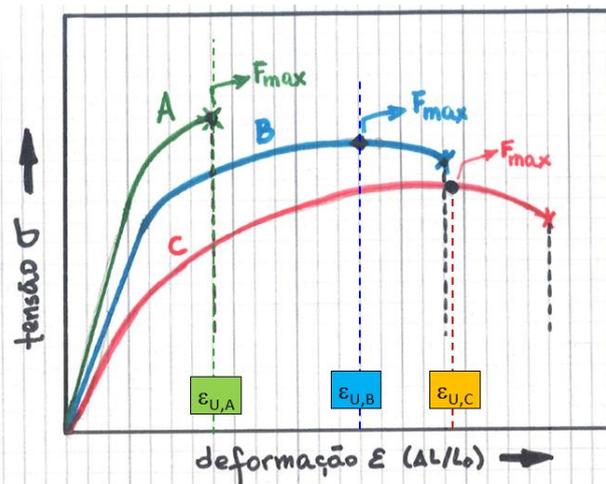
O **LIMITE DE ESCOAMENTO** é definido a partir da tensão a partir da qual a deformação não é mais puramente elástica → acima dessa tensão, chamada limite de proporcionalidade, já ocorre deformação plástica. No entanto, na prática, muitas vezes, é difícil definir o limite de proporcionalidade com precisão, e em consequência geralmente se define uma **tensão limite de escoamento (LE)** como sendo a tensão necessária para se produzir uma pequena quantidade de deformação plástica. Observando a figura, é evidente que o valor do limite de escoamento do material A é o maior. A ordem dos limites de escoamento, segundo a figura, é a seguinte: $LE_A > LE_B > LE_C$.

d) O material C apresenta maior limite de resistência do que A ou B. (F)



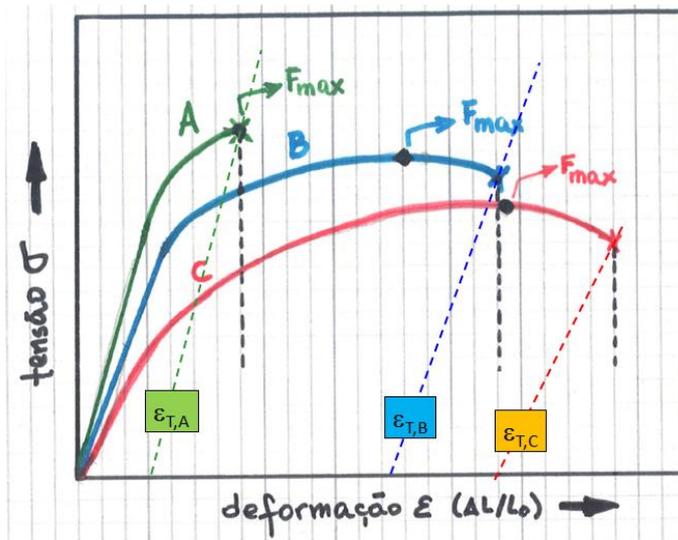
O LIMITE DE RESISTÊNCIA ou limite de resistência à tração (LR) é definido como sendo a tensão de engenharia máxima observada durante o ensaio de tração. Observando a figura, é evidente que os limites de resistência (indicados na figura como F_{max}) seguem a seguinte ordem: $LR_A > LR_B > LR_C$.

e) O material C apresenta maior alongamento uniforme do que A ou B. (V)



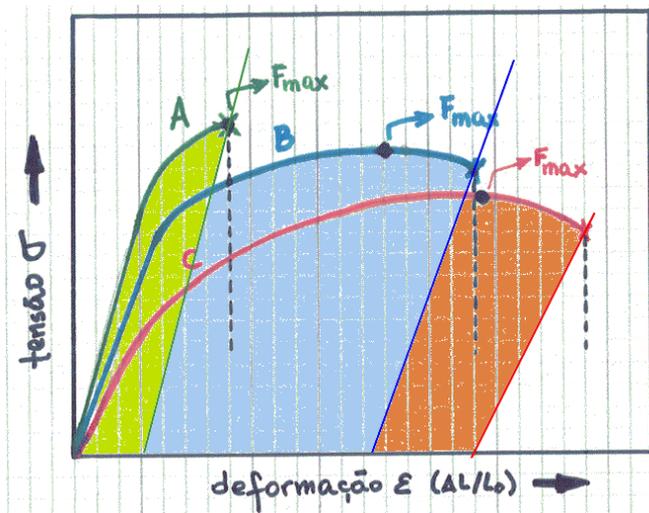
O valor máximo da tensão de engenharia no ensaio de tração (indicado por F_{max} na figura) corresponde à formação do empescoamento no corpo de prova. Isso corresponde ao máximo valor da deformação ϵ com alongamento uniforme (ϵ_U) \rightarrow deformações maiores que ϵ_U ocorrem com empescoamento (estricção). Observando a figura, é evidente que o valor de ϵ_U do material C é o maior. A ordem dos alongamentos uniformes, segundo a figura, é a seguinte: $\epsilon_{U,C} > \epsilon_{U,B} > \epsilon_{U,A}$.

f) O material A apresenta menor alongamento total (ductilidade) do que o material B. (V)



O **ALONGAMENTO TOTAL** é aquele que é observado das duas partes do corpo de prova depois da fratura e depois da recuperação elástica que ocorre nas duas partes do corpo de prova fraturado. Observando a figura, é evidente que o valor do alongamento total ϵ_T do material A é menor do que alongamento total do material B.

g) Os materiais B e C tem maior tenacidade do que o material A. (**V**)



A **TENACIDADE** é uma medida da energia absorvida por um material quando ele se deforma até a fratura – ela é indicada pela área total sob a curva tensão-deformação de engenharia do ensaio de tração. Observando a figura, é evidente que o valor da tenacidade dos materiais B e C são maiores do que aquela do material A. A classificação (aproximada) das tenacidades dos materiais, segundo a figura, é a seguinte: $TEN_C > TEN_B > TEN_A$.

h) O material A é provavelmente mais duro do que C. (**V**)

O material A apresenta um módulo de elasticidade maior do que o do material C. Ora, um dos principais fatores que afetam de forma positiva a dureza é o módulo de elasticidade – por isso, é bastante provável que o material A seja mais duro do que o material C.

i) Os três materiais (A, B e C) são provavelmente materiais cerâmicos. (**F**)

NENHUM dos três materiais é um material cerâmico. Os materiais cerâmicos não apresentam deformação plástica, fraturando em regime de deformação elástica. Observando a figura, é evidente que todos os três materiais apresentam alguma ou muita deformação plástica antes da fratura, não podendo ser, portanto, cerâmicos.

5. Um corpo de prova cilíndrico de alumínio com diâmetro 12,8 mm e comprimento inicial de 50,8 mm é submetido a um ensaio de tração.

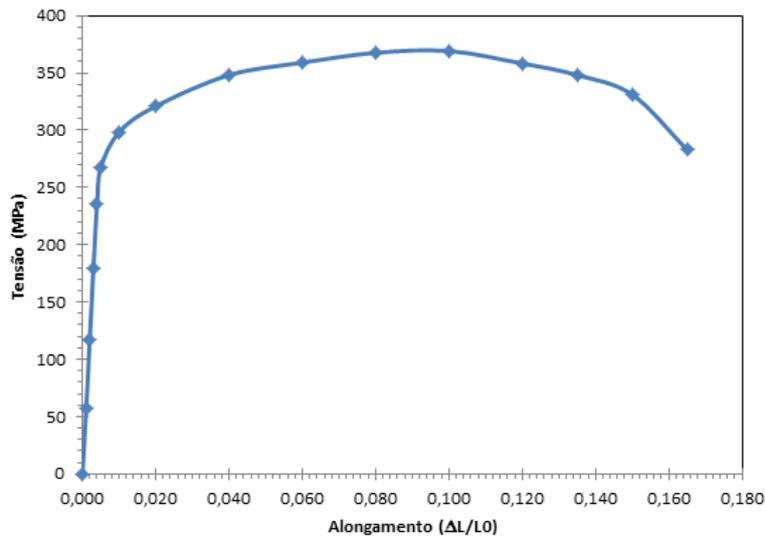
5a – Curva Tensão de Engenharia – Deformação de Engenharia

Os resultados que permitem a construção da curva tensão de engenharia – deformação de engenharia são dados abaixo.

diâmetro (m)	Área (m ²)	L ₀ (mm)
0,0128	0,00012868	50,8

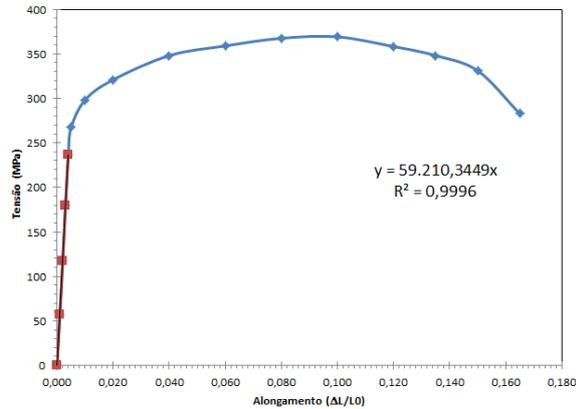
Carga (N)	Tensão (N/m ² = Pa)	Tensão (MPa)	ΔL	Alongamento (ΔL/L ₀)	% Along.
0	0	0,0	0,00	0,000	0,0
7330	56963171	57,0	0,05	0,001	0,1
15100	117345686	117,3	0,10	0,002	0,2
23100	179515585	179,5	0,15	0,003	0,3
30400	236245619	236,2	0,20	0,004	0,4
34400	267330568	267,3	0,25	0,005	0,5
38400	298415518	298,4	0,51	0,010	1,0
41300	320952107	321,0	1,02	0,020	2,0
44800	348151438	348,2	2,03	0,040	4,0
46200	359031170	359,0	3,05	0,060	6,0
47300	367579532	367,6	4,06	0,080	8,0
47500	369133779	369,1	5,08	0,100	10,0
46100	358254047	358,3	6,10	0,120	12,0
44800	348151438	348,2	6,86	0,135	13,5
42600	331054716	331,1	7,62	0,150	15,0
36400	282873043	282,9	8,38	0,165	16,5

Curva Tensão-Deformação de Engenharia



5b – Módulo de Elasticidade

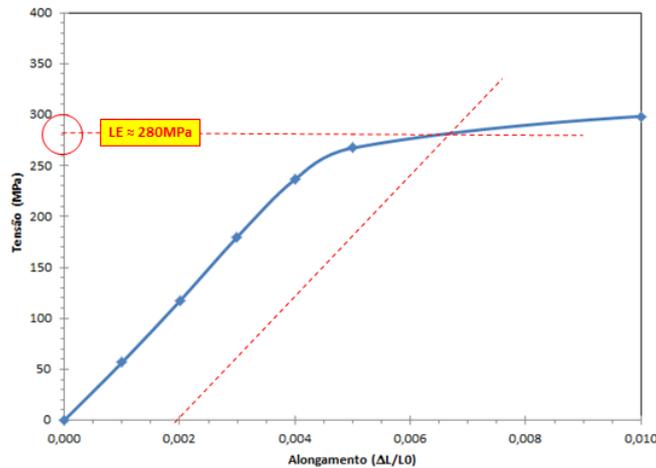
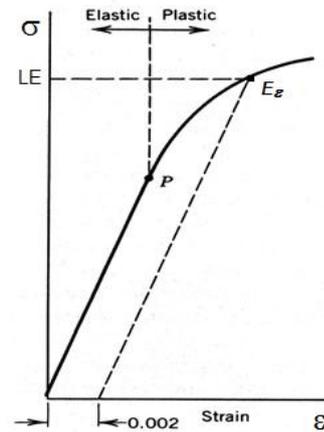
De acordo com o mostrado na figura ao lado, o módulo de elasticidade vale 59,2 GPa.



5c – Limite de Escoamento ($\epsilon = 0,002$)

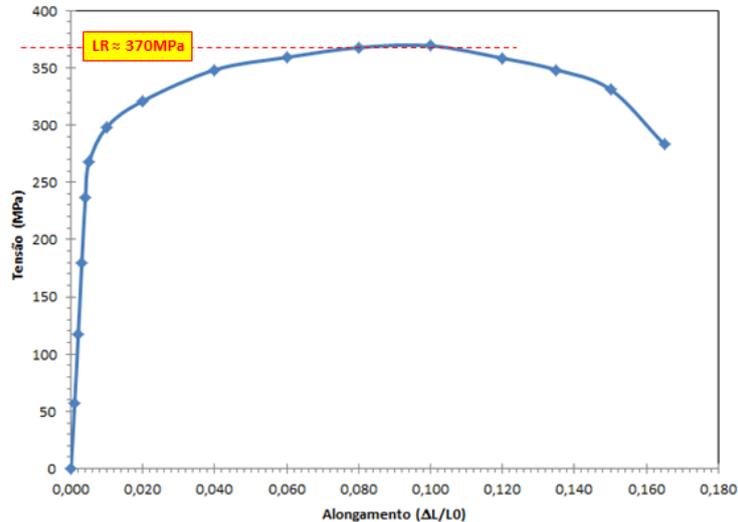
O limite de escoamento é obtido realizando a operação indicada na figura ao lado:

- partindo do ponto correspondente à deformação de engenharia igual a 0,002, traça-se uma paralela à região reta (inicial) da curva tensão-deformação de engenharia – região onde a deformação ainda ocorre em regime puramente elástico;
- o ponto onde essa reta tocar a curva tensão-deformação corresponde ao limite de escoamento.



5d – Limite de Resistência

O limite de resistência corresponde à tensão máxima da curva tensão de engenharia-deformação de engenharia.

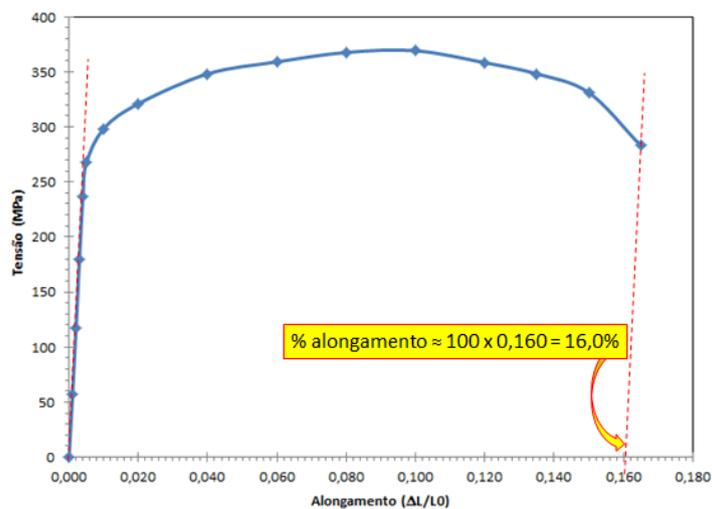


5e – Ductilidade

A ductilidade pode ser obtida traçando-se, a partir do ponto onde ocorre a fratura, uma paralela à reta que corresponde à região de deformação puramente elástica (reta correspondente ao início da curva tensão-deformação).

Essa reta indica a recuperação elástica que o corpo apresenta imediatamente depois da ruptura.

A ductilidade, expressa em porcentagem, corresponde a 100 vezes o valor do alongamento lido onde essa reta tocar o eixo do alongamento (eixo x).



5f – Tenacidade e Módulo de Resiliência

A **tenacidade** é estimada pela **área** abaixo da curva tensão de engenharia – deformação de engenharia até o ponto de fratura (em amarelo na figura). A partir do ponto da fratura, não se traça uma vertical, mas uma linha paralela à reta utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade.

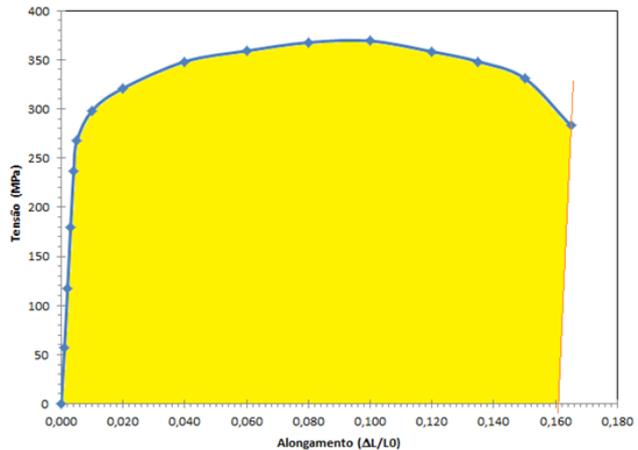
A unidade da tenacidade é (energia / volume) → Joule / m³.

Dessa forma, a tenacidade é estimada como sendo aproximadamente igual a:

56 MJ/m³

Obs.: A unidade MJ/m³ vem de:

$$MPa \times \frac{m}{m} = \frac{MN}{m^2} \times \frac{m}{m} = \frac{MN \times m}{m^3} = \frac{MJ}{m^3}$$

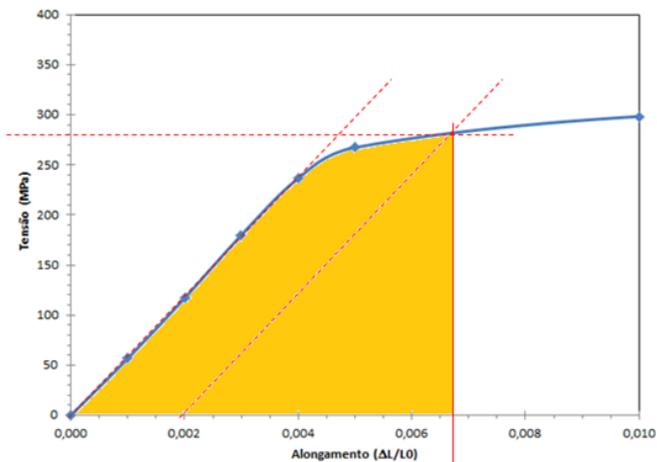


O módulo de **resiliência** é estimado pela **área** abaixo da curva tensão de engenharia – deformação de engenharia na região onde a deformação é puramente elástica (em laranja na figura). Como o ponto onde a deformação deixa de ser elástica e torna-se plástica é normalmente difícil de ser visualizado, admite-se que o módulo de resiliência é estimado pela área abaixo da curva até o o limite de escoamento.

A unidade do módulo de resiliência também é (energia / volume) → Joule / m³.

Dessa forma, o módulo de resiliência é estimado como sendo aproximadamente igual a:

1,3 MJ/m³

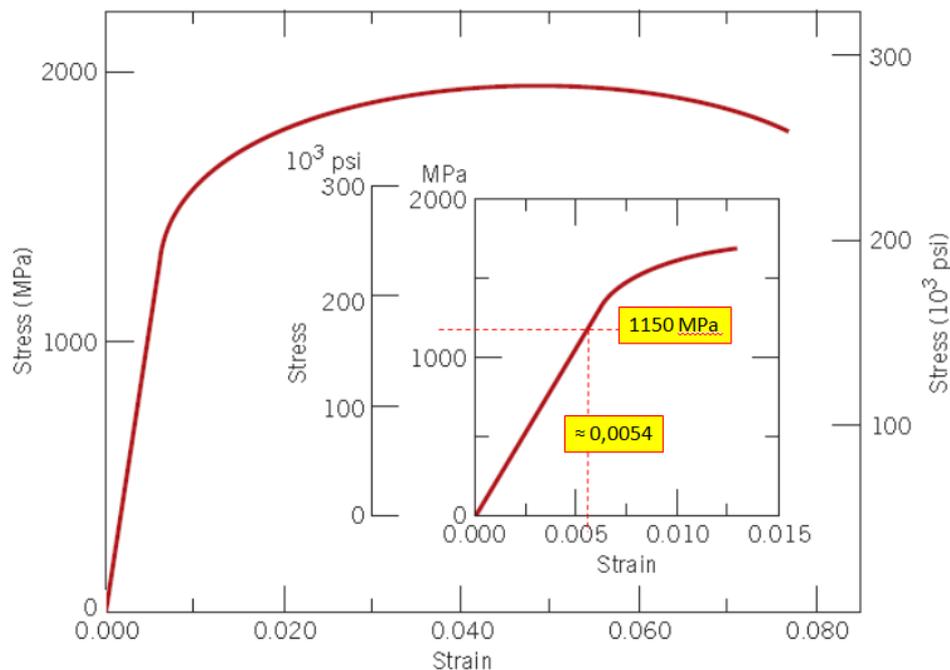


6. Considere um corpo de prova cilíndrico de um aço (curva tensão de engenharia – deformação de engenharia apresentada abaixo) de 8,5 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento que é submetido ao ensaio de tração. Determine seu alongamento quando uma carga de 65.250 N for aplicada

Este problema pede que se calcule o alongamento ΔL de uma amostra de aço cujo comportamento tensão-deformação foi mostrado na Figura abaixo. Primeiro, é necessário calcular a tensão quando uma carga de 65.250 N foi aplicada:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{\pi \left(\frac{d_0}{2}\right)^2} = \frac{65,250 \text{ N}}{\pi \left(\frac{8,5 \times 10^{-3} \text{ m}}{2}\right)^2} = 1150 \text{ MPa}$$

Com referência à curva tensão de engenharia-deformação de engenharia, nessa tensão estamos na região elástica. A essa tensão corresponde uma deformação de aproximadamente 0,0054.



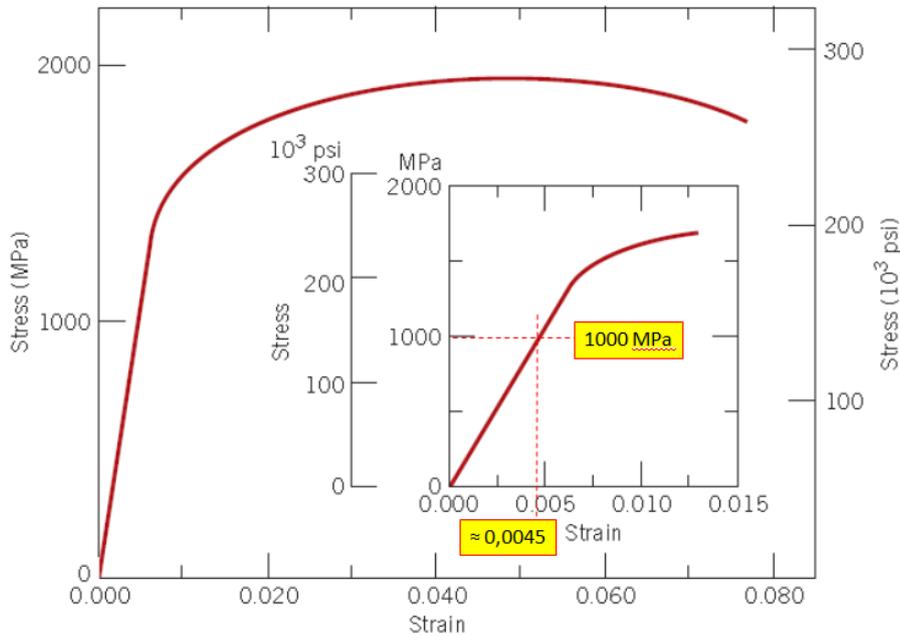
Agora, para calcular o valor de ΔL temos:

$$\Delta L = \varepsilon \times L_0 = 0,0054 \times 80 \text{ mm} = 0,43 \text{ mm}$$

7. Usando a mesma do exercício 6, que mostra o comportamento tensão de engenharia-deformação de engenharia durante o ensaio de tração de um aço, responda:

7a – Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade pode ser calculado pela inclinação da porção linear inicial da curva tensão de engenharia – deformação de engenharia.

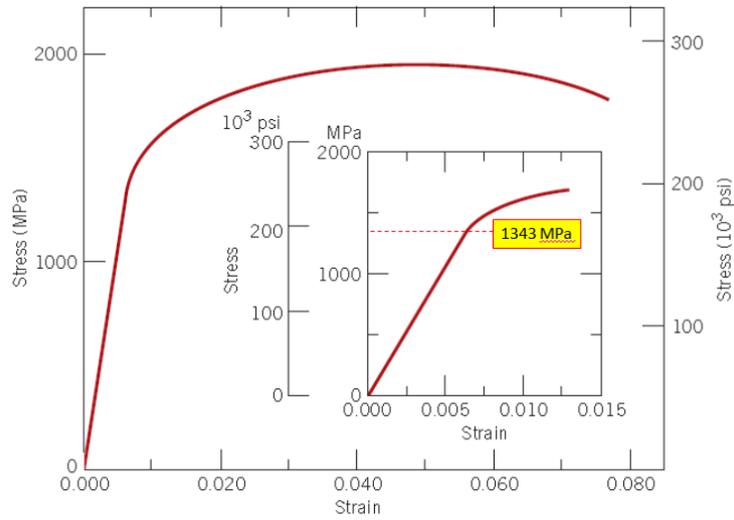


Assim:

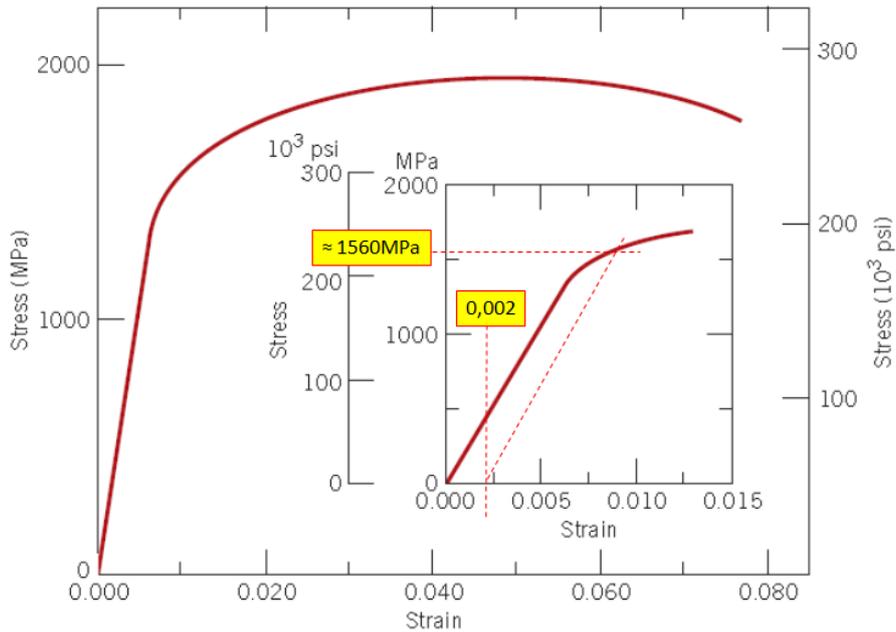
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{1000}{0,0045} = 220 \text{ GPa}$$

7b – Limite de Proporcionalidade

O limite de proporcionalidade corresponde à tensão a partir da qual a curva tensão de engenharia – deformação de engenharia deixa de ser linear – essa tensão vale aproximadamente 1343 MPa.



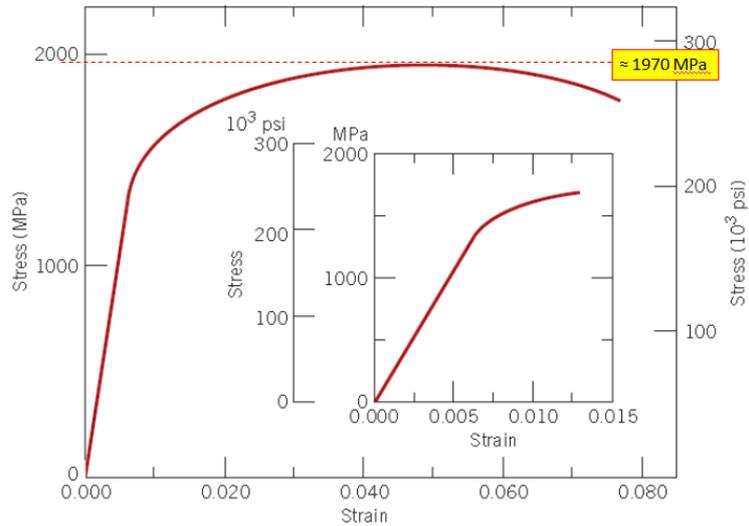
7c – Limite de Escoamento (*yield strength*) para deformação de engenharia = 0,002



A linha paralela à região linear da curva tensão-deformação partindo de 0,002 de deformação intercepta a curva tensão-deformação a aproximadamente 1560 MPa → esse é o valor do limite de escoamento.

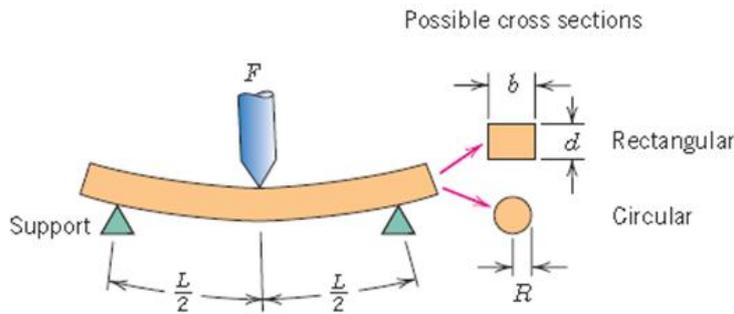
7d – Limite de Resistência à Tração

O valor do limite de resistência à tração (Tensile Strength) (= ponto de máxima tensão na curva tensão de engenharia – deformação de engenharia) é aproximadamente de 1970 MPa



8. Um corpo de prova cilíndrico (*seção transversal circular*) de MgO foi submetida a um ensaio de flexão em três pontos. Calcular o raio mínimo possível que a seção transversal da amostra deve apresentar para que não ocorra fratura, quando submetida a uma força de 5560 N. Dados: a amostra possui resistência à flexão de 105 MPa e a separação entre pontos de apoio no ensaio de três pontos é de 45 mm.

Como o corpo de prova é cilíndrico, vale a fórmula para a seção transversal circular:



...e, portanto, :

$$R = \left(\frac{F \times L}{\sigma \times \pi} \right)^{1/3}$$

$$\sigma = \text{stress} = \frac{Mc}{I}$$

where M = maximum bending moment

c = distance from center of specimen to outer fibers

I = moment of inertia of cross section

F = applied load

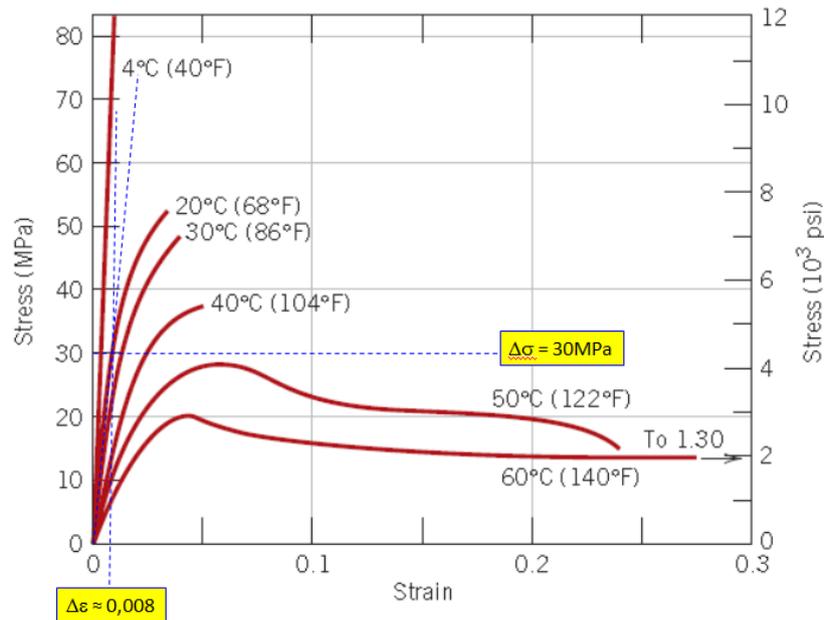
	$\frac{M}{4}$	$\frac{c}{2}$	$\frac{I}{12}$	$\frac{\sigma}{2bd^2}$
Rectangular	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$
Circular	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

Substituindo os valores indicados no enunciado, temos:

$$R = \left(\frac{5560N \times 45 \times 10^{-3}m}{105 \times 10^6 N/m^2 \times \pi} \right) = 9,1 \times 10^{-3} m = 9,1 mm$$

9. A partir da curva tensão de engenharia-deformação de engenharia do poli(metacrilato de metila) mostrada na figura abaixo, determine o módulo de elasticidade e o limite de resistência à tração (*Tensile Strength*) à temperatura ambiente e compare com os valores fornecidos na Tabela abaixo. Depois, determine o valor aproximado do limite de escoamento - *Yield Strength* a 60°C.

O **módulo de elasticidade** pode ser calculado pela inclinação da porção linear inicial da curva tensão de engenharia – deformação de engenharia.



Assim:

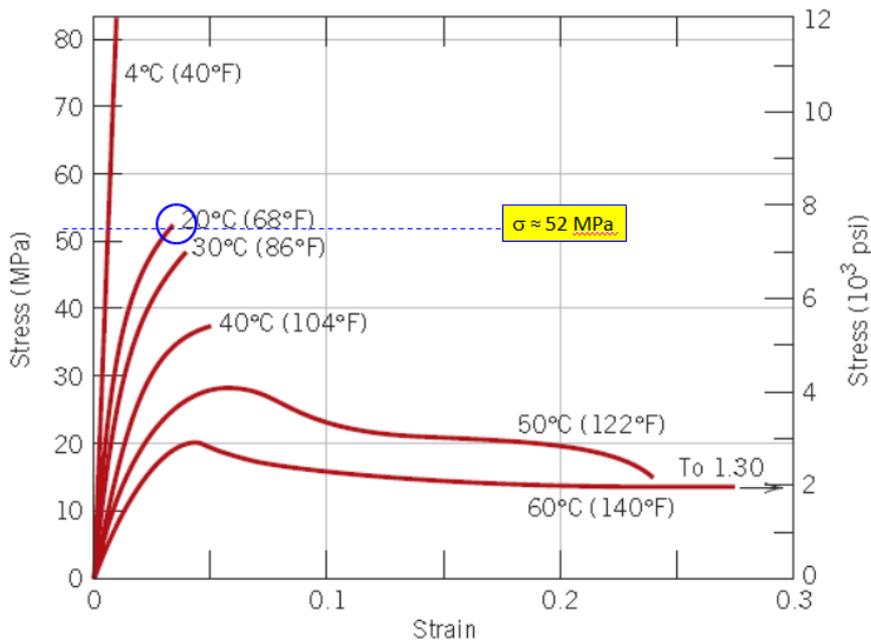
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{30}{0,008} = 3,75 \text{ GPa}$$

Como pode ser visto na tabela na próxima página, o valor calculado está um pouco acima da faixa de valores tabelada.

Material	Specific Gravity	Tensile Modulus [GPa (ksi)]	Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Elongation at Break (%)
Polyethylene (low density)	0.917-0.932	0.17-0.28 (25-41)	8.3-31.4 (1.2-4.55)	9.0-14.5 (1.3-2.1)	100-650
Polyethylene (high density)	0.952-0.965	1.06-1.09 (155-158)	22.1-31.0 (3.2-4.5)	26.2-33.1 (3.8-4.8)	10-1200
Poly(vinyl chloride)	1.30-1.58	2.4-4.1 (350-600)	40.7-51.7 (5.9-7.5)	40.7-44.8 (5.9-6.5)	40-80
Polytetrafluoroethylene	2.14-2.20	0.40-0.55 (58-80)	20.7-34.5 (3.0-5.0)	—	200-400
Polypropylene	0.90-0.91	1.14-1.55 (165-225)	31-41.4 (4.5-6.0)	31.0-37.2 (4.5-5.4)	100-600
Polystyrene	1.04-1.05	2.28-3.28 (330-475)	35.9-51.7 (5.2-7.5)	—	1.2-2.5
Poly(methyl methacrylate)	1.17-1.20	2.24-3.24 (325-470)	48.3-72.4 (7.0-10.5)	53.8-73.1 (7.8-10.6)	2.0-5.5
Phenol-formaldehyde	1.24-1.32	2.76-4.83 (400-700)	34.5-62.1 (5.0-9.0)	—	1.5-2.0
Nylon 6,6	1.13-1.15	1.58-3.80 (230-550)	75.9-94.5 (11.0-13.7)	44.8-82.8 (6.5-12)	15-300
Polyester (PET)	1.29-1.40	2.8-4.1 (400-600)	48.3-72.4 (7.0-10.5)	59.3 (8.6)	30-300
Polycarbonate	1.20	2.38 (345)	62.8-72.4 (9.1-10.5)	62.1 (9.0)	110-150

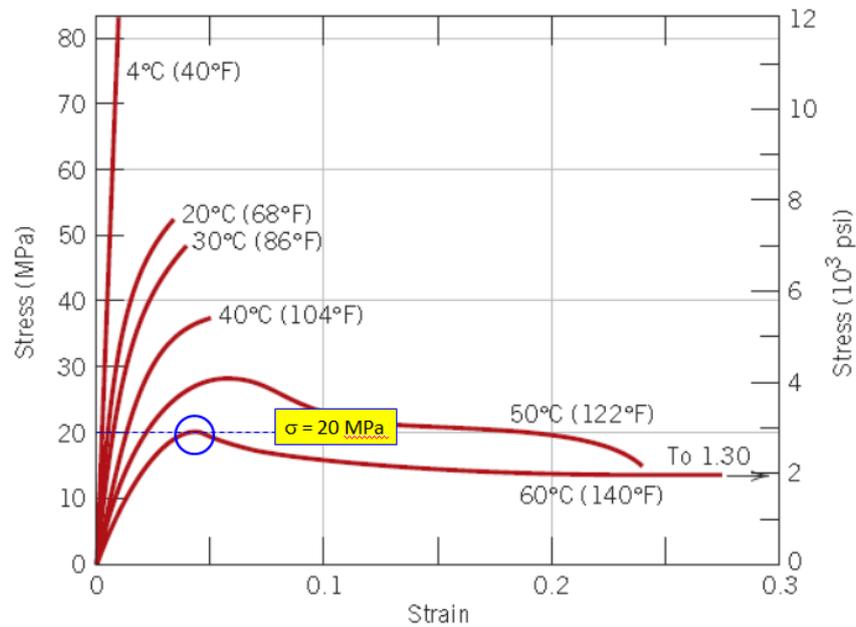
Source: *Modern Plastics Encyclopedia '96*. Copyright 1995, The McGraw-Hill Companies. Reprinted with permission.

O limite de resistência à tração (tensile strength) corresponde a tensão na qual a curva termina (que se supõe corresponder à a fratura do corpo de prova ensaiado), que é 52 MPa. Esse valor situa-se dentro do intervalo citado na Tabela, que é de 48,3 a 72,4 MPa.



O limite de escoamento a 60°C para esse polímero é determinado no ponto de máximo da curva tensão de engenharia - deformação de engenharia *, o que ocorre logo após o término da região linear elástica (ver figura abaixo).

O valor do limite de escoamento para temperatura de 60°C é de 20 MPa.



* o limite de escoamento para polímeros dúcteis é determinado dessa forma.