



1.11 – Lista de exercícios

Para os exercícios a seguir, podem ser considerados os seguintes gráficos/tabelas a seguir.

Tabela I.1 – Algumas propriedades mecânicas de metais, ($\tilde{\sigma} = H\tilde{\epsilon}^n$), Downling (1993).

Material	True Fracture:		Strength Coefficient H	Strain Hardening Exponent n	Brinell Hardness ¹ HB
	Strength $\tilde{\sigma}_{fB}$	Strain $\tilde{\epsilon}_f$			
	MPa (ksi)		MPa (ksi)		
Ductile cast iron A536 (65-45-12)	524 (76)	0.222	456 (66.1)	0.0455	167
AISI 1020 steel as rolled	713 (103)	0.96	737 (107)	0.19	107
ASTM A514, T1 structural steel	1213 (176)	1.08	1103 (160)	0.088	256
AISI 4142 steel as quenched	2580 (375)	0.060	—	0.136	670
AISI 4142 steel 205°C temper	2650 (385)	0.310	—	0.091	560
AISI 4142 steel 370°C temper	1998 (290)	0.540	—	0.043	450
AISI 4142 steel 450°C temper	1826 (265)	0.660	—	0.051	380
18 Ni maraging steel (250)	2136 (310)	0.82	—	0.02	460
SAE 308 cast aluminum	232 (33.6)	0.009	567 (82.2)	0.196	80
2024-T4 aluminum	631 (91.5)	0.43	806 (117)	0.20	120
7075-T6 aluminum	744 (108)	0.41	827 (120)	0.113	150
AZ91C-T6 cast magnesium	137 (20)	0.004	653 (94.7)	0.282	61

Note: ¹Load 3000 kg for irons and steels, 500 kg otherwise; typical values from [Boyer 85] are listed in some cases.

Sources: Data in [Conle 84] and [SAE 89].



Tabela I.2 – Propriedades mecânicas segundo obtidas em ensaios de tração para alguns metais, Downling (1993).

Material	Elastic Modulus E	0.2% Yield Strength σ_o	Ultimate Strength σ_u	Elongation ¹ $100\epsilon_f$	Reduction in Area $\%RA$
	GPa (10^3 ksi)	MPa (ksi)	MPa (ksi)	%	%
Ductile cast iron A536 (65-45-12)	159 (23)	334 (49)	448 (65)	15	19.8
AISI 1020 steel as rolled	203 (29.4)	260 (37.7)	441 (64)	36	61
ASTM A514, T1 structural steel	208 (30.2)	724 (105)	807 (117)	20	66
AISI 4142 steel as quenched	200 (29)	1619 (235)	2450 (355)	6	6
AISI 4142 steel 205°C temper	207 (30)	1688 (245)	2240 (325)	8	27
AISI 4142 steel 370°C temper	207 (30)	1584 (230)	1757 (255)	11	42
AISI 4142 steel 450°C temper	207 (30)	1378 (200)	1413 (205)	14	48
18 Ni maraging steel (250)	186 (27)	1791 (260)	1860 (270)	8	56
SAE 308 cast aluminum	70 (10.2)	169 (25)	229 (33)	0.9	1.5
2024-T4 aluminum	73.1 (10.6)	303 (44)	476 (69)	20	35
7075-T6 aluminum	71 (10.3)	469 (68)	578 (84)	11	33
AZ91C-T6 cast magnesium	40 (5.87)	113 (16)	137 (20)	0.4	0.4

Note: ¹Typical values from [Boyer 85] are listed in most cases.

Sources: Data in [Conle 84] and [SAE 89].



1. Qual o valor das tensões principais para os tensores de tensão dados, segundo a simbologia utilizada na disciplina (vide matrizes abaixo) ?

$$\begin{vmatrix} \sigma_X & \tau_{YX} & \tau_{ZX} \\ \tau_{XY} & \sigma_Y & \tau_{ZY} \\ \tau_{XZ} & \tau_{YZ} & \sigma_Z \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}$$

Valores de tensões em MPa

Estados	Tensões Genéricas						Tensões principais		
	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{xz}	τ_{yz}	σ_1	σ_2	σ_3
A	200	100	-50	30	0	0			
B	150	-75	50	0	0	0			
C	0	0	0	150	-75	50			
D	-200	-125	-50	70	0	-50			
E	200	-125	-50	70	0	-50			

2. A tabela 1.5 apresenta valores de coeficientes elásticos para alguns metais. A tabela abaixo ilustra coeficientes de dilatação linear para estes mesmos metais. Ambas as tabelas foram obtidas de referências bibliográficas confiáveis. Qual seria a deformação esperada, para cada material quando há um aquecimento de 50°C ? Qual a maior deformação elástica possível de ser obtida ? Qual é a diferença percentual entre uma deformação e outra ? Com base nestes dados V.Sa. acredita ser possível deformar plasticamente um metal apenas pela dilatação térmica ?

Tabela de propriedades dos metais listados na tabela 1.5, ASM Metals Reference Book (1993)

Material	α ($\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$)	σ_{ys}^* (MPa)	ϵ $\Delta T=50^\circ\text{C}$	ϵ Elástica máx	$(\epsilon_{\Delta T}-\epsilon_{elas})$ / ϵ_{elas}	Qual a maior ϵ ?
Alumínio	23,6	100				
Latão	20,3	300				
Cobre	16,5	200				
Ferro fundido	10,5	250				
Aço carbono	11,7	300				
Aço inox	16,5	500				
Titânio	8,41	350				
Tungstênio	4,6	600				

* Os valores do limite de escoamento variam muito com a composição química, os valores listados aqui podem ser considerados típicos.

Dilatação de um material submetido a uma variação de temperatura ΔT : $L_f = L_0(1+\alpha)\Delta T$

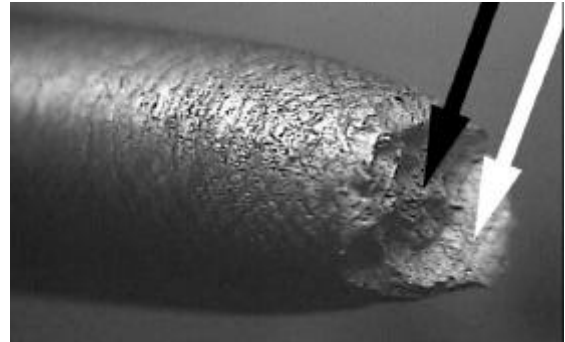
Lei de Hooke (relação tensão-deformação no regime linear elástico): $\sigma = E \cdot \epsilon$

Definição de deformação real: $\epsilon = \ln l_f/l_0$

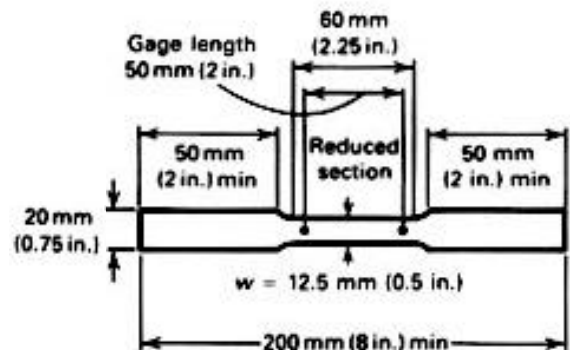


3. Extensômetros, posicionados em um dado ponto da superfície de uma chapa de aço sofrendo estampagem, indicam que as deformações principais ($\epsilon_1 = \epsilon_{xx}$; $\epsilon_2 = \epsilon_{yy}$ e $\epsilon_3 = \epsilon_{zz}$ – vide equações da tabela 1.3) valem 0,4% e 0,1%. Considerar os dados da tabela 1.5

4. Um corpo de prova de tração cilíndrico de 12mm de diâmetro e base de medida de 50mm apresentou, sob teste, uma carga máxima de 8,1t e fraturou-se a 6,8t. O diâmetro mínimo da fratura (como a mostrada ao lado) foi de 8mm. Qual foi o limite de resistência obtido para o material e qual seria a máxima tensão de fratura real do material ? Qual a deformação real do material neste ensaio ? Qual seria a relação entre as áreas ?



5. Considere um limite de escoamento de 250 e 500MPa. Qual estado de tensão, daqueles mostrados no exercício 1 produziria escoamento segundo os critérios de Rankine, Tresca e von Mises ? Qual o estado que induziria mais facilmente o escoamento em vossa opinião ? Tente explicar o porquê.
6. Traçar os círculos de Mohr de todos os estados de tensão do exercício 1. A análise destes círculos condiz com os resultados do exercício 5 ?
7. Qual seria a relação entre a deformação necessária na laminação ($\epsilon_1 = -\epsilon_2$ e $\epsilon_3 = 0$) para produzir o mesmo efeito que uma determinada deformação em um ensaio de tração ($\epsilon_1 = -(\epsilon_2 + \epsilon_3)$) ? (utilize as equações de tensão e deformação efetivas: equações de 1.59 a 1.62).
8. Retirou-se um corpo de prova (CP), segundo a norma ASTM E8M, de um fardo de chapas de aço baixo carbono de 3,00mm de espessura. O CP possui a geometria conforme mostrada na figura ao lado. A carga máxima, registrada no ensaio, foi de 1,3t e a carga de ruptura foi de 1t.



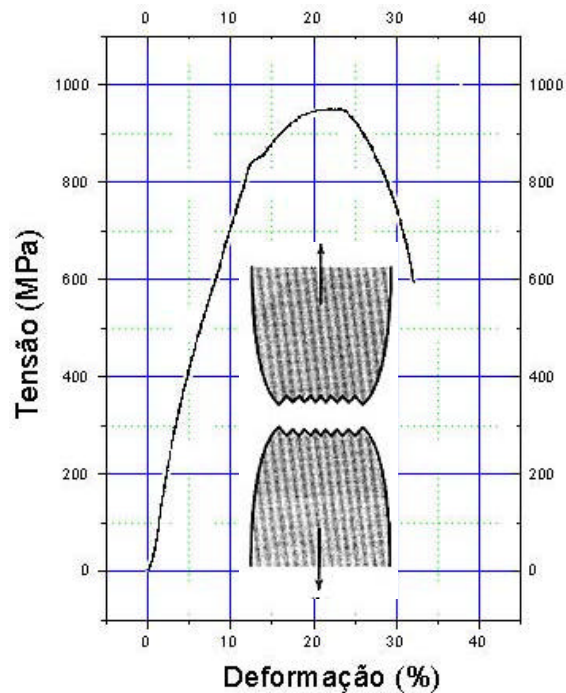
- 8.a) Porque a carga de ruptura foi maior do que a carga máxima durante o ensaio ou o que ocorreu com o CP após a carga máxima ?

- 8.b) Qual é a resistência mecânica do material ? (LR ou σ_{UTS}) em MPa ? Esta resistência é a convencional (de engenharia) ou real ?

- 8.c) Supondo um limite de escoamento de 265MPa, qual seria a deformação esperada para metade deste valor de tensão ? E no limite de escoamento ? Se o nível de tensão fosse aumentado de 10%, em relação ao limite de escoamento, você esperaria qual aumento relativo na deformação ? Faça uma tabela / gráfico e compare os resultados.



9. Em um ensaio de tração, realizado em uma Universidade, utilizou-se um CP ASTM E8M de um aço SAE 4340 temperado e revenido com 12mm de diâmetro da região útil e $L_0=50\text{mm}$. A carga máxima registrada durante o ensaio foi de 11,2t e a carga durante a ruptura final foi de aproximadamente 7,1t. A curva apresentada foi traçada diretamente dos dados do ensaio. A região de ruptura final possuía um diâmetro de 9mm.



- 9.a) Calcule a tensão de máxima de engenharia e a tensão de ruptura real e compare os resultados.
- 9.b) Calcule a tensão de escoamento do material.
- 9.c) A deformação mostrada é real ou convencional? Estaria sendo levado em consideração a rigidez da máquina de ensaios?
- 9.d) As tensões calculadas são reais ou convencionais, porquê?

10. Considere que V.Sa. seja o(a) gerente de uma estamparia de chapas de aço. Sua empresa está com uma grande encomenda de peças, que necessitam da matéria-prima conforme a especificação de fabricação mostrada na coluna ao lado.

Especificação	Fornec. C	Fornec. U	Fornec. N
LE $\leq 280\text{MPa}$	LE $\leq 320\text{MPa}$	LE $\leq 270\text{MPa}$	LE $\leq 280\text{MPa}$
LR $\leq 450\text{MPa}$	LR $\leq 500\text{MPa}$	LR $\leq 450\text{MPa}$	LR $\leq 440\text{MPa}$
Along. (50mm) $\geq 25\%$	Along. (50mm) $\geq 25\%$	Along. (50mm) $\geq 22\%$	Along. (200mm) $\geq 19\%$
Espessura de 2,5mm	Custo (aço + Frete + impostos) R\$ 1450,00/ton	Custo (aço + Frete + impostos) R\$ 1500,00/ton	Custo (aço + Frete + impostos) R\$ 1550,00/ton
LE e LR são valores máximos e Along. são valores mínimos de garantia O valor entre parêntesis no alongamento refere-se à base de medida (L_0) Todos os resultados foram obtidos segundo ASTM E8M, vide figura I.9			

Existem três fornecedores no mercado, também descritos. Escolha e justifique tecnicamente o porquê de não ter escolhido o fornecedor/material mais barato.

11. Um arame de bronze (liga ASTM B22 C91100; $\alpha=16,5\mu\text{m/m}\times^\circ\text{C}$; $\sigma_{YS}=LE=172\text{MPa}$) de 30m de comprimento e 5mm de diâmetro se alonga 7mm quando uma carga axial de tração de 50kgf é aplicada sobre este.

11.1) Qual é o módulo de elasticidade do material?

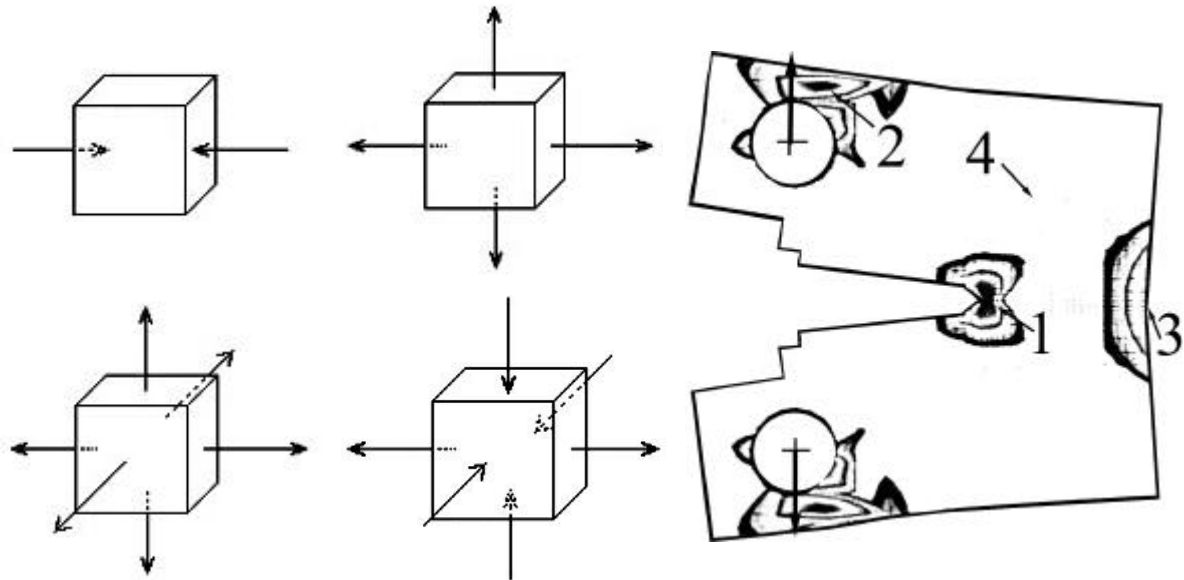
11.b) Caso a temperatura caia em 20°C o material tenderá a se contrair. Considerando a carga fixa em 50kgf, ainda persistirá alguma deformação mecânica? Qual seria o seu valor?

11.c) Qual seria o máximo alongamento reversível que poderia ser imposto ao arame?

11.d) Se você fosse provocar uma mudança reversível no volume de um cubo deste material, qual seria o processo que alteraria mais o volume: carregamento elástico ou dilatação térmica?

11.e) Em qual metal é mais fácil de alterar o volume por meio de um carregamento mecânico (elástico): o aço ou o bronze ? Porquê ?

12. Trace os respectivos círculos de Mohr para as situações abaixo ilustradas, no caso do corpo de prova à direita (CP de Mecânica de Fratura, segundo norma ASTM E1820-99), considerar os pontos numerados de 1 a 4 e o carregamento axial nos orifícios, segundo indicado pelas setas.



13. Qual seria o método que utilizaria o menor valor de σ para conformar uma chapa metálica?

$$\begin{vmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

(tração simples)

$$\begin{vmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & -s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

(torção simples)

$$\begin{vmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

(tração e $\frac{1}{2}$ compressão)

$$\begin{vmatrix} s & \frac{1}{2}s & 0 \\ \frac{1}{2}s & -\frac{1}{3}s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

(tração e cisalhamento)

13.a) Monte o círculo de Mohr para cada caso e repare em uma possível correlação entre a geometria do círculo com a sua resposta anterior.

13.b) Todos os estados de tensões acima não possuem o componente σ_3 , seria possível a utilização de um componente de tensão deste tipo para facilitar o processo de conformação da chapa metálica ? Como deveria ser este valor ?

13.c) Considerando um cilindro de metal dúctil, qual seria o valor prático de σ para se conformar o metal, no caso de $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$?

14. Qual seria o valor de X, nos estados de tensão a seguir, para provocar escoamento (deformação plástica) em uma barra de aço SAE 1006 ($\sigma_{YS}=LE=165\text{MPa}$) laminado a quente e em uma barra de aço SAE 1020 ($\sigma_{YS}=LE=350\text{MPa}$) laminada a frio ?

14.a) Qual seria o valor de tensão que influenciaria mais a condição de escoamento do material: tensão normal ou cisalhante ? Porquê ?

14.b) Seria razoável conceber um processo de conformação de chapas finas cujos estados de tensão sejam representados pelos tensores acima ? Porquê ?



$$s_{ij} = \begin{vmatrix} 100 & X & 0 \\ X & 75 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{vmatrix}$$

$$s_{ij} = \begin{vmatrix} 75 & 0 & X \\ 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & -60 \end{vmatrix}$$

$$s_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & X \\ 0 & -100 & 0 \\ X & 0 & 100 \end{vmatrix}$$

$$s_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X \\ 0 & X & 150 \end{vmatrix}$$

$$s_{ij} = \begin{vmatrix} X & 100 & 75 \\ 100 & 0 & 50 \\ 75 & 50 & 0 \end{vmatrix}$$

$$s_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & 75 & -60 \\ 75 & 0 & 0 \\ -60 & 0 & X \end{vmatrix}$$

$$s_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & -100 & 0 \\ -100 & X & 100 \\ 0 & 100 & 0 \end{vmatrix}$$

$$s_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 150 \\ 0 & 150 & X \end{vmatrix}$$

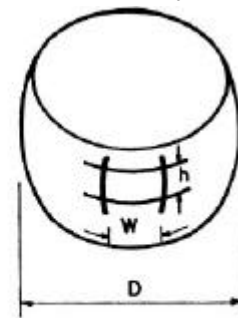
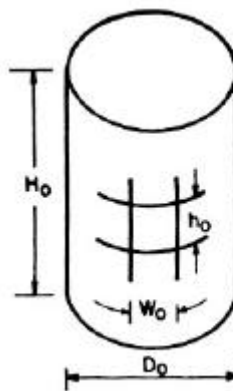
15. As duas fórmulas ao lado definem deformação.

15.a) Quais são as características de cada fórmula?

15.b) Considere um cilindro, de altura inicial 50mm, que sofreu compressão até atingir as alturas de 45, 40, 30, 25 e 10mm (como mostrado ao lado). Calcule as respectivas deformações por meio de cada definição e descreva o resultado em uma tabela.

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0}$$

$$e = \ln \frac{L_f}{L_0}$$



15.c) O quê V.Sa. poderia descrever a respeito dos valores calculadas para as deformações ?

15.d) Em sua opinião, qual fórmula consegue descrever melhor a deformação de um material? Porquê ?

16. Qual é a correspondência entre as tensões aplicadas e efetivas para os carregamentos mecânicos seguintes (considere que não ocorram estricções):

16.a) tração ($\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$);

16.b) torção ($\sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$);

16.c) compressão hidrostática ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 < 0$) e

16.d) especial ($\sigma_1 = -2\sigma_2 = -2\sigma_3; \sigma_2 = \sigma_3$).

16.e) Qual deverá ser o processo (ensaio) que produz maiores quantidades de deformação para um mesmo nível de tensão aplicado ?

16.f) A resposta do item “16.e” está de acordo com o esperado a partir de uma análise por um critério de escoamento ?