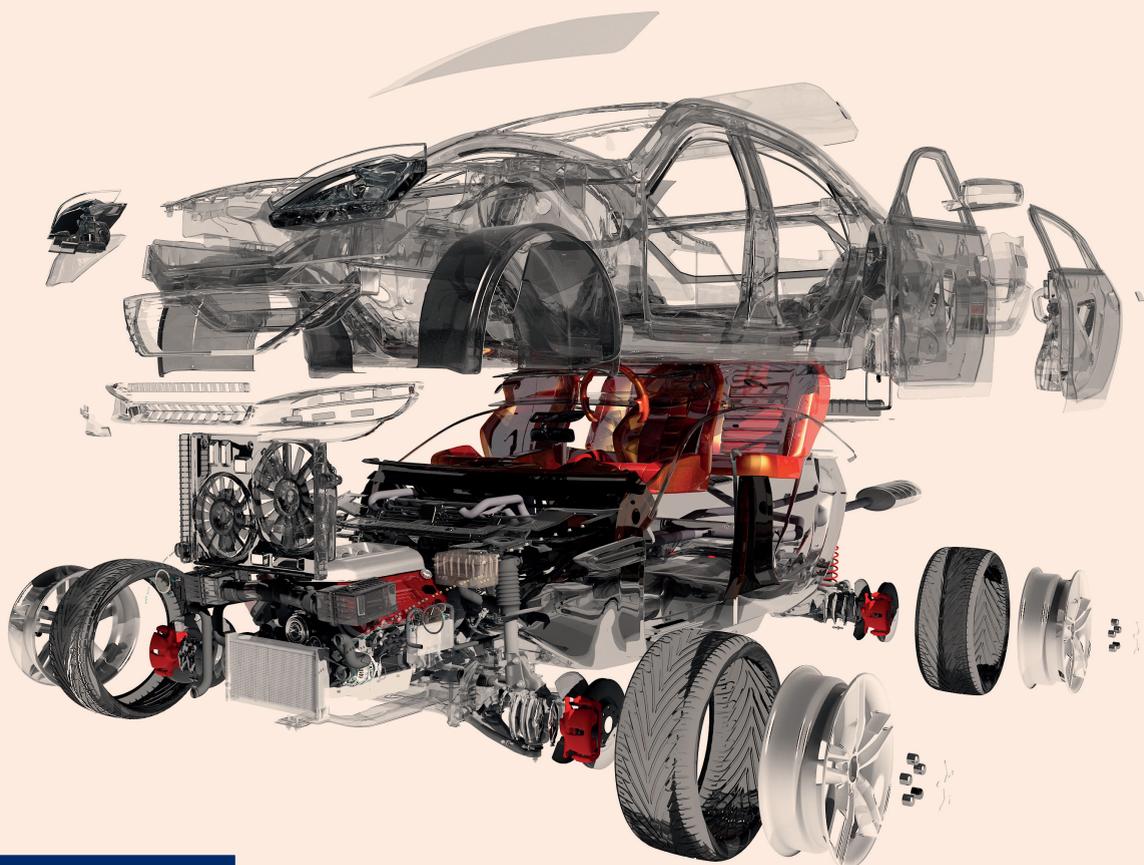


# INTRODUÇÃO À CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS

**PRÁTICA**

EDUARDO A. S. MARQUES  
RICARDO J. C. CARBAS  
CATARINA S. P. BORGES  
FERNANDO SOUSA  
LUCAS F. M. DA SILVA



AUTORES

**Eduardo A. S. Marques · Ricardo J. C. Carbas · Catarina S. P. Borges · Fernando Sousa · Lucas F. M. da Silva**

TÍTULO

**INTRODUÇÃO À CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS  
PRÁTICA**

EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.  
Tel. 220 939 053 · E-mail: geral@quanticaeditora.pt · www.quanticaeditora.pt  
Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO

CHANCELA

Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO

Booki – Conteúdos Especializados  
Tel. 220 104 872 · E-mail: info@booki.pt · www.booki.pt

APOIO

CENFIM – Centro de Formação Profissional da Indústria Metalúrgica e Metalomecânica · www.cenfim.pt  
RAMADA AÇOS, S.A. – www.ramada.pt

REVISÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

DESIGN

Delineatura – Design de Comunicação · www.delineatura.pt

IMPRESSÃO

Dezembro, 2023

DEPÓSITO LEGAL

506301/22



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.  
Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2023 | Todos os direitos reservados a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.  
A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor e do Autor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU  
621 Engenharia mecânica em geral.  
621.7 Tecnologia mecânica em geral: processos, ferramentas, máquinas, equipamentos

DOI  
<https://doi.org/10.61875/9789899101548>

ISBN  
Papel: 9789899101548  
E-book: 9789899101524

Catálogo da publicação  
Família: Engenharia Mecânica  
Subfamília: Materiais / Metalúrgica

<b>PREFÁCIO</b>	<b>XIII</b>
<b>PARTE A   DEMONSTRAÇÕES</b>	<b>15</b>
<b>A.1. Coeficientes de Poisson</b>	<b>17</b>
A.1.1. Introdução	17
A.1.2. Equipamento	18
A.1.3. Materiais	18
A.1.4. Segurança	18
A.1.5. Procedimento experimental	18
<b>A.2. Rigidez de diferentes materiais</b>	<b>18</b>
A.2.1. Introdução	18
A.2.2. Equipamento	19
A.2.3. Materiais	19
A.2.4. Segurança	20
A.2.5. Procedimento experimental	20
<b>A.3. Estruturas cristalinas</b>	<b>21</b>
A.3.1. Introdução	21
A.3.2. Equipamento	21
A.3.3. Materiais	22
A.3.4. Segurança	22
A.3.5. Procedimento experimental	22
<b>A.4. Deformação plástica e fratura</b>	<b>22</b>
A.4.1. Introdução	22
A.4.2. Equipamento	23
A.4.3. Materiais	23
A.4.4. Segurança	23
A.4.5. Procedimento experimental	24

<b>A.5. Fatores fragilizantes – Entalhe e taxa de deformação</b>	<b>24</b>
A.5.1. Introdução	24
A.5.2. Equipamento	26
A.5.3. Materiais	26
A.5.4. Segurança	26
A.5.5. Procedimento experimental	26
<b>A.6. Mecânica da fratura – Carregamento e comprimento de fenda crítico</b>	<b>27</b>
A.6.1. Introdução	27
A.6.2. Equipamento	27
A.6.3. Materiais	28
A.6.4. Segurança	28
A.6.5. Procedimento experimental	28
<b>A.7. Falha por carregamento cíclico</b>	<b>29</b>
A.7.1. Introdução	29
A.7.2. Equipamento	29
A.7.3. Materiais	29
A.7.4. Segurança	30
A.7.5. Procedimento experimental	30
<b>A.8. Ligas de memória de forma</b>	<b>30</b>
A.8.1. Introdução	30
A.8.2. Equipamento	31
A.8.3. Materiais	31
A.8.4. Segurança	31
A.8.5. Procedimento experimental	32
<b>A.9. Condutibilidade térmica de cerâmicos</b>	<b>32</b>
A.9.1. Introdução	32
A.9.2. Equipamento	33
A.9.3. Materiais	33
A.9.4. Segurança	33
A.9.5. Procedimento experimental	33
<b>A.10. Efeito das baixas temperaturas em polímeros</b>	<b>34</b>
A.10.1. Introdução	34
A.10.2. Equipamento	34
A.10.3. Materiais	34
A.10.4. Segurança	35
A.10.5. Procedimento experimental	35
<b>A.11. Anisotropia de materiais compósitos</b>	<b>35</b>
A.11.1. Introdução	35
A.11.2. Equipamento	36
A.11.3. Materiais	36
A.11.4. Segurança	36
A.11.5. Procedimento experimental	36

<b>PARTE B   ESTRUTURA DOS MATERIAIS</b>	<b>37</b>
<b>B.1. Estrutura dos materiais</b>	<b>39</b>
B.1.1. Problemas resolvidos	39
B.1.2. Problemas propostos	46
B.1.3. Soluções	48
<b>B.2. Diagramas de fases</b>	<b>50</b>
B.2.1. Problemas resolvidos	50
B.2.2. Problemas propostos	55
B.2.3. Soluções	58
<b>B.3. Deformação plástica</b>	<b>62</b>
B.3.1. Problemas resolvidos	62
B.3.2. Problemas propostos	71
B.3.3. Soluções	74
<b>B.4. Mecanismos de endurecimento</b>	<b>76</b>
B.4.1. Problemas resolvidos	76
B.4.2. Problemas propostos	81
B.4.3. Soluções	82
<b>B.5. Mecânica da fratura</b>	<b>84</b>
B.5.1. Problemas resolvidos	84
B.5.2. Problemas propostos	89
B.5.3. Soluções	90
<b>B.6. Fadiga</b>	<b>92</b>
B.6.1. Problemas resolvidos	92
B.6.2. Problemas propostos	100
B.6.3. Soluções	102
<b>B.7. Fluência</b>	<b>104</b>
B.7.1. Problemas resolvidos	104
B.7.2. Problemas propostos	110
B.7.3. Soluções	112
<b>B.8. Aços</b>	<b>113</b>
B.8.1. Problemas resolvidos	113
B.8.2. Problemas propostos	119
B.8.3. Soluções	123
<b>PARTE C   TRABALHOS LABORATORIAIS</b>	<b>125</b>
<b>C.1. Aços – Tratamento térmico de aços e ensaio Jominy</b>	<b>127</b>
C.1.1. Instruções de trabalho	127
C.1.1.1. Introdução	127
C.1.1.2. Descrição geral do trabalho	128
C.1.1.3. Materiais	128
C.1.1.4. Procedimento experimental	128
C.1.1.5. Instruções para elaboração do relatório	129

C1.2.	Exemplo de relatório	129
C1.2.1.	Introdução ao tratamento térmico dos aços	129
C1.2.2.	Propriedades mecânicas	131
C1.2.3.	Preparação de uma amostra metalográfica	131
C1.2.4.	Microestrutura do aço testado	132
C1.2.5.	Ensaio de Jominy	133
C1.2.6.	Previsão da curva teórica e comparação com a curva experimental	133
<b>C.2.</b>	<b>Aços – Influência do teor de carbono na transformação martensítica</b>	<b>137</b>
C.2.1.	Instruções de trabalho	137
C.2.1.1.	Introdução	137
C.2.1.2.	Descrição geral do trabalho	137
C.2.1.3.	Materiais	138
C.2.1.4.	Procedimento experimental	138
C.2.1.5.	Instruções para elaboração do relatório	138
<b>C.3.</b>	<b>Aços – Transição dúctil-frágil e o ensaio de charpy</b>	<b>139</b>
C.3.1.	Instruções de trabalho	139
C.3.1.1.	Introdução	139
C.3.1.2.	Descrição geral do trabalho	140
C.3.1.3.	Materiais	140
C.3.1.4.	Procedimento experimental	140
C.3.1.5.	Instruções para elaboração do relatório	140
<b>C.4.</b>	<b>Ferros fundidos e ligas não ferrosas – Caracterização mecânica de diferentes materiais metálicos</b>	<b>141</b>
C.4.1.	Instruções de trabalho	141
C.4.1.1.	Introdução	141
C.4.1.2.	Descrição geral do trabalho	141
C.4.1.3.	Materiais	142
C.4.1.4.	Procedimento experimental	142
C.4.1.5.	Instruções para elaboração do relatório	142
C.4.2.	Exemplo de relatório	142
C.4.2.1.	Introdução aos ferros fundidos	142
C.4.2.2.	Introdução às ligas não-ferrosas	143
C.4.2.3.	Materiais utilizados	145
C.4.2.4.	Curvas de tração	146
C.4.2.5.	Sumário de propriedades obtidas	147
<b>C.5.</b>	<b>Ferros fundidos– Comparação de ferro fundido cinzento lamelar e ferro fundido dúctil</b>	<b>149</b>
C.5.1.	Instruções de trabalho	149
C.5.1.1.	Introdução	149
C.5.1.2.	Descrição geral do trabalho	149
C.5.1.3.	Materiais	150
C.5.1.4.	Procedimento experimental	150
C.5.1.5.	Instruções para a elaboração do relatório	150
<b>C.6.</b>	<b>Ligas não ferrosas – Tensão limite de fadiga de ligas vazadas e trabalhadas</b>	<b>151</b>
C.6.1.	Instruções de trabalho	151
C.6.1.1.	Introdução	151

C.6.1.2.	Descrição geral do trabalho	152
C.6.1.3.	Materiais	152
C.6.1.4.	Procedimento experimental	152
C.6.1.5.	Instruções para a elaboração do relatório	152
<b>C.7.</b>	<b>Cerâmicos – Caracterização de cerâmicos refratários</b>	<b>153</b>
C.7.1.	Instruções de trabalho	153
C.7.1.1.	Introdução	153
C.7.1.2.	Descrição geral do trabalho	154
C.7.1.3.	Materiais	154
C.7.1.4.	Procedimento experimental	154
C.7.1.5.	Instruções para a elaboração do relatório	155
C.7.2.	Exemplo de relatório	155
C.7.2.1.	Introdução aos cerâmicos refratários e seu uso em aplicações aeroespaciais.	155
C.7.2.2.	Materiais estudados	157
C.7.2.3.	Medição da densidade	158
C.7.2.4.	Análise da microestrutura	159
C.7.2.5.	Determinação da resistência à flexão	159
C.7.2.6.	Medição dinâmica de rigidez	162
C.7.2.7.	Resistência às temperaturas elevadas e condutividade térmica	163
<b>C.8.</b>	<b>Cerâmicos – Cerâmicos estabilizados</b>	<b>166</b>
C.8.1.	Instruções de trabalho	166
C.8.1.1.	Introdução	166
C.8.1.2.	Descrição geral do trabalho	167
C.8.1.3.	Materiais	167
C.8.1.4.	Procedimento experimental	167
C.8.1.5.	Instruções para a elaboração do relatório	168
<b>C.9.</b>	<b>Cerâmicos – Comportamento à fluência de materiais cerâmicos</b>	<b>169</b>
C.9.1.	Instruções de trabalho	169
C.9.1.1.	Introdução	169
C.9.1.2.	Descrição geral do trabalho	170
C.9.1.3.	Materiais	170
C.9.1.4.	Procedimento experimental	170
C.9.1.5.	Instruções para a elaboração do relatório	170
<b>C.10.</b>	<b>Polímeros – Temperatura de transição vítrea</b>	<b>172</b>
C.10.1.	Instruções de trabalho	172
C.10.1.1.	Introdução	172
C.10.1.2.	Descrição geral do trabalho	172
C.10.1.2.	Materiais	173
C.10.1.3.	Procedimento experimental	173
C.10.1.4.	Instruções para elaboração do relatório	173
C.10.2.	Exemplo de relatório	174
C.10.2.1.	Efeito da temperatura nas propriedades mecânicas dos polímeros	174
C.10.2.2.	Material usado	176
C.10.2.3.	Descrição do princípio de funcionamento da máquina usada para medir a T <sub>g</sub>	176
C.10.2.4.	Curva de tração do polímero abaixo e acima da T <sub>g</sub>	178

<b>C.11. Polímeros – Comparação de desempenho de um termoplástico, termoendurecível de um elastômero</b>	<b>179</b>
<b>C.11.1. Instruções de trabalho</b>	<b>179</b>
C.11.1.1. Introdução	179
C.11.1.2. Descrição geral do trabalho	180
C.11.1.3. Materiais	180
C.11.1.4. Procedimento experimental	180
C.11.1.5. Instruções para a elaboração do relatório	181
<b>C.12. Polímeros – Resistência ao impacto de materiais poliméricos</b>	<b>182</b>
<b>C.12.1. Instruções de trabalho</b>	<b>182</b>
C.12.1.1. Introdução	182
C.12.1.2. Descrição geral do trabalho	183
C.12.1.3. Materiais	183
C.12.1.4. Procedimento experimental	184
C.12.1.5. Instruções para a elaboração do relatório	184
<b>C.13. Compósitos – Propriedades mecânicas na direção das fibras e na direção transversal às fibras</b>	<b>185</b>
<b>C.13.1. Instruções de trabalho</b>	<b>185</b>
C.13.1.1. Introdução	185
C.13.1.2. Descrição geral do trabalho	185
C.13.1.3. Materiais	186
C.13.1.4. Procedimento experimental	186
C.13.1.5. Instruções para a elaboração do relatório	186
<b>C.13.2. Exemplo de relatório</b>	<b>187</b>
C.13.2.1. Introdução aos compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras	187
C.13.2.2. Materiais usados	188
C.13.2.3. Descrição da fabricação do compósito	190
C.13.2.4. Previsão das propriedades mecânicas pela regra das misturas	191
C.13.2.5. Curva de tração de compósito determinada no sentido longitudinal e transversal	192
C.13.2.6. Propriedades mecânicas e comentários	192
<b>C.14. Compósitos – Expansão térmica dos materiais compósitos</b>	<b>194</b>
<b>C.14. Instruções de trabalho</b>	<b>194</b>
C.14.1. Introdução	194
C.14.2. Descrição geral do trabalho	195
C.14.3. Materiais	195
C.14.4. Procedimento experimental	195
C.14.5. Instruções para a elaboração do relatório	196
<b>C.15. Compósitos – Efeito do núcleo em materiais sandwich</b>	<b>197</b>
<b>C.15.1. Instruções de trabalho</b>	<b>197</b>
C.15.1.1. Introdução	197
C.15.1.2. Descrição geral do trabalho	197
C.15.1.3. Materiais	198
C.15.1.4. Procedimento experimental	198
C.15.1.5. Instruções para a elaboração do relatório	198

# PREFÁCIO

Esta obra de carácter prático e aplicado acompanha o livro teórico dos mesmos autores *Introdução à Ciência e Engenharia dos Materiais*. Pretende facilitar a assimilação dos conteúdos teóricos através de experiências simples, da resolução de exercícios, e da realização de trabalhos laboratoriais.

Propõe-se na primeira parte uma série de demonstrações muito simples que permitem compreender facilmente vários conceitos teóricos. Por exemplo, uma simples fita de borracha é usada para explicar o coeficiente de Poisson. Outro exemplo consiste no uso de uma folha de papel cortada para explicar conceitos energéticos da mecânica da fratura.

A ciência dos materiais envolve conceitos que requerem cálculo. Por conseguinte, na segunda parte deste livro apresenta-se uma série de problemas sobre toda a matéria relativa a ciência dos materiais (estrutura dos materiais, diagramas de fases, deformação plástica, mecanismos de endurecimento, mecânica da fratura, fadiga e fluência). O diagrama de equilíbrio ferro-carbono e os diagramas de transformação da austenite nos aços também são tratados sob a forma de resolução de exercícios. Para cada matéria, alguns exercícios contêm uma resolução detalhada e problemas adicionais são fornecidos com apenas a solução.

A última parte aborda a engenharia dos materiais. Os autores consideram que a melhor maneira de compreender e recordar as propriedades dos materiais de engenharia é fazer experiências laboratoriais. Assim, para cada família de materiais são apresentados trabalhos laboratoriais que ilustram com ensaios mecânicos e físicos as principais características de cada material. O ensaio Jominy associado à temperabilidade dos aços e a análise mecânica dinâmica para determinar a temperatura de transição vítrea dos polímeros são exemplos. A realização destes trabalhos permite também aos estudantes desenvolverem competências laboratoriais que são essenciais para um engenheiro.

Os autores agradecem o Eng. Francisco Tenreiro pela preparação de muitas imagens. Os autores agradecem também o apoio incondicional da Quântica Editora, com especial atenção ao Eng. Antonio Malheiro.

Os autores

Eduardo A. S. Marques

Ricardo J. C. Carbas

Catarina Borges

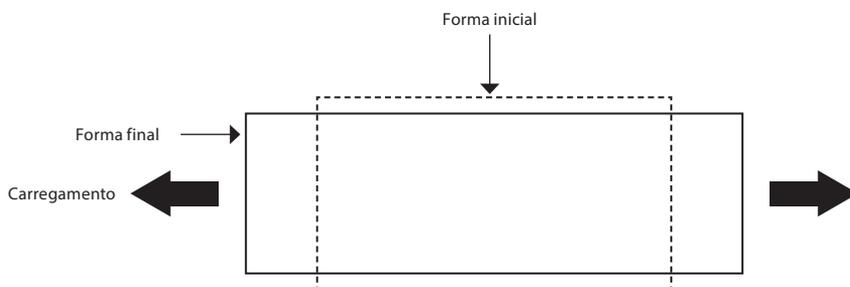
Fernando Sousa

Lucas F. M. da Silva

# A.1. COEFICIENTES DE POISSON

## A.1.1. INTRODUÇÃO

É sabido que em geral, quando uma amostra de material é tracionada numa direção, esta tende a ficar mais fina na direção perpendicular. De forma oposta, se uma amostra é comprimida numa direção, tende a ficar mais espessa na direção perpendicular (Figura A.1.1). Este nível de variação dimensional é representado pelo coeficiente de Poisson.



**Figura A.1.1.** Deformação normal e lateral em função de uma carga aplicada.

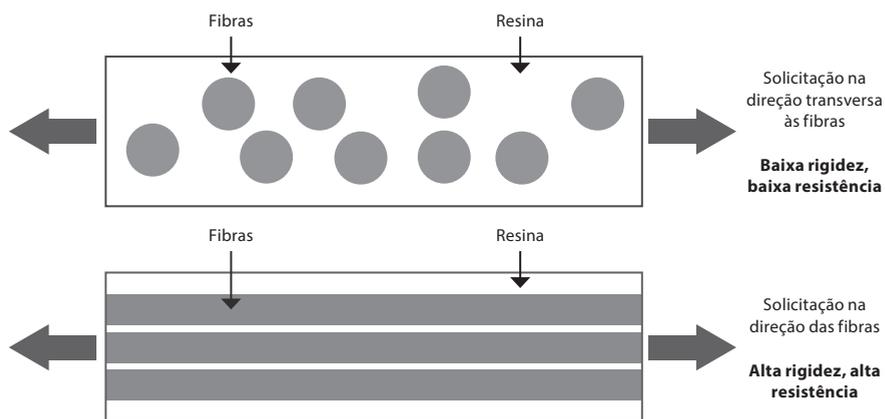
O coeficiente de Poisson representa a relação da deformação de contração (tensão transversal, lateral ou radial) normal à direção da carga aplicada com a deformação de extensão relativa (ou tensão axial) na direção da carga aplicada. É calculado de acordo com a Equação A.1.1.

$$\nu = -\varepsilon_t / \varepsilon_l \quad (\text{A.1.1})$$

Onde:

- $\nu$  é o coeficiente de Poisson;
- $\varepsilon_t$  é a deformação transversal (m/m, adimensional);
- $\varepsilon_l$  é a deformação longitudinal (m/m, adimensional).

Tipicamente, o coeficiente de Poisson varia entre 0 e 0,5, embora possam existir materiais ou estruturas com coeficiente de Poisson negativo. Estes materiais são conhecidos como materiais auxéticos, e quando tracionados, tornam-se mais espessos numa direção perpendicular à força aplicada.



**Figura A.11.1.** – Comportamento dos materiais compósitos reforçados com fibras na direção transversa às fibras e na direção das fibras.

## A.11.2. EQUIPAMENTO

Sem equipamento necessário

## A.11.3. MATERIAIS

Placas de um material compósito com matriz polimérica reforçado com fibra de carbono, onde as fibras estão dispostas de forma unidirecional.

## A.11.4. SEGURANÇA

Recomenda-se o uso de luvas de trabalho robustas, capazes de evitar a penetração de fibras soltas na pele.

## A.11.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1. Manusear as placas de material compósito, dobrando-as em várias direções;
2. Notar as deflexões muito reduzidas quando as fibras são solicitadas à flexão e a baixa rigidez encontrada na direção transversa a esta.

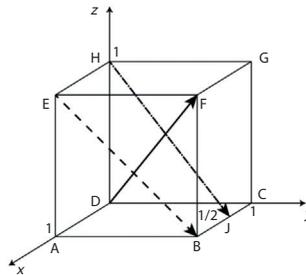
**Tabela B.1.1.** Interseção dos planos cristalográficos com os eixos x, y e z.

Plano	1.º Intersecções	2.º Inversos	3.º Inteiros	4.º Resultado
A	1, 1, 1	1, 1, 1	1, 1, 1	(111)
B	$\infty, 1/3, \infty$	0, 3, 0	0, 3, 0	(030)
C	1, 2/3, 1/2	1, 3/2, 2	2, 3, 4	(234)

## B.1.2. PROBLEMAS PROPOSTOS

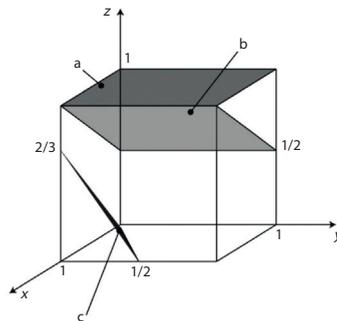
5. Considere um material sujeito a uma carga de tração de 3 kN.
  - a. A deformação que o material sofrerá será maior se tiver um módulo de Young de 210 GPa ou 400 MPa? Justifique, considerando que a secção reta não se altera.
  - b. Determine a razão entre a deformação nas duas situações.
  - c. Assumindo que a secção reta do material com um módulo de Young de 210 GPa é circular com um diâmetro de 10 mm, qual seria a secção reta necessária para o material com 400 MPa sofrer a mesma deformação?
  
6. Determine os índices de Miller das direções abaixo, partindo da representação na Figura B.1.1.

- a.  $\vec{DF}$
- b.  $\vec{EB}$
- c.  $\vec{HJ}$

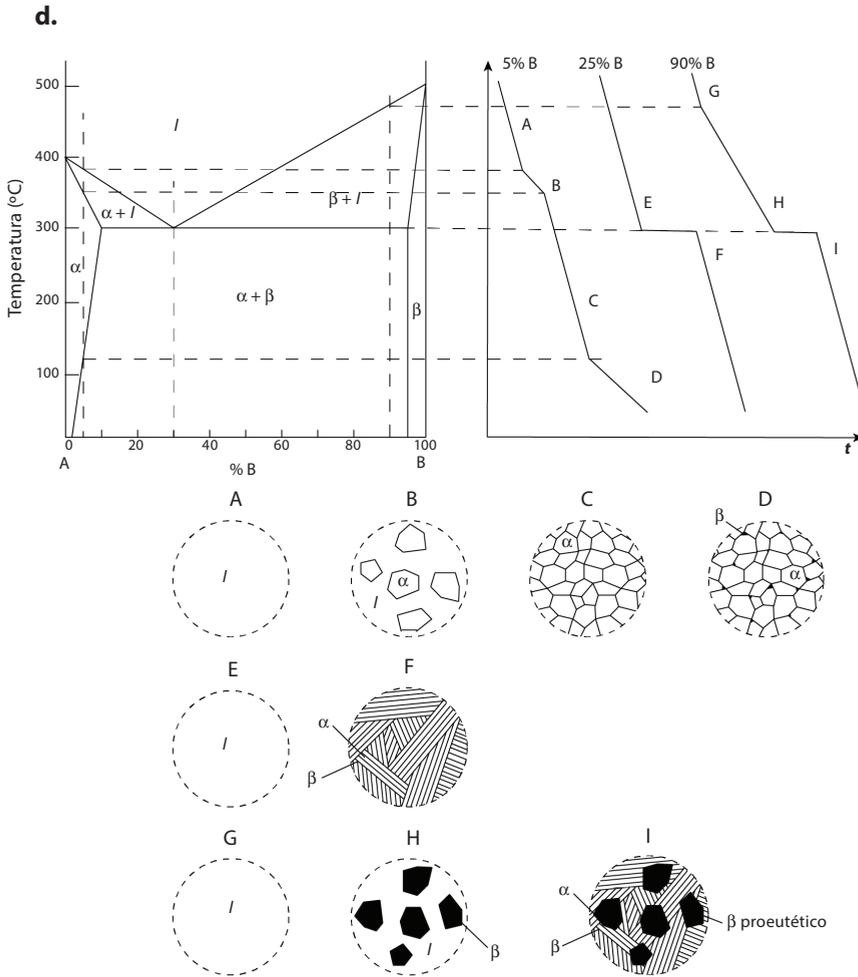


**Figura B.1.8.** Direções cristalográficas de uma célula cúbica.

7. Determine os índices de Miller dos planos representados na Figura B.1.9.



**Figura B.1.9.** Planos cristalográficos de uma célula cúbica.



**Figura B.2.13.** Curvas de arrefecimento e microestruturas de ligas com 5 %, 25 % e 90 % e microestruturas mais relevantes das transformações.

**6.**

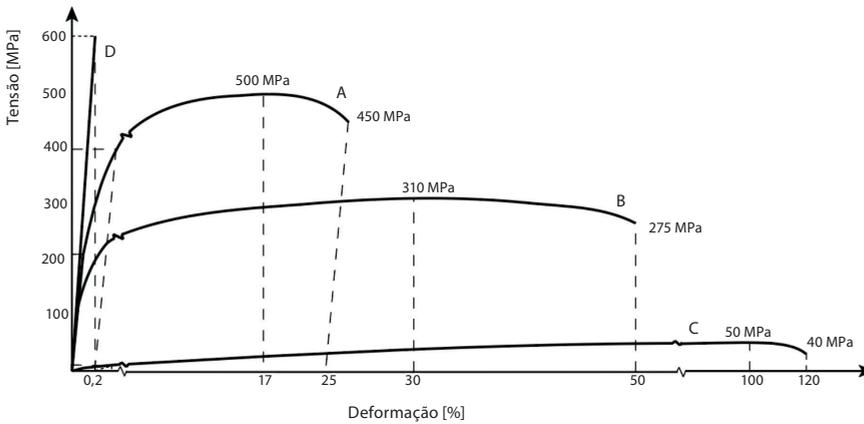
- Solubilidade máxima de Al em Si: 0 % (insolúvel no estado sólido); solubilidade máxima de Si em Al: 1,65 % à temperatura eutética, 577 °C.
- 1 %
- 12,6 % Si, liga com a composição eutética, solidifica a uma única temperatura e apresenta boa colabilidade, conduzindo a menos defeitos.

**Resolução:**

- a. As curvas de tração estão representadas na Figura B.3.5., através da marcação dos pontos referidos na Tabela B.3.1.

**TABELA B.3.1.** Pontos relevantes para o esboço das curvas dos ensaios de tração dos materiais A, B, C e D.

	Módulo de Young [GPa]	Ponto 1 – cedência		Ponto 2 – tensão de rotura		Ponto 3 – colapso	
		$\sigma_{0,2}$ [MPa]	$\epsilon_{plástica}$ [%]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]
A	210	400	0,2	500	17	450	25
B	210	230	0,2	310	30	275	50
C	5	13	0,2	50	100	40	120
D	300	–	–	600	$\frac{\sigma_R}{E} = \frac{600}{300 \times 10^3} 100 = 0,2\%$	(= rotura)	



**Figura B.3.5.** Curvas de tração dos materiais A, B, C e D.

- b. Os materiais A e B são metais visto que tem elevada rigidez e resistência e uma deformação plástica apreciável (tendo módulo de Young de 210 GPa tratam-se de aços). O material C é um polímero, visto que é pouco rígido e resistente e a sua deformação em regime plástica é muito mais significativa do que em regime elástico. O material D é um cerâmico, visto que tem elevada rigidez e resistência, mas deformação plástica praticamente nula.
- c. Sendo o coeficiente de estricção de 30%:

$$\epsilon_r = \frac{S_0 - S_f}{S_0} = \frac{\frac{D_2^0 \pi}{4} - \frac{D_f^2 \pi}{4}}{\frac{D_2^0 \pi}{4}} = \frac{D_2^0 - D_f^2}{D_2^0}$$

$$\Rightarrow D_f^2 = D_2^0 - \epsilon_r D_2^0 = 10^2 - 0,30 \times 10^2 D_f = 7 \text{ mm}$$

# B.7. FLUÊNCIA

## B.7.1. PROBLEMAS RESOLVIDOS

1. A Figura B.7.1. mostra a deformação em função do tempo (não está à escala) num ensaio de fluência de um provete de tração. A tensão do ensaio é de 100 MPa, e a temperatura é de 600 °C. O provete parte após 420h.
  - a. Identifique e descreva os três estágios do comportamento à fluência.
  - b. Se a fluência secundária obedecer à lei de Norton,  $\dot{\epsilon} = B\sigma^n$ , descreva como se podem determinar os parâmetros  $B$  e  $n$ . No mínimo, quantos ensaios são necessários para determinar as duas constantes?
  - c. Se um segundo provete do mesmo material romper após 2h num ensaio de fluência sujeito à mesma tensão a 700 °C, determine o parâmetro de Larson-Miller  $P = T(c + \log t_r)$ , do material para esse nível de tensão.
  - d. Usando o parâmetro de Larson-Miller determinado na alínea c), qual seria o tempo de rotura para um material sujeito ao mesmo nível de tensão a 900 °C e à temperatura ambiente (25 °C)?

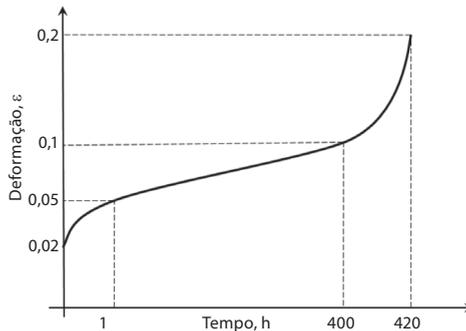


Figura B.7.1. Exemplo de curva de fluência.

### Resolução:

- a. Ao analisar a curva deformação vs tempo de um material sujeito a uma determinada tensão e temperatura, é possível distinguir três regiões distintas:
  - i. **Fluência primária** – a deformação é transitória, que aumenta até estabilizar num patamar. Nesta fase, a velocidade de deformação diminui. Isto deve-se ao facto de existir um predomínio dos mecanismos de encruamento, em que a resistência da fluência aumenta devido à sua deformação.

# B.8. AÇOS

## B.8.1. PROBLEMAS RESOLVIDOS

1. Considere o diagrama de equilíbrio Fe-C metastável, Figura B.8.1.
  - a. Legende o diagrama em termos de constituintes no caso dos aços, arrefecendo a partir do domínio austenítico.
  - b. Qual é a constituição de:
    - i. Um aço hipoeutetóide à temperatura ambiente.
    - ii. Um aço eutetóide à temperatura ambiente.
    - iii. O aço com maior teor de carbono à temperatura ambiente.
  - c. Qual é a percentagem de fases de um aço com 0,03 % de carbono a 950 °C? E à temperatura ambiente?
  - d. Qual é a percentagem de constituintes do aço St37 à temperatura ambiente?
  - e. Qual é a percentagem de constituintes de um aço com 1,2 %C à temperatura ambiente.

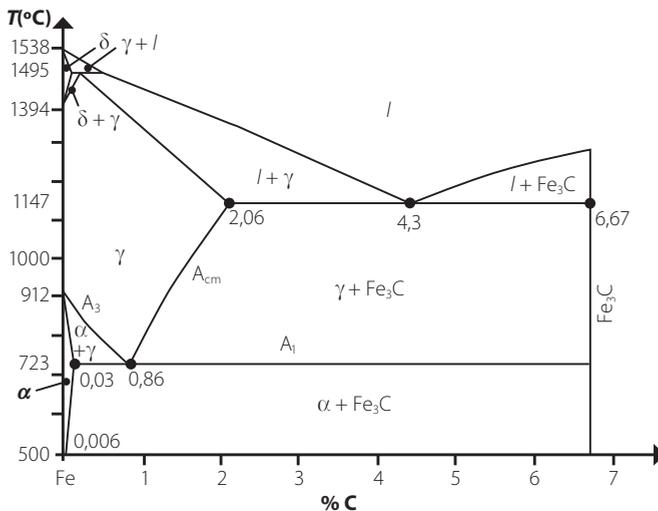
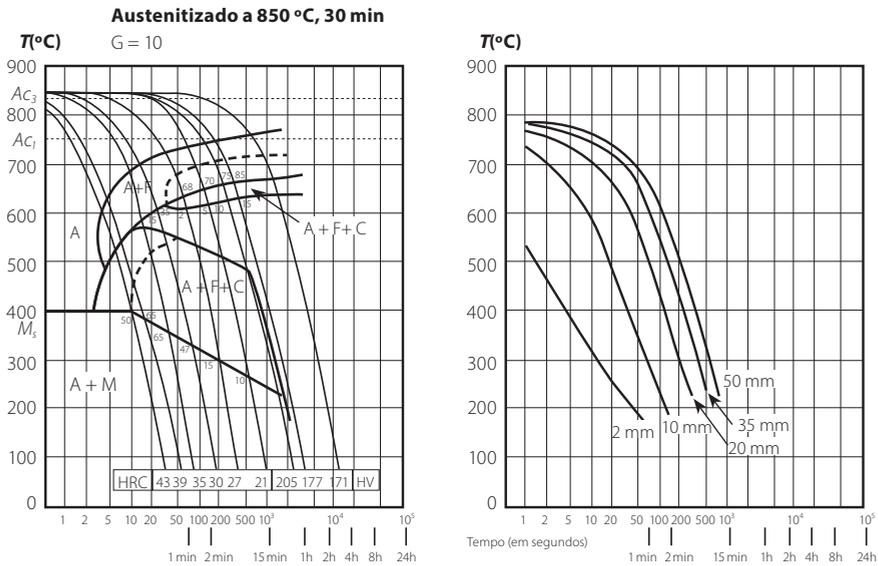


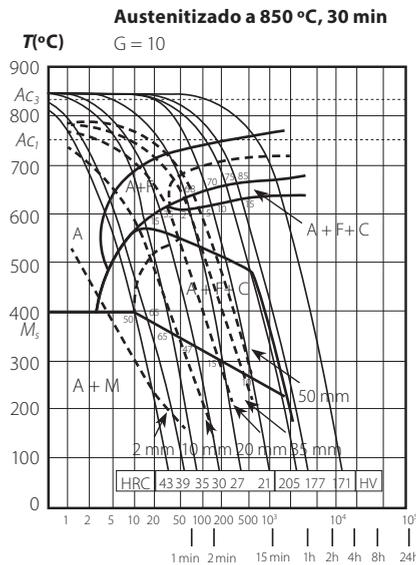
Figura B.8.1. Diagrama Fe-C metaestável.

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %
0,18	1,10	0,27	0,025	0,023	0,28	1,02	0,04	0,18



**Figura C.1.4.** Curvas TRC do aço RMC16 (esquerda), curvas teóricas de arrefecimento para diferentes distâncias ao provete (direita).

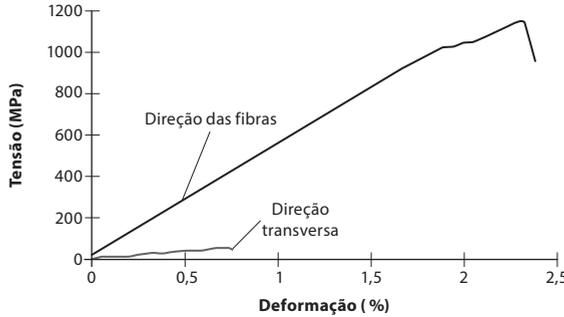
C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %
0,18	1,10	0,27	0,025	0,023	0,28	1,02	0,04	0,18



**Figura C.1.5.** Sobreposição das das curvas TRC e das curvas teóricas de arrefecimento

### C.13.2.5. Curva de tração de compósito determinada no sentido longitudinal e transversal

Duas curvas de tração, obtidas através do ensaio dos provetes de material compósito na direção das fibras e na direção transversal são mostradas na Figura C.13.1.



**Figura C.13.1.** Curvas de tensão deformação resultantes do ensaio de provetes de material compósito na direção das fibras (longitudinal) e transversal.

### C.13.2.6. Propriedades mecânicas e comentários

As propriedades mecânicas obtidas os ensaios de tração encontram-se resumidas na Tabela C.13.3.

**Tabela C.13.3.** Propriedades mecânicas do compósito estudado nas duas direções testadas.

	Sentido longitudinal (fibras)	Sentido transversal
<b>Rigidez (GPa)</b>	114,25	5,06
<b>Resistência (MPa)</b>	1121,59	47,55
<b>Ductilidade (%)</b>	2,39	0,75

Os dados experimentais obtidos revelam que no sentido longitudinal a rigidez e resistência dos compósitos são bastante superiores às do sentido transversal. Isto era esperado já que no sentido transversal a rigidez e resistência do compósito correspondem às da resina (polímero) que são baixas comparativamente com as das fibras de carbono que intervêm longitudinalmente.

Observa-se também que a ductilidade também é superior no caso longitudinal. No ensaio transversal obteve-se um valor para a resistência à tração de 47,55 MPa, o que é inferior aos 50 MPa da resina. Pode justificar-se o sucedido pelo facto de nesta

*TAMBÉM DISPONÍVEL*



# INTRODUÇÃO À CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS – TEORIA

LUCAS F. M. DA SILVA · RICARDO J. C. CARBAS · EDUARDO A. S. MARQUES ·  
CATARINA S. P. BORGES

# INTRODUÇÃO À CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS

## PRÁTICA

EDUARDO A. S. MARQUES  
RICARDO J. C. CARBAS  
CATARINA S. P. BORGES  
FERNANDO SOUSA  
LUCAS F. M. DA SILVA

### Sobre a obra

Esta obra de carácter prático e aplicado acompanha o livro teórico da mesma equipa de autores. Na primeira parte propõe uma série de demonstrações que permitem compreender facilmente vários conceitos teóricos. Por outro lado, a ciência dos materiais envolve conceitos que requerem cálculo, pelo que, na segunda parte deste livro, apresenta-se uma série de problemas sobre toda a matéria relativa à ciência dos materiais. Para cada matéria, alguns exercícios contêm uma resolução detalhada e são fornecidos problemas adicionais. A última parte aborda a engenharia dos materiais, através de experiências laboratoriais, sendo apresentados, para cada família de materiais, trabalhos laboratoriais que ilustram com ensaios mecânicos e físicos as principais características de cada material. A realização destes trabalhos permite aos estudantes desenvolverem competências laboratoriais que são essenciais para um/a engenheiro/a.

### Sobre os autores

**Eduardo A. S. Marques** é Investigador contratado pós-doutoral no Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI) e docente convidado no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Obteve o seu doutoramento na área das ligações adesivas estruturais para aplicações aeroespaciais na FEUP, em 2016, dedicando-se agora a estudar o efeito de elevadas taxas de deformação, temperaturas extremas e elevada humidade relativa no comportamento de diversos materiais e estruturas coladas.

**Ricardo J. C. Carbas** é atualmente Investigador pós-doutoral na Unidade de Processos Avançados de Ligação (UPAL), uma unidade de investigação do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI). Obteve doutoramento em juntas coladas funcionalmente graduadas, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), em 2013, e realiza regularmente trabalhos de consultoria para empresas nacionais e internacionais.

**Catarina S. P. Borges** é doutoranda em Engenharia Mecânica, desenvolvendo a sua investigação na área no projeto e durabilidade de juntas adesivas. Durante a sua tese de mestrado participou na concepção e desenvolvimento de um novo equipamento de ensaio para a caracterização à fractura de juntas adesivas sujeitas a taxas de deformação elevadas. É autora de diversos artigos de investigação neste campo.

**Fernando Sousa** é doutorando em Engenharia Mecânica, desenvolvendo a sua investigação na área do projeto à fadiga de juntas coladas. Durante a sua tese de mestrado desenvolveu uma nova metodologia para prever a durabilidade de juntas adesivas sujeitas a solicitações cíclicas. É autor de diversos artigos de investigação neste campo.

**Lucas F. M. da Silva** é Professor Catedrático no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e editor-chefe do *Journal of Materials Design and Applications* (SAGE). É o diretor da Unidade de Processos Avançados de Adesão (AJPU) do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI).

### Apoio



Também disponível em formato e-book



[www.engebook.pt](http://www.engebook.pt)

engebook