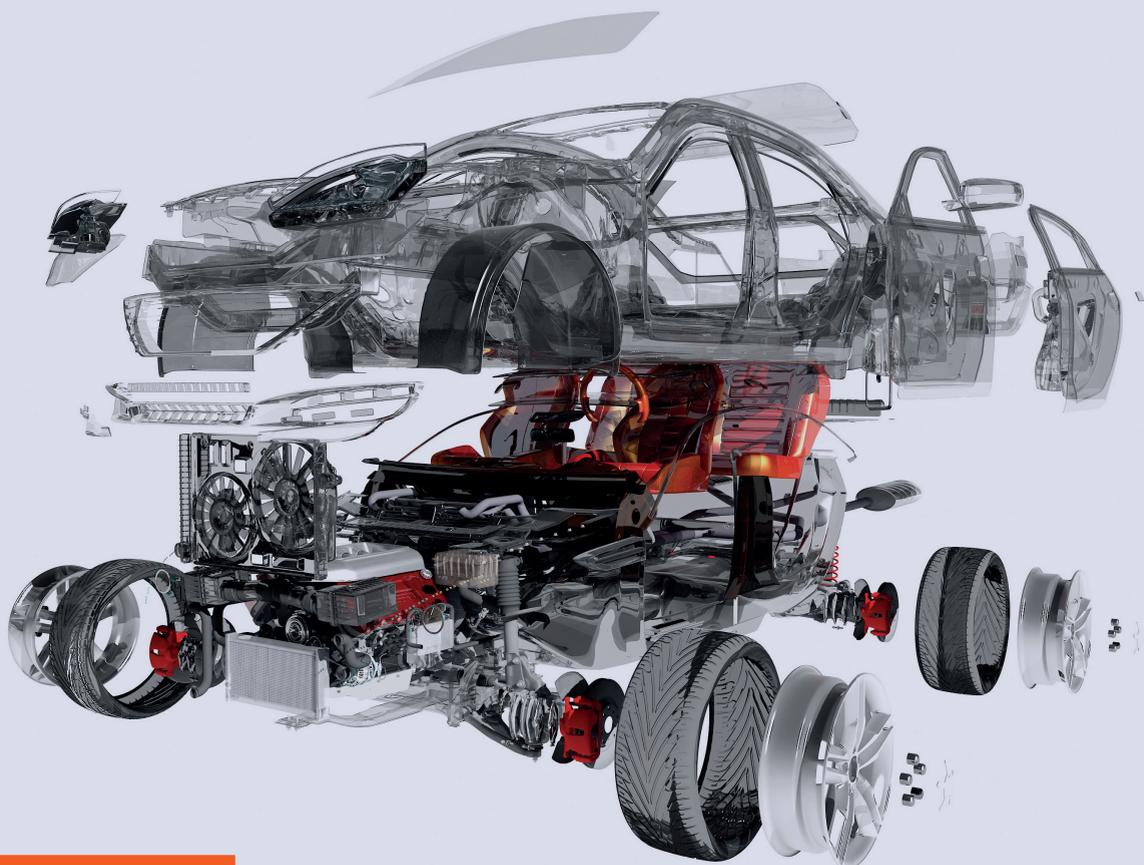


INTRODUÇÃO À CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS

TEORIA

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



AUTORES

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

TÍTULO

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

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

506300/22



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, e 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/10.61875/9789899101517>

ISBN

Papel: 9789899101517
E-book: 9789899101531

Catálogo da publicação

Família: Engenharia Mecânica
Subfamília: Materiais / Metalúrgica

PREFÁCIO	XV
1. ESTRUTURA DOS MATERIAIS	17
1.1. Introdução	19
1.2. Classes de materiais	19
1.3. Propriedades mecânicas	21
1.4. Comportamento elástico	22
1.4.1. Definição de tensão	22
1.4.2. Definição de deformação	23
1.4.3. Coeficiente de Poisson	24
1.4.4. Módulo de elasticidade e lei de Hooke	25
1.4.5. Relação entre módulo de Young e densidade	26
1.5. Ligações atômicas	28
1.5.1. Ligação iônica	29
1.5.2. Ligação covalente	30
1.5.3. Ligação metálica	31
1.5.4. Ligação de van der Waals	32
1.6. Empilhamento de átomos num sólido	33
1.6.1. Cristalografia geométrica	34
1.6.1.1. Redes cristalinas	34
1.6.1.2. Índices de Miller	35
1.6.2. Estruturas cristalinas dos metais	38
1.6.2.1. Estrutura cúbica de corpo centrado (CCC)	38
1.6.2.2. Estrutura cúbica de faces centradas (CFC)	39
1.6.2.3. Estrutura hexagonal compacta (HC)	39
1.6.2.4. Comparação das estruturas CFC e HC	40
1.6.3. Factores de ocupação atômico, planar e linear	40
1.6.4. Distâncias interplanar e interatômica	42
1.6.5. Estrutura cristalina dos materiais cerâmicos	43
1.6.6. Arranjo atômico nos polímeros	44

2.	DIAGRAMAS DE FASES	47
2.1.	Introdução	49
2.2.	Difusão	49
2.2.1.	Lei de Fick	50
2.2.2.	Coefficiente de difusão	50
2.2.3.	Mecanismos de difusão	51
2.3.	Transformações de fase	52
2.4.	Diagramas de fases	54
2.4.1.	Limite de solubilidade	54
2.4.2.	Fases	55
2.4.2.1.	Soluções sólidas	56
2.4.2.2.	Compostos definidos	56
2.5.	Microestrutura	57
2.6.	Relação de Gibbs	58
2.7.	Regras de interpretação dos diagramas de fases binários	58
2.7.1.	Regra da horizontal	59
2.7.2.	Regra da alavanca (ou dos segmentos inversos)	59
2.7.3.	Frações volúmicas	61
2.7.4.	Domínios trifásicos	61
2.8.	Reação eutética	62
2.8.1.	Ligas tais que $0 \leq X \leq x(C_1)$	63
2.8.2.	Ligas tais que $x(C_1) < X < x(C_2)$	64
2.9.	Diagrama de fases e diagrama de constituintes	67
2.10.	Transformações de fase congruentes	68
2.11.	Análise térmica simples	69
3.	DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	71
3.1.	Introdução	73
3.2.	Cedência e ductilidade	73
3.2.1.	Deformação elástica	73
3.2.2.	Deformação plástica	74
3.2.3.	Curva real	80
3.2.4.	Ensaio de tração	83
3.2.4.1.	Parâmetros de resistência	84
3.2.4.2.	Parâmetros de ductilidade	85
3.2.4.3.	Parâmetro de resiliência	86
3.2.4.4.	Parâmetro de tenacidade	86
3.2.5.	Ensaio de dureza	87
3.2.5.1.	Ensaio Vickers	88
3.2.5.2.	Ensaio Brinell	89
3.2.5.3.	Ensaio Rockwell	89
3.3.	Mecanismos de deformação	90
3.3.1.	Resistência teórica dos cristais	91
3.3.2.	Defeitos cristalinos	92
3.3.2.1.	Defeitos pontuais	93
3.3.2.2.	Defeitos lineares	94
3.3.2.3.	Defeitos planos	96

4.3.	Junta de grão	96
3.3.3.	Movimento das deslocações	96
3.3.3.1.	Deslocação canto (ou cunha)	96
3.3.3.2.	Sistemas de deslizamento	97
3.3.4.	Maclagem	98
3.3.5.	Deformação plástica em polímeros	99
4.	MECANISMOS DE ENDURECIMENTO	101
4.1.	Introdução	103
4.2.	Endurecimento de monocristais	103
4.2.1.	Intrínseco	103
4.2.2.	Precipitados em monocristais	103
4.2.3.	Solução sólida em monocristais	105
4.2.4.	Encruamento em monocristais	106
4.3.	Juntas de grão em policristais	107
4.4.	Aparecimento de uma segunda fase	108
4.5.	Interação de deslocações com átomos intersticiais	110
4.6.	Envelhecimento por deformação	111
4.7.	Endurecimento de polímeros	113
5.	MECÂNICA DA FRATURA	115
5.1.	Introdução	117
5.2.	Rotura frágil	117
5.3.	Teoria de Griffith	120
5.4.	Plasticidade na extremidade de fendas	122
5.5.	Fator intensidade de tensão	123
5.6.	Determinação experimental da tenacidade	125
5.7.	Mecanismos de rotura	126
5.7.1.	Rotura dúctil	126
5.7.2.	Rotura frágil	127
6.	FADIGA	131
6.1.	Introdução	133
6.2.	Definição dos ciclos de tensão	133
6.3.	Elevado número de ciclos	135
6.3.1.	Ensaios de fadiga	135
6.3.2.	Curvas SN	136
6.3.3.	Efeito da tensão média	138
6.3.4.	Efeito da variação da onda de tensão	140
6.4.	Baixo número de ciclos	143
6.5.	Componentes com fendas	144
6.5.1.	Ensaios	145
6.5.2.	Lei de Paris	146
6.6.	Mecanismos de rotura por fadiga	148
6.7.	Mecanismos de aumentar a resistência à fadiga	150

7.	FLUÊNCIA	153
7.1.	Introdução	155
7.2.	Curva de fluência	156
7.2.1.	Taxa de deformação na fluência secundária	158
7.2.2.	Tempo de rotura	158
7.3.	Métodos de extrapolação	160
7.4.	Mecanismos de fluência	161
7.4.1.	Subida das deslocações (<i>power-law</i>)	162
7.4.2.	Fluência por difusão	164
7.4.3.	Fluência de polímeros	165
7.5.	Rotura por fluência	166
7.6.	Mecanismos para aumentar a resistência à fluência	167
8.	AÇOS	169
8.1.	Introdução	171
8.2.	Formas alotrópicas do ferro	171
8.3.	Diagrama de equilíbrio ferro-carbono	174
8.3.1.	Constituição no estado recozido	174
8.3.2.	Influência da velocidade de arrefecimento nos pontos de transformação e na microestrutura	176
8.3.2.1.	Pontos de transformação	176
8.3.2.1.	Microestrutura dos aços	178
8.3.3.	Relações entre a microestrutura e as propriedades mecânicas: caso dos aços ferrito-perlíticos	179
8.4.1.	Transformação bainítica	183
8.4.2.	Transformação martensítica	184
8.5.	Diagramas TTT (tempo, temperatura, transformação)	186
8.5.1.	Transformações com difusão	186
8.5.2.	Transformação sem difusão ou martensítica	187
8.5.3.	Diagrama de transformação isotérmica	189
8.5.4.	Diagrama de transformação contínua	190
8.5.5.	Aços ligados	192
8.5.5.1.	Transformação eutetoide	193
8.5.5.2.	Temperaturas de transformação	194
8.5.5.3.	Efeito do gamageno e alfageno	194
8.5.5.4.	Natureza dos carbonetos	194
8.5.5.5.	Aços de construção ligados	195
8.5.5.6.	Aços inoxidáveis	196
8.6.	Tratamentos dos aços	198
8.6.1.	Tratamentos térmicos	198
8.6.1.1.	Recozido	199
8.6.1.2.	Recozido ou recozido completo	199
8.6.1.3.	Recozido de normalização	200
8.6.1.4.	Recozido de amaciamento ou de globulização	201
8.6.1.5.	Têmpera	202
8.6.1.5.1.	Martêmpera	206
8.6.1.5.2.	Têmpera Bainítica ou Austêmpera	206

8.6.1.6.	Temperabilidade	207
8.6.1.6.1.	Fatores que influenciam a temperabilidade	207
8.6.1.6.2.	Meios para avaliar a temperabilidade	207
8.6.1.7.	Revenido	211
8.6.1.8.	Transformações das estruturas	211
8.6.1.9.	Evolução das propriedades mecânicas	213
8.6.2.	Tratamentos superficiais	213
8.6.2.1.	Têmpera superficial	214
8.6.2.1.	Cementação	214
8.6.2.3.	Nitruração	214
8.7.	Aços de alta resistência	215
9.	FERROS FUNDIDOS	217
9.1.	Introdução	219
9.2.	Ferros fundidos brancos	220
9.2.1.	Ligas hipoeutéticas	221
9.2.2.	Ligas hipereutéticas	223
9.2.3.	Aplicações	224
9.3.	Ferros fundidos cinzentos	225
9.3.1.	Composição	225
9.3.2.	Processo de arrefecimento	227
9.3.3.	Morfologia da grafite	228
9.3.3.1.	Grafite tipo A	229
9.3.3.2.	Grafite tipo B	229
9.3.3.3.	Grafite tipo C	229
9.3.3.4.	Grafite tipo D	229
9.3.3.5.	Grafite tipo E	230
9.3.4.	Aplicações	230
9.4.	Ferros fundidos dúcteis	232
9.4.1.	Processo de obtenção da grafite nodular	232
9.4.1.1.	Adição de magnésio	232
9.4.1.2.	Inoculação	233
9.4.2.	Aplicações	233
9.5.	Ferros fundidos maleáveis	233
9.5.1.	Processo de maleabilização	234
9.5.1.1.	Ferro fundido maleável de coração branco (processo Europeu)	234
9.5.1.2.	Ferro fundido maleável de coração negro (processo Americano)	234
9.5.2.	Aplicações	235
9.6.	Sumário de propriedades mecânicas e aplicações de diferentes ferros fundidos	236
10.	LIGAS NÃO FERROSAS	237
10.1.	Introdução	239
10.2.	Alumínio	239
10.2.1.	Ligas trabalhadas de alumínio	242
10.2.2.	Ligas vazadas de alumínio	246

10.3. Cobre	248
10.3.1. Latões	249
10.3.2. Bronzes	252
10.3.3. Ligas de memória de forma	254
10.4. Magnésio	256
10.4.1. Ligas de magnésio	257
10.5. Titânio	258
10.5.1. Ligas de titânio	259
10.6. Níquel	261
10.6.1. Ligas de níquel	261
10.6.1.1. Monel	262
10.6.1.2. Inconel	262
10.6.1.3. Outras superligas de níquel	263
10.7. Zinco	264
10.7.1. Ligas de zinco	265
10.7.1.1. Zamak	265
10.7.1.2. Kayem	266
10.7.1.3. Ilzro	266
11. CERÂMICOS	267
11.1. Introdução	269
11.2. Classificação De Cerâmicos	269
11.2.1. Cerâmicos Tradicionais	270
11.2.2. Cerâmicos Técnicos	270
11.2.3. Vidros	271
11.3. Estrutura dos cerâmicos	272
11.3.1. Cerâmicos iônicos	273
11.3.2. Cerâmicos covalentes	274
11.3.3. Cerâmicos iônicos-covalentes (mistos)	275
11.3.4. Vidros	276
11.4. Propriedades mecânicas dos cerâmicos	277
11.4.1. Módulo de elasticidade	277
11.4.2. Dureza e resistência	277
11.4.3. Resistência à fratura dos cerâmicos	278
11.4.4. Fluência de materiais cerâmicos	279
11.5. Fabricação e processamento de cerâmicos	279
11.5.1. Preparação das matérias primas	280
11.5.2. Conformação	280
11.5.2.1. Conformação manual	281
11.5.2.2. Prensagem unidirecional a frio (de pó ou pasta)	281
11.5.2.3. Prensagem isostática a frio	282
11.5.2.4. Prensagem unidirecional a quente	283
11.5.2.5. Prensagem isostática a quente	283
11.5.2.6. Vazamento de uma barbotina	284
11.5.2.7. Extrusão	285

11.5.3.	Tratamento térmico	286
11.5.3.1.	Cozedura	286
11.5.3.2.	Sinterização no estado sólido	286
11.5.4.	Processo de fabrico de vidros	288
11.5.4.1.	Prensagem	288
11.5.4.2.	Moldação por sopro	288
11.5.4.3.	Fabrico de vidro plano	289
11.5.4.4.	Fabrico de vidro temperado	289
12.	POLÍMEROS	291
12.1.	Introdução	293
12.2.	Estrutura dos polímeros	293
12.2.1.	Escala	295
12.2.2.	Estrutura	296
12.2.3.	Temperatura de transição vítrea	298
12.3.	Tipos de polímeros	300
12.3.1.	Termoplásticos	301
12.3.1.1.	Termoplásticos baseados em estireno	301
12.3.1.2.	Termoplásticos vinílicos	304
12.3.1.3.	Outros termoplásticos amorfos	305
12.3.1.4.	Poliiolefinas	306
12.3.1.5.	Outros termoplásticos sem-cristalinos	308
12.3.1.6.	Termoplásticos de flúor	310
12.3.2.	Termoendurecíveis	311
12.3.3.	Elastómeros	318
12.4.	Fabricação e processamento de polímeros	322
12.4.1.	Processos de fabricação de polímeros termoplásticos	322
12.4.1.1.	Extrusão	322
12.4.1.2.	Moldação por injeção	323
12.4.1.3.	Moldação por sopro	324
12.4.1.4.	Fabrico aditivo	325
12.4.2.	Processos de fabricação de polímeros termoendurecíveis	325
12.4.2.1.	Moldação por injeção	326
12.4.2.2.	Moldação por compressão	326
12.4.2.3.	Moldação por transferência de resina	326
12.4.2.4.	Fabrico aditivo	327
12.4.3.	Processos de fabricação de elastómeros	328
12.4.3.1.	Vulcanização	328
12.5.	Propriedades mecânicas de polímeros	329
12.5.1.	Comparação do comportamento mecânico dos polímeros com outros materiais de construção mecânica	329
12.5.2.	Processos de deformação plástica em polímeros	330
12.5.3.	Mecanismos de endurecimento de polímeros	331
12.5.4.	Mecanismos de rotura	332
12.5.4.1.	Estiramento a frio	333
12.5.4.2.	<i>Crazing</i>	333
12.5.4.3.	Formação de bandas de corte	334
12.5.4.4.	Fluência	334

13. COMPÓSITOS	337
13.1. Introdução	339
13.2. Reforços e matrizes	340
13.2.1. Reforços	341
13.2.1.1. Fibras de vidro	341
13.2.1.2. Fibras de carbono	342
13.2.1.3. Fibras aramídicas	343
13.2.1.4. Fibras naturais	343
13.2.2. Matriz	344
13.2.2.1. Matriz polimérica	344
13.2.2.2. Matriz metálica	345
13.2.2.3. Matriz cerâmica	345
13.2.3. Semi-produtos	346
13.2.3.1. Compostos de moldação	346
13.2.3.2. Pré-impregnados	346
13.2.3.3. Pré-formas	348
13.2.3.4. Termoplásticos reforçados por fibras	348
13.3. Fabricação	349
13.3.1. Matriz polimérica	349
13.3.1.1. Impregnação de resina líquida	349
13.3.1.2. Consolidação de pré-impregnados	352
13.3.1.3. Consolidação de compostos de moldação	353
13.3.1.4. Fabrico aditivo	354
13.3.2. Matriz metálica	354
13.3.2.1. Técnicas no estado líquido	355
13.3.2.2. Técnicas no estado sólido	355
13.3.2.3. Técnicas por deposição	356
13.3.2.4. Infiltração química em fase vapor	356
13.3.2.5. Infiltração no estado líquido	357
13.3.2.6. Sol-gel	357
13.3.2.7. Oxidação direta	357
13.4. Compósitos reforçados com fibras	357
13.5. Compósitos reforçados com partículas	363
13.6. Outros compósitos	363
13.6.1. Madeira	363
13.6.2. Compósitos celulares	365
13.6.3. Estruturas <i>sandwich</i>	368

BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS CCCLXXI

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS CCCLXXVII

PREFÁCIO

O estudo dos materiais de engenharia é cada vez mais elaborado e multidisciplinar. É uma área científica muito dinâmica com inovações que transcendem o imaginário. É o caso por exemplo dos inovadores *chips* fabricados em papel ou das mais antigas ligas de memória de forma. É uma área de conhecimento que está em constante evolução e que permite à humanidade cada vez mais conforto. A parte da sustentabilidade é também uma questão essencial, mas felizmente abundam os exemplos de ideias promissoras de reciclagem, como o descobrimento de uma enzima natural por cientistas japoneses que em 50 anos alterou o seu comportamento para incluir plásticos na sua dieta.

Este livro não pretende apresentar as últimas novidades sobre materiais, mas ser uma primeira introdução que permita ter uma noção dos fundamentos teóricos e das aplicações dos principais materiais de engenharia. A apresentação é muito simples e objetiva com imagens e esquemas explicativos. A conceção do livro é, para além obviamente de formar, despertar a curiosidade e o interesse dos estudantes universitários.

Na primeira parte da obra sobre ciência dos materiais, pretende-se explicar como a microestrutura de um material condiciona o seu comportamento mecânico. Representa os primeiros sete capítulos abordando os temas da estrutura cristalina, diagramas de fases, deformação plástica, mecanismos de endurecimento, mecânica da fratura, fadiga e fluência. A segunda parte é mais aplicada e apresenta os principais materiais de engenharia, como o aço, ferros fundidos, ligas não ferrosas, cerâmicos, polímeros e compósitos. São apresentadas as principais propriedades mecânicas e aplicações com imagens muito sugestivas.

O público-alvo são estudantes universitários, especialmente dos cursos que necessitam de uma abordagem não muito aprofundada dos materiais de engenharia como gestão industrial, química, design, etc.

Os autores agradecem ao Eng. Fernando Sousa, Eng. Francisco Tenreiro, Eng. Paulo Nunes e Eng. Mateus dos Reis pela preparação de muitas imagens. Os autores agradecem também o apoio incondicional da Quântica Editora.

Os autores

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

1. ESTRUTURA DOS MATERIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

O capítulo inicial deste livro tem como objetivo explicar como as diferentes classes de materiais e algumas das suas propriedades fundamentais são altamente dependentes da estrutura atômica dos mesmos. Neste sentido, são descritos em detalhe os diversos tipos de ligações atômicas que podem se encontrar assim como as estruturas de empilhamento dos átomos, com especial enfoque nas estruturas cristalinas típicas de materiais metálicos. São também abordadas as estruturas cristalinas de materiais cerâmicos e a estrutura particular dos materiais poliméricos.

1.2. CLASSES DE MATERIAIS

Os materiais que são tipicamente usados em engenharia e construção encontram-se divididos em quatro grandes classes. Estes são os metais, polímeros, cerâmicos e compósitos, conforme ilustrado na Figura 1.1.

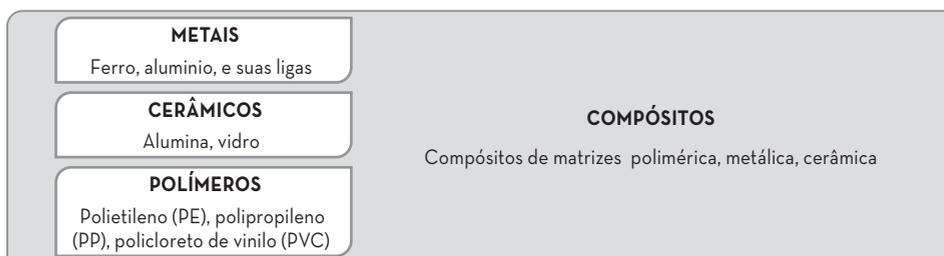


Figura 1.1. Classes de materiais e alguns exemplos.

Os metais são dos materiais mais importantes em aplicações de engenharia, fruto das suas excelentes propriedades mecânicas. Entre os metais mais comuns contam-se o ferro, alumínio, titânio, níquel, cobre entre muitos outros. Estes podem surgir no seu estado puro, mas mais habitualmente surgem sob a forma de ligas, que usualmente apresentam desempenho muito superior.

Em complemento aos metais, encontramos os polímeros. Embora sejam menos resistentes e rígidos que os metais, os polímeros são baratos, fáceis de processar e muito leves, o que os torna excepcionalmente adequados para aplicações não estruturais. Entre os materiais poliméricos com uso mais alargado contam-se, por exemplo, o polietileno, policarbonato, polipropileno e o policloreto de vinilo.

A deformação normal (na direção perpendicular à secção resistente) é representada pelo símbolo grego ε . Com a Equação 1.2 obtém-se a deformação sofrida por um dado material, sendo esta obtida pelo alongamento (Δl), ou variação do comprimento, dividido pelo comprimento inicial (l_0). O alongamento, por sua vez, é dado pela diferença entre o comprimento num dado instante, l , e o comprimento inicial l_0 . A deformação é, um conceito adimensional, sendo a razão entre dois comprimentos.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1.2)$$

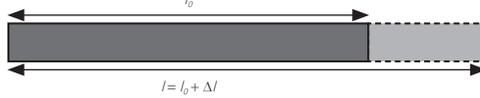


Figura 1.6. Deformação normal.

1.4.3. Coeficiente de Poisson

O conceito da deformação possibilita analisar o comportamento de um material de forma mais detalhada e permite determinar o coeficiente de Poisson do mesmo. Conforme mostrado acima, quando uma barra é sujeita a uma força de tração ocorre deformação longitudinal (aumento de Δl) mas esta é acompanhada de deformação transversal (contração ao longo da largura da barra Δb e ao longo da espessura Δd). Isto ocorre porque a continuidade do material tem de ser assegurada, se o material expande numa direção, terá necessariamente de contrair nas direções perpendiculares a esta. Em três dimensões, a deformação transversal atua segundo os eixos y e z conforme ilustrado na Figura 1.7., podendo estas deformações ser calculadas pelas expressões da Equação 1.3.

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta b}{b} \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta d}{d}$$

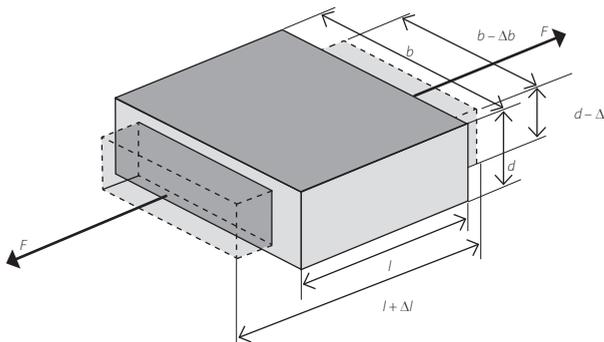


Figura 1.7. Deformação transversal de um sólido.

O coeficiente de Poisson é representado pelo símbolo ν e é obtido pela Equação 1.4. Em que ε_x é a deformação longitudinal ($\Delta l/l$) e ε_y e ε_z são as deformações transversais que

Metal
 Não metal
 Intermédio

1 Número atômico
1.0079 Massa atômica relativa

G1																		G18										
1 H 1.0079																	5 He 4.0026	Gases nobres										
G2																			10 Ne 20.180									
3 Li 6.941	4 Be 9.0122																	13 Al 26.982	G3	14 Si 28.086	G4	15 P 30.974	G5	16 S 32.065	G6	17 Cl 35.453	G7	18 Ar 39.948
11 Na 22.990	12 Mg 24.305	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.933	27 Co 58.693	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798									
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc [98]	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29											
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71		72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.20	83 Bi 208.98	84 Po [209]	85 At [210]	86 Rn [222]										
87 Fr [223]	88 Ra [226]	89-103		104 Rf [261]	105 Db [262]	106 Sg [266]	107 Bh [264]	108 Hs [277]	109 Mt [268]	110 Ds [271]	111 Rg [272]	112 Cn [272]	113 Nh [272]	114 Fl [272]	115 Mc [272]	116 Lv [272]	117 Ts [272]	118 Og [272]										
		Metais alcalinos-terrosos		57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm [145]	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.05	71 Lu 174.97	Halogênios									
				89 Ac [227]	90 Th [232.04]	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np [237]	94 Pu [243]	95 Am [243]	96 Cm [247]	97 Bk [247]	98 Cf [251]	99 Es [252]	100 Fm [257]	101 Md [258]	102 No [259]	103 Lr [262]										

Figura 1.13. Tabela periódica.

À medida que aumenta o número atômico, os níveis de energia vão sendo preenchidos segundo a ordem $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4s, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f$, etc..

O ponto mais importante para compreender os diferentes tipos de ligações consiste no facto de os átomos mais estáveis serem aqueles que têm a sua sub-camada de eletrões mais afastada do núcleo (camada periférica) completamente preenchida. Um exemplo de elementos que têm essa camada saturada são os gases nobres como o hélio, néon e árgon. Estes elementos são muito pouco reativos e dificilmente formam ligações químicas duradouras. Outros elementos podem adquirir essa estrutura estável ao formarem ligações químicas, que envolvem a perda de eletrões para os metais (Mg, Al, Fe, etc.), ou o ganho de eletrões para os não metais (Cl, O, etc.).

Estas ligações químicas podem ser classificadas como ligações primárias (também designadas por ligações químicas ou fortes) que incluem as ligações iónicas, metálicas e covalentes, ou ligações secundárias (também designadas por físicas ou fracas) que incluem as ligações de van der Waals e de hidrogénio. Os cerâmicos e os metais contêm exclusivamente ligações primárias, o que lhes confere alta rigidez e resistência, enquanto que os polímeros contêm ligações primárias e secundárias, que resultam num menor desempenho mecânico.

1.5.1. Ligação iónica

As ligações iónicas são estabelecidas entre elementos muito eletropositivos, como o caso dos metais, e muito eletronegativos, como o caso dos não metais. Nesta ligação, o átomo eletropositivo cede um ou mais eletrões ao átomo eletronegativo, o que produz iões de cargas opostas. As forças de ligação resultam da atração eletrostática entre os iões, como ilustrado na Figura 1.14. para o caso do cloreto de sódio.

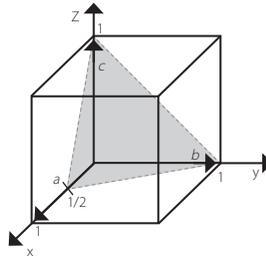


Figura 1.26. Exemplo de um plano cristalográfico.

Um índice negativo é representado por uma barra sobre o valor do índice. Para sistemas de elevada simetria, existem direções que são fisicamente equivalentes (apresentam a mesma densidade atômica linear ou planar, no caso das direções ou planos, respectivamente). Assim sendo, o conjunto de famílias para as direções é designado por $\langle u \ v \ w \rangle$ onde u, v, w são os índices de um dos representantes do conjunto. No caso dos planos é designado por $\{h \ k \ l\}$.

No sistema cúbico, qualquer direção $[u \ v \ w]$ é perpendicular ao plano com os mesmos índices de Miller.

Na Figura 1.27. e a Figura 1.28. encontram-se alguns exemplos de direções e planos cristalográficos, respetivamente, no sistema cúbico.

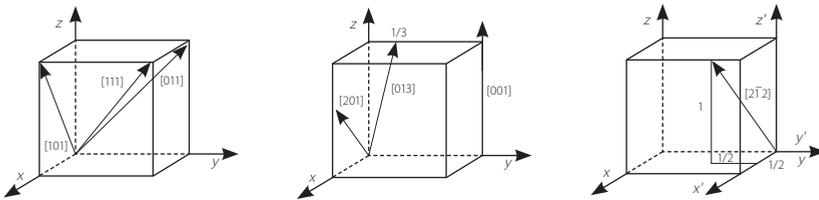


Figura 1.27. Exemplos de diferentes direções cristalográficas no sistema cúbico.

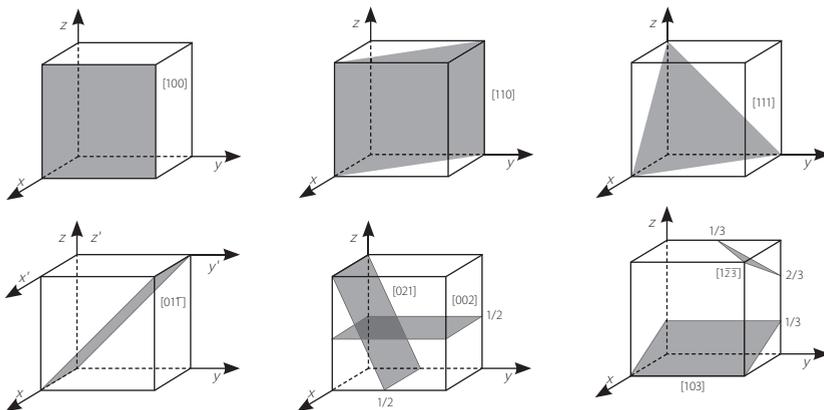


Figura 1.28. Exemplos de diferentes planos cristalográficos no sistema cúbico.

isotérmicas possíveis. Encontram-se definidas as transformações eutéticas ou eutetóides, peritéticas ou peritetóides, monotéticas ou monotetóides. Pode ainda notar-se que:

- se na transformação existir uma fase líquida, o nome acaba em 'íca';
- se na transformação existirem apenas fases sólidas, o nome acaba em 'oide'.

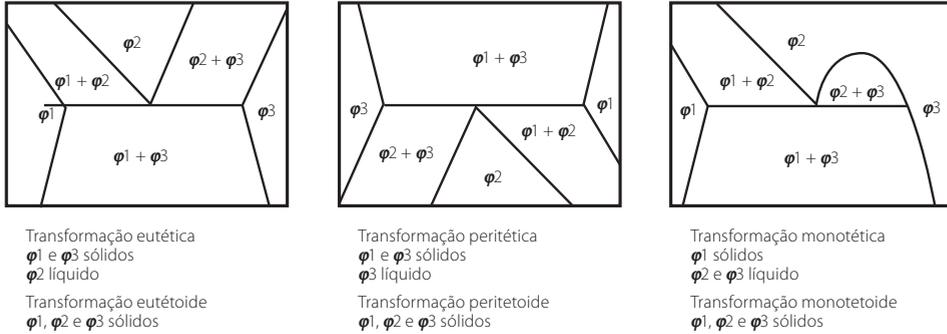


Figura 2.14. Diferentes tipos de transformações isotérmicas.

2.8. REAÇÃO EUTÉTICA

Das reações apresentadas na Figura 2.14. as transformações eutéticas e eutetóides são das transformações mais estudadas e estão presentes em muitos diagramas binários (Fe-C, Al-Si, Cu-Zn, Cu-Ag, etc.). Na Figura 2.15. está ilustrado um diagrama genérico com dois elementos A e B, que apresenta três domínios monofásicos: líquido l , solução sólida primária α de B em A e a solução sólida primária β de A em B. À temperatura T_E (temperatura eutética) todas as ligas tais que $x(C_1) \leq X \leq x(C_2)$ são trifásicas e constituídas pelas três fases α (C_1), l (E), β (C_2). A reação eutética é descrita por:

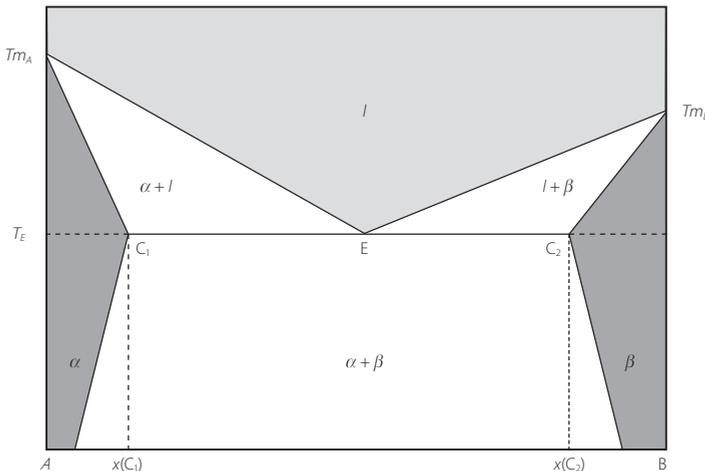
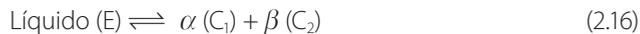


Figura 2.15. Diagrama de fases genérico com uma transformação eutética.

Para materiais dúcteis a área abaixo da curva é aproximada pela área de um retângulo com altura entre a tensão limite de elasticidade e a tensão de rotura e base igual à deformação no ponto de rotura, Figura 3.19.a:

$$U_T = \frac{\sigma_r + \sigma_e}{2} \varepsilon_f \quad (3.14)$$

Para materiais frágeis a área abaixo da curva é aproximada pela área de um retângulo com altura igual a $2/3$ da tensão de rotura e base igual à deformação no ponto de rotura, Figura 3.19.b:

$$U_T = \frac{2}{3} \sigma_r \varepsilon_f \quad (3.15)$$

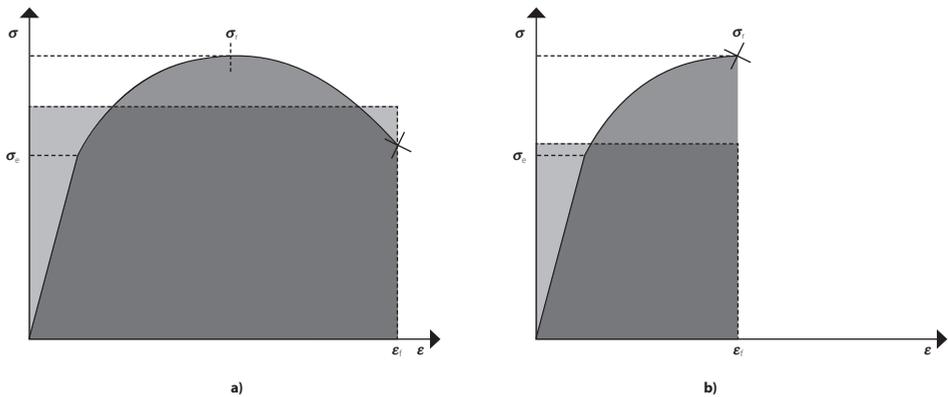


Figura 3.19. Representação gráfica da tenacidade e aproximação para a determinação do módulo de tenacidade para materiais dúcteis **a)** e frágeis **b)**.

3.2.5. Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza podem também ser utilizados para a caracterização de materiais, com a vantagem de serem muito simples e pouco destrutivos. A dureza caracteriza a resistência de um material à deformação, e os ensaios realizados para medir a dureza realizam-se por penetração. De um modo geral, um teste de dureza pode ser definido pela penetração com uma carga constante de um dado penetrado, no material e análise da impressão por ele deixada. Esta impressão será tanto menor quanto mais duro for o material. A dureza, H , é proporcional à relação entre a carga aplicada, F , e a área da impressão, A :

$$H = \frac{F}{A} \quad (3.16)$$

O valor obtido neste teste está intrinsecamente ligado à metodologia de teste utilizada. Por este motivo, apesar de ser possível exprimir-se a dureza em MPa, os números de dureza são expressos sem dimensão, com indicação da convenção de teste adotada. Existem diversas metodologias normalizadas para a realização destes ensaios, sendo as mais comuns Vickers, Brinell e Rockwell.

A passagem de uma deslocação por uma 'linha' de precipitados só se pode dar com um encurvamento da deslocação entre as partículas, Figura 4.1., o que exige uma tensão suplementar.

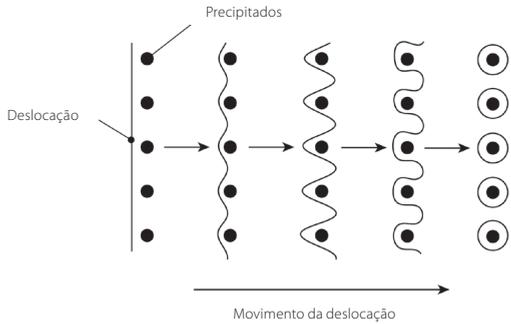


Figura 4.1. Movimento da deslocação na presença de precipitados.

Se um precipitado tiver a mesma estrutura que a matriz e apresentar uma continuidade dos planos cristalinos é considerado de precipitado coerente. O precipitado coerente tem uma interação mais marcada do que um precipitado incoerente oferecendo mais resistência à propagação de uma deslocação. Um precipitado incoerente tem uma estrutura diferente da matriz, Figura 4.2. Na Figura 4.3. pode-se notar que existe um tamanho limite abaixo do qual a eficácia tende a diminuir, uma partícula de grande tamanho (fenómeno de coalescência) não tem qualquer eficácia.

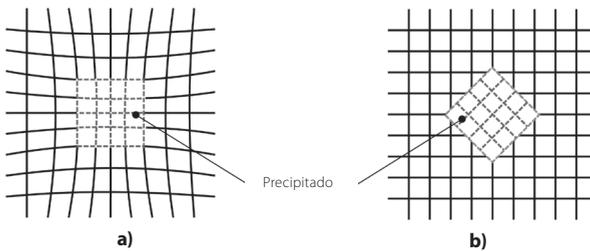


Figura 4.2. Precipitados coerentes a) e incoerentes b).

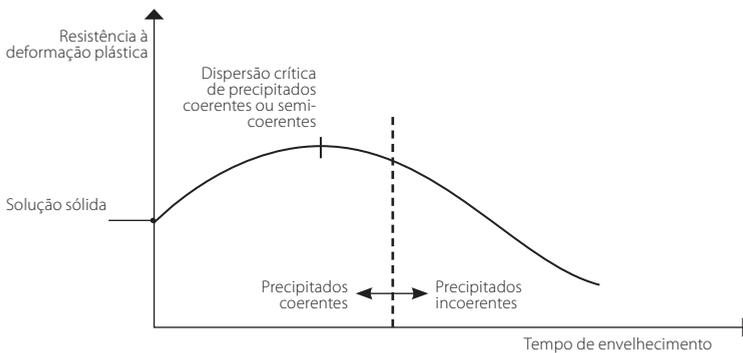


Figura 4.3. Variação da resistência à deformação plástica com o tipo e o tamanho do precipitado.

são menos sensíveis à temperatura, pois apresentam sistemas de fácil deslizamento que são difíceis de restringir.

Em materiais frágeis, a rotura pode ocorrer sem deformação plástica e segundo planos cristalográficos bem definidos, chamados de planos de clivagem. Estas roturas são chamadas de transgranulares, pois os planos de clivagem atravessam os grãos dos materiais, conforme ilustrado na Figura 5.16.

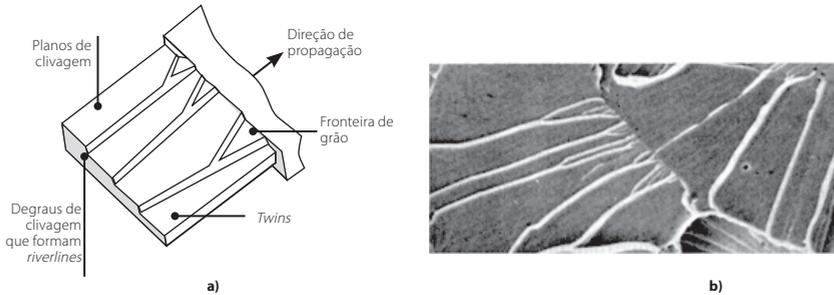


Figura 5.16. Rotura frágil de um metal através de planos de clivagem representada esquematicamente **a)** e em imagem real **b)**.

A superfície de fratura é, genericamente, lisa e brilhante, como a apresentada na fratura frágil do ensaio Charpy na Figura 5.3., sendo que, a interação da fissura com os defeitos estruturais ou heterogeneidades do metal conduz a microrelevos muito característicos chamados riverlines e twins, representados na Figura 5.16.

Num metal que solidifica desde o estado líquido, os grãos serão gerados de pequenos cristais sólidos, os germes, que vão crescer de forma desimpedida até que se encontram nas juntas de grão. Uma vez que estas juntas de grão correspondem às últimas regiões de solidificação, acabam por concentrar uma grande parte das impurezas presentes no metal líquido. Isto resulta numa rede frágil que rodeia os grãos tenazes. Nestes casos, o material é especialmente suscetível a uma rotura frágil completamente intergranular. A Figura 5.17. mostra esquematicamente este processo e o aspeto microscópico de uma superfície de rotura deste tipo.



Figura 5.17. Rotura frágil de um metal através de falha intergranular.

A composição química diferente nas juntas de grão pode causar outros problemas como a corrosão que gera fendas num material inicialmente livre de defeitos. Fratura frágil pode também ocorrer à temperatura ambiente, para materiais normalmente dúcteis, como os

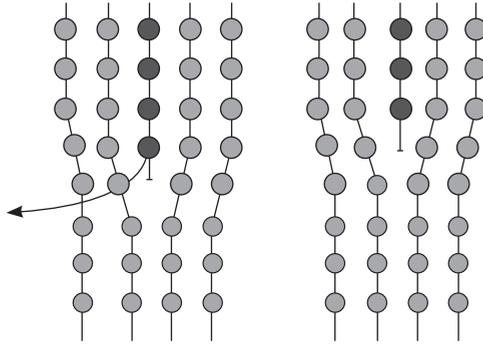


Figura 7.12. Difusão de átomos que permitem a subida de uma deslocação.

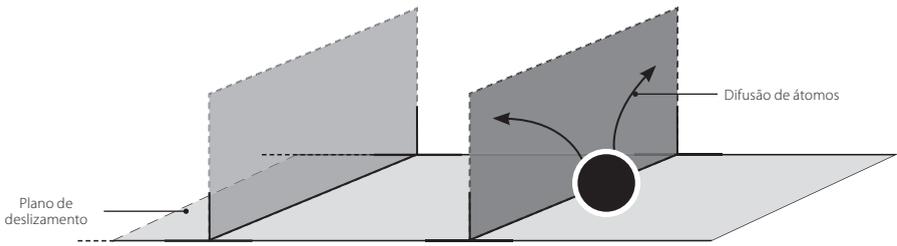


Figura 7.13. Subida de deslocações que permite a passagem por um precipitado.

Este comportamento é cíclico, repetindo-se para cada vez que uma deslocação se depara com um obstáculo, podendo esse obstáculo ser outra deslocação. É este avanço progressivo que origina o comportamento progressivo da deformação por fluência.

O coeficiente de difusão é dado por (o fenómeno de difusão está exposto com maior detalhe no Capítulo 2 sobre diagramas de fases):

$$D = -D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (7.5)$$

O que explica que a taxa de deformação, $\dot{\epsilon}$ pode ser relacionada com a temperatura através de:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (7.6)$$

Em que σ é a tensão devida à força de subida exercida sobre a deslocação. Assim, quanto maior essa força, mais obstáculos à progressão das deslocações serão removidos em cada intervalo de tempo e maior será a taxa de deformação. Deve ainda ser notado que a forma da Equação 7.6 é em tudo semelhante à Equação 7.1, fazendo $B = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$.

tável é usado para descrever a constituição dos aços não ligados no estado recozido, como ilustrado na Figura 8.7.

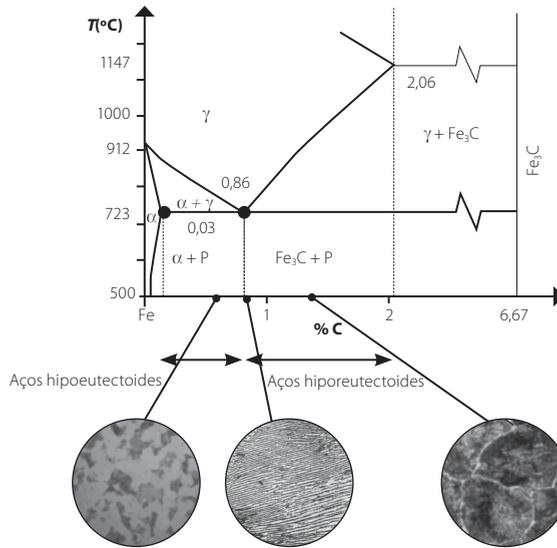
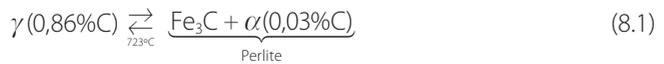


Figura 8.7. Constituição dos aços no estado recozido.

Todas as ligas ferrosas contêm em proporções variáveis do constituinte eutetoide, perlite, com exceção para os aços com menos de 0,03%C. A perlite é um agregado eutetoide obtido pela transformação isotérmica da austenite γ segundo:



Para a temperatura de 723°C e para todas as ligas com %C > 0,03%, a austenite apresenta o mesmo teor em carbono (0,86%), e no arrefecimento vai transformar-se em perlite. A perlite é um constituinte bifásico, composto por ferrite α e cementite. As frações mássicas de cada são determinados por:

$$\frac{\text{massa } Fe_3C \text{ eut}}{\text{massa perlite}} = \frac{0,86 - 0,03}{6,67 - 0,03} = 0,13; \quad \frac{\text{massa } \alpha \text{ eut}}{\text{massa perlite}} = 0,87 \quad (8.2)$$

O agregado é em geral lamelar. É formado por lamelas alternadas de Fe_3C e de α . A cementite é a primeira fase a sofrer nucleação nas juntas de grão da fase γ -mãe, energeticamente mais favorável. Na região adjacente à formação de cementite há um empobrecimento relativo em carbono, formando-se ferrite. Por sua vez, nas regiões adjacentes à ferrite haverá uma região mais rica em carbono que não consegue ser dissolvido nesta fase, promovendo a formação de cementite. Assim, pode compreender-se que a germinação de uma das fases promove a germinação da outra fase na região adjacente, e que o crescimento de uma das fases contribui para o crescimento da outra fase. Ou seja, pode dizer-se que a fase nucleante é a cementite, a germinação é recíproca e faz-se a partir das juntas de grão da fase γ -mãe e o crescimento é cooperativo e faz-se sem relação cristalográfica com a fase γ -mãe, fazendo intervir a difusão do carbono, Figura 8.8.

as ligas hipoeutéticas e as ligas hipereutéticas. As primeiras têm teores de carbono entre 2,06 e 4,3% e as segundas entre 4,3 e 6,67%.

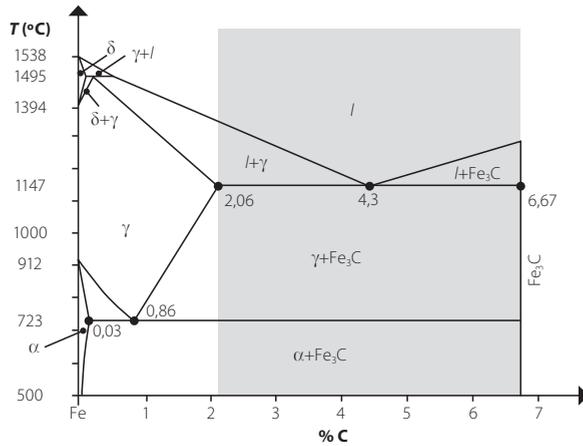


Figura 9.2. Diagrama Fe-C metaestável. A zona marcada a cinzento marca o intervalo que origina ferros fundidos.

9.2.1. Ligas hipoeutéticas

As ligas hipoeutéticas têm concentrações de carbono entre 2,06 e 4,3%. Considere-se a liga representada na Figura 9.3. pelos pontos A_1 .

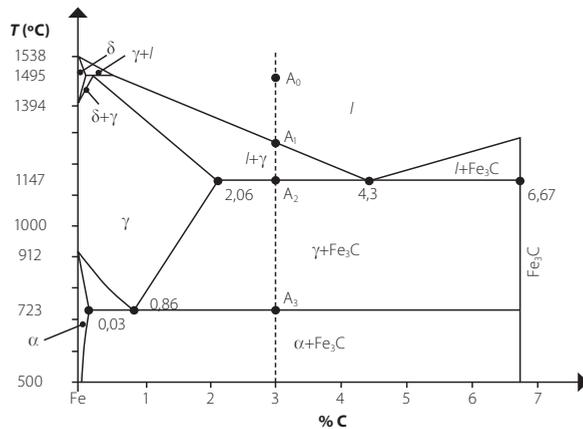


Figura 9.3. Diagrama Fe-C metaestável com liga hipoeutética assinalada.

A temperatura de vazamento da liga é ainda no estado líquido, A_0 . Posteriormente, à medida que ocorre o arrefecimento, os primeiros cristais sólidos de austenite aparecem à temperatura A_1 , que representa então o início da solidificação. No domínio $I + \gamma$ estes cristais continuam a desenvolver-se, geralmente sob a forma dendrítica, até que é atingida a temperatura da transformação eutética a 1148 °C, representada pelo ponto A_2 . Neste processo de solidificação a difusão tanto no estado sólido como no estado líquido é consideravelmente rápida devido à alta temperatura do domínio. Imediatamente antes do ponto

As principais ligas de cobre são o latão (cobre ligado com zinco) e o bronze (cobre ligado com estanho). Existem também outras ligas de cobre com características muito peculiares, das quais são o principal exemplo as ligas de memória de forma.

10.3.1. Latões

Os latões são ligas de cobre e zinco, em que o conteúdo de zinco pode variar entre 5 e 45%. São fundamentalmente ligas trabalhadas, facilmente estampadas, embutidos ou maquinadas, embora algumas variantes sejam também adequadas para uso em processos de fundição. Possuem uma cor que vai do rosado ao amarelo (dependente do teor de zinco), boa resistência à corrosão e respondem bem a tratamentos de superfície. Estas características levam a que os latões sejam muitas vezes utilizados para a produção de peças decorativas onde a componente estética é altamente valorizada. Podem ser fundidos, trabalhados a frio ou a quente, segundo a sua composição.

De forma geral, os diagramas de equilíbrio de cobre-X (em que X poderá ser zinco, estanho ou alumínio) apresentam todas soluções sólidas de três tipos, conforme mostrado na Tabela 10.5.

Tabela 10.5. Soluções sólidas de ligas de cobre.

Percentagem crescente de elemento de liga (%X) ↓	Solução sólida α	Estrutura CFC	Maleável	–
	Solução sólida α	Estrutura CCC	Maleável	CuZn Cu ₃ Sn Cu ₃ Al
	Solução sólida β	Estrutura cúbica (52 átomos por malha)	Muito frágil	Cu ₂ Zn Cu ₃ Sn Cu ₉ Al

O diagrama de equilíbrio cobre-zinco típico dos latões está representado na Figura 10.11.

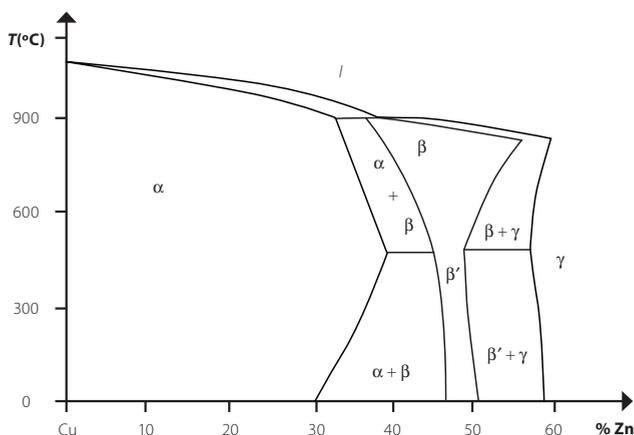


Figura 10.11. Diagrama de equilíbrio de ligas cobre-zinco.

Existem dois tipos principais de latões simples, dependendo das fases que incluem. Estes são os latões α (até 33% de Zinco) com estrutura do tipo CFC e os latões $\alpha + \beta$ (de 33 a 45% de zinco), de estrutura CCC. A fase β , desordenada, ocorre apenas a temperaturas elevadas,



Figura 11.13. Vela de ignição de um automóvel fabricada por prensagem isostática a frio.

11.5.2.4. Prensagem unidirecional a quente

A prensagem unidirecional a quente, Figura 11.14., é uma variante do método de prensagem unidirecional em que aplicação de temperatura e pressão ocorrem de forma simultânea durante o processo de fabrico. As altas temperaturas utilizadas neste processo permitem que o cerâmico seja processado a pressões muito superiores àquelas que são possíveis à temperatura ambiente, dando origem a materiais cerâmicos com densidades relativas mais elevadas, com poucos defeitos e propriedades mecânicas significativamente melhoradas. No entanto, este tipo de equipamento é complexo e muito mais caro que um sistema de prensagem a frio e apresenta as mesmas limitações em termos de geometrias que podem ser obtidas, o que limita o seu uso a peças simples e de pequena dimensão.

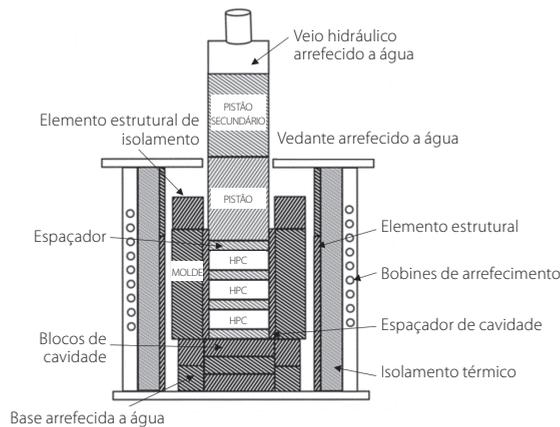


Figura 11.14. Forno de prensagem unidirecional a quente.

11.5.2.5. Prensagem isostática a quente

Neste processo, o cerâmico (em pré-forma ou em pó) é colocado num forno selado e preenchido com um gás a temperatura elevada. As peças são sujeitas a uma pressão isostática que compacta a matéria prima em todas as direções. Novamente, o uso da temperatura elevada permite que esta compactação seja feita de forma muito eficiente. Note-se que este processo requer um método que permita selar a superfície exterior da peça, caso contrário o gás a alta pressão poderá facilmente penetrar pelos inúmeros poros que existem na peça no início do processo, causando defeitos. Isto é conseguido recorrendo a uma encapsulação que pode ser feita com recurso a materiais metálicos, vidro ou outros

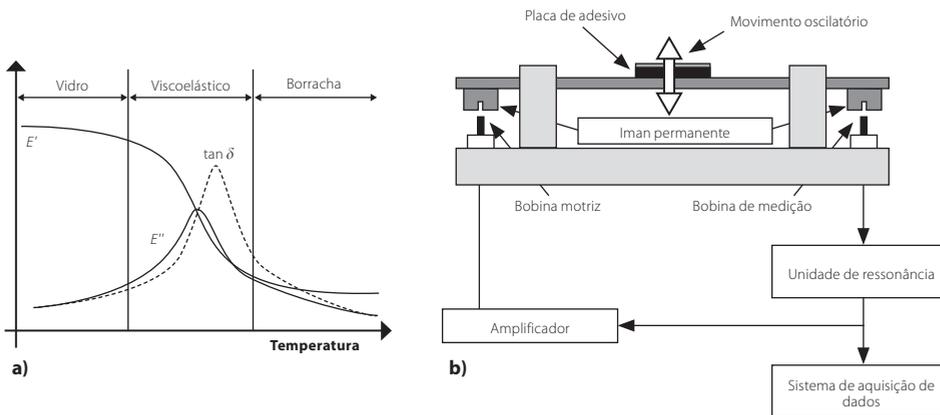


Figura 12.10. Pico de amortecimento existente na região de transição vítrea **a)** e representação esquemática de um sistema de medição de T_g baseado na análise dinâmica **b).**

Exemplos de valores típicos de T_g de diversos polímeros são mostrados na Tabela 12.1. Note-se que existem diversos materiais poliméricos cuja T_g é negativa, o que significa que à temperatura ambiente se encontram na fase mais flexível. Este é o caso dos elastômeros, materiais extremamente flexíveis vulgarmente conhecidos como borrachas.

Tabela 12.1. Valores típicos de temperatura de transição vítrea de alguns de alguns polímeros.

Polímero	T_g (°C)
Policloreto de vinilo (PVC)	75
Polipropileno (PP) atático	- 20
Polipropileno (PP) isotático	0
Poliétileno (PE) de baixa densidade	- 30
Poliétileno (PE) de alta densidade	- 100
Poliestireno (PS)	100
Polimetacrilato de metilo	105
Policarbonato (PC)	150
Borracha natural (NR)	- 75
Borracha de silicone (NR)	- 120

12.3. TIPOS DE POLÍMEROS

Os polímeros são usualmente divididos em três grandes categorias: os termoplásticos, termoendurecíveis e os elastômeros. Estes três tipos de polímeros diferem significativamente no seu comportamento mecânico, no tipo de processamento necessário, nas suas características físicas e químicas e nas suas aplicações. De uma forma geral, os termoplásticos apresentam cadeias poliméricas longas e com ramificações ocasionais, sendo amorfos ou semi-cristalinos. Uma vez que não existem ligações covalentes entre as cadeias podem ser fundidos e reutilizados com relativa facilidade. Um exemplo de um termoplástico muito utilizado é o polietileno. Já os termoendurecíveis apresentam uma rede tridimensional altamente reticulada com muitas ligações covalentes entre as cadeias. Esta rede não permite

Já os termoplásticos são materiais que se podem deformar elasticamente e plasticamente. No caso de solicitações a temperaturas abaixo da T_g encontramos uma deformação de natureza fundamentalmente elástica. Acima da T_g já existe uma grande contribuição da deformação plástica no desempenho mecânico do material.

12.5.4.1. Estiramento a frio

O mecanismo de estiramento a frio (*cold drawing*) é um processo que confere aos materiais termoplásticos excelentes propriedades mecânicas. Este processamento é obtido quando um material termoplástico é solicitado à tração a temperaturas próximas ou acima da T_g , forçando o alinhamento das cadeias poliméricas na direção do carregamento. O material resultante será mais resistente e rígido devido a esta orientação organizada das moléculas. As fibras poliméricas, utilizadas nas mais diversas aplicações como cablagens e têxteis são produzidas desta forma, garantindo elevadas resistência à tração. O processo de estiramento e forma como a reorientação das moléculas influencia o desempenho do material encontra-se explicado na Figura 12.58.

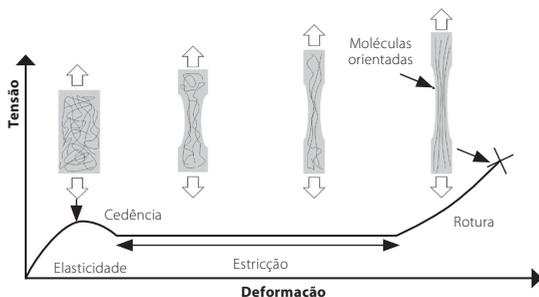


Figura 12.58. Processo de estirção de um polímero e a sua influência na curva tensão deformação.

12.5.4.2. Crazing

Um tipo de rotura muito específica que ocorre num polímero solicitado abaixo da T_g é o mecanismo de rotura por *crazing*. Neste fenómeno ocorre a formação de pequenas regiões com forma de fenda que se desenvolvem no material, Figura 12.59. Estas secções são chamadas de *crazes* e dispersam luz, conferindo um tom esbranquiçado aos plásticos quando estes são carregados e sofrem deformação plástica.

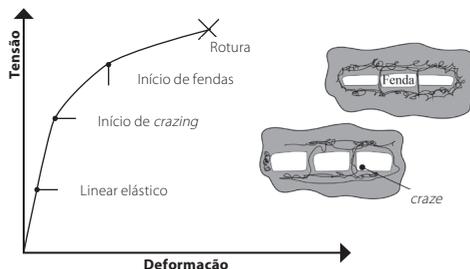


Figura 12.59. Representação esquemática do mecanismo de rotura por crazing.

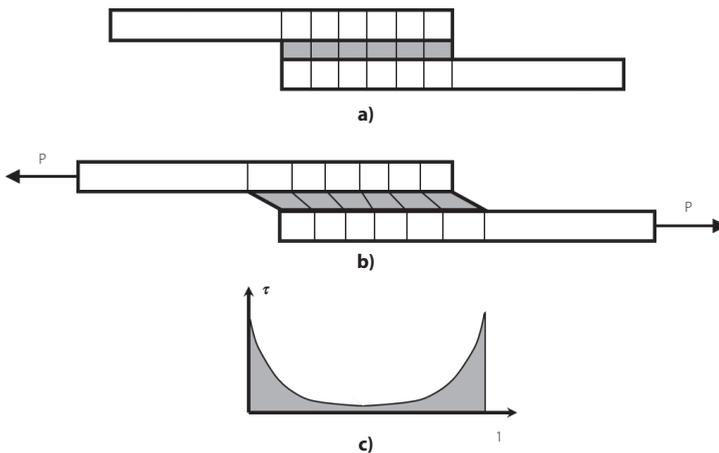


Figura 13.27. Junta de sobreposição simples sem carga **a)**, carregada **b)** e distribuição de tensões **c)**.

Nestas juntas, a falha pode ocorrer no adesivo, na interface adesivo/substrato ou no substrato. Quando a falha ocorre no substrato, sendo este um material compósito, pode haver uma descoesão entre as fibras e a matriz, como pode ser observado na Figura 13.28.

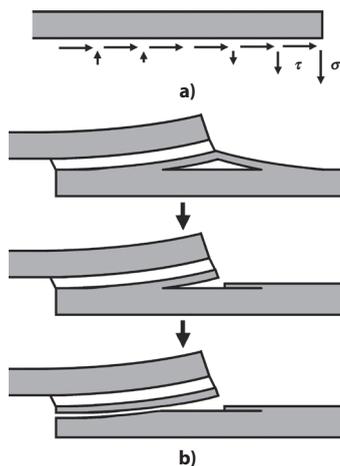


Figura 13.28. Descoesão fibra/matriz num material compósito tensões atuantes **a)** e descoesão do material compósito **b)**.

Isto normalmente é causado pelas tensões de arrancamento que podem surgir em ligações por juntas de sobreposição simples, conforme mostrado na Figura 13.27. Estas tensões atuam perpendicularmente à direção do plano de colagem e das fibras e sujeitam o material compósito na sua direção menos resistente. Nesta solicitação, a resistência interlaminar do compósito é apenas conferida pela resistência da matriz, sendo esta muito inferior à do material reforço. Como tal, é fundamental que as ligações adesivas de componentes compósitos sejam realizadas de forma a minimizar o aparecimento de tensões de arrancamento.

Os materiais celulares podem ser usados como reforço distribuído na matriz de um material compósito ou podem ser usados para criar o núcleo de uma estrutura sandwich (descritas em detalhe na secção seguinte). Os materiais celulares podem também aplicados de forma isolada, onde a sua geometria lhes confere um desempenho mecânico muito peculiar.

A maioria dos materiais poliméricos podem ser obtidos na forma de espuma através da mistura de um agente expansivo com grânulos do polímero antes do processamento. Este agente liberta dióxido de carbono durante o ciclo térmico, criando bolhas de gás na peça final. A estrutura de uma espuma polimérica é constituída por células poliédricas, podendo ser abertas, Figura 13.31.a, como nas esponjas ou fechadas, Figura 13.31.b.

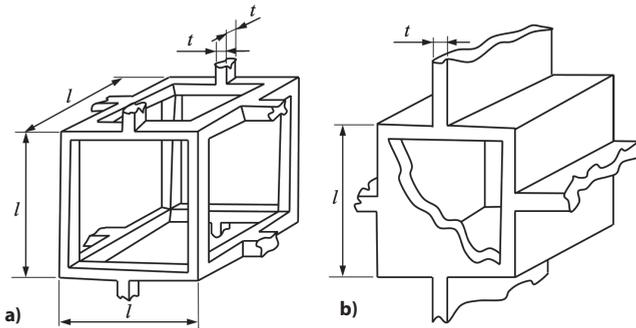


Figura 13.31. Espuma com células poliédricas abertas **a)** e fechadas **b)**.

A curva tensão-deformação à compressão de uma espuma, Figura 13.32., pode ser dividida em três zonas distintas. A primeira zona, para deformações pequenas, corresponde a um comportamento linear elástico. Nesta zona há uma flexão e distorção das células. À medida que a deformação aumenta passa-se a um *plateau* de tensão para uma dada gama de deformações, que corresponde a uma encurvadura elástica das colunas ou placas das células ou à deformação plástica das mesmas. A parte final da curva representa um rápido aumento da tensão que corresponde à rotura das células.

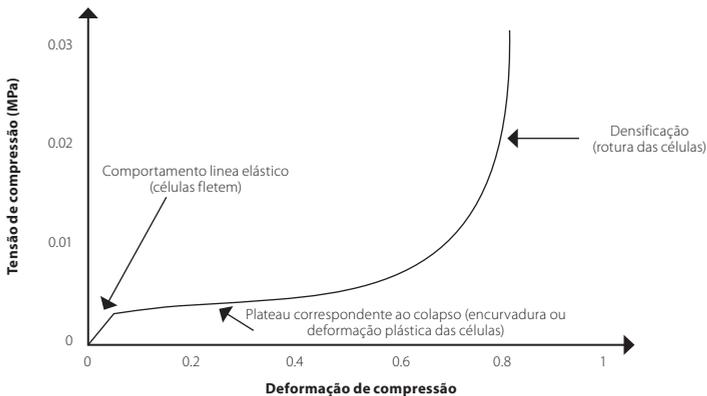


Figura 13.32. Curva tensão-deformação à compressão de uma espuma.

TAMBÉM DISPONÍVEL



INTRODUÇÃO À CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS – PRÁTICA

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

INTRODUÇÃO À CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS

TEORIA

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

Sobre a obra

O estudo dos materiais de engenharia é cada vez mais elaborado e multidisciplinar, constituindo uma área científica muito dinâmica e inovadora, e uma área de conhecimento em constante evolução, aliada à questão da sustentabilidade. Este livro não pretende apresentar as últimas novidades sobre materiais, mas ser uma primeira introdução que permita ter uma noção dos fundamentos teóricos e das aplicações dos principais materiais de engenharia, direcionando o interesse e a formação dos estudantes universitários. Os primeiros sete capítulos constituem uma primeira parte sobre ciência dos materiais, explicando como a microestrutura de um material condiciona o seu comportamento mecânico. Aborda os temas da estrutura cristalina, diagramas de fases, deformação plástica, mecanismos de endurecimento, mecânica da fratura, fadiga e fluência. Os restantes seis capítulos completam uma segunda parte, mais aplicada aos principais materiais de engenharia, como o aço, ferros fundidos, ligas não ferrosas, cerâmicos, polímeros e compósitos, sendo apresentadas as principais propriedades mecânicas e aplicações.

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.

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

engebook