

LUCAS F. M. DA SILVA  
JORGE LINO ALVES  
ANTÓNIO TORRES MARQUES

# MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.<sup>a</sup> Edição



LUCAS F. M. DA SILVA  
JORGE LINO ALVES  
ANTÓNIO TORRES MARQUES

# MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.<sup>a</sup> Edição

AUTORES

**Lucas Filipe Martins da Silva**

**Jorge Lino Alves**

**António Torres Marques**

TÍTULO

**MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO – 2.ª Edição**

EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO

Tel. 220 939 053 · E-mail: geral@quanticaeditora.pt · www.quanticaeditora.pt

CHANCELA

Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO

Booki – Conteúdos Especializados

Tel. 220 104 872 · E-mail: info@booki.pt · www.booki.pt

REVISÃO DA 2ª EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

DESIGN DA 2ª EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

IMPRESSÃO

Junho, 2023

DEPÓSITO LEGAL

515063/23



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2023 | Todos os direitos reservados 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

620 Testes dos Materiais

621 Engenharia Mecânica em Geral

ISBN

Papel: 9789899101746

E-book: 9789899101753

Catálogo da publicação

Família: Mecânica

Subfamília: Materiais/Metalurgia

LUCAS F. M. DA SILVA  
JORGE LINO ALVES  
ANTÓNIO TORRES MARQUES

# MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

2.<sup>a</sup> Edição



engebook

# ÍNDICE

|                                                                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>PREFÁCIO À 2ª EDIÇÃO .....</b>                                                                            | <b>XIX</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                    | <b>21</b>  |
| 1.1. História .....                                                                                          | 21         |
| 1.2. Ciência e engenharia dos materiais.....                                                                 | 21         |
| 1.3. Propriedades dos materiais.....                                                                         | 22         |
| 1.3.1. Propriedades mecânicas.....                                                                           | 22         |
| 1.3.2. Propriedades térmicas.....                                                                            | 24         |
| 1.3.3. Propriedades elétricas, magnéticas e óticas.....                                                      | 26         |
| 1.3.4. Propriedades químicas.....                                                                            | 27         |
| 1.4. Processos.....                                                                                          | 28         |
| 1.5. Classificação dos materiais.....                                                                        | 29         |
| 1.5.1. Metais.....                                                                                           | 29         |
| 1.5.2. Cerâmicos.....                                                                                        | 32         |
| 1.5.3. Polímeros.....                                                                                        | 32         |
| 1.5.4. Compósitos.....                                                                                       | 33         |
| <b>PARTE A: METAIS.....</b>                                                                                  | <b>35</b>  |
| <b>2. AÇOS.....</b>                                                                                          | <b>37</b>  |
| 2.1. Diagrama de equilíbrio ferro-carbono.....                                                               | 37         |
| 2.2. Aços ao carbono.....                                                                                    | 42         |
| 2.2.1. Constituição no estado recozido.....                                                                  | 44         |
| 2.2.2. Influência da velocidade de arrefecimento nos pontos de<br>transformação e na microestrutura.....     | 48         |
| 2.2.2.1. Temperaturas de transformação.....                                                                  | 48         |
| 2.2.2.2. Microestrutura dos aços.....                                                                        | 50         |
| 2.2.3. Relações entre a microestrutura e as propriedades mecânicas:<br>caso dos aços ferrito-perlíticos..... | 52         |

|                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.4. Resultados experimentais.....                                                          | 53        |
| 2.2.4.1. Influência do teor em carbono .....                                                  | 53        |
| 2.2.4.2. Influência da microestrutura.....                                                    | 54        |
| <b>2.3. Aços ligados .....</b>                                                                | <b>56</b> |
| 2.3.1. Influência dos elementos de liga nas condições de equilíbrio e nas transformações..... | 56        |
| 2.3.1.1. Influência no ponto eutectoide.....                                                  | 58        |
| 2.3.1.2. Influência no domínio austenítico.....                                               | 59        |
| 2.3.1.3. Elementos carborígenos e não carborígenos.....                                       | 61        |
| 2.3.2. Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços no estado recozido.....     | 62        |
| 2.3.2.1. Influência dos elementos solúveis na fase ferrítica.....                             | 63        |
| 2.3.2.2. Influência dos elementos de liga nos carbonetos.....                                 | 63        |
| 2.3.2.3. Ação dos elementos de liga formando precipitados.....                                | 63        |
| <b>2.4. Tratamentos térmicos dos aços .....</b>                                               | <b>64</b> |
| 2.4.1. Transformações isotérmicas da austenite.....                                           | 65        |
| 2.4.1.1. Transformações com difusão.....                                                      | 66        |
| 2.4.1.2. Transformação sem difusão ou martensítica.....                                       | 69        |
| 2.4.2. Parâmetros influenciando as transformações da austenite .....                          | 72        |
| 2.4.2.1. Influência da composição da austenite .....                                          | 72        |
| 2.4.2.2. Influência das condições de austenitização.....                                      | 74        |
| 2.4.3. Diagramas TTT isotérmicos .....                                                        | 74        |
| 2.4.4. Diagramas TRC .....                                                                    | 76        |
| 2.4.5. Recozidos.....                                                                         | 80        |
| 2.4.5.1. Recozido completo ou simplesmente recozido.....                                      | 82        |
| 2.4.5.2. Recozido de homogeneização ou de difusão.....                                        | 82        |
| 2.4.5.3. Recozido de normalização .....                                                       | 83        |
| 2.4.5.4. Recozido de amaciamento ou de globulização.....                                      | 84        |
| 2.4.5.5. Recozido de relaxação ou de distensão .....                                          | 85        |
| 2.4.5.6. Recozido isotérmico.....                                                             | 86        |
| 2.4.6. Têmpera .....                                                                          | 87        |
| 2.4.6.1. Austenitização .....                                                                 | 87        |
| 2.4.6.2. Arrefecimento.....                                                                   | 88        |
| 2.4.6.3. Tensões residuais.....                                                               | 92        |
| 2.4.6.4. Têmpera com estágio martensítica ou martêmpera.....                                  | 94        |
| 2.4.6.5. Têmpera bainítica ou austêmpera .....                                                | 95        |
| 2.4.7. Temperabilidade.....                                                                   | 95        |
| 2.4.7.1. Fatores influenciando a temperabilidade.....                                         | 96        |
| 2.4.7.2. Utilização dos diagramas TRC.....                                                    | 96        |
| 2.4.7.3. Curvas de penetração de têmpera.....                                                 | 97        |
| 2.4.7.4. Diâmetro crítico .....                                                               | 100       |

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.4.7.5. Utilização do ensaio Jominy.....                                                    | 100        |
| 2.4.8. Revenido.....                                                                         | 103        |
| 2.4.8.1. Transformações metalúrgicas.....                                                    | 104        |
| 2.4.8.2. Evolução das propriedades mecânicas.....                                            | 106        |
| <b>2.5. Tratamentos superficiais.....</b>                                                    | <b>108</b> |
| 2.5.1. Tratamento de endurecimento superficial por têmpera após aquecimento localizado.....  | 108        |
| 2.5.2. Tratamento de endurecimento por têmpera superficial após cementação pelo carbono..... | 109        |
| 2.5.2.1. Tratamentos térmicos após cementação.....                                           | 111        |
| 2.5.2.2. Profundidade de cementação.....                                                     | 111        |
| 2.5.3. Tratamentos de nitruração.....                                                        | 112        |
| 2.5.4. Tratamentos de carbonitruração.....                                                   | 113        |
| <b>2.6. Aços de ferramentas.....</b>                                                         | <b>113</b> |
| 2.6.1. Composição química e estruturas.....                                                  | 114        |
| 2.6.1.1. Estrutura no estado recozido.....                                                   | 114        |
| 2.6.1.2. Estrutura após tratamento térmico.....                                              | 115        |
| 2.6.2. Classificação dos aços de ferramentas.....                                            | 115        |
| 2.6.3. Aços rápidos.....                                                                     | 116        |
| <b>2.7. Aços inoxidáveis.....</b>                                                            | <b>117</b> |
| 2.7.1. Diagramas de equilíbrio.....                                                          | 117        |
| 2.7.1.1. Binários Fe-Cr.....                                                                 | 117        |
| 2.7.1.2. Binários Fe-Ni.....                                                                 | 118        |
| 2.7.1.3. Ternários Fe-Ni-Cr.....                                                             | 119        |
| 2.7.1.4. Aços inoxidáveis de n constituintes.....                                            | 119        |
| 2.7.1.5. Influência do carbono.....                                                          | 119        |
| 2.7.2. Categorias de aços inoxidáveis.....                                                   | 120        |
| 2.7.3. Aços inoxidáveis ferríticos (magnéticos).....                                         | 121        |
| 2.7.4. Aços inoxidáveis martensíticos (magnéticos).....                                      | 121        |
| 2.7.5. Aços inoxidáveis austeníticos (amagnéticos).....                                      | 121        |
| 2.7.6. Aços inoxidáveis de endurecimento por precipitação ( <i>maraging</i> ).....           | 122        |
| 2.7.7. Corrosão dos aços inoxidáveis.....                                                    | 122        |
| <b>3. FERROS FUNDIDOS.....</b>                                                               | <b>123</b> |
| <b>3.1. Ferros fundidos brancos.....</b>                                                     | <b>123</b> |
| 3.1.1. Ligas hipoeutéticas $2,06\% < \%C < 4,3\%$ .....                                      | 123        |
| 3.1.2. Ligas hipereutéticas $4,3\% < \%C < 6,67\%$ .....                                     | 126        |
| <b>3.2. Ferros fundidos cinzentos.....</b>                                                   | <b>127</b> |
| 3.2.1. Ligas hipoeutéticas: $2,03 < \%C < 4,25$ .....                                        | 128        |
| 3.2.2. Ligas hipereutéticas: $4,25\% < \%C < 100\%$ .....                                    | 129        |
| 3.2.3. Influência dos elementos de elaboração.....                                           | 129        |

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.4. Fatores que afetam a constituição e a microestrutura dos ferros fundidos..... | 130        |
| 3.2.4.1. Elaboração do metal.....                                                    | 130        |
| 3.2.4.2. Composição química.....                                                     | 130        |
| 3.2.4.3. Condições de arrefecimento.....                                             | 131        |
| 3.2.5. Constituintes dos ferros fundidos cinzentos.....                              | 132        |
| 3.2.5.1. Ferrite.....                                                                | 132        |
| 3.2.5.2. Perlite.....                                                                | 132        |
| 3.2.5.3. Cementite.....                                                              | 132        |
| 3.2.5.4. Esteadite.....                                                              | 133        |
| 3.2.5.5. Grafite.....                                                                | 133        |
| 3.2.6. Características mecânicas dos ferros fundidos cinzentos.....                  | 134        |
| <b>3.3. Ferros fundidos dúcteis.....</b>                                             | <b>136</b> |
| 3.3.1. Elaboração.....                                                               | 137        |
| 3.3.2. Constituição e tratamentos.....                                               | 137        |
| 3.3.3. Características mecânicas.....                                                | 138        |
| <b>3.4. Ferros fundidos maleáveis.....</b>                                           | <b>138</b> |
| 3.4.1. Processo europeu (maleabilização por recozido de descarburização).....        | 139        |
| 3.4.2. Processo americano (maleabilização por recozido de grafitização).....         | 139        |
| 3.4.2.1. Maleáveis de coração negro ferríticos.....                                  | 139        |
| 3.4.2.2. Maleáveis de coração negro perlíticos e martensíticos.....                  | 140        |

#### **4. LIGAS NÃO FERROSAS.....141**

|                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.1. Ligas de alumínio.....</b>                              | <b>141</b> |
| 4.1.1. Tratamento de precipitação estrutural.....               | 142        |
| 4.1.2. Propriedades gerais das ligas de alumínio.....           | 146        |
| 4.1.2.1. Resistência a quente.....                              | 148        |
| 4.1.2.2. Resistência a baixas temperaturas.....                 | 148        |
| 4.1.2.3. Resistência à fadiga.....                              | 148        |
| 4.1.2.4. Resistência à corrosão.....                            | 148        |
| 4.1.2.5. Conformação.....                                       | 148        |
| 4.1.2.6. Soldadura.....                                         | 149        |
| 4.1.2.7. Comparação das resistências de diferentes classes..... | 149        |
| 4.1.3. Ligas sem endurecimento estrutural.....                  | 150        |
| 4.1.3.1. Liga alumínio-manganês (3xxx).....                     | 150        |
| 4.1.3.2. Liga alumínio-magnésio (5xxx).....                     | 150        |
| 4.1.4. Ligas de endurecimento estrutural.....                   | 151        |
| 4.1.4.1. Ligas alumínio-cobre (2xxx).....                       | 151        |
| 4.1.4.2. Ligas alumínio-silício-magnésio (6xxx).....            | 152        |
| 4.1.4.3. Ligas alumínio-zinco-magnésio (7xxx).....              | 153        |



|                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.5. Ligas alumínio-silício (4xxx).....                      | 153        |
| 4.1.6. Ligas alumínio-lítio .....                              | 154        |
| <b>4.2. Ligas de cobre .....</b>                               | <b>155</b> |
| 4.2.1. Latões (ligas Cu-Zn, 5 a 45% de Zn).....                | 156        |
| 4.2.1.1. Latões simples (binários Cu-Zn).....                  | 156        |
| 4.2.1.2. Latões com adições .....                              | 158        |
| 4.2.1.3. Características mecânicas.....                        | 158        |
| 4.2.1.4. Resistência à corrosão .....                          | 158        |
| 4.2.2. Bronzes (Cu-Sn, de 3 a 20% de Sn) .....                 | 159        |
| 4.2.2.1. Bronzes simples (binários Cu-Sn).....                 | 159        |
| 4.2.2.2. Bronzes com adições .....                             | 160        |
| 4.2.2.3. Características mecânicas.....                        | 160        |
| 4.2.3. Ligas de cobre-berílio.....                             | 160        |
| 4.2.4. Cupro-alumínios (Cu-Al, de 4 a 14% Al).....             | 161        |
| 4.2.4.1. Cupro-alumínios simples (binários Cu-Al) .....        | 161        |
| 4.2.4.2. Cupro-alumínios com adições .....                     | 162        |
| 4.2.4.3. Características mecânicas .....                       | 162        |
| 4.2.5. Cupro-níqueis (Cu-Ni, de 5 a 45% de Ni).....            | 162        |
| 4.2.6. Ligas de cobre-níquel-zinco ('alpaca') (Cu-Ni-Zn) ..... | 162        |
| 4.2.7. Ligas de memória de forma .....                         | 162        |
| <b>4.3. Ligas de magnésio.....</b>                             | <b>163</b> |
| 4.3.1. Ligas magnésio-alumínio.....                            | 165        |
| 4.3.2. Ligas magnésio-manganês .....                           | 165        |
| 4.3.3. Ligas magnésio-zircônio.....                            | 165        |
| <b>4.4. Ligas de titânio .....</b>                             | <b>166</b> |
| <b>4.5. Ligas de zinco.....</b>                                | <b>168</b> |
| 4.5.1. Ligas com 4% de alumínio .....                          | 169        |
| 4.5.2. Ligas com 4% de alumínio e 3% de cobre.....             | 169        |
| 4.5.3. Ligas com 12% de alumínio .....                         | 170        |
| 4.5.4. Ligas com 35% de alumínio .....                         | 170        |
| <b>4.6. Ligas de níquel.....</b>                               | <b>170</b> |
| 4.5.1. Ligas de níquel-crómio .....                            | 171        |
| 4.5.2. Superligas de níquel.....                               | 171        |
| 4.5.2.1. Ligas níquel-crómio-ferro.....                        | 171        |
| 4.5.2.2. Ligas níquel-molibdênio.....                          | 172        |
| <b>5. FABRICAÇÃO .....</b>                                     | <b>173</b> |
| 5.1. Fundição .....                                            | 174        |
| <b>5.2. Processos de deformação .....</b>                      | <b>178</b> |
| 5.2.1. Laminagem.....                                          | 178        |
| 5.2.1.1. Laminagem a quente .....                              | 178        |

|                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.1.2. Laminagem a frio.....                                 | 178        |
| 5.2.2. Extrusão.....                                           | 179        |
| 5.2.3. Forjamento.....                                         | 179        |
| 5.2.4. Estiramento.....                                        | 180        |
| 5.2.5. Estampagem.....                                         | 180        |
| 5.2.6. Pressão de deformação.....                              | 181        |
| <b>5.3. Recristalização.....</b>                               | <b>184</b> |
| 5.3.1. Restauração (ou restauração no sentido restrito).....   | 185        |
| 5.3.2. Recristalização primária.....                           | 185        |
| 5.3.3. Crescimento do grão ou recristalização secundária.....  | 186        |
| <b>PARTE B: CERÂMICOS.....</b>                                 | <b>189</b> |
| <b>6. TIPOS E ESTRUTURA DOS CERÂMICOS.....</b>                 | <b>191</b> |
| <b>6.1. Tipos de cerâmicos.....</b>                            | <b>192</b> |
| 6.1.1. Cerâmicos tradicionais.....                             | 192        |
| 6.1.2. Cerâmicos técnicos.....                                 | 193        |
| 6.1.2.1. Alumina ( $Al_2O_3$ ).....                            | 193        |
| 6.1.2.2. Nitreto de silício ( $Si_3N_4$ ).....                 | 195        |
| 6.1.2.3. Carboneto de silício (SiC).....                       | 195        |
| 6.1.2.4. Zircónia ( $ZrO_2$ ).....                             | 196        |
| 6.1.3. Cimento e betão.....                                    | 197        |
| 6.1.4. Cerâmicos naturais.....                                 | 197        |
| 6.1.5. Cerâmicos compósitos.....                               | 197        |
| <b>6.2. Estrutura dos cerâmicos.....</b>                       | <b>198</b> |
| 6.2.1. Cerâmicos iônicos e covalentes.....                     | 198        |
| 6.2.2. Cerâmicos iônicos simples.....                          | 199        |
| 6.2.3. Cerâmicos covalentes simples.....                       | 201        |
| 6.2.4. Sílica e silicatos.....                                 | 201        |
| 6.2.5. Microestrutura dos cerâmicos.....                       | 203        |
| <b>7. FABRICAÇÃO DOS CERÂMICOS.....</b>                        | <b>205</b> |
| 7.1. Preparação dos materiais.....                             | 206        |
| 7.2. Conformação.....                                          | 207        |
| 7.2.1. Prensagem.....                                          | 207        |
| 7.2.1.1. Prensagem a seco (uniaxial).....                      | 207        |
| 7.2.1.2. Prensagem isostática.....                             | 208        |
| 7.2.1.3. Prensagem a quente.....                               | 209        |
| 7.2.2. Vazamento de uma barbotina ( <i>slip casting</i> )..... | 209        |
| 7.2.3. Extrusão.....                                           | 212        |
| 7.2.4. Moldagem por injeção.....                               | 214        |

|                                                                               |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.3. Tratamentos térmicos .....                                               | 214        |
| 7.3.1. Secagem e remoção do ligante .....                                     | 215        |
| 7.3.2. Sinterização .....                                                     | 215        |
| 7.3.3. Vitrificação (sinterização com fase líquida) .....                     | 216        |
| <b>8. VIDROS.....</b>                                                         | <b>219</b> |
| 8.1. Definição de um vidro.....                                               | 220        |
| 8.2. Temperatura de transição vítrea .....                                    | 220        |
| 8.3. Estrutura dos vidros.....                                                | 221        |
| 8.3.1. Vidros constituídos por óxidos ( <i>glass-forming oxides</i> ).....    | 221        |
| 8.3.2. Óxidos modificadores do vidro ( <i>glass-modifying oxides</i> ) .....  | 222        |
| 8.3.3. Óxidos intermédios ( <i>intermediate oxides in glasses</i> ).....      | 222        |
| 8.4. Composição dos vidros.....                                               | 223        |
| 8.5. Deformação viscosa dos vidros .....                                      | 223        |
| 8.6. Fabricação.....                                                          | 224        |
| 8.6.1. Conformação de chapas .....                                            | 224        |
| 8.6.2. Insuflagem, prensagem e vazamento do vidro .....                       | 225        |
| 8.6.3. Termoformação e vitrofusão .....                                       | 226        |
| 8.7. Vidros temperados.....                                                   | 227        |
| <b>9. PROPRIEDADES DOS CERÂMICOS .....</b>                                    | <b>231</b> |
| 9.1. Propriedades mecânicas.....                                              | 231        |
| 9.1.1. Mecanismos de deformação nos materiais cerâmicos .....                 | 231        |
| 9.1.2. Tenacidade dos materiais cerâmicos.....                                | 232        |
| 9.1.3. Zircónia parcialmente estabilizada (PSZ).....                          | 237        |
| 9.1.4. Mecanismo de aumento da tenacidade por ligações<br>entre os grãos..... | 239        |
| 9.1.5. Compósitos laminados e compósitos reforçados com fibras .....          | 244        |
| 9.1.6. Fadiga dos materiais cerâmicos.....                                    | 246        |
| 9.1.7. Materiais cerâmicos abrasivos.....                                     | 246        |
| 9.2. Propriedades físicas.....                                                | 247        |
| 9.2.1. Propriedades térmicas .....                                            | 247        |
| 9.2.1.1. Cerâmicos refratários .....                                          | 247        |
| 9.2.1.2. Refratários ácidos.....                                              | 247        |
| 9.2.1.3. Refratários básicos.....                                             | 248        |
| 9.2.2. Propriedades elétricas .....                                           | 248        |
| 9.2.2.1. Materiais cerâmicos isoladores.....                                  | 248        |
| 9.2.2.2. Materiais cerâmicos para condensadores.....                          | 249        |
| 9.2.2.3. Os cerâmicos semicondutores.....                                     | 249        |
| 9.2.2.4. Cerâmicos ferroelétricos.....                                        | 249        |

**PARTE C: POLÍMEROS ..... 251**

**10. ESTRUTURA ..... 253**

**10.1. Escalas das estruturas ..... 256**

**10.2. Escala molecular ..... 258**

10.2.1. Homopolímeros e copolímeros ..... 262

10.2.2. Reticulação e ramificação ..... 263

10.2.3. Isomerismo químico e estérico. Estereorregularidade ..... 264

10.2.4. Conformação ..... 265

10.2.4.1. Rotações elementares dos segmentos das cadeias ..... 265

10.2.4.2. Conformações trans e cis ..... 266

**10.3. Escala macromolecular ..... 266**

10.3.1. Polímeros lineares ..... 266

10.3.2. Polímeros tridimensionais ..... 268

**10.4. Escala supramolecular ..... 269**

10.4.1. Cristalização ..... 269

10.4.1.1. Temperaturas de transição ..... 270

10.4.1.2. Mobilidade molecular ..... 271

10.4.1.3. Estado cristalino ..... 280

10.4.1.4. Sistemas multifásicos ..... 283

10.4.1.5. Orientação ..... 284

**10.5. Relação das propriedades com a natureza orgânica e a estrutura molecular dos polímeros ..... 284**

10.5.1. Propriedades dependentes da natureza orgânica ..... 285

10.5.2. Propriedades dependentes da estrutura macromolecular ..... 287

10.5.3. De polímero a plástico ..... 288

**11. TIPOS DE POLÍMEROS ..... 291**

**11.1. Termoplásticos ..... 291**

11.1.1. Características gerais dos termoplásticos ..... 295

11.1.1.1. Propriedades gerais ..... 296

11.1.1.2. Peso específico ..... 297

11.1.1.3. Isolamento ..... 297

11.1.1.4. Coeficiente de dilatação linear ..... 297

11.1.1.5. Estabilidade dimensional ..... 297

11.1.1.6. Resistência química ..... 297

11.1.1.7. Fogo ..... 299

11.1.1.8. Temperatura de aplicação ..... 299

11.1.1.9. Aspeto ..... 300

11.1.1.10. Coeficiente de atrito ..... 300

11.1.1.11. Resistência ao tempo e ultravioletas ..... 300

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.1.1.12. Tenacidade.....                                         | 300        |
| 11.1.1.13. Resistência ao impacto.....                             | 300        |
| 11.1.1.14. Resistência mecânica e rigidez.....                     | 300        |
| 11.1.2. Termoplásticos comercialmente importantes.....             | 301        |
| 11.1.3. Termoplásticos baseados em estireno.....                   | 302        |
| 11.1.3.1. Poliestireno de uso geral (PS).....                      | 302        |
| 11.1.3.2. Poliestireno de alta resistência ao impacto (HIPS).....  | 303        |
| 11.1.3.3. Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS).....              | 303        |
| 11.1.3.4. Estireno-acrilonitrilo (SAN).....                        | 303        |
| 11.1.4. Termoplásticos vínicos.....                                | 304        |
| 11.1.4.1. Policloreto de vinilo (PVC) rígido.....                  | 304        |
| 11.1.4.2. Policloreto de vinilo (PVC) flexível.....                | 304        |
| 11.1.4.3. Copolímeros de cloreto de vinilo.....                    | 304        |
| 11.1.5. Outros termoplásticos amorfos.....                         | 304        |
| 11.1.5.1. Acrílicos.....                                           | 305        |
| 11.1.5.2. Policarbonato (PC).....                                  | 305        |
| 11.1.5.3. Polióxido de fenileno (PPO).....                         | 305        |
| 11.1.5.4. Polissulfonas (PSU).....                                 | 306        |
| 11.1.5.5. Celulósicos.....                                         | 306        |
| 11.1.5.6. Poliimidas.....                                          | 307        |
| 11.1.6. Poliolefinas.....                                          | 307        |
| 11.1.6.1. Polietilenos.....                                        | 307        |
| 11.1.6.2. Polipropileno.....                                       | 308        |
| 11.1.6.3. Copolímero de polietileno - acetato de vinilo (EVA)..... | 309        |
| 11.1.7. Outros termoplásticos semicristalinos.....                 | 309        |
| 11.1.7.1. Poliamida (PA).....                                      | 309        |
| 11.1.7.2. Poliacetal.....                                          | 310        |
| 11.1.7.3. Poliésteres termoplásticos (PET, PBT).....               | 310        |
| 11.1.7.4. Politetrafluoretileno (PTFE).....                        | 311        |
| 11.1.7.5. Poli-éter-éter-cetona (PEEK).....                        | 311        |
| 11.1.7.6. Polímeros de cristais líquidos (LCP).....                | 311        |
| 11.1.7.7. Ionómeros (I).....                                       | 312        |
| <b>11.2. Termoendurecíveis.....</b>                                | <b>312</b> |
| 11.2.1. Resinas de poliéster insaturado.....                       | 315        |
| 11.2.2. Resinas epoxídicas.....                                    | 315        |
| 11.2.3. Resinas de viniléster.....                                 | 316        |
| 11.2.4. Resinas fenólicas (PF).....                                | 317        |
| 11.2.5. Resinas de poliuretano (PU).....                           | 317        |
| 11.2.6. Resinas de poliimida termoendurecível.....                 | 318        |
| 11.2.7. Resinas de polietileno reticulado (PEX).....               | 318        |
| <b>11.3. Elastómeros.....</b>                                      | <b>319</b> |

|                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.3.1. Borracha natural (NR).....                                                     | 321        |
| 11.3.2. Borracha de estireno-butadieno (SBR) .....                                     | 323        |
| 11.3.3. Borrachas de cloropreno (CR) .....                                             | 323        |
| 11.3.4. Borrachas de butadieno-acrilonitrilo (nitrilo) (NBR) .....                     | 323        |
| 11.3.5. Borrachas de isobuteno-isopreno (butil) (IIR).....                             | 323        |
| 11.3.6. Borrachas de etileno-propileno (EPM e EPDM) .....                              | 324        |
| 11.3.7. Borrachas termoplásticas .....                                                 | 324        |
| 11.3.8. Borrachas fluorocarbonadas (FPM).....                                          | 324        |
| 11.3.9. Borrachas de silicone (SI) .....                                               | 324        |
| 11.3.10. Borrachas de poliuretano (PU).....                                            | 325        |
| 11.3.11. Borrachas de polietileno clorossulfonado (CSM) .....                          | 325        |
| 11.3.12. Outras borrachas.....                                                         | 325        |
| <b>11.4. Polímeros naturais .....</b>                                                  | <b>326</b> |
| <b>11.5. Polímeros com memória de forma (SMP - <i>Shape Memory Polymers</i>) .....</b> | <b>328</b> |

## **12. PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DE POLÍMEROS.....331**

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>12.1. Processos de transformação de termoplásticos .....</b>        | <b>331</b> |
| 12.1.1. Extrusão .....                                                 | 336        |
| 12.1.2. Injeção.....                                                   | 337        |
| 12.1.2.1. Introdução.....                                              | 337        |
| 12.1.2.2. Máquina, fuso e molde.....                                   | 337        |
| 12.1.2.3. Ciclo de moldação.....                                       | 340        |
| 12.1.2.4. Variantes do processo de moldação por injeção.....           | 342        |
| 12.1.2.5. Sugestões para o projeto de peças moldadas por injeção.....  | 345        |
| 12.1.3. Moldação por sopro.....                                        | 346        |
| 12.1.4. Termoformação.....                                             | 346        |
| 12.1.5. Moldação rotacional .....                                      | 347        |
| 12.1.6. Moldação por compressão.....                                   | 348        |
| 12.1.7. Moldação por transferência de resina.....                      | 349        |
| 12.1.8. Vazamento.....                                                 | 350        |
| 12.1.9. Fabrico de espumas.....                                        | 350        |
| 12.1.10. Outros processos .....                                        | 350        |
| 12.1.10.1. Calandragem .....                                           | 350        |
| 12.1.10.2. Forjamento.....                                             | 351        |
| 12.1.10.3. Laminados .....                                             | 351        |
| 12.1.10.4. Maquinagem.....                                             | 351        |
| 12.1.10.5. Fabricação com PTFE.....                                    | 352        |
| 12.1.10.6. Coloração e cargas.....                                     | 352        |
| <b>12.2. Processos de transformação<br/>de termoendurecíveis .....</b> | <b>353</b> |
| 12.2.1. Processamento de termoendurecíveis .....                       | 354        |

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.2.1.1. Moldação por injeção com reação<br>(Reaction Injection Moulding, RIM)..... | 354        |
| 12.2.1.2. Moldação por injeção.....                                                  | 354        |
| 12.2.1.3. Moldação por compressão.....                                               | 355        |
| 12.2.1.4. Moldação por transferência.....                                            | 355        |
| 12.2.2. Otimização do desempenho do produto.....                                     | 355        |
| 12.2.3. Perfis de viscosidade.....                                                   | 356        |
| <b>12.3. Fabricação de elastómeros.....</b>                                          | <b>356</b> |
| 12.3.1. Composição.....                                                              | 357        |
| 12.3.1.1. Cargas de reforço em partícula.....                                        | 357        |
| 12.3.1.2. Cargas diluentes em partícula.....                                         | 358        |
| 12.3.1.3. Óleos e ajudantes de processamento.....                                    | 359        |
| 12.3.1.4. Agentes protetores.....                                                    | 359        |
| 12.3.2. Mistura.....                                                                 | 359        |
| 12.3.3. Vulcanização.....                                                            | 360        |
| 12.3.4. Moldação.....                                                                | 361        |
| 12.3.4.1. Moldação por compressão.....                                               | 361        |
| 12.3.4.2. Moldação por transferência.....                                            | 361        |
| 12.3.4.3. Moldação por injeção.....                                                  | 362        |
| <b>13. COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS POLÍMEROS.....</b>                                 | <b>363</b> |
| 13.1. Introdução.....                                                                | 363        |
| 13.2. Mecanismos de deformação dos termoplásticos.....                               | 364        |
| 13.3. Mecanismos de endurecimento de termoplásticos.....                             | 365        |
| 13.3.1. Massa molecular.....                                                         | 365        |
| 13.3.2. Cristalinidade.....                                                          | 365        |
| 13.3.3. Grupos atômicos laterais.....                                                | 365        |
| 13.3.4. Átomos polares na cadeia de carbono.....                                     | 365        |
| 13.3.5. Reforços.....                                                                | 366        |
| 13.4. Mecanismos de endurecimento dos termoendurecíveis.....                         | 367        |
| 13.5. Propriedades mecânicas.....                                                    | 367        |
| 13.5.1. Efeito da temperatura.....                                                   | 368        |
| 13.5.2. Efeito da velocidade de deformação.....                                      | 369        |
| 13.6. Mecanismos de rotura.....                                                      | 370        |
| 13.6.1. Rotura frágil.....                                                           | 370        |
| 13.6.2. Rotura dúctil.....                                                           | 372        |
| 13.6.2.1. Estricção seguida de rotura.....                                           | 372        |
| 13.6.2.2. Grande deformação sem estricção.....                                       | 373        |
| 13.6.2.3. Estiramento a frio ( <i>cold-drawing</i> ).....                            | 373        |
| 13.6.2.4. Combinação de ductilidade e fragilidade.....                               | 374        |
| 13.6.3. Indicadores de rotura.....                                                   | 375        |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 13.6.3.1. <i>Crazing</i> .....                                        | 376        |
| 13.6.3.2. Bandas de corte ( <i>shear bands</i> ) .....                | 376        |
| <b>13.7. Fluência</b> .....                                           | <b>377</b> |
| 13.7.1. Ensaio de fluência.....                                       | 378        |
| 13.7.2. Recuperação da deformação por fluência.....                   | 379        |
| 13.7.3. Comentários sobre o comportamento à fluência.....             | 380        |
| 13.7.4. Manipulação de dados de fluência.....                         | 384        |
| 13.7.5. Princípio de Sobreposição de Boltzmann.....                   | 386        |
| <b>13.8. Relaxação</b> .....                                          | <b>387</b> |
| <b>13.9. Rotura por fluência ('Fadiga estática')</b> .....            | <b>388</b> |
| <b>13.10. Fadiga</b> .....                                            | <b>389</b> |
| <b>13.11. Impacto</b> .....                                           | <b>390</b> |
| <b>13.12. Dureza</b> .....                                            | <b>391</b> |
| <b>13.13. Atrito</b> .....                                            | <b>391</b> |
| <br>                                                                  |            |
| <b>PARTE D: COMPÓSITOS</b> .....                                      | <b>393</b> |
| <br>                                                                  |            |
| <b>14. REFORÇOS E MATRIZES</b> .....                                  | <b>395</b> |
| <br>                                                                  |            |
| <b>14.1. Reforços</b> .....                                           | <b>397</b> |
| 14.1.1. Fibras de vidro.....                                          | 398        |
| 14.1.2. Fibras de carbono.....                                        | 399        |
| 14.1.3. Fibras orgânicas.....                                         | 400        |
| 14.1.4. Fibras naturais.....                                          | 401        |
| 14.1.5. Carboneto de silício.....                                     | 401        |
| 14.1.6. Alumina e aluminossilicatos.....                              | 402        |
| <b>14.2. Matrizes</b> .....                                           | <b>402</b> |
| 14.2.1. Polímeros.....                                                | 403        |
| 14.2.1.1. Termoendurecíveis.....                                      | 403        |
| 14.2.1.2. Termoplásticos.....                                         | 403        |
| 14.2.2. Metais.....                                                   | 404        |
| 14.2.3. Cerâmicos.....                                                | 404        |
| <b>14.3. Semiprodutos</b> .....                                       | <b>405</b> |
| 14.3.1. Termoplásticos de fibras curtas (SF RTP) e longas (LFT) ..... | 405        |
| 14.3.2. Termoplásticos de fibras longas (LFT).....                    | 408        |
| 14.3.3. Termoplásticos de fibras contínuas (CFT).....                 | 410        |
| 14.3.4. Preformas.....                                                | 412        |
| 14.3.5. Compostos de moldação .....                                   | 412        |
| 14.3.6. Pré-impregnados ( <i>prepregs</i> ).....                      | 414        |
| <br>                                                                  |            |
| <b>15. FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS</b> .....                             | <b>417</b> |
| <br>                                                                  |            |
| 15.1. Compósitos de matriz polimérica.....                            | 417        |



|                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 15.1.1. Impregnação de resina líquida.....                                              | 417        |
| 15.1.1.1. Moldação manual e projeção.....                                               | 417        |
| 15.1.1.2. Enrolamento filamental.....                                                   | 418        |
| 15.1.1.3. Pultrusão.....                                                                | 418        |
| 15.1.1.4. Moldação por transferência (RTM)/injeção de resina.....                       | 419        |
| 15.1.2. Consolidação de pré-impregnados.....                                            | 420        |
| 15.1.2.1. Prensa de pratos quentes.....                                                 | 421        |
| 15.1.2.2. Saco de vácuo.....                                                            | 421        |
| 15.1.2.3. Autoclave.....                                                                | 421        |
| 15.1.3. Consolidação de compostos de moldação.....                                      | 422        |
| 15.1.4. Injeção de termoplásticos.....                                                  | 422        |
| 15.1.5. Moldação por compressão de termoplásticos.....                                  | 423        |
| <b>15.2. Compósitos de matriz metálica.....</b>                                         | <b>423</b> |
| 15.2.1. <i>Stir casting</i> .....                                                       | 423        |
| 15.2.2. <i>Squeeze infiltration</i> .....                                               | 423        |
| 15.2.3. Ligação por difusão.....                                                        | 424        |
| 15.2.4. Sinteriza o.....                                                                | 424        |
| 15.2.5. Deposi o por proje o.....                                                       | 425        |
| 15.2.6. Deposi o em fase vapor.....                                                     | 425        |
| <b>15.3. Compósitos de matriz cerâmica.....</b>                                         | <b>425</b> |
| 15.3.1. Infiltra o química em fase vapor.....                                           | 425        |
| 15.3.2. Infiltra o no estado líquido.....                                               | 426        |
| 15.3.2.1. Infiltra o de cerâmico fundido.....                                           | 426        |
| 15.3.2.2. Infiltra o de uma barbotina.....                                              | 426        |
| 15.3.2.3. Infiltra o reativa.....                                                       | 426        |
| 15.3.2.4. Infiltra o de um polímero e pirólise.....                                     | 426        |
| 15.3.3. Sol-gel.....                                                                    | 427        |
| 15.3.4. Oxida o direta.....                                                             | 427        |
| <b>16. COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS E COMPÓSITOS REFORÇADOS COM PARTÍCULAS.....</b> | <b>429</b> |
| <b>16.1. Compósitos reforçados com fibras.....</b>                                      | <b>429</b> |
| 16.1.1. Módulo.....                                                                     | 429        |
| 16.1.2. Resistência.....                                                                | 431        |
| 16.1.3. Tenacidade.....                                                                 | 434        |
| 16.1.4. Projeto.....                                                                    | 435        |
| <b>16.2. Compósitos reforçados com partículas - caso do betão.....</b>                  | <b>437</b> |
| 16.2.1. Cimento.....                                                                    | 438        |
| 16.2.2. Propriedades mecânicas.....                                                     | 441        |
| 16.2.3. Betão reforçado.....                                                            | 441        |

|                                                                                          |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>17. OUTROS COMPÓSITOS.....</b>                                                        | <b>445</b>      |
| 17.1. Compósitos celulares .....                                                         | 445             |
| 17.1.1. Propriedades mecânicas das espumas.....                                          | 446             |
| 17.2. Madeira .....                                                                      | 449             |
| 17.2.1. Estrutura.....                                                                   | 449             |
| 17.2.2. Propriedades mecânicas .....                                                     | 452             |
| 17.2.2.1. Elasticidade .....                                                             | 453             |
| 17.2.2.2. Resistência à tração e à compressão.....                                       | 455             |
| 17.2.2.3. Tenacidade .....                                                               | 456             |
| 17.2.3. Comparação da madeira com outros materiais.....                                  | 457             |
| 17.3. Estruturas <i>sandwich</i> .....                                                   | 458             |
| <b>18. MATERIAIS E SUSTENTABILIDADE .....</b>                                            | <b>461</b>      |
| 18.1. Introdução .....                                                                   | 461             |
| 18.2. Desenvolvimento sustentável .....                                                  | 462             |
| 18.2.1. Conceito .....                                                                   | 462             |
| 18.2.2. Objetivos de desenvolvimento sustentável.....                                    | 463             |
| 18.3. Circularidade de materiais .....                                                   | 466             |
| 18.4. Materiais e sustentabilidade.....                                                  | 468             |
| 18.4.1. Introdução .....                                                                 | 468             |
| 18.4.2. Avaliação da sustentabilidade de materiais.....                                  | 469             |
| 18.4.3. Materiais.....                                                                   | 470             |
| 18.4.4. Design para a sustentabilidade .....                                             | 474             |
| 18.4.4.1. Design de produto .....                                                        | 474             |
| 18.4.4.2. Fabrico aditivo.....                                                           | 475             |
| 18.4.4.3. Medição da sustentabilidade.....                                               | 475             |
| 18.4.4.4. Normas .....                                                                   | 476             |
| 18.4.4.5. Plataforma material Design-for-eXcellence - aplicação à sustentabilidade ..... | 477             |
| 18.5. Desafios tecnológicos.....                                                         | 480             |
| 18.6. Mudança de estilos de vida de materiais críticos.....                              | 483             |
| 18.7. Responsabilidade social no desenvolvimento de materiais e produtos .....           | 486             |
| 18.8. Conclusões e reflexões.....                                                        | 487             |
| <b>BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS.....</b>                                                   | <b>CDLXXXIX</b> |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>                                                            | <b>CDXCVII</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>                                                            | <b>DXI</b>      |

# PREFÁCIO À 2ª EDIÇÃO

Tal como indicado no prefácio da primeira edição, esta obra pretende ser uma ferramenta didática para apoiar os estudantes de pré-graduação no estudo de materiais de construção mecânica, civil, etc.

Não se pretende, por isso, fazer uma apresentação exaustiva de todos os materiais, mas apenas tratar as matérias mais relevantes para engenheiros envolvidos em aplicações estruturais. Os fundamentos teóricos sobre a ciência dos materiais (química, ligações atômicas, propriedades mecânicas e físicas, etc.) não são descritos, sendo somente abordados materiais de engenharia descrevendo as suas estruturas, os seus métodos de fabrico e as propriedades importantes para diferentes aplicações.

Está dividida em quatro partes, conforme a classificação de materiais: metais, cerâmicos, polímeros e compósitos. Para além deste livro, de carácter teórico, há outra obra prática com problemas e trabalhos de laboratório intitulada *Problemas e Trabalhos Práticos de Materiais de Construção*.

Se a escassez de literatura escrita em português incentivou a publicação da edição inicial, por forma a facilitar a assimilação desta matéria, esta segunda edição, mantendo ainda esse objetivo, surge atualizada com um novo capítulo - *Materiais e Sustentabilidade* - que pretende contribuir para que as novas gerações sejam motoras de sustentabilidade no desenvolvimento de materiais, produtos e tecnologias, pois consideramos esse um desígnio fundamental dos futuros engenheiros.

Os autores

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. HISTÓRIA

Os materiais estão intimamente ligados ao nível de desenvolvimento das sociedades. As primeiras civilizações eram designadas em função do nível de desenvolvimento dos materiais, como a Idade da Pedra, a Idade do Bronze ou a Idade do Ferro. Os primeiros seres humanos tinham uma variedade muito limitada de materiais disponíveis, ocorrendo todos eles naturalmente, como as pedras, a madeira, a argila, a pele e ossos dos animais que caçavam, etc. Com o passar dos anos, foram sendo descobertas técnicas para melhorar o comportamento dos materiais, como tratamentos térmicos ou a adição de elementos. Só mais recentemente se compreendeu a relação entre os elementos que compõem os materiais e as suas propriedades. A partir daí, conseguiu-se desenvolver materiais sintéticos com propriedades adaptadas às nossas necessidades. O aparecimento de muitas tecnologias só foi possível graças ao desenvolvimento de materiais avançados. Por exemplo, os aviões superssônicos só o podem ser recorrendo a materiais leves e resistentes, como o titânio, ou materiais compósitos.

## 1.2. CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS

O estudo dos materiais pode ser dividido em Ciência dos Materiais e Engenharia dos Materiais. Na ciência dos materiais estuda-se a relação entre a estrutura e as propriedades destes. Por outro lado, na engenharia dos materiais pretende-se, com base na relação estrutura-propriedades, desenvolver materiais para obter um determinado conjunto de propriedades. O cientista de materiais desenvolve ou sintetiza novos materiais, enquanto o engenheiro de materiais desenvolve uma determinada aplicação usando novos materiais e/ou novos processos ou ainda materiais e processos existentes. Este

livro apenas trata da parte da engenharia dos materiais para aplicações de construção. A estrutura de um material está relacionada com o modo como os seus componentes internos estão arrançados. A estrutura subatômica envolve os eletrões em cada átomo e interações entre os núcleos. Ao nível atômico, a estrutura descreve como os átomos ou moléculas estão organizados. A escala seguinte, ou microestrutura (observável com microscópio ótico), envolve uma aglomeração de um grande grupo de átomos. A estrutura que é possível ver a olho nu é a macroestrutura (como, por exemplo, fibras numa matriz polimérica, no caso dos materiais compósitos).

## 1.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

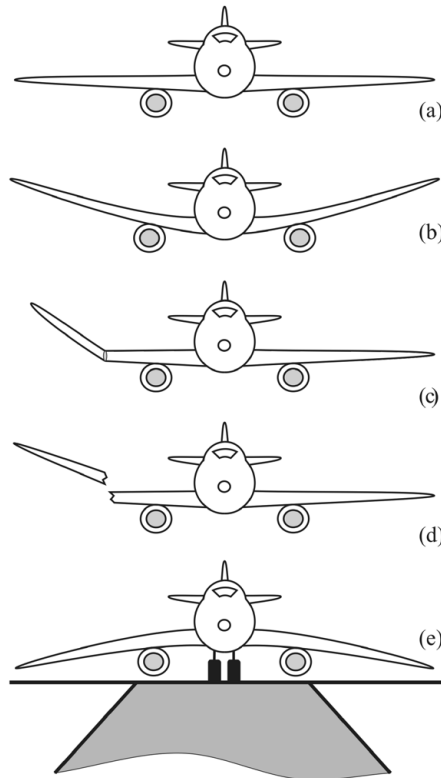
Em serviço, todos os materiais expostos a um estímulo externo respondem de algum modo. Por exemplo, quando se aplica uma força a uma mola ela deforma-se, enquanto uma superfície polida de um metal reflete luz. As propriedades mais importantes para materiais de construção são as propriedades mecânicas. Mas existem outras que devem ser tomadas em consideração, como por exemplo a transparência (no caso das janelas de um automóvel ou de uma casa). O significado pormenorizado de cada propriedade não é desenvolvido neste livro, sendo apenas dada uma descrição sumária de cada propriedade, começando pelas mais importantes para os materiais de construção que devem suportar com segurança solicitações mecânicas: as propriedades mecânicas.

### 1.3.1. Propriedades mecânicas

É fácil fletir elasticamente uma régua de aço. Elasticamente implica dizer que a régua recupera a sua forma quando a força aplicada é retirada. A rigidez elástica (aqui rigidez à flexão, mas a solicitação pode ser de outro tipo, como tração) é determinada em parte pela sua forma (as fitas são fáceis de fletir) e, noutra parte, por uma propriedade do próprio aço: o módulo de elasticidade  $E$ . Os materiais – como o aço – que possuem um elevado módulo de elasticidade são intrinsecamente rígidos, enquanto os materiais com um baixo módulo – como o polietileno – são flexíveis. A **Figura 1.1.b** ilustra o problema que pode ocorrer num avião com um material demasiado flexível.

A régua de aço deforma plasticamente mas, se for um bom aço, é difícil deformar a régua de modo permanente. A deformação permanente está relacionada com a “resistência” e não com a rigidez. A facilidade em deformar permanentemente (ou plasticamente, é a mesma coisa) a régua depende de novo da forma da régua e de outra propriedade intrínseca do aço: a sua tensão limite de elasticidade ou tensão de cedência  $\sigma_y$ . Os materiais com uma elevada tensão de cedência,  $\sigma_y$ , têm uma elevada resistência à deformação plástica (como, por exemplo, aço tratado ou titânio), sendo difíceis de

deformar plasticamente. Já o chumbo tem uma baixa tensão de cedência,  $\sigma_y$ , e é muito fácil de deformar plasticamente. Quando os metais deformam plasticamente, tornam-se mais resistentes (diz-se que o material encrua) mas existe um limite, chamado tensão de rotura,  $\sigma_r$ , para além do qual o material parte. A deformação plástica que o material consegue aguentar antes de romper está relacionada com a ductilidade. A **Figura 1.1.c** ilustra a consequência de ter um material com uma resistência inadequada num avião.



**Figura 1.1.** Propriedades mecânicas. (a) Situação normal, (b) Rigidez insuficiente ( $E$  muito baixo), (c) Resistência mecânica insuficiente ( $\sigma_y$  muito baixo), (d) Tenacidade insuficiente ( $K_c$  muito baixo), (e) Demasiado denso ( $\rho$  muito elevado) [adaptado de **Ashby et al. (2007)**].

Outra propriedade muito importante é a tenacidade. Se a régua fosse feita de vidro ou de plástico transparente não era possível deformá-la plasticamente, partindo a régua de repente, sem aviso. Os materiais que têm este tipo de comportamento são materiais frágeis, enquanto os materiais que deformam plasticamente antes de partir são materiais tenazes. A propriedade que caracteriza a capacidade de um material em resistir à fratura e à propagação de uma fenda é a taxa crítica de libertação de energia,  $G_c$ . Os metais são, em geral, tenazes, enquanto os vidros são muito frágeis. A **Figura 1.1.d** ilustra a consequência de ter um material com uma elevada fragilidade.

A densidade é um parâmetro importante em construções. No caso da régua, a densidade é pouco relevante mas, no caso de veículos, é fundamental, sobretudo aqueles que voam. Se o avião que se tem analisado fosse feito de chumbo, não descolava (**Figura 1.1.e**). É possível reduzir o peso através de um projeto adequado e do uso de materiais leves, como alumínio ou os materiais compósitos.

Estas são as principais propriedades mecânicas. A dureza não foi descrita mas é proporcional à tensão de cedência, permitindo avaliar a resistência à deformação plástica do material. O objetivo desta secção é apenas recordar os conceitos básicos, sendo o leitor convidado a consultar livros dedicados às propriedades dos materiais para mais detalhes. Apesar das propriedades mecânicas serem as mais importantes para construções, também se descrevem sumariamente a seguir as propriedades térmicas, elétricas, óticas e químicas que devem, em muitos casos, ser consideradas no projeto de uma construção.

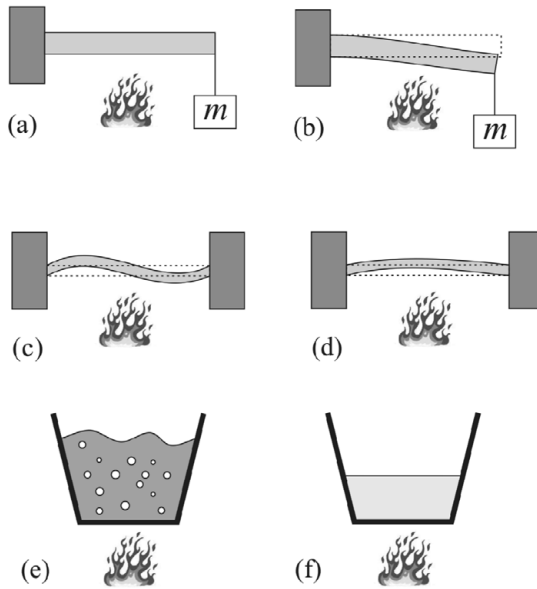
### 1.3.2. Propriedades térmicas

As propriedades dos materiais alteram-se com a temperatura, geralmente com uma degradação. A resistência mecânica diminui, pode fluir (i.e., deformar sem aumento da força aplicada, oxidar, degradar ou decompor-se). Existe uma temperatura limite chamada temperatura máxima de serviço  $T_{\max}$  (**Figura 1.2.a**) acima da qual não é possível usar o material. Os aços têm uma elevada  $T_{\max}$ , podendo ser usados até 800 °C, enquanto os polímeros têm uma baixa  $T_{\max}$ , sendo raramente usados acima de 150 °C, exceto em alguns polímeros mais específicos.

A maior parte dos materiais expandem quando são aquecidos mas de modo diferente, dependendo do seu coeficiente de expansão térmico  $\alpha$ . A expansão é pequena mas pode ser suficiente para causar problemas graves. Se, por exemplo, uma barra for fixada nas extremidades, a expansão da barra quando aquecida pode levar à sua encurvadura (**Figura 1.2.c**). Este tipo de problema pode ocorrer nos caminhos de ferro se não forem deixadas folgas para a expansão dos carris.

Alguns materiais são frios ao toque (como os metais), enquanto outros, como a madeira, são mornos. Esta sensação está relacionada com duas propriedades térmicas dos materiais: a condutividade térmica e a capacidade térmica. A primeira, a condutividade térmica,  $\lambda$ , mede a velocidade com que o calor flui ou se transfere através de um material, estando uma extremidade quente e a outra fria. Os materiais com uma elevada condutividade térmica  $\lambda$  permitem conduzir rapidamente o calor, o que é desejável no caso de fritadeiras, radiadores ou permutadores de calor (**Figura 1.2.e**).

Uma baixa condutividade térmica,  $\lambda$ , também pode ser útil para isolar casas, reduzir a energia consumida por frigoríficos e congeladores, ou permitir aos veículos espaciais reentrarem na atmosfera.



**Figura 1.2.** Propriedades térmicas. (a) Elevada temperatura de serviço  $T_{\max}$ . (b) Baixa temperatura de serviço  $T_{\max}$ . (c) Elevado coeficiente de expansão térmica  $\alpha$ . (d) Baixo coeficiente de expansão térmica  $\alpha$ . (e) Elevada condutividade térmica  $\lambda$ . (f) Baixa condutividade térmica  $\lambda$ .

As aplicações descritas acima estão relacionadas com transferências de calor constantes e de longo prazo. Quando o tempo é limitado, a capacidade térmica  $C_p$  é importante. Mede a quantidade de calor que é necessária para aquecer um material de uma determinada quantidade. Materiais com uma elevada capacidade térmica  $C_p$  (como o cobre, por exemplo) precisam de muito calor para alterar a sua temperatura, enquanto materiais com uma baixa capacidade térmica  $C_p$  (como a espuma polimérica), necessitam de muito pouco calor. A transferência de calor permanente tem a ver com a condutividade térmica, como visto acima.

Existe outra propriedade mais subtil que descreve o que acontece quando o calor é inicialmente aplicado. Considere o exemplo de uma placa fria com uma bola de gelado em cima aquecida por baixo. Logo após ligar o aquecimento, a parte de baixo fica quente, mas o resto está frio. Após algum tempo, o meio da placa fica quente e, decorridos alguns minutos depois da parte de cima aquecer, o gelado começa a derreter. O tempo que isto demora para uma determinada espessura da placa está relacionado com a difusividade térmica do material da placa. É diferente da condutividade porque os materiais têm uma capacidade térmica diferente, sendo proporcional a  $\lambda / C_p$ .



### 1.3.3. Propriedades elétricas, magnéticas e óticas

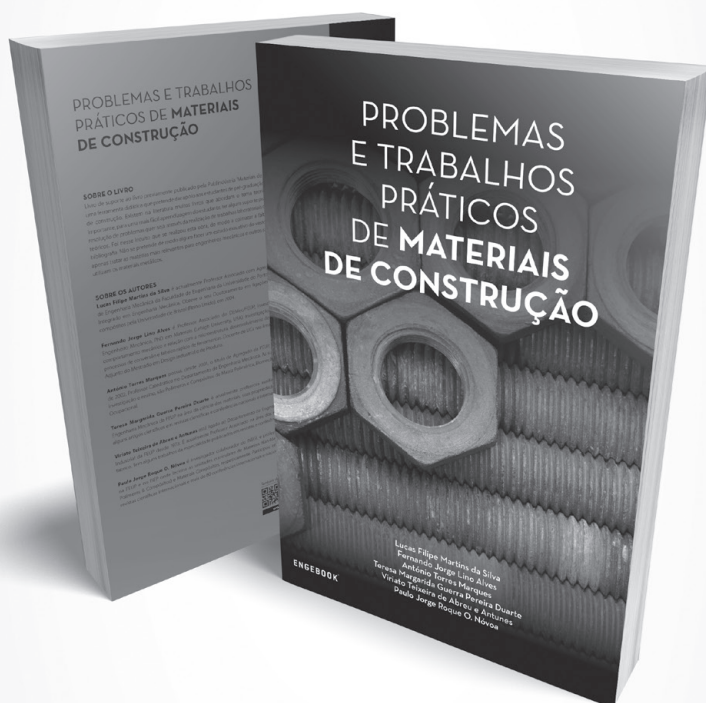
A luz que temos em casa (a energia elétrica), as comunicações, etc. a que temos acesso só são possíveis graças a materiais que conduzem bem a eletricidade. Os metais são bons condutores, especialmente o cobre e o alumínio. A condutividade elétrica  $K_e$  é que traduz essa capacidade (**Figura 1.3.a**). Por outro lado, em muitas situações, é o contrário que é desejável, ou seja, é preciso evitar a condução de eletricidade, como nos casos de tomadas de eletricidade, caixas de fusíveis, suspensões para cabos elétricos de transmissão, etc. (**Figura 1.3.b**). Aqui, o que se quer são materiais com elevada resistividade  $\rho_e$ . A maior parte dos plásticos têm elevada resistividade e são usados como isolantes, apesar de poderem ser condutores com tratamentos especiais.

Outra propriedade elétrica ilustrada na **Figura 1.3.c** é a capacidade de permitir a passagem de micro-ondas (como no caso do radome) ou a capacidade de refletir essas mesmas ondas, no caso de um refletor de um barco. Trata-se, em ambos os casos, da propriedade dielétrica do material ou, mais precisamente, do fator de perda  $L$ . As espumas poliméricas, alguns polímeros (e.g. poliolefinas) e alguns cerâmicos são materiais transparentes às micro-ondas (têm um valor baixo de  $L$ ). Os materiais que absorvem as micro-ondas como os polímeros contendo grupos polares (e.g. poliamida ou poliuretano) e materiais naturais como a madeira têm um valor elevado de  $L$ . Também existe a constante dielétrica  $\epsilon_d$  que está relacionada com o modo como um material adquire um dipolo (polarização) num campo elétrico, reorientando os seus eletrões e até as suas moléculas. Os materiais que permitem a passagem de micro-ondas têm uma baixa constante dielétrica.

Eletricidade e magnetismo estão intimamente ligados. Uma corrente elétrica induz um campo magnético, enquanto um campo magnético em movimento induz uma corrente elétrica num condutor. A resposta da maior parte dos materiais a um campo magnético é demasiado pequena para ter algum interesse prático. No entanto, alguns chamados ferromagnéticos têm a capacidade de conservar um campo magnético permanentemente. Esses materiais são difíceis de desmagnetizar uma vez magnetizados. São usados em ímãs permanentes em motores, dínamos e telefones. Aqui a propriedade que interessa é a remanescência, que mede a intensidade em reter magnetismo. Existem outros materiais que são fáceis de magnetizar e desmagnetizar. São usados, por exemplo, em transformadores. Têm a capacidade de conduzir um campo magnético mas não de o reter permanentemente (**Figura 1.3.f**).

Os materiais também respondem à luz, o que não é surpreendente, uma vez que a luz é uma onda eletromagnética. Os materiais que são opacos refletem a luz, enquanto os materiais transparentes refratam-na (**Figura 1.3.g**). Alguns têm a capacidade

*TAMBÉM DISPONÍVEL*



# PROBLEMAS E TRABALHOS PRÁTICOS DE **MATERIAIS** **DE CONSTRUÇÃO**

LUCAS FILIPE MARTINS DA SILVA, JORGE LINO ALVES,  
ANTÓNIO TORRES MARQUES,  
TERESA MARGARIDA GUERRA PEREIRA DUARTE,  
VIRIATO TEIXEIRA DE ABREU E ANTUNES,  
PAULO JORGE ROQUE O. NÓVOA

**engebook**

# MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

## 2.<sup>a</sup> Edição

LUCAS F. M. DA SILVA  
JORGE LINO ALVES  
ANTÓNIO TORRES MARQUES

### Sobre a obra

Esta obra pretende ser uma ferramenta didática para apoiar os estudantes de pré-graduação no estudo de materiais de construção mecânica, civil, etc. Não se pretende, por isso, fazer uma apresentação exaustiva de todos os materiais, mas apenas tratar as matérias mais relevantes para engenheiros envolvidos em aplicações estruturais. Os fundamentos teóricos sobre a ciência dos materiais (química, ligações atómicas, propriedades mecânicas e físicas, etc.) não são descritos, sendo somente abordados materiais de engenharia descrevendo as suas estruturas, os seus métodos de fabrico e as propriedades importantes para diferentes aplicações. Está dividida em quatro partes, conforme a classificação de materiais: metais, cerâmicos, polímeros e compósitos. Nesta segunda edição surge com um novo capítulo que pretende contribuir para que as novas gerações sejam motoras de sustentabilidade no desenvolvimento de materiais, produtos e tecnologias.

### Sobre os autores

#### LUCAS F. M. DA SILVA

Nasceu em França, em 1973. Licenciou-se em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), em 1996. Fez o mestrado pela FEUP, em 1999. Doutorou-se pela Universidade de Bristol, Inglaterra, em 2004. É Professor Catedrático no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Lidera a Unidade de Processos Avançados de Ligação (UPAL) do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI). É editor-chefe da revista *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* (Sage).

#### JORGE LINO ALVES

Nasceu no Porto, em 1961. Licenciou-se em Engenharia Mecânica (1985) pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), fez o Mestrado em Materiais e Processos de Fabrico pela FEUP (1991) e o Doutoramento em Ciências e Engenharia dos Materiais pela Universidade de Lehigh, USA (1997). É Professor Associado com Agregação da FEUP e tem realizado trabalho de investigação nas áreas da Fundação, Fabrico Aditivo e Desenvolvimento de Produto. É docente de diversas unidades curriculares na área dos materiais e processos tecnológicos. É Diretor Adjunto do Curso de Mestrado em Design Industrial e de Produto, Diretor do Laboratório de Desenvolvimento de Produto e Serviços e Presidente da Sociedade Portuguesa de Materiais. Publicou em coautoria três livros sobre Fabrico Aditivo e é coautor de um livro sobre Cerâmicos Técnicos, tem mais de 500 artigos em revistas científicas, capítulos de livros e conferências, e tem 27 prémios em concursos nacionais e internacionais.

#### ANTÓNIO TORRES MARQUES

Nasceu no Porto, em 1950. Licenciou-se em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em 1972, tem um Mestrado (1977) em Polímeros e um Doutoramento (1981) em Materiais Compósitos do Cranfield Institute of Technology (Reino Unido). Possui, desde 2001, o título de Agregado da FEUP, sendo, desde 2002, Professor Catedrático no Departamento de Engenharia Mecânica. É, desde 2021, Professor Emérito da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. As suas áreas de interesse na investigação e ensino são Polímeros e Compósitos de Matriz Polimérica, Biomecânica, Saúde e Segurança Ocupacional. Lecionou diversas unidades curriculares relacionadas com Polímeros, Sistemas Compósitos, Seleção de Materiais e Projeto. Foi responsável por vários projetos de I&D, em particular com a indústria.

Também disponível em formato e-book



ISBN: 978-989-910-174-6



9 789899 101746

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

