



Índice

Prefácio

1. INTRODUÇÃO AOS MATERIAIS COMPÓSITOS	1
1.1. Perspectiva global dos compósitos e suas aplicações	1
1.2. Reforços	9
1.2.1. Fibras de vidro	9
1.2.2. Fibras de carbono	11
1.2.3. Fibras aramídicas	13
1.2.4. Fibras de boro	14
1.2.5. Outros tipos de reforços	15
1.3. Formas que podem apresentar os reforços	16
1.3.1. Roving	16
1.3.2. Mantas	16
1.3.3. Tecidos 2D	17
1.3.3.1. Tecidos entrelaçados (<i>woven fabrics</i>)	17
1.3.3.2. Tecidos quase unidireccionais	18
1.3.3.3. Tecidos híbridos	18
1.3.4. Malhas (<i>knitted fabrics</i>)	18
1.3.5. Tecidos 3D	19
1.3.6. Entraçados (<i>braids</i>)	19
1.3.7. Pré-formas	17
1.4. Matrizes	21
1.4.1. Temperaturas de transição	22
1.4.2. Temperatura de deflexão sob carga	23
1.4.3. Matrizes termoplásticas	24

1.4.3.1. Polipropileno (PP)	24
1.4.3.2. Poliamida (PA)	24
1.4.3.3. Policarbonato (PC)	25
1.4.3.4. Poli-éter-éter-cetona (PEEK)	25
1.4.3.5. Poliimidas termoplásticas	25
1.4.3.6. Polisulfureto de fenileno (PPS)	26
1.4.4. Matrízes termoendurecíveis	27
1.4.4.1. Políesteres insaturados	27
1.4.4.2. Resinas de vinilester	28
1.4.4.3. Resinas fenólicas	28
1.4.4.4. Resinas de epóxido	29
1.4.4.5. Bismaleimidas	29
1.4.4.6. Poliimidas termoendurecíveis	30
1.5. Semi-produtos	31
1.5.1. Compostos de moldação	31
1.5.1.1. SMC (sheet molding compound)	31
1.5.1.2. TMC (thick molding compound)	31
1.5.1.3. DMC (dough molding compound)	32
1.5.1.4. Compostos termoplásticos	32
1.5.2. Pré-impregnados	32
1.6. Cargas e outros aditivos	33
1.7. Conclusão	34
Questões	34
Referências	35
2. PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	37
2.1. Moldação por contacto	38
2.1.1. Moldação manual	38
2.1.2. Moldação por projecção	40
2.2. Moldação por vácuo	41
2.3. Moldação por compressão	43
2.3.1. Moldação por compressão a frio	44
2.3.2. Moldação por compressão a quente	44
2.4. Moldação por injeção	45
2.5. Moldação por injeção a baixa pressão e por transferência	48
2.5.1. RTM (Reaction Transfer Moulding)	48
2.5.2. SRIM (Structural Reaction Injection Moulding)	50
2.5.3. RRIM (Reinforced Reaction Injection Moulding)	50
2.6. Moldação em autoclave	51
2.7. Enrolamento filamental	54
2.8. Pultrusão	56
2.9. Moldação por centrifugação	57
2.10. Moldação em contínuo	58
2.11. Maquinagem de materiais compósitos	59

2.11.1. Furação de materiais compósitos	60
2.11.2. Corte de materiais compósitos	62
2.12. Reciclagem de materiais compósitos	63
Questões	64
Referências	64
3. LEIS CONSTITUTIVAS DA CAMADA	67
3.1. Introdução	67
3.2. Análise geral de sólidos anisotrópicos	68
3.3. Ortotropia e isotropia transversal	71
3.4. Constantes de Engenharia da camada	75
3.5. Lei constitutiva tridimensional	78
3.6. Lei constitutiva para estado plano de tensão	82
Referências	89
4. ANÁLISE MICROMECAÂNICA DA CAMADA	91
4.1. Introdução	91
4.2. Análise das constantes de engenharia	92
4.2.1. Modelos de mecânica dos materiais	93
4.2.2. Modelo auto-consistente	97
4.2.3. Limites superior e inferior	98
4.2.4. Modelos semi-empíricos	101
4.2.5. Método das células	102
4.2.6. Conclusão	106
4.3. Análise das resistências	108
4.3.1. Resistência longitudinal à tracção	111
4.3.2. Resistência longitudinal à compressão	119
4.3.3. Conclusão	126
Referências	127
5. CRITÉRIOS DE ROTURA DA CAMADA	131
5.1. Introdução	131
5.2. Critérios não-interactivos	132
5.3. Critérios interactivos	134
5.4. Critérios parcialmente interactivos	137
5.5. Conclusão	143
Referências	144
6. ANÁLISE DOS COMPÓSITOS DE FIBRAS CURTAS	147
6.1. Introdução	147
6.2. Compósitos de fibras alinhadas	148
6.2.1. Modelo de Kelly-Tyson	149
6.2.2. Modelo de Cox	151
6.3. Compósitos de fibras com orientação aleatória	156

Referências	160
7. ANÁLISE DOS LAMINADOS	163
7.1. Introdução	163
7.2. Teoria clássica dos laminados	164
7.2.1. Relações esforços-deformações de alguns laminados	170
7.2.2. Constantes de engenharia de laminados simétricos	175
7.2.3. Análise da resistência de laminados	178
7.3. Teorias avançadas dos laminados	184
7.3.1. Teorias de deformação globais	184
7.3.2. Teorias de deformação locais	187
7.3.3. Teorias de deformação globais-locais	187
Referências	188
8. EFEITOS HIGROTÉRMICOS E VISCOELÁSTICOS	191
8.1. Introdução	191
8.2. Efeitos higrotérmicos	193
8.2.1. Degradação de propriedades	193
8.2.2. Leis constitutivas com efeitos higrotérmicos	196
8.3. Viscoelasticidade linear	204
8.3.1. Princípio da sobreposição de Boltzmann	204
8.3.2. Modelos de comportamento viscoelástico	205
8.3.3. Análise quase-elástica	209
8.3.4. Solicitações sinusoidais e notação complexa	210
8.3.5. Princípio de equivalência tempo-temperatura	213
Referências	216
9. MECÂNICA DA FRACTURA	221
9.1. Introdução	221
9.2. Fundamentos de Mecânica da Fractura	222
9.2.1. Teoria de Griffith	222
9.2.2. Extensão da teoria de Griffith	225
9.2.3. Factor intensidade de tensão e tenacidade à Fractura	226
9.2.4. Relação entre G e K	228
9.2.5. Modos de solicitação	230
9.2.6. Teoria da densidade de energia de deformação	234
9.3. Aplicação da mecânica da fractura aos compósitos	236
9.3.1. Fractura intralaminar	237
9.3.1.1. Factor intensidade de tensão e taxa de libertação de energia	237
9.3.1.2. Processo de rotura micromecânica em compósitos	239
9.3.1.3. Teoria da densidade de energia de deformação	241
9.3.2. Fractura interlaminar	243
9.3.2.1. Obtenção da taxa crítica de libertação de energia em modo I	243
9.3.2.2. Obtenção da taxa crítica de libertação de energia em modo II	248

9.3.2.3. Modo Misto	249
9.4. Métodos numéricos aplicados à fractura interlaminar	252
9.4.1. Método do fecho virtual de fenda	252
9.4.2. Elementos finitos de interface	254
Referências	258
10. TÓPICOS AVANÇADOS EM MATERIAIS COMPÓSITOS	261
10.1. Efeito de bordo	261
10.1.1. Laminados tipo (0, 90)	262
10.1.2. Laminados tipo (+ θ , - θ)	263
10.1.3. Análise teórica de laminados	264
10.1.4. O ensaio de provetes delaminados nos bordos	265
10.2. Critérios de rotura para compósitos com furo e entalhes	268
10.3. Impacto em compósitos	273
10.3.1. Impacto de baixa velocidade	273
10.3.1.1. Ensaios de impacto de baixa velocidade	274
10.3.1.2. Métodos experimentais usados para a detecção do dano	276
10.3.1.3. Dano causado por impacto de baixa velocidade	277
10.3.1.4. Modelação	279
10.3.1.4.1. Força de impacto	279
10.3.1.4.1.1. Modelo do balanço energético	279
10.3.1.4.1.2. Modelo de massa e mola	281
10.3.1.4.1.3. Distribuição espacial da força de contacto	282
10.3.1.4.2. Previsão do dano causado pelo impacto	283
10.3.2. Impacto de alta velocidade	287
10.3.3. Parâmetros fundamentais na resistência ao impacto	289
10.3.4. Resistência residual após impacto	291
10.4. Fadiga em compósitos	295
10.4.1. Mecanismos de dano	295
10.4.2. Factores que afectam o comportamento à fadiga	298
10.4.3. Modelos	299
10.4.3.1. Modelos de previsão da vida à fadiga	300
10.4.3.2. Modelos fenomenológicos	301
10.4.3.2.1. Modelos de rigidez residual	301
10.4.3.2.2. Modelos de resistência residual	302
10.4.3.2.3. Modelos de dano progressivo	303
Referências	305
11. ENSAIOS MECÂNICOS	311
11.1. Introdução	311
11.2. Ensaios de tracção	312
11.3. Ensaios de compressão	316
11.4. Ensaios de corte	320
11.4.1. Ensaio de tracção de laminados $\pm 45^\circ$	320

11.4.2. Ensaio de tracção de laminados unidireccionais a 10°	321
11.4.3. Ensaio de corte em calha	322
11.4.4. Ensaio Iosipescu	324
11.4.5. Ensaio de torção de placas	325
11.4.6. Ensaio de torção de tubos de paredes finas	326
11.5. Ensaio de flexão	327
11.6. Medição das propriedades na direcção da espessura	330
11.7. Ensaio de fractura	333
11.7.1. Modo I	333
11.7.2. Modo II	335
11.7.3. Modo misto I-II	337
11.7.4. Laminados multidireccionais	338
Referências	340
 12. LIGAÇÕES EM MATERIAIS COMPÓSITOS	 345
12.1. Ligações aparafusadas e rebitadas	346
12.1.1. Características	346
12.1.2. Modos de rotura	347
12.1.3. Modelação	349
12.2. Ligações coladas	352
12.2.1. Características	352
12.2.2. Procedimentos de execução de uma ligação colada	354
12.2.3. Tipos de adesivos	356
12.2.4. Modos de rotura	361
12.2.5. Modelação	363
12.2.6. Regras de projecto de uma ligação colada	366
12.3. Ligações por fusão	367
Referências	368