

Conteúdo

Prefácio	xv
Lista de símbolos	xix
Lista de tabelas, fluxogramas e sumários	xxiii
Unidades	xxiv
I Projeto de Compostos e Estruturas-sanduíche	1
1 Tipos de compostos, fibras e matrizes	3
1.1 Definição e tipos de material composto	3
1.1.1 Compostos reforçados por fibras	6
1.2 Tipos e propriedades de fibras	9
1.2.1 Fibras de vidro	12
1.2.2 Fibras de carbono e grafite	16
1.2.3 Fibras de kevlar	17
1.2.4 Fibras de monocristais – <i>Whiskers</i>	17
1.2.5 Asbesto	17
1.2.6 Fibras cerâmicas	18
1.3 Tipos e propriedades das matrizes	18
1.3.1 Polímeros	19
1.3.2 Aditivos	23
1.3.3 Poliéster e epóxi	24
1.3.4 Plásticos fenólicos	25
1.4 Processos de fabricação de compostos	25
1.4.1 Processo manual	26
1.4.2 Processo manual por <i>spray</i>	30
1.4.3 Cuidados gerais de segurança e higiene	30
1.4.4 Bobinamento	31
1.4.5 Trefilação de perfis estruturais	34
1.4.6 Moldagem por membrana	34
1.4.7 Processo com preformados	36
1.4.8 Outros processos de fabricação	38
1.5 Exercícios	39

2	Revisão de elasticidade linear	41
2.1	Tensões	41
2.2	Deslocamentos e deformações	43
2.3	Relações tensão-deformação – Lei de Hooke	46
2.4	Equações de equilíbrio	47
2.5	Estado plano de tensões e transformação de tensões	47
2.5.1	Transformação plana de tensões	48
2.6	Exercícios	51
3	Micromecânica de uma lâmina	53
3.1	Propriedades mecânicas	54
3.2	Coefficientes de dilatação térmica e de umidade	56
3.2.1	Coefficientes de dilatação proveniente da umidade	58
3.2.2	Frações de massa e de volume	58
3.3	Módulo e resistência longitudinal à tração	62
3.3.1	Resistência à ruptura em tração longitudinal	66
3.4	Módulo e resistência transversal à tração	66
3.4.1	Modelos de elasticidade	68
3.4.2	Modelos de Halpin-Tsai e de CCA	69
3.4.3	Ruptura transversal à tração	72
3.5	Módulo de elasticidade cisalhante G_{12}	74
3.6	Coefficientes de Poisson	76
3.7	Resistência longitudinal à compressão	77
3.8	Coefficientes de dilatação térmica	79
3.9	Constantes elásticas para mantas de fibras curtas	80
3.10	Exercícios	81
4	Macromecânica de uma lâmina	83
4.1	Relação tensão-deformação para materiais elástico-lineares	83
4.1.1	Constantes de engenharia para materiais ortotrópicos	84
4.2	Lei de Hooke para material ortotrópico sob EPT	88
4.2.1	Lâmina isotrópica sob estado plano de tensões	89
4.3	Rotação da relação tensão-deformação	89
4.3.1	Matriz de flexibilidade reduzida transformada	93
4.4	Constantes de engenharia para lâminas angulares em EPT	94
4.5	Rotação da matriz de rigidez em torno do eixo 3	98
4.6	Resistência de uma lâmina ortotrópica	103
4.7	Critérios de falha para uma lâmina ortotrópica	106
4.7.1	Teoria da tensão máxima	106
4.7.2	Teoria da deformação máxima	109
4.7.3	Teoria de Hill	112
4.7.4	Critério de Tsai-Wu	117
4.7.5	Critério de Hoffman	120
4.7.6	Critério de Hashin	121
4.8	Exercícios	123

5	Placa delgada isotrópica	127
5.1	Flexão de viga	127
5.1.1	Estática	130
5.1.2	Lei de Hooke	132
5.1.3	Síntese das equações diferenciais de viga	134
5.1.4	Solução de casos de vigas de Bernoulli	135
5.2	Fórmulas para vigas	136
5.2.1	Fatores de cisalhamento k para vigas isotrópicas	141
5.3	Placas isotrópicas	142
5.3.1	Estática	143
5.3.2	Cinemática e Lei de Hooke	145
5.4	Condições de contorno	149
5.4.1	Condições em contorno curvilíneo	153
5.5	Sumário da teoria de placas delgadas	155
5.6	Exemplos	156
5.6.1	Exemplo 1 – Flexão cilíndrica	156
5.6.2	Exemplo 2 – Placa retangular sob flexão pura	158
5.7	Placa retangular biapoiada sob flexão pura	160
5.7.1	Classificação placa-viga – casos isotrópico e composto	162
5.8	Placa retangular sob carga senoidal	163
5.9	Fórmulas para placas retangulares isotrópicas	166
5.10	Placas e vigas sobre apoio elástico	170
5.10.1	Exemplo 3 – Placa sobre apoio elástico em flexão cilíndrica	171
5.10.2	Vigas sobre apoio elástico	172
5.11	Tensões de membrana	173
5.11.1	Equações de equilíbrio	175
5.11.2	Cinemática	175
5.12	Exercícios	177
6	Análise de um laminado	181
6.1	Teoria clássica de laminação – TCL	181
6.2	Casos especiais de laminados	187
6.2.1	Laminados monolâminas	187
6.2.2	Laminados simétricos	188
6.2.3	Laminado cruzado-simétrico	189
6.2.4	Laminados simétricos angulares	191
6.2.5	Laminados anti-simétricos	191
6.3	Determinação das tensões e deformações nas lâminas	193
6.4	Análise de resistência do laminado	206
6.4.1	Análise de falha inicial	206
6.4.2	Eliminação de propriedades de lâminas	209
6.4.3	Falhas subsequentes	211
6.4.4	Tensões imediatamente antes e depois do ponto de falha	212
6.4.5	Carregamento inicial	214
6.5	E e ν em mantas de fibras curtas aleatórias	227
6.5.1	Aproximação para mantas de vidro-epóxi	230
6.5.2	Aproximação para mantas arbitrárias de fibras curtas	231
6.5.3	Exemplo 9 – Laminado de fibras curtas	231

6.6	Placas metálicas com <i>stiffeners</i> e grelhas metálicas	232
6.6.1	Grelha simétrica	233
6.6.2	Grelha assimétrica	234
6.7	Exercícios	235
7	Tensões higtotérmicas	239
7.1	Deflexão em vigas bimeriais sob efeito térmico	239
7.1.1	Efeito térmico na viga	241
7.1.2	Tensões térmicas em cada lâmina	244
7.1.3	Tensões mecânicas e efetivas nas lâminas	245
7.1.4	Exemplo 1 – Deslocamentos em um bimetal	247
7.1.5	Exemplo 2 – Tensões em bimetal	248
7.1.6	Exemplo 3 – Tensões residuais térmicas em viga al-aço-al	249
7.2	Tensões térmicas em painéis laminados	250
7.2.1	Tensões térmicas em cada lâmina	253
7.2.2	Tensões mecânicas e efetivas nas lâminas	254
7.3	Cargas de ruptura do laminado	254
7.3.1	Exemplo 4 – Resistência de laminado com efeitos térmicos	256
7.4	Exercícios	270
8	Projeto e análise de vigas laminadas	271
8.1	Análise de vigas longas de seção plana	271
8.1.1	Tensões interlaminares	275
8.2	Módulos de elasticidade equivalente – Homogeneização	276
8.2.1	Método da rigidez do material	276
8.2.2	Método da flexibilidade do material	277
8.2.3	Laminados simétricos ortotrópicos	279
8.2.4	Síntese das propriedades equivalentes em vigas planas	279
8.3	Tensões normal e cisalhante em vigas laminadas planas	280
8.4	Seções não-planas – Perfis estruturais	281
8.4.1	Tração simples de barras de seção não-plana	282
8.4.2	Relação entre as definições do módulo equivalente	283
8.5	Flexão em seção não-plana – Fases isotrópicas ou ortotrópicas	288
8.5.1	Casos particulares de flexão – Fases homogêneo-isotrópicas ou ortotrópicas	290
8.5.2	Flexão de viga de seção tubular anisotrópica	293
8.6	Torção de eixos	298
8.6.1	Torção de barras de seção circular	298
8.6.2	Torção de tubos de seção fechada de paredes finas	302
8.6.3	Torção de tubos de camadas ortotrópicas angulares	306
8.7	Limitações no uso das fórmulas	309
8.7.1	Concentração de tensões	311
8.8	Deflexão de vigas planas de Timoshenko	311
8.8.1	Solução para diversos casos práticos	315
8.8.2	Processo simplificado para vigas de Timoshenko	317
8.8.3	Vigas hiperestáticas	319
8.9	Exercícios	321

9	Estruturas-sanduíche	325
9.1	Aplicação de estruturas-sanduíche	326
9.1.1	Aspectos gerais dos sanduíches	326
9.2	Adesivos e construção de painéis-sanduíche	329
9.3	Modos de falha	332
9.4	Uniões, fechamentos e conexões	334
9.5	Manufatura de colméias	337
9.6	Propriedades e ensaios de núcleos e sanduíches	339
9.6.1	Cisalhamento de núcleos	340
9.6.2	Propriedades compressivas de núcleos	343
9.6.3	Ensaio em núcleos e sanduíches	344
9.7	Espumas – Tipos e propriedades	345
9.8	Faces – Materiais e propriedades	345
9.9	Avaliação das constantes elásticas de uma colméia	348
9.9.1	Densidade de uma colméia	350
9.9.2	Colméia isotrópica	351
9.9.3	Minimização da densidade da colméia	352
9.10	Exercícios	353
10	Projeto de placas-sanduíche	355
10.1	Flexão de vigas-sanduíche	356
10.1.1	Rigidez flexural da viga-sanduíche	356
10.1.2	Tensão normal	357
10.1.3	Tensões cisalhantes	357
10.1.4	Correção da área para a deformação cisalhante	360
10.1.5	Solução para flexão de vigas-sanduíche	361
10.1.6	Exemplo 1 – Rigidez relativa de vigas homogênea e sanduíche	361
10.1.7	Flambagem de vigas-sanduíche	363
10.2	Flexão de placas-sanduíche	363
10.3	Deflexão de placa-sanduíche retangular	365
10.4	Minimização de peso para rigidez flexural dada	366
10.5	Minimização de peso com momento fletor dado	371
10.6	Rotina de cálculo para sanduíches	371
10.6.1	Exemplo 2 – Otimização de placa-sanduíche sob flexão	375
10.6.2	Exemplo 3 – Sanduíche com núcleo de espuma de poliuretano	377
10.7	Exercícios	379
II	Análise de Laminados e Estruturas-sanduíche	381
11	Formulação do problema de placas laminadas	383
11.1	Equações de movimento e cinemáticas	383
11.1.1	Tensões	386
11.1.2	Segundo tensor tensão do Piola-Kirchhoff σ	389
11.2	Equações diferenciais para placas laminadas	392
11.2.1	Equações de movimento do laminado	393
11.2.2	Relações cinemáticas e constitutivas	398
11.3	Método dos Resíduos Ponderados e condições de contorno	399

11.3.1	Formulação de Kirchhoff para placas delgadas	407
11.4	Forma fraca do problema	411
11.5	Soluções aproximadas – Método de Galerkin	412
11.6	Formas integrais em flexão	416
11.6.1	Energia potencial elástica	417
11.6.2	Energia cinética de uma placa	417
11.6.3	Energia potencial das cargas externas	418
11.6.4	Princípio da energia potencial mínima	418
11.6.5	Método de Ritz	418
11.7	Exercícios	420
12	Flexão de placas delgadas laminadas	423
12.1	Placas delgadas ortotrópicas	423
12.1.1	Placas retangulares simplesmente apoiadas	423
12.1.2	Solução de Levy – Placa com dois lados apoiados	427
12.1.3	Método energético – Placa delgada retangular engastada	430
12.2	Laminado delgado angular simétrico	433
12.3	Laminado delgado cruzado anti-simétrico	436
12.4	Laminado delgado angular anti-simétrico	439
12.5	Exercícios	443
13	Tensões interlaminares e teoria de primeira ordem	445
13.1	Cisalhamento numa barra laminada sob tração	446
13.1.1	Solução pela TCL	446
13.1.2	Solução pela teoria de elasticidade linear	448
13.2	Cisalhamento em flexão	450
13.2.1	Teoria de Mindlin para laminados	451
13.2.2	Flexão cilíndrica de laminados ortotrópicos – Modelo de 1 ^a ordem	453
13.2.3	Flexão cilíndrica de laminados ortotrópicos – TCL	456
13.2.4	Flexão cilíndrica de laminados ortotrópicos – Solução de elasticidade	458
13.2.5	Flexão cilíndrica – Comparação de resultados	462
13.3	Flexão de laminado retangular – Teoria de primeira ordem	466
13.4	Fator de cisalhamento k para placa ortotrópica homogênea	467
13.4.1	Método de Timoshenko	468
13.4.2	Método de Reissner	469
13.5	Fator k para placas ortotrópicas laminadas	470
13.6	Exercícios	472
14	Vibrações de placas laminadas	473
14.1	Placa delgada simétrica ortotrópica	473
14.2	Placa delgada anti-simétrica cruzada	477
14.3	Placa delgada anti-simétrica angular	480
14.4	Placa delgada simétrica angular – Método energético	481
14.5	Exercícios	488

15	Análise de placas-sanduíche	489
15.1	Teoria de primeira ordem para placas-sanduíche	490
15.1.1	Equações do movimento em placa-sanduíche de faces delgadas	494
15.2	Flexão cilíndrica de sanduíche – 1ª ordem	495
15.2.1	Tensões	497
15.2.2	Placas-sanduíche de faces isotrópicas	500
15.3	Soluções exatas para laminados e sanduíches retangulares	501
15.3.1	Lâminas transversamente isotrópicas	507
15.3.2	Resultados numéricos para sanduíche retangular	508
15.4	Solução de primeira ordem para sanduíche retangular	510
15.5	Exercícios	512
16	Estabilidade e carga crítica de flambagem	515
16.1	Estabilidade de placas – Método do equilíbrio adjacente	517
16.2	Formas integrais em flambagem	522
16.2.1	Energia potencial	523
16.2.2	Placas laminadas delgadas	524
16.3	Flambagem de vigas laminadas delgadas	526
16.4	Flambagem de vigas laminadas semi-espessas	528
16.5	Placa retangular ortotrópica sob compressão biaxial	530
16.5.1	Caso 1 – $N_{yo} = 0$ – Compressão uniaxial	531
16.5.2	Caso II – $N_{xo} = N_{yo}$ – Compressão biaxial, placa quadrada	533
16.5.3	Caso III – $N_{xo} < 0$ e $N_{yo} > 0$ – Compressão e tração	533
16.6	Placa sob cisalhamento – Método de Galerkin	533
16.7	Placa anisotrópica sob compressão e cisalhamento	536
16.8	Exercícios	539
17	Instabilidade local em painéis-sanduíche	541
17.1	Flambagem de viga sobre apoio elástico	541
17.1.1	Soluções em núcleos de espessura infinita e finita	544
17.1.2	Sumário das soluções	547
17.2	<i>Wrinkling</i> em placas-sanduíche com núcleo homogêneo	552
17.3	Corrugados e colméias – <i>Dimpling</i> e <i>wrinkling</i>	553
17.3.1	<i>Dimpling</i>	553
17.4	Exercícios	554
18	Análise de compostos por elementos finitos – 1ª ordem	555
18.1	Flexão estática de placas compostas	556
18.1.1	Polinômios lagrangeanos	557
18.1.2	Mapeamento dos deslocamentos no elemento	558
18.1.3	Continuidade interelemento	560
18.1.4	Matriz de rigidez e vetor força do elemento	561
18.2	Integração e subintegração	564
18.2.1	Integração numérica	565
18.2.2	Sobreposição e condições de contorno	568
18.2.3	Cálculo das tensões	568
18.2.4	Extração de tensões	570
18.3	Tensões higrotérmicas	571

18.4	Frequências naturais e carregamentos dinâmicos	573
18.4.1	Frequências naturais de vibrações	575
18.5	Flambagem e matriz geométrica	575
18.6	Elemento de casca degenerada laminada	577
18.6.1	Geometria de um elemento quadrilateral de casca	577
18.6.2	Campo de deslocamentos	580
18.6.3	Deformações e tensões nas lâminas	582
18.6.4	Transformações	583
18.6.5	Integração e subintegração	585
19	Teorias de ordem superior	587
19.1	Teorias de primeira ordem e de ordem superior	587
19.1.1	Sumário das principais teorias	589
19.2	Equações do movimento da teoria de Reddy	591
19.2.1	Relações esforços-deformações de placa	596
19.3	Solução analítica para laminado simétrico cruzado	598
19.3.1	Resultados numéricos para flexão estática	601
19.4	Elemento finito C^0 de 3 ^a ordem com normal inextensível	602
19.5	Elemento finito C^0 de 3 ^a ordem com normal extensível	606
19.6	Comparações numéricas dos elementos de 3 ^a ordem	610
19.7	Exercícios	614
	Bibliografia	615

Prefácio

Num certo aspecto, o ensino de engenharia mecânica e, conseqüentemente, a formação do engenheiro no início do século XXI têm sido bastante similares ao que ocorria no início do século XX. A capacidade de pensar, projetar, dimensionar e realizar demais operações de cálculo estrutural era restrita ao uso das ferramentas simples fornecidas pelo que hoje se denomina Resistência dos Materiais, aplicada a materiais metálicos, predominantemente aos aços.

Aproximadamente a partir da década de 1950, uma série de novos tipos de materiais estruturais tem sido utilizada com sucesso. Os materiais compostos por plásticos reforçados por fibras, desenvolvidos e aplicados inicialmente na indústria aeroespacial-militar, difundiram-se posteriormente para outros tipos de componentes e sistemas que hoje se tornaram presença comum nos artigos consumidos e usados no dia-a-dia.

Apesar das vantagens oferecidas pelos materiais compostos em relação aos aços e demais materiais comuns em alguns tipos de aplicação, o seu uso correto pelo engenheiro ainda não é generalizado em razão de alguns fatores, como:

- ▷ as propriedades mecânicas são diferentes dos aços e suas características e formas de determinação são, em geral, mais complexas;
- ▷ têm processos de fabricação próprios;
- ▷ as ferramentas simples da Resistência dos Materiais, em geral, não funcionam para esses materiais.

Conseqüentemente, mesmo o dimensionamento de um componente simples como uma viga sob flexão exige, por vezes, uma teoria e um procedimento próprios. O presente livro trata os materiais compostos do ponto de vista de projeto de componentes estruturais e não sob a perspectiva da ciência do material. Parte do seu conteúdo pode ser vista como uma forma de proporcionar ao engenheiro a capacidade de realizar projetos em componentes simples de materiais compostos, análoga à capacitação obtida nas seqüências de disciplinas tradicionais para o trabalho com materiais isotrópicos. Adicionalmente, o leitor deve adquirir uma introdução a tópicos que lhe permitam prosseguir em etapas mais avançadas de pesquisa e desenvolvimento.

O texto é dividido em duas grandes partes. A **Parte I** é voltada para um curso de graduação ou de nível similar, enquanto a **Parte II** apresenta uma seqüência de tópicos avançados, adequada a um curso de pós-graduação. Observamos que os fundamentos da análise de materiais compostos laminados, boa parte baseados na Teoria Clássica de Laminação, têm caráter bastante simples, sendo portanto bastante acessíveis a um aluno de graduação. A Parte I apresenta então o conteúdo clássico do assunto, que pode ser visto em livros como o de Jones [92]. Esse conteúdo, porém, é apresentado em linguagem clara, com deduções detalhadas e seqüências de exemplos trabalhados também pormenorizadamente. O resultado é que temos tido sucesso ao adotar o conteúdo deste livro em cursos nos quais os alunos possuem apenas conhecimento introdutório correspondente a um semestre em Mecânica dos Sólidos, envolvendo tensões e deslocamentos em vigas e barras sob flexão e torção, transformação de tensões e critérios de falha. Como motivação e para ilustrar melhor alguns efeitos, têm-se realizado algumas

demonstrações experimentais, como a construção de corpos de provas simples usando tecidos, seu subsequente ensaio de tração e a determinação de conteúdo de fibra por queima e pesagem.

O **objetivo** da Parte I é habilitar o leitor a projetar e analisar estruturas simples constituídas por laminados planos ou levemente curvos constituídos por lâminas de resina reforçadas por fibras contínuas ou descontínuas. Ao final da Parte I, o leitor deverá ser capaz de:

- ▷ identificar se um dado componente pode ser vantajosamente construído por material composto e fazer a escolha do tipo mais adequado e do processo de fabricação;
- ▷ identificar propriedades mecânicas importantes e escolher os ensaios mecânicos necessários para a determinação desses valores;
- ▷ dadas as propriedades mecânicas de um certo tipo de fibra e matriz, estimar as propriedades da lâmina constituída por elas;
- ▷ dadas as propriedades elásticas das lâminas (em forma matricial), nas suas direções principais, obter as matrizes de rigidez elástica do laminado;
- ▷ dadas as matrizes de rigidez e os valores de esforços num ponto do laminado, obter deformações e tensões em cada lâmina;
- ▷ usar valores das tensões nas direções principais de propriedades de uma lâmina e verificar sua segurança segundo um dos critérios de falhas estudados.

Apesar de ser destinada a um público de graduação, a Parte I é de certa forma completa em seu conteúdo; assim, um curso de pós-graduação pode apresentar em seu início toda a Parte I, de forma rápida, e, em seguida, entrar na Parte II. Isso geralmente é necessário, porque freqüentemente o estudante de pós-graduação jamais foi exposto ao assunto em seu curso de graduação. O conteúdo inicial deve ser a ele ministrado, ainda que de forma acelerada ou selecionando apenas alguns tópicos como os Capítulos 1 (Tipos de compostos, fibras e matrizes), 4 (Macromecânica de uma lâmina) e 6 (Análise de um laminado).

Os **conteúdos e métodos de apresentação** das Partes I e II foram cuidadosamente escolhidos da seguinte forma:

- A Parte I caracteriza-se principalmente por formas algébricas. Soluções de problemas simples, mas importantes em engenharia, como barras e vigas, são desenvolvidas ou simplesmente apresentadas. Freqüentemente, as fórmulas serão aproximativas, visando apenas às etapas iniciais de dimensionamento no projeto. Rotinas de cálculo são exaustivamente desenvolvidas, explicadas e exemplificadas. Apesar de as equações diferenciais gerais, como as equações de equilíbrio e cinemáticas, serem apresentadas, não se despende muito esforço em suas resoluções. Em geral, buscam-se situações em que a solução pode ser obtida diretamente das relações constitutivas, como no caso de vigas isostáticas e alguns tipos de placas, em que os esforços em uma seção podem ser obtidos de forma simples, isto é, por equilíbrio global ou por simples inspeção. Dessa maneira, a carga matemática sobre o estudante fica reduzida, permitindo espaço para discussões sobre os fenômenos físicos envolvidos.
- Na Parte II, a ênfase encontra-se na dedução detalhada das equações gerais dos problemas, quer em sua forma diferencial, quer na forma integral. Os processos de solução apresentados visam à obtenção das soluções dos problemas de valor no contorno envolvido, tanto em formas exatas como aproximadas. Torna-se intensa a manipulação de formas integrais como o Princípio dos Trabalhos Virtuais, o Método de Galerkin e o Método de Elementos Finitos.

Outras observações

A maioria dos capítulos conta com **lista de exercícios** ao final. Parte desses exercícios são numéricos, nos quais o estudante deverá utilizar as fórmulas disponíveis para resolver problemas práticos de engenharia nos diversos tópicos. Outra parte dos exercícios são trabalhos analíticos, de dedução de fórmulas ou problemas conceituais. Frequentemente, as deduções solicitadas encontram-se já detalhadas no próprio texto e são pedidas ali de forma a indicar ao leitor a necessidade de entender seus detalhes. Alguns dos problemas propostos são acompanhados dos valores numéricos finais da solução, quando for o caso, ou de “dicas” que facilitem a sua resolução.

Algumas observações sobre a **grafia** utilizada são também pertinentes. Como é sabido, a quase totalidade do material publicado no mundo sobre materiais compostos é em língua inglesa, o que leva a alguma dificuldade na transcrição de alguns termos para o português. Assim, os termos *sandwich* e *sandwich structure* foram simplesmente convertidos para *sanduíche* ou *estrutura-sanduíche*. Considera-se que não há risco de confusão com nenhum outro significado que a palavra possa ter em outro contexto, isto é, no presente contexto, *sanduíche* sempre terá o significado técnico único de *estrutura-sanduíche*, conforme a definição de engenharia associada ao termo. Adicionalmente, *face* e *core* de um sanduíche foram convertidos para *face* e *núcleo*.

Uma quantidade de valores de propriedades mecânicas de materiais e outras informações úteis em cálculo foram incluídas no texto e distribuídas ao longo dos capítulos. Uma lista de tabelas, figuras e fluxogramas encontra-se na página xxiii a seguir. Deve-se observar que os valores de propriedades apresentados são apenas valores indicativos, médios, adequados ao uso na resolução dos exercícios e para cálculos preliminares em projeto. Isso porque, propriedades de polímeros, principalmente, mas também de fibras e metais, são fortemente dependentes da composição e do processo de fabricação. Frequentemente, as propriedades devem ser obtidas por ensaio direto, a partir de amostras obtidas de cada lote.

O texto apresenta uma grande quantidade de formulações, que se apresentam desde a forma de equações simples até formulações de elementos finitos. Com exceção do Capítulo 3, de micromecânica, as formulações foram deduzidas no texto, buscando-se, em cada caso, a forma mais clara possível de explicá-las. Frequentemente, os gráficos comparativos de resultados que acompanham cada teoria foram construídos usando os mesmos dados dos artigos de referência. Entretanto, **todas as formulações** apresentadas foram programadas pelo autor como parte de trabalhos de iniciação científica, de dissertações de mestrado ou teses de doutorado, desenvolvidas no Grante. Esses programas, ou partes deles, foram desenvolvidas em linguagens como Mathematica[®], Fortran[®] e C++[®] e usados para a geração dos gráficos de resultados mostrados no texto.

Agradecimentos

Agradecemos ao prof. Domingos Boechat Alves, que primeiro vislumbrou que a obra era necessária e que poderíamos realizá-la; ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro; ao prof. Clovis Sperb de Barcellos, que acompanhou todo o processo elaboração, além de revisar diversos capítulos.

O trabalho foi desenvolvido nas dependências e com os recursos de infra-estrutura do Grante, Grupo de Análise e Projeto Mecânico do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina – a cujos professores desejamos agradecer o apoio. Agradecemos aos professores Edison da Rosa, Lauro Cezar Nicolazzi, Eduardo A. Fancello e José Carlos Pereira pela leitura crítica dos diversos capítulos. O texto foi digitado por Nichele Antunes, as figuras e os modelos numéricos foram preparados pelos graduandos André Labanowski Jr., Diego J. Dall’Agnol, Thiago Guinzani Felipe, Cristian Mangoni, Peterson L. Zacharias, José Mario R. de Oliveira e Paulo Damiani, a quem agradecemos pela dedicação durante o longo trabalho. Não podemos esquecer a paciência e as contribuições das diversas turmas das disciplinas de Materiais Compostos em graduação e pós-graduação que sofreram com as várias versões intermediárias e incompletas do texto.

Lista de símbolos

Um grande esforço foi despendido no desenvolvimento de uma notação única e homogênea ao longo de toda a obra, de forma a garantir que não houvesse duas grandezas diferentes representadas pelo mesmo símbolo no mesmo ambiente, com chances de serem confundidas. Simultaneamente, procurou-se respeitar as notações já consagradas na literatura, onde elas existissem. Isso eventualmente resultou numa situação peculiar, em que o sanduíche, com suas diversas partes, pode usar a notação regular dos laminados ou a notação consagrada dos sanduíches. Para as direções principais do núcleo, por exemplo, pode-se usar a notação 1-2 ou $L-W$.

Deve-se ressaltar que manter notação única numa obra deste porte reserva alguns perigos, como a proliferação de índices. De modo a minorar esse efeito, usa-se o mesmo símbolo para designar grandezas escalares, vetoriais e matriciais, como entidades que devem ser vistas como distintas. Por exemplo, o número de lâminas no laminado é designado por N , um vetor de funções teste de elementos finitos é indicado por $\{N(x, y)\}$ e uma matriz de funções é $[N(x, y)]$.

Índices superiores e inferiores

R_i	- i -ésima falha do laminado.
t	- transposta de uma matriz quando índice superior.
t	- tração ou direção tangencial quando índice inferior.
T, U	- térmico ou higroscópico quando índice superior.
l_k	- k -ésima lâmina do laminado. Contada em ordem crescente com a cota z .
k	- k -ésima lâmina do laminado. Usado alternativamente a l_k , quando possível.
x	- sistema de eixos $x-y-z$.
1	- sistema principal de eixos da lâmina, 1-2-3.
o	- valor na superfície de referência do laminado ou placa.
$\bar{\bullet}$	- barra indica o perfil de esforços, de deformações ou de tensões.
i	- valor na superfície inferior de uma lâmina. Índice superior ou inferior.
s	- valor na superfície superior de uma lâmina. Índice superior ou inferior.
f	- fibra.
m	- matriz do composto.
\cdot_v	- vazios no composto.
$(\cdot)_{,x}$	- diferenciação de uma função $\partial(\bullet)/\partial x$, também $(\bullet)'$.
$\hat{\cdot}$	- função peso.
\cdot^e	- e -ésimo elemento finito.
\cdot^h	- aproximação de uma função por elementos finitos ou outro método.
f_1, f_2	- faces inferior e superior de um painel-sanduíche.
n	- núcleo de um painel-sanduíche.
m, n	- número de harmônico em soluções em série, nas direções x e y .

Símbolos

$\{ \}$	- componentes de um arranjo unidimensional de valores de funções. Também vetores.
$[\]$	- componentes de um arranjo bidimensional de valores ou funções. Também matrizes.
\mathbf{v}	- (símbolo em negrito) vetor ou tensor, de componentes $\{v\}$ ou $[v]$.
Ω, Γ	- domínio e contorno da superfície média de uma placa.
TCL	- Teoria clássica de laminação.
PTV	- Princípio dos trabalhos virtuais.

Variáveis

$\{\varepsilon\}$	- deformação total num ponto.
$\{\sigma\}$	- tensões num ponto.
$\{\varepsilon^o\}, \{\kappa\}$	- deformações e curvaturas da superfície de referência de uma placa.
$\{N\}, \{M\}$	- esforços coplanares e de momentos no laminado, (6.13), (6.20).
$\{Q\}$	- esforços cortantes $\{Q_y; Q_x\}^t$ no laminado, (11.59).
$\{N\}^T, \{M\}^T$	- esforços térmicos coplanares e de momentos no laminado, (7.53).
$[S], [\bar{S}]$	- matriz de flexibilidade de uma lâmina nas direções 1-2 e $x-y$, eqs. (4.7), (4.20), (4.49).
N_v, Q_v	- esforços normais, cortante de viga, em unidades de força.
M_v, M_t	- momentos fletor e torção em viga, em unidades de força-comprimento
$[Q], [\bar{Q}]$	- matriz de rigidez reduzida de uma lâmina nas direções 1-2 e $x-y$, eqs. (4.22), (4.45).
$[C], [A], [B], [D]$	- matriz de rigidez do laminado e suas partições, (6.19).
$[C'], [A'], [B'], [D']$	- matriz de flexibilidade do laminado e suas partições, (6.34).
A, D	- rigidez extensional e flexural de uma placa delgada isotrópica, eqs.(5.130), (5.54).
$[T]$	- matriz de transformação plana de coordenadas, (2.26), (4.32).
$\{\gamma_c\}$	- deformações cisalhantes transversais $\{\gamma_{yz}; \gamma_{xz}\}^t$.
$\{\tau_c\}$	- tensões cisalhantes transversais $\{\tau_{yz}; \tau_{xz}\}^t$.
$[C_c^{xlk}]$	- matriz elástica da lâmina k nas direções $x-y$ para as tensões transversais, (4.71), (11.58).
$[A_c]$	- matriz de rigidez do laminado para cisalhamento transversal, $\sum h_k[C_c^{xlk}]$, (11.60).
$[E]$	- matriz de rigidez do laminado para cisalhamento transversal, $k[A_c]$, (11.61).
$p(x), q(x)$	- carga distribuída em viga e placa, força/comprimento, força/área.
a, b	- dimensões de uma placa retangular nas direções x e y .
r, R	- $r = b/a$, $R = a/b$ em uma placa retangular.
l	- comprimento de uma viga.
b, H	- largura e espessura da seção de uma viga de seção plana.
k	- fator de correção ao cisalhamento transversal em viga ou placa.
k	- contador para lâminas.
S	- perímetro médio de uma seção tubular fechada.
G_t	- módulo cisalhante equivalente de barra sob torção (8.117).
A, A_k	- área de seção transversal de uma viga e de uma lâmina k , ou área cheia dentro do perímetro.
A_s	- área de deformação cisalhante para vigas-sanduiche de faces espessas (10.23).
E_x^k	- módulo de elasticidade na direção x da k -ésima lâmina, (4.61).
ν_{xy}^k, G_{xy}^k	- coeficiente de Poisson e módulo no plano $x-y$ da k -ésima lâmina, (4.61).
E_{xF}, E_{xN}	- módulos de viga sob flexão e tração, (8.31), (8.32)

E_{mat}, ν_{mat}	- módulo e coeficiente de Poisson de manta de fibras curtas, eq.(6.92).
ν_{xyF}, ν_{xyN}	- coeficiente de Poisson equivalente de viga sob flexão e carga axial.
S_y^k	- 1 ^o momento de inércia da k -ésima lâmina em relação ao eixo y da seção.
β_p	- parâmetro de classificação viga-placa, (5.98)-(5.100).
D_v	- módulo de rigidez flexural equivalente da viga, eq.(8.40).
D_x	- módulo de rigidez flexural aproximada de placa-sanduiche, eq.(10.34).
ξ	- fator para cálculo de tensão de enrugamento de sanduíches (17.29).
h_a	- espessura da camada de adesivo num <i>honeycomb</i> .
h_k	- espessura da lâmina k -ésima.
H	- espessura do laminado ou do painel-sanduiche.
H_n	- espessura do núcleo de um painel-sanduiche.
H_m	- espessura de um painel-sanduiche, entre as superfícies médias das faces.
z_k, \bar{z}_k	- cota da superfície inferior da lâmina k e de sua superfície média.
N	- número de lâminas do laminado.
γ^n	- deformação cisalhante no núcleo de um painel-sanduiche.
V_f, V_m	- fração volumétrica de fibras e de matriz num composto.
V_v	- fração volumétrica de vazios.
M_f, M_m	- fração mássica de fibras e resina num composto.
m_f, m_m	- massa de fibras e matriz num composto.
m_c	- massa do composto.
ρ_f, ρ_m	- densidade da fibra e de matriz num composto.
ρ_c	- densidade do composto, ou densidade da chapa de colméia.
ρ	- densidade de um material.
ρ_n	- densidade do núcleo de um sanduíche.
E, G, ν	- módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson.
X_t, X_c	- valores de resistência de uma lâmina à tração e à compressão na direção 1.
Y_t, Y_c	- valores de resistência de uma lâmina à tração e à compressão na direção 2.
Z_t, Z_c	- valores de resistência de uma lâmina à tração e à compressão na direção 3.
S	- valores de resistência de uma lâmina ao cisalhamento no plano 1-2.
S_1, S_2	- resistência de uma lâmina ao cisalhamento nos planos 1-3 e 2-3.
u, v, w	- funções de deslocamento em um ponto de coordenadas (x, y, z) .
E_x^n, E_x^f	- módulos de elasticidade do núcleo e face de um sanduíche, na direção x .
E_y^n, E_y^f	- módulos de elasticidade do núcleo e face de um sanduíche, na direção y .
G_{xz}^n, G_{WT}	- módulos de elasticidade do núcleo de um sanduíche, no plano xz ou WT .
G_{yz}^n, G_{LT}	- módulos de elasticidade do núcleo de um sanduíche, no plano yz ou LT .
ν_{xy}^n, ν_{xy}^f	- coeficiente de Poisson do núcleo e face de um sanduíche no plano xy .
E_3, E_T	- módulos de elasticidade de núcleo de um sanduíche, na direção 3 ou T .
R_i	- i -ésima falha do laminado, Figura 6.21, página 215.
R_i	- i -ésimo intervalo de carga no laminado, entre as falhas R_{i-1} e R_i .
C_{R_i}	- fator de carga na i -ésima falha (6.57).

$T, \Delta T$	- temperatura, diferença entre temperatura de trabalho e de cura.
U	- concentração de umidade no composto.
α, β	- coeficiente de dilatação térmica e higroscópica.
$\{\alpha^1\}, \{\alpha^x\}$	- coeficientes de dilatação térmica de uma lâmina nas direções 1-2 e x - y , (7.49).
$d\varepsilon_x^{T,l_k}$	- deformação na lâmina desacoplada das demais, (7.13), (7.14).
$t\varepsilon_x^{T,l_k}$	- deformação térmica total na lâmina, (7.22), (7.56).
$[K^e], [K]$	- matrizes de rigidez do elemento e e matriz global.
$\{F^e\}, \{F\}$	- vetor força nodal do elemento e e força global.
$\{U^e\}, \{U\}$	- vetor deslocamento nodal do elemento e e deslocamento global.
$[B^e]$	- matriz de deformação no elemento e .
$(r; s)$	- coordenadas intrínsecas do elemento e , (18.4).
$N_i^e(r, s)$	- função base num elemento e , Seção 18.1.1.

Lista de tabelas, fluxogramas e sumários

Item	Conteúdo	Página
Tab. 1.1	Propriedades mecânicas típicas de alguns materiais em forma de fibra	7
Tab. 1.3	Propriedades mecânicas típicas de alguns materiais em bloco	9
Tab. 1.4	Propriedades de alguns compostos laminados	10
Tab. 1.5	Propriedades termomecânicas de alguns compostos fibrados comerciais	11
Tab. 1.8	Propriedades típicas de monocristais	18
Tab. 1.9	Vantagens e desvantagens dos polímeros em relação a outros materiais	20
Tab. 1.10	Propriedades típicas de alguns polímeros	21
Tab. 3.1	Lista de normas da ASTM de ensaios de compostos reforçados por fibras	56
Sec. 5.1.3	Síntese das equações diferenciais de viga	134
Sec. 5.2	Fórmulas para vigas	136
Sec. 5.10.2	Fórmulas para vigas sobre apoio elástico	172
Sec. 5.2.1	Fatores de cisalhamento k para vigas isotrópicas	141
Sec. 5.5	Sumário da teoria de placas delgadas	155
Eq.(5.100)	Parâmetro de classificação viga-placa	162
Sec. 5.9	Fórmulas para placas retangulares isotrópicas	166
Fig. 6.7	Fluxograma para análise de tensões nas lâminas de um laminado	195
Fig. 6.22	Fluxograma de análise de resistência de um laminado, sem temperatura	216
Fig. 7.11	Fluxograma de cálculo de cargas limites para laminados compostos, incluindo efeitos higrotérmicos e esforços iniciais	257
Tab. 9.2	Alguns adesivos estruturais comerciais	330
Tab. 9.3	Combinações recomendadas de adesivo e aderentes	331
Tab. 9.4	Propriedades típicas de alguns tipos de <i>honeycomb</i> de folha de alumínio	339
Tab. 9.5	Propriedades de alguns tipos de <i>honeycomb</i> de resina reforçada	341
Tab. 9.6	Outras normas de ensaio aplicadas a sanduíches	345
Tab. 9.7	Propriedades típicas de espumas e outros materiais usados em sanduíche	346
Tab. 9.8	Propriedades típicas de faces de sanduíches	347
Tab. 10.1	Fatores K_j para solução de flexão de painel-sanduíche retangular	367
Sec. 10.6	Rotinas de cálculo para sanduíches	371

Unidades

O livro usa unicamente o Sistema Internacional de Unidades, SI. Entretanto, em algumas partes do mundo ainda se usam e publicam trabalhos e resultados em “sistemas” distintos. Por isso, coletamos algumas correspondências que podem facilitar ao leitor a interpretação de valores obtidos em diversas fontes.

Quantidade Física	“sistema” inglês para SI ou métrico
Comprimento	1 pé = 0,3048 m 1 pol = 25,4 mm (valor exato)
Área	1 pé ² = 0,092903 m ² 1 pol ² = 645,16 mm ²
Volume	1 pé ³ = 0,028317 m ³ 1 pol ³ = 16.387,064 mm ³ 1 galão (gal) = 3,785412·10 ⁻³ m ³
Densidade	1 lb _m /pé ³ = 15,394 kg/m ³ 1 lb _m /pol ³ = 26.600,3 kg/m ³
Massa	1 lb _m = 0,4535924 kg 1 ton = 2.000 lb _m = 907,1847 kg
Força	1 lb _f = 4,448222 N = 0,4535924 kgf
Momento	1 lb _f pol = 11,52125 kgf·mm = 112,9848 N·mm
Pressão, tensão	1 lb _f /pol ² ≡ 1 psi = 6.894,757 N/m ² 1 N/m ² = 1 Pascal = 1 Pa = 10 ⁶ N/mm ² 1 lb _f /pe ² = 47,88026 N/m ²
Energia, calor	1 Btu = 1,05504 kJ 1 Joule (J) = 1 N·m
Fluxo de calor ou Potência	1 Btu/h = 0,29307 W 1 Watt (W) = 1 Nm/s 1 hp = 746,499 W
Fluxo de calor por unidade de área	1 Btu/h pe ² = 3,154 W/m ²
Calor específico	1Btu/lb _m °F = 4,1869 kJ/kg°C
Condutividade térmica	1 Btu/h pe°F = 1,7307 W/m°C
Temperatura	°F = 9°C/5 + 32
Variação da temperatura	Δ°F = 9Δ°C/5