

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

Desenvolvimento histórico de materiais, elementos e sistemas estruturais em alvenaria 23

- 1.1 História dos materiais da alvenaria 24
- 1.2 Pedra 24
- 1.3 Tijolos cerâmicos 26
- 1.4 Blocos sílico-calcários 28
- 1.5 Blocos de concreto 28
- 1.6 Argamassa 29
- 1.7 Elementos tradicionais de construções 29
 - 1.7.1 Ganhando altura 30
 - 1.7.2 Vencendo vãos 35
 - 1.7.3 Definindo espaços internos 43
- 1.8 Desenvolvimento da estrutura de edifícios 48
 - 1.8.1 Pilar e viga 49
 - 1.8.2 Abóbodas e cúpulas 49
 - 1.8.3 Gótico 51
 - 1.8.4 Edificações térreas em alvenaria estrutural 53
 - 1.8.5 Edifícios de múltiplos pavimentos em alvenaria estrutural 53
- 1.9 Desempenho das estruturas ainda hoje existentes 55
- 1.10 Restauração e reabilitação de estruturas históricas 56
- 1.11 Considerações finais 58
- 1.12 Exercícios 58

CAPÍTULO 2

Alvenaria contemporânea 61

- 2.1 Introdução 61
- 2.2 Elementos em alvenaria 61
 - 2.2.1 Definições 62
 - 2.2.2 Paredes 65
 - 2.2.3 Pilares e enrijecedores 71

- 2.2.4 Vigas, vergas e cintas 74
- 2.3 Sistemas estruturais de edificações em alvenaria 75**
 - 2.3.1 Edificações térreas 75
 - 2.3.2 Edifícios de múltiplos pavimentos 76
 - 2.3.3 Edifícios híbridos 78
- 2.4 Tipos de alvenarias estruturais 78**
 - 2.4.1 Alvenaria não armada 78
 - 2.4.2 Alvenaria armada 82
 - 2.4.3 Alvenaria protendida 84
- 2.5 Desenvolvimento da normalização internacional 88**
- 2.6 Desenvolvimento da alvenaria estrutural no Brasil 90**
- 2.7 Normas brasileiras 93**
- 2.8 Considerações finais 95**
- 2.9 Exercícios 95**

CAPÍTULO 3

Projeto de edifícios 97

- 3.1 Introdução 97**
- 3.2 Requisitos estruturais 98**
 - 3.2.1 Critérios de dimensionamento 98
- 3.3 Ações 101**
 - 3.3.1 Ações horizontais: empuxo e desaprumo 104
 - 3.3.2 Ação do vento 107
 - 3.3.2.1 Caso de edifício de múltiplos pavimentos de planta retangular 113
 - 3.3.2.2 Outros casos 116
 - 3.3.3 Ações acidentais 117
 - 3.3.4 Outras ações 118
 - 3.3.5 Segurança em estruturas 120
 - 3.3.5.1 Valores característicos e valores de cálculo 120
 - 3.3.5.2 Coeficientes de majoração e combinação de ações 120
 - 3.3.5.3 Combinação das ações no ELU 121
 - 3.3.5.4 Combinação das ações no ELS 122
 - 3.3.5.5 Coeficientes de minoração dos materiais 123
 - 3.3.6 Estados limites de serviço 124
- 3.4 Requisitos de conforto térmico e acústico 126**
 - 3.4.1 Desempenho térmico 127

- 3.4.2 Desempenho acústico 130
- 3.4.3 Estanqueidade 132
- 3.4.4 Resistência ao fogo 132
- 3.5 Estética 133
- 3.6 Compatibilização dos requisitos 136
- 3.7 Concepção do edifício 139
 - 3.7.1 Forma do edifício 139
 - 3.7.2 Fachada e elevações 141
 - 3.7.3 Planta 144
 - 3.7.4 Configuração das paredes e *layout* 147
 - 3.7.5 Lajes 151
 - 3.7.6 Conexões 154
 - 3.7.7 Juntas de dilatação e controle 156
 - 3.7.8 Fundação 157
- 3.8 Aspectos econômicos 157
- 3.9 Considerações finais 158
- 3.10 Exercícios 159

CAPÍTULO 4

Materiais da alvenaria 161

- 4.1 Introdução 161
- 4.2 Propriedades básicas dos blocos e tijolos 161
 - 4.2.1 Descrição de blocos e tijolos 161
 - 4.2.2 Formas usuais 165
 - 4.2.3 Propriedades dos blocos 167
- 4.3 Blocos cerâmicos 174
 - 4.3.1 Produção 175
 - 4.3.2 Formatos, tamanhos e classificação 177
 - 4.3.3 Resistência à compressão 184
 - 4.3.4 Resistência à tração 185
 - 4.3.5 Absorção 185
 - 4.3.6 Durabilidade 187
 - 4.3.7 Coeficiente de expansão térmica 188
 - 4.3.8 Expansão higroscópica 188
 - 4.3.9 Fluência 189
- 4.4 Blocos de concreto 189
 - 4.4.1 Produção 189
 - 4.4.2 Formatos, tamanhos e classificação 191

- 4.4.3 Resistência à compressão 195
- 4.4.4 Resistência à tração 197
- 4.4.5 Absorção 197
- 4.4.6 Durabilidade 197
- 4.4.7 Movimentação térmica 197
- 4.4.8 Retração 198
- 4.4.9 Fluência 198
- 4.5 Blocos de sílico-calcário 199**
 - 4.5.1 Produção 199
 - 4.5.2 Classificação, tamanhos e formatos 199
 - 4.5.3 Resistência à compressão e tração 201
 - 4.5.4 Absorção 201
 - 4.5.5 Movimentação térmica, retração e fluência 201
- 4.6 Blocos de pedra e de vidro 201**
- 4.7 Blocos especiais não convencionais 202**
 - 4.7.1 Blocos especiais não convencionais 203
 - 4.7.2 Blocos de concreto celular 204
- 4.8 Argamassa 205**
 - 4.8.1 Funções da argamassa 205
 - 4.8.2 Tipos de argamassa 205
 - 4.8.3 Propriedades no estado fresco 207
 - 4.8.4 Propriedades no estado endurecido 209
 - 4.8.5 Agregados para argamassa 215
 - 4.8.6 Aditivos e corantes 216
- 4.9 Graute 217**
 - 4.9.1 Requisitos de trabalhabilidade 217
 - 4.9.2 Tipos 218
 - 4.9.3 Aditivos 219
 - 4.9.4 Resistência à compressão 220
- 4.10 Armaduras 221**
 - 4.10.1 Barras de aço 221
 - 4.10.2 Armadura para juntas de assentamento 222
 - 4.10.3 Conectores 222
 - 4.10.4 Cabos de protensão 222
 - 4.10.5 Proteção contra corrosão 222
- 4.11 Materiais complementares 223**
 - 4.11.1 Materiais para preenchimento de juntas 223
 - 4.11.2 Impermeabilização 224

- 4.11.3 Drenagem 224
- 4.11.4 Revestimento e pintura 224
- 4.12 Considerações finais 225
- 4.13 Exercícios 226

CAPÍTULO 5

Comportamento de elementos em alvenaria 229

- 5.1 Introdução 229
- 5.2 Compressão simples 230
 - 5.2.1 Introdução 230
 - 5.2.2 Ensaios padrão de prisma 230
 - 5.2.3 Valor característico 233
 - 5.2.4 Mecanismo usual de ruptura 234
 - 5.2.5 Fatores que influenciam a resistência do prisma 238
 - 5.2.6 Relações tensão-deformação 248
 - 5.2.7 Relação entre resistência de parede e prisma 252
 - 5.2.8 Resistência à compressão paralela à junta de assentamento 252
- 5.3 Combinação de compressão e flexão 253
 - 5.3.1 Introdução 253
 - 5.3.2 Ensaios de prisma 254
 - 5.3.3 Mecanismo usual de ruptura 255
 - 5.3.4 Fatores que afetam o diagrama tensão-deformação na flexão 257
 - 5.3.5 Diagrama tensão-deformação na compressão 257
- 5.4 Tração na flexão fora do plano 259
 - 5.4.1 Introdução 259
 - 5.4.2 Métodos de ensaio 259
 - 5.4.3 Mecanismo de ruptura 263
 - 5.4.4 Fatores que afetam a resistência de tração por aderência entre o bloco e a argamassa 265
 - 5.4.5 Fatores que influenciam a resistência de tração na flexão de alvenaria grauteada 269
 - 5.4.6 Coeficiente de resistência ortogonal 271
 - 5.4.7 Resistência biaxial 273
- 5.5 Resistência ao cisalhamento ao longo da junta de assentamento 274
 - 5.5.1 Introdução 274
 - 5.5.2 Métodos de ensaio 274
 - 5.5.3 Modos de ruptura 275
 - 5.5.4 Relações entre resistência ao cisalhamento ao longo da junta e pré-compressão vertical 275

- 5.5.5 Interação entre cisalhamento e tração ao longo da junta 277
- 5.5.6 Fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento ao longo da junta 278
- 5.5.7 Resistência ao cisalhamento e juntas verticais 280
- 5.6 Resistência de tração no plano da alvenaria 280**
 - 5.6.1 Introdução 280
 - 5.6.2 Métodos de ensaio 280
 - 5.6.3 Modos de ruptura 282
 - 5.6.4 Fatores que influenciam a resistência de tração no plano da alvenaria 284
- 5.7 Ações combinadas e resistência biaxial 286**
 - 5.7.1 Introdução 286
 - 5.7.2 Métodos de ensaio 286
 - 5.7.3 Modos de ruptura 288
 - 5.7.4 Fatores que influenciam a ruptura sob tensões biaxiais de compressão-tração 288
- 5.8 Exemplos 289**
 - 5.8.1 Placa de apoio para ensaio de prisma 289
 - 5.8.2 Especificação dos materiais 289
 - 5.8.3 Deformação axial 289
 - 5.8.4 Coeficiente de ortogonalidade (μ) da resistência à tração para tijolos cerâmicos 290
 - 5.8.5 Coeficiente de ortogonalidade (μ) da resistência à tração para blocos de concreto 290
- 5.9 Considerações finais 291**
- 5.10 Exercícios 292**

CAPÍTULO 6

Vigas 295

- 6.1 Introdução 295**
- 6.2 Comportamento e dimensionamento a flexão 296**
 - 6.2.1 Hipóteses básicas 296
 - 6.2.2 Comportamento de vigas com armadura de flexão 297
 - 6.2.3 Análise elástica de vigas 298
 - 6.2.4 Análise de vigas pelo estado limite último 302
 - 6.2.5 Armadura dupla 305
 - 6.2.6 Estados limites de serviço 307
 - 6.2.7 Armadura intermediária 310
 - 6.2.8 Vigas-parede 310
 - 6.2.9 Armadura mínima 311

6.2.10	Considerações especiais	312
6.2.11	Exemplo 6.1: Análise de uma seção de alvenaria armada sujeita a flexão simples	313
6.3	Comportamento e dimensionamento ao cisalhamento	318
6.3.1	Desenvolvimento das especificações para dimensionamento	318
6.3.2	Exemplo 6.2: Análise da força cortante	325
6.4	Comprimento de ancoragem, emendas e ancoragem nos apoios	327
6.4.1	Requisitos gerais	327
6.4.2	Comprimento de ancoragem e de emenda	327
6.4.3	Ancoragem nos apoios e em pontos intermediários	330
6.4.4	Exemplo 6.3: Ancoragem no apoio	332
6.5	Vigas de alvenaria protendida	332
6.5.1	Introdução	332
6.5.2	Comportamento e projeto de seções não fissuradas sob ações de serviço	333
6.5.3	Verificação da resistência à compressão da alvenaria	336
6.5.4	Perdas de protensão	338
6.5.4.1	Deformação elástica da alvenaria, movimentação higroscópica, efeitos térmicos e fluência	338
6.5.4.2	Atrito, acomodação das ancoragens e relaxação do aço	338
6.5.5	Comportamento e projeto de seções fissuradas no estado limite último	339
6.5.6	Dimensionamento ao cisalhamento	340
6.5.7	Tensão de contato e ancoragem	340
6.5.8	Exemplo 6.4: Comportamento e dimensionamento de uma viga de alvenaria protendida	343
6.6	Distribuição de carregamentos em vergas	347
6.6.1	Comportamento	347
6.6.2	Exemplo 6.5: Carregamento sobre uma verga	348
6.7	Considerações finais	350
6.8	Exercícios	350

CAPÍTULO 7

Painéis fletidos 353

7.1	Introdução	353
7.2	Mecanismos resistentes	354
7.3	Comportamento a flexão de alvenarias não armadas	358
7.3.1	Considerações gerais	358

- 7.3.2 Flexão vertical 358
- 7.3.3 Efeito de carregamento vertical adicional 361
- 7.3.4 Flexão horizontal 362
- 7.3.5 Flexão em duas direções 365
- 7.3.6 Paredes duplas 368

7.4 Análise e dimensionamento de painéis não armados 368

- 7.4.1 Introdução 368
- 7.4.2 Dimensionamento por princípios elásticos simples 369
- 7.4.3 Métodos plásticos da linha de plastificação, da linha de ruptura e da linha de fratura 370
- 7.4.4 Dimensionamento de acordo com o Método da Linha de Ruptura 375
- 7.4.5 Exemplo 7.1: Flexão em duas direções de um painel de alvenaria não armada 379
- 7.4.6 Paredes com enrijecedores 383

7.5 Efeito arco para força horizontal 384

- 7.5.1 Mecanismos do efeito arco em apoios rígidos 384
- 7.5.2 Mecanismo do efeito arco quando há folgas nas extremidades 387
- 7.5.3 Influência do encurtamento axial no mecanismo de arco 388
- 7.5.4 Influência da movimentação dos apoios no mecanismo de arco 389
- 7.5.5 Dimensionamento 389
- 7.5.6 Exemplo 7.2: Efeito arco em um painel com flexão vertical 390

7.6 Painéis fletidos em alvenaria armada 394

- 7.6.1 Introdução 394
- 7.6.2 Flexão vertical 395
- 7.6.3 Flexão horizontal 397
- 7.6.4 Flexão em duas direções 399

7.7 Análise e dimensionamento de painéis armados 399

- 7.7.1 Flexão vertical 399
- 7.7.2 Flexão horizontal 401
- 7.7.3 Flexão em duas direções 401
- 7.7.4 Painéis com aberturas 401
- 7.7.5 Limites para taxa de armadura 401
- 7.7.6 Verificação do cisalhamento 402
- 7.7.7 Ancoragem da armadura 402

7.8 Exemplos de dimensionamento de painéis fletidos armados 402

- 7.8.1 Exemplo 7.3: Painel armado com flexão vertical 402
- 7.8.2 Exemplo 7.4: Painel armado com flexão nas duas direções 406
- 7.8.3 Exemplo 7.5: Painel armado com flexão horizontal 407
- 7.8.4 Exemplo 7.6: Dimensionamento de uma parede de vedação 408

7.9 Considerações finais 410

7.10 Exercícios 411

CAPÍTULO 8

Paredes com compressão axial e flexão fora do plano 413

8.1 Introdução 413

8.2 Visão geral da evolução dos critérios de dimensionamento 414

8.2.1 Evolução das recomendações para projeto 414

8.2.2 Tipos de paredes estruturais 415

8.3 Evolução histórica da compreensão sobre comportamento de paredes comprimidas 417

8.3.1 Capacidade resistente 417

8.3.2 Efeito da altura da parede 418

8.4 Interação entre carga axial e flexão 419

8.4.1 Introdução 419

8.4.2 Análise elástico-linear de seções não armadas 420

8.4.3 Análise elástico-linear de seções armadas 423

8.4.4 Análise no estado limite último 425

8.5 Efeitos da esbeltez 431

8.5.1 Introdução 431

8.5.2 Dimensionamento simplificado de acordo com a normalização brasileira 432

8.5.3 Efeito de esbeltez e excentricidade de carga para paredes com esbeltez pequena ($kh/t \leq 30$) 434

8.5.4 Dimensionamento de paredes esbeltas sob baixa compressão axial 438

8.6 Paredes protendidas 441

8.6.1 Considerações iniciais 441

8.6.2 Análise elástico-linear 441

8.6.3 Verificação do estado limite último 442

8.6.4 Efeitos da esbeltez 442

8.7 Cargas concentradas 446

8.7.1 Estado de tensões sob cargas concentradas 446

8.7.2 Especificações para dimensionamento 449

8.8 Cisalhamento no plano perpendicular à parede 453

8.8.1 Paredes armadas e não armadas 453

8.9 Exemplos de dimensionamento 453

- 8.9.1 Exemplo 8.1: Parede sob carga centrada 453
- 8.9.2 Exemplo 8.2: Parede sob carga excêntrica e força lateral 455
- 8.9.3 Exemplo 8.3: Parede dupla de tijolos cerâmicos, esbelta e protendida 461
- 8.9.4 Exemplo 8.4: Carga concentrada 466
- 8.10 Considerações finais 466
- 8.11 Exercícios 467

CAPÍTULO 9

Pilares e enrijecedores 469

- 9.1 Introdução 469
- 9.2 Comportamento de pilares de alvenaria 471
 - 9.2.1 Introdução 471
 - 9.2.2 Modos de ruptura e resistência à compressão 472
 - 9.2.3 Efeitos de esbeltez 473
- 9.3 Limitações no dimensionamento de pilares 473
- 9.4 Dimensionamento de pilares e enrijecedores para flexão normal (em uma direção) 474
 - 9.4.1 Seções não armadas 474
 - 9.4.2 Seções armadas 475
- 9.5 Efeitos da esbeltez 476
- 9.6 Dimensionamento de pilares para momento biaxial 477
- 9.7 Dimensionamento de acordo com a normalização brasileira 479
- 9.8 Exemplos de dimensionamento de pilares de alvenaria 480
 - 9.8.1 Exemplo 9.1: Pilares com carga axial excêntrica 480
 - 9.8.2 Exemplo 9.2: Pilares com carga centrada 483
- 9.9 Dimensionamento de enrijecedores 485
 - 9.9.1 Introdução 485
 - 9.9.2 Distribuição de esforços entre a parede e o enrijecedor 486
 - 9.9.3 Exemplo 9.3: Projeto de um enrijecedor 487
- 9.10 Considerações finais 492
- 9.11 Exercícios 492

CAPÍTULO 10

Paredes de contraventamento 495

- 10.1 Introdução 495

10.2	Influência do tipo e do <i>layout</i> das paredes de contraventamento	496
10.3	Comportamento e modos de ruptura	498
10.3.1	Paredes não armadas	498
10.3.2	Paredes de contraventamento não armadas em edifício de múltiplos pavimentos	501
10.3.3	Paredes de contraventamento armadas	504
10.3.4	Paredes armadas e com aberturas	509
10.3.5	Paredes de contraventamento armadas em edifícios de múltiplos andares	510
10.4	Distribuição dos esforços em paredes de contraventamento	512
10.4.1	Cargas verticais	512
10.4.2	Forças laterais	514
10.4.3	Fatores que afetam a distribuição das forças laterais	519
10.5	Efeitos de aberturas na rigidez da parede e distribuição da força lateral	521
10.5.1	Combinação de segmentos de paredes verticais e horizontais	521
10.5.2	Rigidez de paredes com aberturas em edifícios baixos	522
10.5.3	Exemplo 10.1: Distribuição da força lateral em uma edificação térrea	524
10.5.4	Paredes de contraventamento de edifícios de múltiplos pavimentos	527
10.5.5	Exemplo 10.2: Esforços em pilares de pilotis de edifício de múltiplos pavimentos	530
10.5.6	Análise limite em paredes de contraventamento em alvenaria armada	534
10.6	Dimensionamento de paredes de contraventamento	536
10.6.1	Área da seção transversal	536
10.6.2	Paredes de contraventamento não armadas	537
10.6.3	Paredes de contraventamento armadas	540
10.6.4	Ligação das paredes	546
10.7	Exemplos	547
10.7.1	Exemplo 10.3: Parede de contraventamento não armada	547
10.7.2	Exemplo 10.4: Parede de contraventamento armada	551
10.7.3	Exemplo 10.5: Pilar em uma parede de contraventamento com abertura	557
10.8	Considerações finais	560
10.9	Exercícios	561
CAPÍTULO 11		
	Paredes de preenchimento e efeito arco	565
11.1	Introdução	565

11.2 Paredes de preenchimento em pórticos 566

- 11.2.1 Comportamento de paredes de preenchimento não ancoradas aos elementos do pórtico 568
- 11.2.2 Análise de pórticos preenchidos 572
- 11.2.3 Resistência de pórticos preenchidos 576
- 11.2.4 Paredes de preenchimento com aberturas 577
- 11.2.5 Paredes de preenchimento com juntas no topo 580
- 11.2.6 Exemplo 11.1: Análise da rigidez de um pórtico com alvenaria de preenchimento 582
- 11.2.7 Exemplo 11.2: Dimensionamento de uma alvenaria de preenchimento 583

11.3 Paredes sobre vigas 585

- 11.3.1 Introdução 585
- 11.3.2 Mecanismo de interação e modos de ruptura 585
- 11.3.3 Análise 587
- 11.3.4 Limites da análise 590
- 11.3.5 Exemplo 11.3: Parede apoiada em viga 591

11.4 Considerações finais 592

11.5 Exercícios 593

ÍNDICE REMISSIVO 597

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 603