

Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado

- 6ª ed.

SUMÁRIO

Prefácio	15
Capítulo 1 - Introdução ao estudo das estruturas de concreto armado	17
1.1 Conceitos fundamentais	17
1.2 Vantagens e desvantagens do concreto armado	22
1.2.1 Vantagens	22
1.2.2 Desvantagens	22
1.3 Pequeno histórico	23
1.4 Sistemas e elementos estruturais	23
1.5 Normas técnicas	28
1.6 Introdução à teoria técnica do concreto armado	30
1.6.1 Fissuração na flexão e momento de fissuração	30
1.6.2 Ações para o cálculo de vigas	33
1.6.3 Exercícios	35
1.7 Características e propriedades do concreto	38
1.7.1 Concreto fresco	39
1.7.1.1 Consistência	39
1.7.1.2 Trabalhabilidade	40
1.7.1.3 Homogeneidade	40
1.7.1.4 Adensamento	41
1.7.1.5 Início do endurecimento (pega) do concreto	41
1.7.1.6 Cura do concreto	42
1.7.1.7 Efeitos das variáveis tempo, temperatura, umidade e velocidade do vento	42
1.7.2 Concreto endurecido	42
1.7.2.1 Resistência à compressão	43
1.7.2.2 Resistência característica do concreto à compressão	44
1.7.2.3 Resistência do concreto à tração	46
1.7.2.4 Diagramas tensão-deformação e módulo de elasticidade do concreto	48
1.7.2.4.1 Módulo de elasticidade	49
1.7.2.4.2 Diagramas tensão-deformação na compressão segundo a ABNT NBR 6118:2026	52
1.7.2.4.3 Diagramas tensão-deformação na tração segundo a ABNT NBR 6118:2026	54
1.7.2.5 Módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson	55
1.7.2.6 Diagrama tensão-deformação com carga e descarga (ensaio rápido)	55
1.8 Características do aço	56
1.9 Dimensionamento (cálculo) de uma estrutura	59
1.9.1 Métodos clássicos	60
1.9.2 Métodos de cálculo na ruptura (ou dos estados limites)	61
1.9.2.1 Valores característicos das resistências	62
1.9.2.2 Valores de cálculo das resistências	62
1.9.2.3 Valores de cálculo das tensões resistentes	63
1.9.2.4 Valores de cálculo da resistência do concreto	63
1.9.2.5 Coeficientes de ponderação das resistências	66

1.9.2.6 Estados limites	67
1.9.3 Ações	71
1.9.3.1 Ações permanentes	71
1.9.3.2 Ações variáveis	71
1.9.3.3 Ações excepcionais	72
1.9.3.4 Valores representativos das ações	74
1.9.3.5 Valores de cálculo	74
1.9.4 Coeficientes de ponderação das ações	75
1.9.4.1 Coeficientes de ponderação para os estados limites últimos	75
1.9.4.2 Coeficientes de ponderação para os estados limites de serviço	76
1.9.5 Combinações das ações	77
1.9.5.1 Combinações últimas	78
1.9.5.2 Combinações de serviço	80
1.9.6 Solicitações	81
1.10 Qualidade das estruturas	82
1.11 Durabilidade das estruturas de concreto	83
1.12 Cuidados a tomar em um projeto para garantir a durabilidade	84
1.13 Emprego de programas automáticos para o cálculo e detalhamento de estruturas de concreto armado	86
Adendo	87

Capítulo 2 - Cálculo da armadura de flexão (normal) de seções retangulares de concreto

armado	91
2.1 Introdução	91
2.2 Tipos de flexão	92
2.3 Processo de colapso (ruína) de vigas em trechos sob tensões normais decorrentes de flexão simples	93
2.4 Hipóteses básicas para o cálculo	96
2.5 Definições e nomenclatura	102
2.6 Domínios de deformação na seção transversal	103
2.7 Cálculo da armadura longitudinal em vigas sob flexão normal	108
2.7.1 Equacionamento para concretos de classe até C40	109
2.7.2 Equacionamento para concretos de qualquer classe	116
2.7.3 Fórmulas adimensionais para dimensionamento de seções retangulares	119
2.7.4 Cálculo do máximo momento resistente da seção	122
2.7.5 Condições de ductilidade em vigas e redistribuição de momentos	125
2.7.6 Cálculo do máximo momento resistente da seção, conhecida a armadura longitudinal	126
2.7.7 Cálculo da altura mínima de uma seção com armadura simples	129
2.7.8 Cálculo de seções com armadura dupla	131
2.7.9 Resumo dos resultados dos exemplos de viga retangular	138
2.7.10 Cálculo de armadura em vigas de seção transversal em forma de "T"	139
2.7.11 Cálculo de armadura de nervuras de lajes unidirecionais "tipo treliça" considerando a seção transversal em forma de "T"	147
Adendo	151

Capítulo 3 - Pavimentos de edificações com lajes nervuradas unidirecionais de vigotas

pré-moldadas	155
3.1 Introdução	155
3.2 Descrição das lajes nervuradas com vigotas pré-moldadas	156

3.3 Elementos constitutivos das lajes pré-fabricadas	158
3.3.1 Vigotas	158
3.3.2 Armaduras	161
3.3.2.1 Requisitos para barras, fios e armadura treliçada	161
3.3.2.2 Armadura treliçada eletrossoldada (TR)	161
3.3.3 Elementos de enchimento (inertes)	162
3.4 Altura total das lajes e espessura da capa	164
3.5 Principais aspectos construtivos e de funcionamento	165
3.5.1 Aspectos construtivos	165
3.6 Vantagens e desvantagens das lajes pré-fabricadas para o uso de pavimento	169
3.7 Comportamento estrutural das lajes unidirecionais pré-fabricadas em um pavimento	170
3.7.1 Modelos de análise (cálculo de esforços solicitantes e deslocamentos)	171
3.7.1.1 O pavimento como chapa	171
3.7.1.2 Pavimento como placa (plano horizontal), ações verticais	172
3.7.1.2.1 Elemento isolado e simplesmente apoiado em apoios indeslocáveis na vertical	172
3.7.1.2.2 Elemento isolado com continuidade por meio de armação na capa, apoios indeslocáveis na vertical	173
3.7.1.2.3 Grelha formada por nervuras da laje e apoiadas em vigas deformáveis na vertical	175
3.7.1.2.4 Grelha formada por nervuras da laje, elementos transversais que representam a capa, todos apoiados em vigas (barras de grelhas), e apenas os pilares com os apoios considerados indeslocáveis na vertical	176
3.8 Comentários e utilização dos modelos de cálculo	177
3.9 Considerações de geometria e de ações atuantes	181
3.9.1 Geometria da seção transversal	181
3.9.2 Geometria da armadura longitudinal positiva	182
3.9.3 Ações atuantes na laje	183
3.10 Cálculo e verificações	187
3.10.1 Verificação de flexão	187
3.10.2 Verificação da força cortante	187
3.10.3 Verificação de deformação	189
3.11 Critérios para projeto de pavimentos com laje pré-moldada	189
3.12 Armaduras construtivas	189
3.13 Considerações finais	213

Capítulo 4 - Detalhamento da armadura longitudinal (flexão) na seção transversal e estados limites de utilização

4.1 Introdução	215
4.2 Armadura longitudinal mínima e máxima em uma seção	218
4.2.1 Armadura mínima	219
4.2.2 Armadura máxima	219
4.3 Armadura concentrada	220
4.4 Armadura de pele	220
4.5 Espaçamentos entre as barras	221
4.6 Proteção e cobrimento	223
4.7 Análise da fissuração em peças de concreto armado	224
4.7.1 Abertura máxima de fissuras	225
4.7.2 Controle da fissuração através da limitação da abertura estimada das fissuras	226
4.7.3 Controle da fissuração sem a verificação da abertura de fissuras	227

4.8 Verificação do estado limite de deformação excessiva	228
4.8.1 Deslocamentos limites	229
4.8.2 Cálculo de deslocamentos em vigas	231
4.8.2.1 Características geométricas de seções no estágio I	234
4.8.2.2 Características geométricas de seções no estágio II	237
4.8.2.3 Efeito da fissuração - modelo simplificado de Branson para flecha imediata	240
4.8.2.4 Efeito da fluência do concreto - avaliação da flecha diferida no tempo	243
Adendo	272
Capítulo 5 - Detalhamento da armadura longitudinal ao longo da viga	275
5.1 Introdução	275
5.2 Quantidade de armadura longitudinal necessária ao longo da viga	276
5.3 Ancoragem por aderência da armadura longitudinal	280
5.3.1 Aderência entre concreto e aço	281
5.3.1.1 Determinação da tensão de aderência	282
5.3.1.2 Verificação da aderência entre concreto e armadura	284
5.3.1.3 Regiões favoráveis ou desfavoráveis quanto à aderência	284
5.3.1.4 Valores das resistências de aderência	285
5.3.2 Ancoragem das barras	286
5.3.2.1 Comprimento básico de ancoragem	286
5.3.2.2 Comprimento necessário de ancoragem	288
5.3.2.3 Armadura transversal na ancoragem	289
5.3.2.4 Ancoragem de estribos	290
5.3.3 Ganchos de ancoragem nas extremidades das barras	290
5.3.3.1 Ganchos da armadura de tração	290
5.3.3.2 Ganchos dos estribos	295
5.4 Emendas de barras	296
5.4.1 Proporção das barras emendadas	297
5.4.2 Comprimento de traspasse de barras isoladas	298
5.4.3 Armadura transversal nas emendas por traspasse, em barras isoladas	299
5.5 Deslocamento do diagrama de momentos fletores (decalagem)	301
5.5.1 Deslocamento do diagrama de momentos fletores de acordo com o modelo I	305
5.5.2 Deslocamento do diagrama de momentos fletores de acordo com o modelo II	306
5.6 Ancoragem da armadura de tração junto aos apoios	307
5.7 Continuidade viga-pilar	308
5.8 Determinação do comprimento das barras longitudinais de acordo com a NBR 6118:2026	310
5.8.1 Comprimento inicial de barras negativas e positivas (duas situações possíveis)	314
5.8.2 Simplificações no diagrama de forças para detalhar a armadura longitudinal	316
5.9 Furos e aberturas em vigas	337
5.9.1 Furos que atravessam as vigas na direção da sua largura	337
5.9.2 Furos que atravessam as vigas na direção da altura	337
5.9.3 Canalizações embutidas	338
Adendo	339
Capítulo 6 - Cisalhamento: cálculo da armadura transversal	341
6.1 Introdução	341
6.2 Tensões normais e tangenciais em uma viga	344
6.3 Tensões principais	347
6.4 Analogia de treliça de Morsch	350

6.4.1 Funcionamento básico e elementos constituintes	350
6.4.2 Cálculo da armadura transversal	352
6.5 Verificação das bielas de concreto comprimidas com a treliça clássica	358
6.6 Treliça generalizada de Mörsch	361
6.7 Estado limite último de elementos lineares sob força cortante (ABNT NBR 6118:2026)	362
6.7.1 Hipóteses básicas	362
6.7.2 Verificação do estado limite último	363
6.7.2.1 Modelo de cálculo I	363
6.7.2.2 Modelo de cálculo II	367
6.8 Prescrições para o detalhamento da armadura transversal	371
6.8.1 Quantidade mínima de estribos	372
6.8.2 Características dos estribos	371
6.8.3 Constituição da armadura transversal	374
6.8.4 Espaçamento entre elementos da armadura transversal	374
6.8.5 Cargas próximas aos apoios	375
Adendo	382
Expressões para a análise de tensões na flexão simples no estágio I (seções 6.2 e 6.3)	382
Expressões para a análise de cortante com a treliça clássica de Mörsch (seções 6.4 e 6.5)	383
Expressões para a verificação do estado limite último (seção 6.7.2)	384
Expressões relativas ao modelo de cálculo I (seção 6.7.2.1)	384
Expressões relativas ao modelo de cálculo II (seção 6.7.2.2)	385
Valores das forças cortantes (kN) resistidas por armadura transversal mínima (seção 6.8.1)	386
Espaçamentos mínimos e máximos para armadura transversal (seção 6.8.4)	386
Capítulo 7 - Pavimentos de edifícios com lajes maciças	387
7.1 Introdução	387
7.2 Métodos de cálculo	389
7.3 Método elástico	389
7.3.1 Hipóteses de cálculo	390
7.3.2 Equação fundamental	391
7.3.3 Processos de resolução	393
7.3.4 Cálculo por diferenças finitas	393
7.3.5 Processo dos elementos finitos	394
7.3.6 Processo de grelha equivalente	394
7.3.7 Determinação de esforços e deslocamentos por meio de séries	395
7.3.7.1 Fundamentos do processo	396
7.3.7.2 Utilização de quadros	398
7.3.7.2.1 Determinação de flechas	399
7.3.7.2.2 Determinação dos momentos máximos nas direções x e y	400
7.4 Roteiro para o cálculo de lajes de concreto armado	409
7.4.1 Discretização do pavimento	410
7.4.2 Pré-dimensionamento da altura das lajes	411
7.4.3 Cálculo das cargas atuantes	412
7.4.4 Verificação das flechas	413
7.4.5 Cálculo dos momentos	414
7.4.6 Determinação das armaduras longitudinais	414
7.4.7 Reação das lajes nas vigas	414
7.4.8 Verificação de lajes ao cisalhamento	419
7.4.8.1 Lajes sem armadura para força cortante	420

7.4.8.2 Lajes com armadura para força cortante	421
7.4.9 Aberturas em lajes	421
7.4.10 Vãos efetivos de lajes e placas	422
7.4.11 Detalhamento das armaduras	423
7.4.11.1 Espaçamento entre barras	423
7.4.11.2 Armaduras longitudinais máximas e mínimas	423
7.4.11.3 Armadura de distribuição e secundária de flexão	424
7.4.11.4 Espaçamento e diâmetro máximo	425
7.4.11.5 Quantidade e comprimentos mínimos de armaduras em bordas livres e aberturas	425
7.4.11.6 Armadura de tração sobre os apoios	426
7.4.11.7 Armadura nos cantos de lajes retangulares e outras recomendações	426
Adendo	443
Anexo 1 - Dimensionamento à flexão de lajes nervuradas unidirecionais contínuas com vigotas pré-moldadas	447
A1.1 Determinação da altura mínima na seção do apoio	449
A1.2 Consideração de trecho maciço junto ao apoio	450
A1.3 Uso de armadura dupla para garantir ductilidade	451
A1.4 Uso da redistribuição de momento	451
A1.5 Plastificação	451
Anexo 2 - Considerações sobre o cálculo de lajes maciças com analogia de grelha	465
A2.1 Introdução	465
A2.2 Processo de analogia de grelha	466
A2.3 Situações analisadas	467
A2.4 Considerações finais	473
Referências	475