

BIBLIOGRAFIA MAIS IMPORTANTE	XIX
NOTAÇÕES	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. CONCRETO	3
2.1 CIMENTO	3
2.1.1 Cimentos padronizados pela norma DIN 1164	4
2.1.2 Escolha dos cimentos	4
2.1.3 Cimentos não padronizados	5
2.2 AGREGADOS	5
2.2.1 Classificação dos agregados	5
2.2.2 Proporcionamento dos agregados	5
2.3 ÁGUA DE AMASSAMENTO	6
2.4 ADITIVOS PARA CONCRETO	7
2.5 CONCRETO FRESCO	7
2.5.1 Dosagem do concreto	7
2.5.1.1 Consumo de cimento [kg/m ³], peso de cimento [kg]	8
2.5.1.2 Teor de água [kg/m ³], peso de água [kg]	8
2.5.1.3 Teor de finos	9
2.5.2 Propriedades do concreto fresco	9
2.6 INFLUÊNCIAS SOBRE O ENDURECIMENTO DO CONCRETO	9
2.6.1 Tipo de cimento	9
2.6.2 Temperatura e grau de maturidade	10
2.6.3 Cura a vapor	11
2.6.4 Adensamento posterior	11
2.6.5 Cura	11
2.7 PRAZOS DE RETIRADA DAS FORMAS	12
2.8 RESISTÊNCIAS DO CONCRETO ENDURECIDO	12
2.8.1 Resistência à compressão	12
2.8.1.1 Corpos de prova e métodos de ensaio	13
2.8.1.2 Resistência nominal β_{WN} de acordo com a DIN 1045	14
2.8.1.3 Ensaio de concreto com urgência de tempo	14
2.8.1.4 Ensaio rápido	14
2.8.1.5 Resistência à compressão sob carga de longa duração	14
2.8.1.6 Resistência à compressão sob carga oscilante ou dinâmica	15
2.8.1.7 Resistência à compressão no caso de temperaturas muito altas ou muito baixas	15
2.8.1.8 Resistência à compressão medida na estrutura	15

2.8.2	Resistência à tração	15
2.8.2.1	Resistência à tração axial	15
2.8.2.2	Resistência à tração por fendilhamento	17
2.8.2.3	Resistência à tração na flexão	17
2.8.2.4	Valores numéricos da resistência à tração	17
2.8.3	Resistências no caso de sollicitação multiaxial	19
2.8.4	Resistência à força cortante, à punção e à torção	19
2.9	DEFORMAÇÕES DO CONCRETO	19
2.9.1	Deformações elásticas	20
2.9.1.1	Módulo de elasticidade do concreto	20
2.9.1.2	Deformação devida à temperatura	21
2.9.1.3	Deformação transversal e módulo de deformação transversal	21
2.9.2	Deformações plásticas independentes do tempo	22
2.9.3	Deformações dependentes do tempo	22
2.9.3.1	Tipos e causas	22
2.9.3.2	Variação da retração	25
2.9.3.3	Variação da deformação lenta	26
2.9.3.4	Impedimento da retração e da deformação lenta	27
2.9.3.5	Efeitos da retração e da deformação lenta sobre as estruturas	29
2.9.3.6	Cálculo da retração e da deformação lenta de acordo com a DIN 1045	29
2.9.3.7	Cálculo da retração e da deformação lenta de acordo com a DIN 4227 (nova edição de 1972)	31
2.10	PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO	35
2.10.1	Durabilidade do concreto	35
2.10.2	Condutibilidade térmica	35
3.	AÇOS PARA CONCRETO	37
3.1	TIPOS E CATEGORIAS DE AÇOS PARA CONCRETO	37
3.2	PROPRIEDADES DOS AÇOS PARA CONCRETO	39
3.2.1	Características de resistência	39
3.2.1.1	Resistência à tração	39
3.2.1.2	Resistência à fadiga	39
3.2.2	Propriedades de deformação	41
3.3	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE AS PROPRIEDADES DOS AÇOS PARA CONCRETO	43
3.4	SOLDABILIDADE DOS AÇOS PARA CONCRETO	43
4.	O MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CONCRETO ARMADO	45
4.1	A AÇÃO CONJUNTA DO AÇO E DO CONCRETO	45
4.1.1	Aderência em uma barra tracionada de concreto armado	45

4.1.2	Aderência em vigas de concreto armado	48
4.1.3	Causas das tensões de aderência em estruturas	50
4.2	AÇÃO DA ADERÊNCIA	50
4.2.1	Tipos de aderência	50
4.2.1.1	Aderência por adesão	50
4.2.1.2	Aderência por atrito	50
4.2.1.3	Aderência mecânica	51
4.2.2	Lei da deformação por aderência	53
4.2.2.1	Descrição qualitativa da deformação por aderência	53
4.2.2.2	Corpos de prova para o ensaio de arrancamento	54
4.2.3	Resistência de aderência	55
4.2.3.1	Influência da qualidade do concreto sobre a resistência de aderência	56
4.2.3.2	Influência da conformação superficial e do diâmetro da barra	56
4.2.3.3	Influência da posição da barra durante a concretagem	56
4.3	ADERÊNCIA EM ELEMENTOS DE ANCORAGEM	57
4.3.1	Ensaio de arrancamento com ganchos	57
4.3.2	Ensaio de arrancamento em barras com barras transversais soldadas	59
4.4	TRATAMENTO ANALÍTICO DA ADERÊNCIA	59
4.4.1	Generalidades	59
4.4.2	Cálculo da aderência segundo a DIN 1045	59
5.	COMPORTAMENTO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	61
5.1	VIGAS DE CONCRETO ARMADO DE UM ÚNICO VÃO SUBMETIDAS À FLEXÃO E À FORÇA CORTANTE	61
5.1.1	Comportamento resistente e estádios	61
5.1.1.1	Estádios I e II	61
5.1.1.2	Solicitações na armadura e no concreto	61
5.1.1.3	Rigidez à flexão e deformação	66
5.1.2	Comportamento resistente na flexão pura	67
5.1.2.1	Capacidade de carga e capacidade de utilização	67
5.1.2.2	Tipos de ruptura por flexão	68
5.1.3	Comportamento resistente na flexão com força cortante	68
5.1.3.1	Estádio I	68
5.1.3.2	Estádio II	68
5.1.3.3	Tipos de ruptura por força cortante	72
5.2	VIGAS CONTINUAS DE CONCRETO ARMADO	73
5.3	VIGAS OU BARRAS SOLICITADAS À TORÇÃO	73
5.3.1	Torção pura	73
5.3.2	Torção com força cortante e flexão	74
5.4	PILARES E OUTRAS PEÇAS COMPRIMIDAS	75

5.5	LAJES DE CONCRETO ARMADO	76
5.5.1	Lajes de concreto armado apoiadas numa direção	76
5.5.2	Lajes de concreto armado apoiadas em duas direções	77
5.5.3	Lajes de concreto armado apoiadas em pontos	79
5.6	CHAPAS E VIGAS-PAREDE	79
5.7	ESTRUTURAS PLISSADAS	81
5.8	CASCAS	83
5.9	COMPORTAMENTO RESISTENTE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO PARA SOLICITAÇÕES ESPECIAS	83
5.9.1	Introdução de cargas	83
5.9.2	Influência da temperatura	84
5.9.3	Fogo e incêndios	84
5.9.4	Retração do concreto	86
5.9.5	Deformação lenta do concreto	86
5.9.6	Comportamento sob vibrações e choques	86
5.9.7	Comportamento no caso de abalos sísmicos	87
6.	PRINCÍPIOS BÁSICOS DA VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA	89
6.1	PRINCÍPIOS	89
6.1.1	Objetivos	89
6.1.2	Solicitações	89
6.1.3	Limites das solicitações, estados-limite	89
6.2	PROCESSOS DE CÁLCULO PARA A GARANTIA DA SEGURANÇA	90
6.2.1	O processo antigo das tensões admissíveis	90
6.2.2	Processos relacionados a estados-limite	91
6.2.3	Processos baseados na teoria das probabilidades	91
6.3	VALOR DOS COEFICIENTES DE SEGURANÇA	92
6.3.1	Segurança para a capacidade de carga e estabilidade	92
6.3.2	Segurança contra perda da capacidade de utilização	94
6.4	DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS	94
6.4.1	Idéia básica do dimensionamento	94
6.4.2	Processo de dimensionamento	95
6.4.3	Dimensionamento para os diversos esforços solicitantes	95
6.4.4	Influência da relação entre rigidezes nos Estádios I e II sobre os esforços solicitantes em estruturas hiperestáticas	96
6.4.5	Observações sobre os processos de dimensionamento mais comuns	96
7.	DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO COMPOSTA	99
7.1	BASES DO DIMENSIONAMENTO	99
7.1.1	Princípios do dimensionamento	99
7.1.2	Valores de cálculo das resistências dos materiais e dos diagramas tensão-deformação	100

7.1.2.1	Valores de cálculo do concreto	100
7.1.2.2	Valores de cálculo dos aços para concreto	102
7.1.3	Tipos de ruptura, diagramas de deformação e valores dos coeficientes de segurança	102
7.1.3.1	Tipos de ruptura	102
7.1.3.2	Diagramas de deformação e valor do coeficiente de segurança	104
7.1.4	Esforços solicitantes e condições de equilíbrio	106
7.1.4.1	Esforços externos	106
7.1.4.2	Esforços internos	108
7.1.4.3	Valor e posição da força de compressão D_b no concreto	109
7.1.4.4	Condições de equilíbrio	114
7.2	DIMENSIONAMENTO DE SEÇÕES TRANSVERSAIS COM ZONA COMPRIMIDA RETANGULAR	114
7.2.1	Observações preliminares	114
7.2.2	Dimensionamento à flexão composta com grande excentricidade (linha neutra elevada na seção transversal)	115
7.2.2.1	Equações para a solução analítica	115
7.2.2.2	Diagrama adimensional (segundo H. Rüsçh) para o dimensionamento de seções sem armadura de compressão	118
7.2.2.3	Utilização do diagrama de dimensionamento de H. Rüsçh para seções com armadura de compressão	121
7.2.2.4	Tabelas de dimensionamento para seções sem armadura de compressão	121
7.2.2.5	Utilização das tabelas de dimensionamento para seções com armadura de compressão	124
7.2.2.6	Dedução de um diagrama adimensional para seções sem armadura de compressão na flexão simples	127
7.2.2.7	Fórmulas empíricas para o dimensionamento de seções sem armadura de compressão na flexão simples	129
7.2.3	Dimensionamento à flexão composta com média e pequena excentricidades (linha neutra baixa e linha neutra fora da seção)	130
7.2.3.1	Diagramas de dimensionamento de Mörsch-Pucher para armadura assimétrica (linha neutra baixa na seção transversal)	130
7.2.3.2	Diagramas de dimensionamento à compressão excêntrica com armadura simétrica	136
7.2.3.3	Dimensionamento para força normal de tração com pequena excentricidade	139
7.2.4	Diagramas gerais de dimensionamento para seções retangulares (diagramas de interação)	140
7.3	DIMENSIONAMENTO DE SEÇÕES COM ZONA COMPRIMIDA NÃO RETANGULAR	142
7.3.1	Introdução	142
7.3.2	Largura colaborante em vigas T	142
7.3.2.1	Formulação do problema	142
7.3.2.2	Cálculo da largura colaborante	147
7.3.3	Dimensionamento de vigas T	148
7.3.3.1	Classificação dos processos de dimensionamento	148
7.3.3.2	Dimensionamento sem aproximações	150
7.3.3.3	Processo aproximado para vigas T compactas com $b/b_0 \leq 5$	151
7.3.3.4	Processo aproximado para vigas T com alma delgada ($b/b_0 \geq 5$)	154
7.3.4	Dimensionamento de zonas comprimidas de concreto com forma qualquer	155
7.3.4.1	Generalidades	155
7.3.4.2	Direção e posição da linha neutra	155
7.3.4.3	Determinação das solicitações críticas M_U e N_U pelo método gráfico de Mörsch	159
7.3.4.4	Verificação da capacidade resistente com a hipótese de distribuição constante das tensões na zona comprimida de concreto	161
7.3.4.5	Dimensionamento de seções circulares	164

7.4	DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS CINTADOS SEM PERIGO DE FLAMBAGEM	166
7.5	ARMADURA MÍNIMA DE TRAÇÃO NA FLEXÃO	171
7.6	DIMENSIONAMENTO DE SEÇÕES DE CONCRETO SIMPLES	173
8.	DIMENSIONAMENTO À FORÇA CORTANTE	175
8.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS	175
8.2	TENSÕES PRINCIPAIS EM ESTRUTURAS HOMOGÊNEAS (ESTÁDIO I)	175
8.2.1	Determinação das tensões de cisalhamento em seções homogêneas (seção transversal de concreto armado no Estádio I)	175
8.2.2	Determinação das tensões principais em seções transversais homogêneas	177
8.3	ESFORÇOS E TENSÕES EM ALMAS DE VIGAS FISSURADAS (ESTÁDIO II)	180
8.3.1	A clássica analogia da treliça de E. Mörsch	180
8.3.2	Cálculo dos esforços e tensões nas treliças de Mörsch	180
8.3.2.1	Treliça clássica com diagonais de tração na alma com um ângulo α qualquer	180
8.3.2.2	Treliça clássica com diagonais de tração a 45° ou 90°	184
8.3.2.3	Influência do ponto de aplicação da carga sobre os esforços em uma treliça	184
8.3.3	Valor de cálculo da tensão de cisalhamento na alma τ_0 , no Estádio II	186
8.4	CAPACIDADE RESISTENTE DE ALMAS DE VIGAS À FORÇA CORTANTE	186
8.4.1	Tipos de ruptura por força cortante	186
8.4.1.1	Ruptura por força cortante-flexão	186
8.4.1.2	Ruptura por força cortante-tração	187
8.4.1.3	Ruptura das diagonais de compressão	187
8.4.1.4	Ruptura por falha de ancoragem	188
8.4.2	Influências sobre a capacidade resistente à força cortante	188
8.4.2.1	Enumeração das influências	188
8.4.2.2	Tipo de carregamento e posição da carga	190
8.4.2.3	Tipo de introdução da carga	192
8.4.2.4	Influência da armadura longitudinal	193
8.4.2.5	Influência da forma da seção transversal e da percentagem de armadura	194
8.4.2.6	Influência da altura total da viga	198
8.4.3	Analogia da treliça generalizada	199
8.5	DIMENSIONAMENTO DE ALMAS DE VIGAS À FORÇA CORTANTE	200
8.5.1	Considerações básicas e conceitos	200
8.5.2	Dimensionamento da armadura de alma com grau de armação total ao cisalhamento segundo E. Mörsch	201
8.5.3	Dimensionamento da armadura de alma com grau de armação reduzido ao cisalhamento	203
8.5.3.1	Princípios básicos	203
8.5.3.2	Valor da redução τ_{0D}	204
8.5.3.3	Grau de armação necessário ao cisalhamento η	204
8.5.3.4	Armadura mínima de cisalhamento em almas de vigas	205
8.5.3.5	Diminuição adicional da armadura de cisalhamento necessária, no caso de cargas próximas do apoio ou de vigas curtas	206
8.5.3.6	Limite superior das tensões de cisalhamento τ_0 para evitar uma ruptura da diagonal comprimida	207
8.5.3.7	Valores limites de τ_0 para lajes sem armadura de cisalhamento	208

8.5.4	Dimensionamento segundo a DIN 1045	208
8.5.4.1	O valor determinante da força cortante	208
8.5.4.2	Valor de cálculo τ_0	208
8.5.4.3	Regiões para o dimensionamento à força cortante	209
8.6	DIMENSIONAMENTO À FORÇA CORTANTE EM CASOS ESPECIAIS	211
8.6.1	Armadura de ligação em banzos	211
8.6.2	Vigas de concreto armado com altura variável	213
8.6.3	Consideração de forças normais no dimensionamento à força cortante	216
8.6.3.1	Flexão composta e linha neutra na seção transversal	216
8.6.3.2	Compressão excêntrica e linha neutra fora da seção transversal	217
8.6.3.3	Tração excêntrica e linha neutra fora da seção transversal	217
8.6.3.4	Influência de forças normais em vigas com banzos inclinados	218
9.	DIMENSIONAMENTO À TORÇÃO	219
9.1	PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS	219
9.2	TENSÕES PRINCIPAIS EM ESTRUTURAS HOMOGÊNEAS NO CASO DE TORÇÃO SIMPLES (ESTÁDIO I)	221
9.2.1	Torção de St. Venant	221
9.2.2	Observações sobre a torção com empenamento impedido na seção transversal	224
9.3	ESFORÇOS E TENSÕES EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À TORÇÃO SIMPLES (ESTÁDIO II)	228
9.3.1	Analogia da treliça para torção simples	228
9.3.2	Esforços e tensões em treliças espaciais	230
9.3.2.1	Treliças espaciais com diagonais de tração a 45°	230
9.3.2.2	Treliça espacial com barras longitudinais e estribos verticais	232
9.3.3	Valor de cálculo da tensão tangencial de torção no Estádio II	233
9.4	COMPORTAMENTO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NO CASO DE TORÇÃO SIMPLES	236
9.4.1	Os ensaios clássicos de torção, por E. Mörsch, nos anos de 1904 e 1921	236
9.4.2	Ruptura por tração na torção (colapso da armadura)	236
9.4.3	Ruptura por compressão na torção (esmagamento das diagonais comprimidas de concreto)	238
9.4.4	Rompimento dos cantos	238
9.4.5	Ruptura da ancoragem	239
9.5	DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS À TORÇÃO SIMPLES	240
9.5.1	Proposições relativas ao dimensionamento à torção simples	240
9.5.1.1	Percentagem de armadura e tensões no caso de torção	240
9.5.1.2	Armadura mínima no caso de torção simples	240
9.5.1.3	Dimensionamento da armadura	241
9.5.1.4	Limite superior da sollicitação de torção	242
9.5.2	Dimensionamento à torção simples de acordo com a DIN 1045	242

9.6	DIMENSIONAMENTO NO CASO DE TORÇÃO COM FORÇA CORTANTE E/OU MOMENTO FLETOR	242
9.6.1	Modelos de ruptura e resultados de ensaios	242
9.6.2	Dimensionamento simplificado no caso de torção combinada com outras solicitações	244
9.6.2.1	Armadura mínima	244
9.6.2.2	Dimensionamento da armadura	245
9.6.2.3	Limite superior para $(\tau_o + \tau_T)$	245
9.6.3	Dimensionamento à torção e força cortante de acordo com a DIN 1045	246
10.	DIMENSIONAMENTO DE PEÇAS COMPRIMIDAS DE CONCRETO ARMADO	247
10.1	SOBRE A ESTABILIDADE DE PEÇAS COMPRIMIDAS	247
10.1.1	Influência das deformações. Teoria de 2ª Ordem	247
10.1.2	Problemas de estabilidade e de tensões	247
10.1.2.1	Capacidade resistente no caso de compressão centrada	247
10.1.2.2	Capacidade resistente no caso de compressão excêntrica	248
10.2	CAPACIDADE RESISTENTE DE PEÇAS COMPRIMIDAS ESBELTAS DE CONCRETO ARMADO	250
10.2.1	Formulação do problema no caso de peças comprimidas esbeltas de concreto armado	250
10.2.2	Influências sobre a capacidade resistente de peças comprimidas de concreto armado	251
10.2.2.1	Influência da distribuição de momentos	251
10.2.2.2	Influência da classe do concreto e da categoria do aço	252
10.2.2.3	Influência da percentagem de armadura	253
10.2.2.4	Influência da deformação lenta no caso de carga de longa duração	254
10.3	VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE ACORDO COM A TEORIA DE 2ª ORDEM PARA PEÇAS ESBELTAS COMPRIMIDAS	255
10.3.1	Introdução	255
10.3.2	Considerações sobre o valor do coeficiente de segurança	256
10.3.3	Dedução das relações para a determinação da curvatura em seções retangulares de concreto armado	257
10.3.4	Verificação da capacidade resistente de acordo com a Teoria de 2ª Ordem	265
10.4	MÉTODO DA BARRA EQUIVALENTE E DETERMINAÇÃO DOS RESPECTIVOS COMPRIMENTOS DE FLAMBAGEM	269
10.4.1	Método da barra equivalente	269
10.4.2	Comprimentos de flambagem para o método da barra equivalente	269
10.4.2.1	Generalidades	269
10.4.2.2	Comprimentos de flambagem de pilares de pórticos indeslocáveis	270
10.4.2.3	Comprimentos de flambagem de pilares de pórticos deslocáveis	273
10.5	VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA À FLAMBAGEM DE ACORDO COM A DIN 1045 E A DIN 4224	277
10.5.1	Visão geral	277
10.5.2	Disposições fundamentais	278
10.5.3	Verificação simplificada para peças comprimidas com esbeltez moderada ($20 < \lambda \leq 70$) e seção transversal constante	279
10.5.4	Verificação simplificada da segurança à flambagem para peças comprimidas esbeltas ($\lambda > 70$)	281
10.5.4.1	Princípios básicos	281
10.5.4.2	Hipóteses para as relações $M - N - \bar{\mu}$	281
10.5.4.3	Deformação admitida para a barra e momento correspondente pela Teoria de 2ª Ordem	283

10.5.4.4	Nomogramas	283
10.5.4.5	Determinação simplificada das deformações v_k devidas à deformação lenta	284
10.5.4.6	Exemplo de dimensionamento	285
10.5.5	Indicações sobre disposições construtivas	288
10.6	VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA À FLAMBAGEM EM CASOS ESPECIAIS	289
10.6.1	Segurança à flambagem no caso de força de compressão com excentricidades em duas direções .	289
10.6.1.1	Generalidades	289
10.6.1.2	Verificação simplificada da segurança à flambagem, no caso de flexão composta oblíqua	290
10.6.2	Verificação da estabilidade de sistemas formados por pórticos	291
10.6.3	Verificação da segurança à flambagem de pilares cintados	294
10.7	CAPACIDADE RESISTENTE DE PEÇAS ESBELTAS COMPRIMIDAS DE CONCRETO SIMPLES . . .	294
10.7.1	Sobre o comportamento estrutural de peças comprimidas de concreto simples	294
10.7.2	Dimensionamento de peças esbeltas comprimidas não armadas, de acordo com a DIN 1045 . . .	295
BIBLIOGRAFIA		297