

# CONTÉUDO

<b>PREFÁCIO</b> .....	V
<b>PLANO DA OBRA</b> .....	VII
<b>NOTAÇÕES</b> .....	XV
<b>1. BIBLIOGRAFIA E REGULAMENTOS</b> .....	1
1.1 A PARTIR DO INÍCIO DO CONCRETO PROTENDIDO .....	1
1.2 BIBLIOGRAFIA MAIS RECENTE .....	1
1.3 REGULAMENTOS .....	2
<b>2. NOÇÕES BÁSICAS E CONCEITOS</b> .....	3
2.1 O CONCEITO BÁSICO DA PROTENSÃO .....	3
2.2 VANTAGENS PECULIARES AO CONCRETO PROTENDIDO .....	6
2.3 CONCEITOS RELATIVOS AO CONCRETO PROTENDIDO .....	7
2.3.1 Meios de Protensão .....	7
2.3.2 Tipos de Protensão .....	7
2.3.3 Tipos de Ancoragens dos Cabos de Protensão .....	8
2.3.4 Grau de Protensão .....	8
2.3.5 Grau de Resiliência da Protensão .....	9
2.3.6 Conceitos Relativos a Deformações .....	9
2.3.7 Esforços Externos Exercidos pelos Cabos de Protensão sobre o Concreto .....	9
<b>3. HISTÓRICO</b> .....	11
<b>4. MATERIAIS PARA CONCRETO PROTENDIDO</b> .....	15
4.1 CONCRETO .....	15
4.2 AÇOS DE PROTENSÃO .....	16
4.2.1 Exigências Relativas aos Aços de Protensão .....	16
4.2.2 Ensaio Exigidos para os Aços de Protensão .....	17
4.2.3 Tipos de Aços para Protensão .....	18
4.2.3.1 Barras de Aço de Dureza Natural .....	18
4.2.3.2 Fios de Aço para Protensão .....	19
4.2.4 Corrosão dos Aços de Protensão .....	22
4.2.5 Fluência e Relaxação dos Aços de Protensão .....	23
4.2.6 Influência de Temperaturas Altas e Baixas sobre os Aços de Protensão .....	26
4.2.7 Influência de uma Compressão Transversal sobre a Resistência dos Aços de Protensão .....	28
4.2.8 Tensões de Flexão (por Dobramento) em Cabos de Protensão .....	29
4.2.9 A Resistência à Fadiga dos Aços de Protensão .....	31
4.3 BAINHAS .....	33
4.4 NATA DE INJEÇÃO .....	34
<b>5. ADERÊNCIA</b> .....	37
5.1 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA .....	37
5.2 TENSÕES DE ADERÊNCIA .....	43

<b>6. COMPORTAMENTO RESISTENTE DE VIGAS DE CONCRETO PROTENDIDO</b> .....	45
6.1 COMPORTAMENTO RESISTENTE NO CASO DE FLEXÃO .....	45
6.2 COMPORTAMENTO RESISTENTE NO CASO DE CISALHAMENTO E FORÇA CORTANTE ...	56
6.3 INFLUÊNCIA DE CABOS CURVOS NA CAPACIDADE RESISTENTE AO CISALHAMENTO ...	62
6.4 COMPORTAMENTO RESISTENTE NO CASO DE TORÇÃO .....	64
6.5 COMPORTAMENTO RESISTENTE NO CASO DE TRAÇÃO CENTRADA .....	65
<b>7. ESCOLHA DO GRAU DE PROTENSÃO</b> .....	69
7.1 DEFINIÇÃO DO GRAU DE PROTENSÃO .....	69
7.2 COMENTÁRIOS SOBRE O GRAU DE PROTENSÃO .....	69
7.3 CRITÉRIOS PARA UMA ANÁLISE CRÍTICA DO GRAU DE PROTENSÃO .....	71
7.3.1 Influência do Grau de Protensão sobre as Tensões na Armadura .....	71
7.3.2 Influência do Grau de Protensão sobre a Abertura das Fissuras e sobre as Flechas .....	74
7.4 ESCOLHA DO GRAU DE PROTENSÃO .....	77
7.5 SITUAÇÃO ATUAL DAS NORMAS .....	78
<b>8. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO PROTENDIDO EM RELAÇÃO À CORROSÃO</b> ..	79
8.1 EXPERIÊNCIA ADQUIRIDA .....	79
8.2 GRAU DE PROTENSÃO E PERIGO DE CORROSÃO .....	79
8.3 CRITÉRIOS PARA GARANTIR A DURABILIDADE FACE À CORROSÃO .....	80
<b>9. RESISTÊNCIA À FADIGA E RESISTÊNCIA EM CONDIÇÕES DE SERVIÇO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO PROTENDIDO</b> .....	83
<b>10. ANCORAGENS E EMENDAS DA ARMADURA DE PROTENSÃO</b> .....	87
10.1 ANCORAGENS POR ADERÊNCIA .....	87
10.1.1 Tensões em Fios Individuais Nervurados .....	87
10.1.2 Ancoragem por Aderência de Feixes de Fios .....	90
10.1.3 Ancoragens em Leque .....	91
10.2 ANCORAGEM DE FIOS DE PROTENSÃO LISOS DIRETAMENTE NO CONCRETO POR MEIO DE CURVATURA E ATRITO .....	92
10.3 ANCORAGENS EM LAÇO .....	95
10.4 ANCORAGENS COM ROSCAS E PORCAS .....	97
10.5 ANCORAGENS COM CUNHAS .....	99
10.6 ANCORAGENS ATRAVÉS DE LUVAS TREFILADAS E LUVAS DE PRESSÃO .....	104
10.7 ANCORAGENS ATRAVÉS DE BOTÕES .....	105
10.8 EMENDAS E ACOPLAMENTO DOS CABOS DE PROTENSÃO .....	107
10.8.1 Luvas Rosqueadas e Luvas de Pressão .....	107
10.8.2 Emendas com Cunhas .....	109
10.8.3 Emendas com Parafusos .....	109
10.8.4 Resistência à Fadiga de Ancoragens e Juntas de Acoplamento .....	110
10.9 DISPOSIÇÃO DAS ANCORAGENS DOS CABOS DE PROTENSÃO .....	112
10.9.1 Ancoragens Passivas .....	112
10.9.2 Ancoragens Ativas .....	112
<b>11. PROCESSOS DE PROTENSÃO E SUA ESCOLHA</b> .....	119
<b>12. SISTEMAS E EQUIPAMENTOS DE PROTENSÃO</b> .....	123
12.1 PROTENSÃO COM MACACOS HIDRÁULICOS .....	123

12.1.1	Generalidades .....	123
12.1.2	Exemplos de Macacos Hidráulicos .....	125
12.2	<b>SISTEMAS ESPECIAIS DE PROTENSÃO</b> .....	130
12.2.2	Tensionamento Transversal à Direção de Protensão .....	130
12.2.3	Protensão por Cintamento .....	131
<b>13.</b>	<b>CABOS EM BAINHAS. ATRITO. INSTALAÇÃO</b> .....	133
13.1	CAUSAS DO ATRITO .....	133
13.2	COEFICIENTE DE ATRITO .....	135
13.3	MEDIDAS PARA REDUZIR O ATRITO. ....	138
13.4	CÁLCULO DA PERDA DE PROTENSÃO POR ATRITO. ....	139
13.5	VARIAÇÃO DA FORÇA DE PROTENSÃO EM FUNÇÃO DAS PERDAS POR ATRITO .....	141
13.6	INSTALAÇÃO DOS CABOS DE PROTENSÃO .....	144
<b>14.</b>	<b>PROTENSÃO, CÁLCULO DO ALONGAMENTO DE PROTENSÃO E REALIZAÇÃO DA ADERÊNCIA POSTERIOR</b> .....	149
14.1	PROTENSÃO COM ADERÊNCIA INICIAL .....	149
14.2	PROTENSÃO COM ADERÊNCIA POSTERIOR .....	149
14.2.1	Cuidados Preliminares .....	149
14.2.2	Execução da Protensão no Tempo .....	150
14.2.3	Execução da Protensão no Espaço .....	150
14.3	A OPERAÇÃO DA PROTENSÃO .....	151
14.3.1	Medições a Efetuar por Ocasião da Protensão .....	151
14.3.2	Irregularidades no Alongamento de Protensão .....	154
14.4	CÁLCULO DO ALONGAMENTO DE PROTENSÃO .....	154
14.5	REALIZAÇÃO DA ADERÊNCIA POSTERIOR ATRAVÉS DA NATA DE INJEÇÃO .....	156
<b>15.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE AS VERIFICAÇÕES NECESSÁRIAS</b> .....	159
15.1	VERIFICAÇÕES NECESSÁRIAS .....	159
15.2	INDICAÇÕES SOBRE AS HIPÓTESES DE CÁLCULO .....	161
<b>16.</b>	<b>ESFORÇOS SOLICITANTES E TENSÕES DEVIDOS À PROTENSÃO. INDICAÇÕES PARA O TRAÇADO DOS CABOS</b> .....	163
16.1	O EFEITO DA PROTENSÃO SOBRE O CONCRETO .....	163
16.2	ESFORÇOS SOLICITANTES E TENSÕES EM VIGAS ISOSTÁTICAS .....	165
16.2.1	Esforços Solicitantes no Concreto .....	165
16.2.2	Determinação das Tensões para a Carga de Utilização .....	169
16.2.3	Determinação das Tensões Normais $\sigma_x$ no Caso de Protensão em Bancada .....	171
16.2.4	Tensões devidas à Carga de Utilização no Estádio II .....	173
16.3	ESFORÇOS SOLICITANTES EM ESTRUTURAS PROTENDIDAS EXTERNAMENTE HIPERESTÁTICAS E CONCLUSÕES SOBRE O TRAÇADO DOS CABOS .....	175
16.3.1	Princípios Básicos .....	175
16.3.2	Métodos de Cálculo para a Determinação dos Esforços de Coação Produzidos pela Protensão .....	177
16.3.3	Noções Básicas Relativas a Vigas de Dois Vãos com Cabo Parabólico .....	178
16.3.3.1	Cálculo Considerando o Esforço Solicitante M como Incógnita .....	178
16.3.3.2	Cálculo Através das Forças Devidas às Mudanças de Direção .....	184
16.3.3.3	Força de Protensão Aplicada na Extremidade da Viga, fora do Eixo Baricêntrico (Cabo Parabólico). ....	184
16.3.3.4	Caso Particular: Cabos Retos em cada Vão .....	189

16.3.4	Vigas com Mais de Dois Vão e Casos Gerais .....	190
16.3.5	A Viga Engastada como Base dos Métodos de Compensação de Momentos .....	194
16.3.5.1	Viga Biengastada .....	195
16.3.5.2	Viga Engastada em um só Lado .....	197
16.3.6	Aplicação dos Métodos de Compensação de Momentos .....	199
<b>17.</b>	<b>DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE PROTENSÃO .....</b>	<b>203</b>
17.1	FORÇA DE PROTENSÃO NECESSÁRIA EM VIGAS ISOSTÁTICAS .....	203
17.2	FORÇA DE PROTENSÃO NECESSÁRIA EM VIGAS HIPERESTÁTICAS .....	206
17.3	A TENSÃO ADMISSÍVEL NA ARMADURA DE PROTENSÃO $\sigma_z$ , $\sigma_{z, \text{vo adm}}$ POR OCASIÃO DA PROTENSÃO .....	207
17.4	PERDAS DE PROTENSÃO DEVIDAS À RETRAÇÃO E À FLUÊNCIA. FÓRMULAS DE APLICAÇÃO PRÁTICA .....	208
17.4.1	Observação Preliminar .....	208
17.4.2	Fórmulas de Aplicação Prática para o Cálculo das Perdas de Protensão .....	208
17.4.3	Influência da Armadura Passiva na Perda de Protensão .....	210
17.4.4	Seções Determinantes para o Cálculo da Perda de Protensão .....	210
<b>18.</b>	<b>DIMENSIONAMENTO TENDO EM VISTA A CAPACIDADE RESISTENTE .....</b>	<b>213</b>
18.1	FLEXÃO SEM MOMENTOS DE PROTENSÃO .....	213
18.2	FLEXÃO COM MOMENTOS DE PROTENSÃO .....	216
18.2.1	Estado Atual dos Conhecimentos .....	216
18.2.2	Critérios Atuais de Verificação .....	217
18.3	FLEXÃO SEM ADERÊNCIA .....	218
18.4	FORÇA CORTANTE E CISALHAMENTO .....	219
18.4.1	Lajes sem Armadura de Cisalhamento .....	219
18.4.2	Vigas com Armadura de Cisalhamento .....	220
18.4.2.1	A Teoria da Treliça Generalizada .....	220
18.4.2.2	Dimensionamento da Armadura de Cisalhamento com o Valor de Redução $Q_D$ ..	222
18.4.2.3	Efeitos da Força Cortante sobre o Banço Tracionado .....	225
18.4.2.4	Verificação das Bielas Comprimidas (Segurança contra a Ruptura das Bielas Comprimidas da Alma) .....	228
18.5	TORÇÃO .....	229
<b>19.</b>	<b>DIMENSIONAMENTO TENDO EM VISTA A CAPACIDADE DE UTILIZAÇÃO .....</b>	<b>233</b>
19.1	LIMITAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES .....	233
19.2	LIMITAÇÃO DA ABERTURA DAS FISSURAS .....	233
19.2.1	Exigências .....	233
19.2.2	Armaduras Mínicas .....	234
19.2.3	Limitação da Abertura das Fissuras Quando a Armadura for Necessária para a Capacidade Resistente .....	238
<b>20.</b>	<b>DEFORMAÇÕES E REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS .....</b>	<b>241</b>
20.1	DEFORMAÇÕES .....	241
20.2	REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS .....	242
<b>21.</b>	<b>DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS .....</b>	<b>245</b>
<b>22.</b>	<b>OBSERVAÇÕES SOBRE A EXECUÇÃO E A FISCALIZAÇÃO DE OBRAS .....</b>	<b>249</b>
<b>23.</b>	<b>PRINCÍPIOS BÁSICOS SOBRE A INFLUÊNCIA DA RETRAÇÃO E DA FLUÊNCIA .....</b>	<b>253</b>

23.1	DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE RETRAÇÃO E DE FLUÊNCIA DE ACORDO COM A DIN 4227, EDIÇÃO DE 1979 .....	253
23.2	DEFORMAÇÕES DO CONCRETO SOB TENSÕES VARIÁVEIS .....	260
23.2.1	Notação .....	260
23.2.2	Formulação Geral do Problema .....	261
23.2.3	O Método do Coeficiente Característico de Envelhecimento de Trost, Zerna e Bažant .....	262
23.2.4	Equação de Dischinger Generalizada de Acordo com Rüşch, Jungwirth e Kupfer .....	264
23.3	CÁLCULO DA PERDA DE TENSÃO EM CABOS COM ADERÊNCIA .....	266
23.3.1	Método do Coeficiente Característico de Envelhecimento .....	266
23.3.2	Método da Equação de Dischinger Generalizada .....	269
23.4	SISTEMAS HIPERESTÁTICOS SIMPLES CONSTITUÍDOS DE CONCRETO E AÇO .....	270
23.4.1	Método do Coeficiente Característico de Envelhecimento .....	270
23.4.2	Método da Equação de Dischinger Generalizada .....	272
23.4.3	Três Exemplos de Emprego dos Valodes $C_{dr}$ , $C_r$ e $C_S$ .....	274
23.4.3.1	Estrutura Hiperestática Homogênea de Concreto .....	274
23.4.3.2	Prisma de Concreto Armado Submetido à Compressão Centrada .....	275
23.4.3.3	Perda de Tensão em um Cabo de Protensão .....	276
23.5	MÉTODO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE FICTÍCIO ! .....	279
23.5.1	Método das Forças .....	279
23.5.2	Método das Deformações .....	280
23.5.3	Ligação de Duas Vigas Pré-Moldadas (Fase de Construção) [27] .....	281
23.6	SEÇÕES COMPOSTAS COM ARMADURAS COM RIGIDEZ À FLEXÃO E À DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL .....	287
23.6.1	Diferentes Tipos de Seções Compostas .....	287
23.6.2	Valores Relativos à Seções Homogeneizadas e Repartição de Esforços de Acordo com o Método das Deformações .....	288
23.6.3	Redistribuição de Esforços Devido à Retração e à Fluência do Concreto em Estruturas Lineares Isostáticas .....	290
23.6.4	Método das Fibras Conjugadas de Busemann [47] .....	293
23.6.4.1	Seção Transversal Homogênea Considerada Concentrada em Dois Pontos .....	293
23.6.4.2	Seção Composta Considerada Concentrada em Dois Pontos .....	296
23.6.5	Método das Forças para Esforços Devidos à Redistribuição .....	298
24.	VERIFICAÇÃO DO ESTADO LIMITE RELATIVO À CAPACIDADE RESISTENTE PELO MÉTODO DA RUPTURA .....	301
24.1	OBSERVAÇÃO PRELIMINAR .....	301
24.2	HIPÓTESES E CONDIÇÕES ADMITIDAS .....	301
24.2.1	Generalidades .....	301
24.2.2	Fundamentos Teóricos do Método da Ruptura .....	302
24.2.3	Capacidade de Rotação .....	304
24.2.4	Deformações e Limitação da Fissuração .....	306
24.2.5	Esforços de Coação .....	306
24.3	UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DA RUPTURA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO PROTENDIDO ..	307
24.3.1	Estruturas Lineares .....	307
24.3.2	Comparação entre a Verificação da Segurança pelos Métodos até Agora Adotados e o Método da Ruptura .....	309
24.3.3	Estruturas Laminares (Lajes) .....	311
	BIBLIOGRAFIA .....	313