

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas.....	xiii
Lista de Símbolos.....	xiv
Resumo	xx
Abstractxxi
INTRODUÇÃO	1
1.1 Dimensionamento e Análise.....	1
1.2 Objetivos.....	5
1.3 Hipóteses Adotadas e Limitações do Presente Trabalho.....	8
2 LEIS CONSTITUTIVAS	11
2.1 Introdução.....	11
2.2 Concreto em Compressão Uniaxial.....	11
2.3 Concreto em Tração Uniaxial.....	21
2.4 Resistência à Tração do Concreto na Flexão Simples.....	26
2.5 Critérios de Resistência do Concreto.....	37
2.6 Leis Constitutivas dos Aços para Armaduras de Concreto	48
2.7 Leis Constitutivas do Concreto na Flexão	58
3 ADERÊNCIA ENTRE O CONCRETO E A ARMADURA. FISSURAÇÃO	62
3.1 Introdução.....	62

3.2 Lei Tensão de Aderência-Deslizamento do MC-90.....	63
3.3 Fissuração do Concreto e Espaçamento Médio das Fissuras	78
3.4 Lei Tensão da Armadura na Fissura Associada à Sua Deformação Média	97

4 O DIAGRAMA MOMENTO-CURVATURA NA FLEXÃO COMPOSTA NORMAL

101

4.1 Introdução.....	101
4.2 O Ponto de Máximo do Diagrama Momento-Curvatura.....	106
4.3 Obtenção do Diagrama Momento-Curvatura.....	114
4.4 Apresentação de Resultados	133
4.5 Pilares no Estado Limite Último.....	158

5 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE ROTAÇÃO PLÁSTICA

171

5.1 Introdução.....	171
5.2 Consideração da Força Cortante e Obtenção da Força do Banzo Tracionado.	177
5.3 Determinação Simplificada da Capacidade de Rotação Plástica.....	182
5.4 Determinação Rigorosa da Capacidade de Rotação Plástica.....	184
5.5 Variação Paramétrica	196
5.6 Comparação entre Resultados Teóricos e Experimentais	206
5.7 Capacidade de Rotação Plástica de Pilar Cintado.....	216
5.8 Considerações Adicionais.....	224
5.9 A Capacidade de Rotação Plástica Segundo Normas	232

6 CONCLUSÃO.....

239

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....

251

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Fig. 1.1 - Classificação das rótulas plásticas, cf. Bachmann (1970)	09
---	----

Capítulo 2

Fig. 2.1 - Leis tensão-deformação do agregado, da pasta de cimento e do concreto, cf. FIP/CEB, Bull. 197 (1990).....	12
Fig. 2.2 - Lei tensão-deformação do concreto em compressão uniaxial, deformação volumétrica e efeito Poisson, cf. McGregor (1997).....	14
Fig. 2.3 - Zona de dano no corpo de prova cilíndrico.....	14
Fig. 2.4 - Amolecimento do corpo de prova de concreto em compressão uniaxial, cf. Sigrist (1995).....	16
Fig. 2.5 - Obtenção da energia de ruptura por unidade de área G_{cF} do concreto em compressão uniaxial, cf. Sigrist (1995).....	18
Fig. 2.6 - Obtenção simplificada do módulo de amolecimento.....	19
Fig. 2.7 - Leis tensão-deformação para concreto em compressão uniaxial, cf. Sigrist (1995)	20
Fig. 2.8 - Leis constitutivas do concreto e modelo da fissura coesiva	22
Fig. 2.9 - Lei $\sigma_c(\Delta l)$ para concreto em tração uniaxial	23
Fig. 2.10 - Leis $\sigma_c(\varepsilon_c)$ e $\sigma_c(w)$ simplificadas	24
Fig. 2.11 - Influência do comprimento do corpo de prova nos ramos descendentes das leis $\sigma_c(\Delta l)$ e $\sigma_c(\varepsilon_c)$, cf. Sigrist (1995)	25
Fig. 2.12 - Valores extremos da resistência do concreto à tração na flexão.....	27
Fig. 2.13 - Dados para o cálculo da resistência do concreto à tração na flexão, cf. Sigrist (1995)	30
Fig. 2.14 - Momento relativo em função da altura relativa da fissura coesiva, cf. Sigrist (1995)	34
Fig. 2.15 - Relação cinemática.....	36

Fig. 2.16 - Critério de Mohr-Coulomb e formas de ruptura.....	39
Fig. 2.17 - Ensaio de compressão simples.....	40
Fig. 2.18 - Ensaio de cisalhamento simples.....	41
Fig. 2.19 - Compressão triaxial, comparação entre resultados experimentais e o critério de Mohr-Coulomb, cf. Menne, apud Sigrist (1995).....	41
Fig. 2.20 - Critério de Mohr-Coulomb em função das tensões principais extremas.	43
Fig. 2.21 - Critério de Mohr-Coulomb no plano ($\sigma/f_c, \tau/f_c$)	45
Fig. 2.22 - Resistência do concreto em estado duplo de tensão, cf. Kupfer, Hilsdorf e Rüschi (1969).....	46
Fig. 2.23 - Modos de ruptura dos espécimes em estado duplo de tensão, idem	47
Fig. 2.24 - Ensaio de tração e tipos de diagramas tensão-deformação dos aços....	50
Fig. 2.25 - Leis tensão-deformação simplificadas	54
Fig. 2.26 - Configuração geométrica das nervuras, cf. NBR 7480/1996	55
Fig. 2.27- Ensaio de tirante armado, cf. NBR 7477/1982, para obtenção do coeficiente de conformação superficial	55
Fig. 2.28- Determinação da deformação média da armadura na fissuração estabilizada.....	57
Fig. 2.29 - Leis constitutivas $\sigma_c(\epsilon_c)$ na flexo-compressão para $f_{ck} / f_{cm} = 20 / 28MPa$, parábola-linear e Grasser.....	61

Capítulo 3

Fig. 3.1 - Tirante com uma fissura, deslizamento entre a armadura e o concreto, deformações nos dois materiais, equilíbrio da barra da armadura.....	64
Fig. 3.2 - Lei tensão de aderência-deslizamento, cf. o MC-90.....	67
Fig. 3.3 - Distribuição das deformações e tensão de aderência no comprimento de transmissão	69
Fig. 3.4 - Ensaio de arrancamento	72
Fig. 3.5 - Ensaio de arrancamento, boa aderência, concreto não-confinado.....	73

Fig. 3.6 - Fissura isolada.....	74
Fig. 3.7 - Fase de formação de fissuras para diferentes diâmetros, $f_{ck} = 35MPa$, boa aderência.....	76
Fig. 3.8 - Ações do estribo na indução da fissuração do concreto.....	79
Fig 3.9 -	80
Fig. 3.10 -	82
Fig. 3.11 - Comparação dos espaçamentos médios das fissuras, cf. o MC-90 e o EC- 2.....	85
Fig. 3.12 - Área efetiva do banzo tracionado nas vigas e nas lajes	88
Fig. 3.13 - Determinação do espaçamento médio das fissuras, cf. Meier, apud Kreller (1989).....	89
Fig. 3.14 - Influência da armadura transversal sobre o espaçamento médio das fissuras, cf. Rizkalla, Hwang e El Shahawi, apud Collins e Mitchell (1987).....	95
Fig. 3.15.-	96
Fig. 3.16 - Lei tensão-deformação média da armadura do banzo tracionado (Indica- se também a lei tensão-deformação da barra nua), cf. o MC-90, item 3.2.3.....	100

Capítulo 4

Fig. 4.1 - Formas de seção e convenção de sinais.....	103
Fig. 4.2 - Distinção entre estrutura isostática e hiperestática.....	104
Fig. 4.3 - Capacidade de carga de estruturas isostática e hiperestática.....	104
Fig. 4.4 - Dados para a determinação do ponto de máximo da curva $M(1/r)$	107
Fig. 4.5.-.....	108
Fig. 4.6 - Discretização das seções de concreto e de aço.....	114
Fig. 4.7.-	115
Fig. 4.8.-.....	121
Fig. 4.9 - Tipos de diagramas momento-curvatura	123

Fig. 4.10 - Passo da curvatura relativa	125
Fig. 4.11 - Comparação dos resultados teóricos e experimentais da relação momento-curvatura média, cf. Ahmad e Shah (1980)	134
Fig. 4.12.....	136
Fig. 4.13 - Comparação entre as curvas momento-curvatura média teórica e experimental, cf. ensaio de Priestley, Park e Lu, apud Collins e Mitchell (1987).....	138
Fig. 4.14 - Determinação da rigidez secante, cf. França (1991).	139
Fig. 4.15 - Dados da seção transversal.....	141
Fig. 4.16 - Diagramas momento-curvatura relativos, seção retangular, flexão simples, armadura simples, CA-50.....	144
Fig. 4.17a- Comparação entre as curvas $M(1/r)$ para força normal relativa igual a $-0,4$	147
Fig. 4.17b- Comparação entre as curvas $M(1/r)$ para força normal relativa igual a $-0,8$	147
Fig. 4.18 - Viga T: Momento-curvatura relativos, seções do vão e do apoio, CA-50, $f_{ck}/f_{cm} = 20/28MPa$	148
Fig. 4.19 - Rigidez de vigas no Estádio II, armadura dupla. (Dados cf. Tabela 4.11)	151
Fig. 4.20 - Comparação das curvas de interação no ELU, flexo-compressão. Leis parábola-retângulo, cf. NBR 6118, 2000, e parábola do segundo grau, com momento último obtido do ponto de máximo do diagrama momento-curvatura. Armadura simétrica, $y_{s1}/h = 0,10$ e $y_{s2}/h = 0,90$. Aço CA-50, $\varepsilon_{su} = 10^0 / 00$	159
Fig. 4.21a – Curvas completas da rigidez relativa equivalente em função da força normal relativa de cálculo, para três taxas mecânicas da armadura total. Dados cf. Tabela 4.14.....	163
Fig. 4.21b - Pilares com fissuração: $M_{cr}(N_d) < M_{du}(N_d)$ e $(EI)_{eq}$ cf. Equação (4.83).....	164
Fig. 4.21c - Pilares sem fissuração: $M_{cr}(N_d) \geq M_{du}(N_d)$ e $(EI)_{eq} = (EI)_1$	164

- Fig. 4.21 - Rigidez equivalente de pilares não esbeltos em flexão composta normal. Seção retangular, armadura simétrica. Dados cf. Tabela 4.14 164
- Fig. 4.22 - Rigidez relativa equivalente para resistências à tração características superior e inferior, $\omega_{tot} = 0,5$. Demais dados cf. Tabela 4.14. 165
- Fig. 4.23 - Comparação da rigidez equivalente, cf. Equação (4.83), e rigidez secante, cf. França, para tensões de pico $f_{ck}/1,27$ e $f_{yk}/1,15$. Seção retangular, armadura simétrica, $A_{s1} = A_{s2} = A_{stot}/2$, $y_{s1}/h = 0,15$ e $y_{s2}/h = 0,85$. Aço CA-50, $f_{ck} = 20MPa$, $f_{ct,d} = 1,26MPa$, $E_{ci} = 10^3 \times (f_{ck}/1,27) = 15,75GPa$, $I_0 = bh^3/12$. Adimensionais: $v_d = N_d/(bhf_{cd})$, $\omega_{tot} = A_{stot}f_{yd}/(bhf_{cd})$ 166

Capítulo 5

- Fig. 5.1 - Viga equivalente na região de apoio de continuidade. 172
- Fig. 5.2 - Deslocamentos relativos das faces da fissura. 176
- Fig. 5.3 - Viga equivalente: geometria, campos de tensão descontínuos, força no banzo tracionado. 178
- Fig. 5.4 - Determinação simplificada da capacidade de rotação plástica 184
- Fig. 5.5 - Dados para o cálculo da rotação plástica 186
- Fig. 5.6 - Curvas $\theta_{pl}(\omega_1)$ obtidas pelos métodos rigoroso e simplificado. Flexão simples, armadura simples, CA-50 191
- Fig. 5.7- Capacidade de rotação plástica cf. método rigoroso, para $\cot v$ função da taxa mecânica da armadura. (Indicam-se também as curvas de $v = 90^\circ$ ou $\cot v = 0$ e $v = 40^\circ$ ou $\cot v = 1,20$) 192
- Fig. 5.8 - Representação qualitativa do ângulo crítico da rótula plástica em função da tensão de cisalhamento em rótulas de flexão e de flexão e força cortante, cf. Bachmann (1967) 194
- Fig. 5.9 - Determinação das taxas mecânicas correspondentes a $0,75\tau_{r1}$ e a τ_{r1} 195
- Fig. 5.10 - Influência da inclinação do campo de compressão na capacidade de rotação plástica 196
- Fig. 5.11 - Influência da deformação limite do concreto na capacidade de rotação plástica.. 198
- Fig. 5.12 - Influência da esbelteza sobre θ_{pl} , altura útil $d = cte$ 198

Fig. 5.13 - Capacidade de rotação plástica em função da esbeltez.....	199
Fig. 5.14 - Influências do espaçamento médio das fissuras e do diâmetro da barra em θ_{pl}	200
Fig. 5.15 - Capacidade de rotação plástica em função de ρ_s , para $f_{ck} = 20$ e $50MPa$	201
Fig. 5.16 - Capacidade de rotação plástica em função de ω_1 , para $f_{ck} = 20$ e $50MPa$	201
Fig. 5.17 - Capacidade de rotação plástica para f_t/f_y variável, ϵ_{su} e f_y ctes	202
Fig. 5.18 - Influência da armadura dupla sobre a capacidade de rotação plástica.	203
Fig. 5.19 - Influência da força normal de compressão na capacidade de rotação plástica, para armadura simétrica.....	204
Fig. 5.20 - Dados dos ensaios de Eligehausen e Fabritius, CEB 218 (1993)	207
Fig. 5.21 - Seção transversal das vigas ensaiadas por Sigrist e Marti (1993) e seção adotada no cálculo.....	209
Fig. 5.22 - Resultados teóricos e experimentais, aço A, ensaios de Bosco e Debernardi, CEB 218 (1993).	215
Fig. 5.23 - Resultados teóricos e experimentais, aço B, ensaios de Bosco e Debernardi, CEB 218 (1993)	215
Fig. 5.24 - Efeito do cintamento em pilar de seção quadrada.....	217
Fig. 5.25- Lei tensão-deformação do concreto confinado, cf. Sheikh e Uzumeri (1982).	219
Fig. 5.26 - Pilar cintado	223
Fig. 5.27 - Capacidade de rotação plástica para o caso de pórtico plano. Exemplo com três fissuras plastificadas.....	225
Fig. 5.28 - Capacidade de rotação plástica em viga equivalente assimétrica.....	226
Fig. 5.29 - Diagrama momento-rotação da viga equivalente.....	229
Fig. 5.30 - Comparação entre as capacidades de rotação plástica do MC-90 e do método rigoroso. Flexão simples, armadura simples, $f_{yk} = 500MPa$ para os três aços	234

Fig. 5.31 - Capacidade de rotação plástica para três classes de concreto e aço CA-50, calculada pelo método rigoroso com resistências $f_{cd} = f_{ck} / 1,2$, $f_{yd} = f_{yk} / 1,15$, $f_{td} = 1,1f_{yd}$ e deformações limites $\varepsilon_{c,lim} = -5^0 / 00$, $\varepsilon_{su} = 50^0 / 00$. Flexão simples, armadura simples, esbeltez $L/d = 6$236

Fig. 5.32 - Capacidade de rotação plástica, $f_{ck} = 20MPa$ e aço CA-50, método rigoroso com resistências $f_{cd} = f_{ck} / 1,2$, $f_{yd} = f_{yk} / 1,15$, $f_{td} = 1,1f_{yd}$ e deformações limites $\varepsilon_{c,lim} = -5^0 / 00$ e $\varepsilon_{su} = 50^0 / 00$, má aderência. Indicam-se as curvas do EC-2 e da equação aproximada proposta. Flexão simples, armadura simples, esbeltez $L/d = 6$ 237

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1-	Obtenção das curvas m para três índices de fragilidade	34
Tabela 2.2-	Comparação entre resistências à tração na flexão, Equações (2.44), (2.35) e MC-90	37
Tabela 2.3-	Classificação dos aços conforme sua ductilidade.....	48
Tabela 2.4-	Determinação da abertura máxima da fissura, conforme ensaio de tirante, NBR 7477/1982.....	57
Tabela 2.5-	Deformação limite do concreto em compressão, Equações (2.75) e (2.83).....	61

Capítulo 3

Tabela 3.1-	Parâmetros para a definição da lei tensão de aderência-deslizamento, cf. o MC-90	68
Tabela 3.2-	Espaçamento médio das fissuras com influência dos estribos	96

Capítulo 4

Tabela 4.1-	Determinação da curva carga-deslocamento $F(\delta)$	104
Tabela 4.2-	Comparação entre o presente cálculo e o obtido com as hipóteses da NBR 6118, 2000, para o ELU Flexão.....	111
Tabela 4.3-	Dados da seção de concreto.....	115
Tabela 4.4-	Resultados teóricos do ensaio da Fig. 4.11	134
Tabela 4.5-	Resultados teóricos para a viga protendida de Priestley, Park e Lu	138
Tabela 4.6-	ELU, comparação entre valores de França e do programa	141
Tabela 4.7-	Comparação entre as rigidezes secantes de França e do programa	143
Tabela 4.8-	Seção retangular, flexão simples, CA-50	145

Tabela 4.9-	Dados referentes à Fig. 4.17.....	146
Tabela 4.10-	Viga T, seções do apoio e do vão.....	149
Tabela 4.11-	Rigidez de vigas no Estádio II, $(EI)_y / (E_{ci} I_0)$. Seção retangular, flexão simples, armaduras simples e dupla. $f_{ck} / f_{cm} = 20/28MPa$, CA-50	151
Tabela 4.12a-	Pilares: Dados para o primeiro segmento do diagrama momento-curvatura. Seção retangular, flexo-compressão normal, armadura simétrica $A_{s1} = A_{s2} = A_{stot} / 2$, CA-50, $f_{ck} / f_{cm} = 20/28MPa$. Adimensionais: $\omega_{tot} = (A_{stot} f_{yk}) / (bh f_{cm})$ e $v = N / (bh f_{cm})$	152
Tabela 4.12b-	Pilares: Dados para o segundo segmento do diagrama momento-curvatura. Seção retangular, flexo-compressão normal, armadura simétrica $A_{s1} = A_{s2} = A_{stot} / 2$, CA-50, $f_{ck} / f_{cm} = 20/28MPa$. Adimensionais: $\omega_{tot} = (A_{stot} f_{yk}) / (bh f_{cm})$ e $v = N / (bh f_{cm})$	153
Tabela 4.13-	Valores de $F(\xi)$ para aço CA-50, $\varepsilon_{sy} = 2,5^0 / 00$, $f_{ck} / f_{cm} = 20/28MPa$, $\varepsilon_{c1} = 2^0 / 00$, seção retangular, armadura simples	156
Tabela 4.14-	Rigidez relativa equivalente, $(EI)_{eq} / (E_{ci} I_0)$, de pilares não esbeltos em flexão composta normal. Seção retangular, armadura simétrica, $A_{s1} = A_{s2} = A_{stot} / 2$, $y_{s1} / h = 0,10$ e $y_{s2} / h = 0,90$. Aço CA-50, $f_{ck} / f_{cm} = 20/28MPa$, $f_{ct,5\%} = 1,47MPa$, $E_{ci} = 28GPa$, $I_0 = bh^3 / 12$, $v_d = N_d / (bh f_{cd})$, $\omega_{tot} = A_{stot} f_{yd} / (bh f_{cd})$. Área sombreada: não há fissuração.....	165

Capítulo 5

Tabela 5.1-	Valores de v_r e de $\tau_{c,M+N} / \tau_{c,M}$ para $f_{ck} = 35MPa$	179
Tabela 5.2-	Resultados do programa para comparação entre os métodos rigoroso e simplificado, má aderência, $\cot v = função(\omega_1)$	192
Tabela 5.3-	Valores de τ_1 / f_c , cf. Bachmann (1967). ($f_c \cong 0,87\beta_w$)	193
Tabela 5.4-	Dados da armadura do apoio central	207
Tabela 5.5-	Resultados teóricos e experimentais (Eligehausen e Fabritius, CEB 218 (1993)).....	208

Tabela 5.6- Dados da armadura e espaçamento médio das fissuras	210
Tabela 5.7- Resultados teóricos para encurtamentos limites iguais a $-8^0 /_{00}$ e $-9,5^0 /_{00}$ (em parênteses).....	211
Tabela 5.8- Resultados teóricos e experimentais (Sigrist e Marti (1993))	211
Tabela 5.9- Dados da armadura.....	212
Tabela 5.10- Resultados experimentais e teóricos, aço A	213
Tabela 5.11- Resultados experimentais e teóricos, aço B	213

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	valor absoluto
CA	concreto armado
CEB	Comitê Europeu do Concreto
CG	centro de gravidade
cte	constante
D/S	deslizamento / separação
EC-2	Eurocódigo 2
ELU	Estado Limite Último
INT	inteiro
LN	linha neutra
MC-90	Código Modelo 90 do CEB
NBR	Norma Brasileira
PDN	ponto de deslizamento nulo
SGN	sinal algébrico

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas Minúsculas

a	comprimento, altura, coeficiente, distância, abscissa
b	largura, coeficiente
c	coeficiente de flexibilidade, coesão, cobrimento, coeficiente
d	altura útil, lado, distância, elemento do vetor de deformação da seção transversal na forma adimensional
e	espessura
f	resistência, área relativa, ruptura
h	altura
j _b	número de segmentos do subelemento
k	coeficiente de rigidez
l	comprimento, vão
m	momento relativo
n	expoente, número de barras longitudinais, número de arcos entre barras longitudinais
p	expoente
q	elemento da matriz de rigidez tangente na forma adimensional, quantil
r	raio de curvatura, ou inverso da curvatura, raio do círculo de Mohr
s	espaçamento, deslizamento
t	tempo
u	deslocamento axial
w	abertura da fissura na boca da fissura coesiva, ou ao nível da primeira camada de armadura
x	abscissa, altura da linha neutra
y	ordenada
z	braço de alavanca, distância, altura da seção resistente à força cortante

Letras Romanas Maiúsculas

A	área, classe de aço, coeficiente, deformação plástica última
B	índice de fragilidade, classe de aço, coeficiente
C	constante, expoente
D	módulo de amolecimento na curva $\sigma(w)$, elemento do vetor de deformação da seção transversal
E	módulo de elasticidade, módulo de amolecimento na curva $\sigma(\varepsilon)$
(EI)	rigidez à flexão
F	força, ação, fator
G	energia por unidade de área
I	momento de inércia
J _E	número de subelementos por lado da viga equivalente
J _F	número de fissuras em cada metade da viga equivalente, mais a fissura central, que delimitam os subelementos onde há plastificação da armadura
K	coeficiente, rigidez à flexão, fator
L	vão
M	momento fletor
N	força normal, expoente
P	probabilidade, força de protensão, carga concentrada
Q	elemento da matriz de rigidez tangente, carga concentrada
R	força interna
S	classe de aço, desvio padrão, elemento do vetor de sollicitação
U	energia por unidade de volume
V	volume, força cortante
W	energia acumulada ou dissipada no sólido
X	eixo

Letras Gregas Minúsculas

α	relação entre tensões principais, deformação relativa, expoente, relação entre módulos de elasticidade, coeficiente, área relativa
β	fator de distância relativa, fator de integração, parâmetro, resistência
γ	coeficiente de ponderação das ações, ou coeficiente de segurança parcial
δ	flecha, coeficiente, deslocamento
ε	deformação
ζ	tensão relativa correspondente à máxima abertura da fissura coesiva, fator de tamanho
η	altura relativa da fissura coesiva, coeficiente de conformação superficial
θ	rotação
λ	coeficiente
μ	coeficiente de atrito, momento relativo
ν	coeficiente de Poisson, força normal relativa
ξ	comprimento relativo da barra da armadura referente à zona de dano, profundidade relativa da linha neutra
ρ	taxa geométrica da armadura, curvatura relativa
σ	tensão normal
τ	tensão tangencial de força cortante ou de aderência
υ	coeficiente de efetividade, ângulo de inclinação do campo de compressão (υ) ou da fissura (υ_r) da alma em relação ao eixo longitudinal da peça
ϕ	diâmetro, ângulo de atrito interno
ψ	fator do coeficiente de ponderação das ações, relação entre os momentos de fissuração e resistente último de cálculo
ω	taxa mecânica da armadura

Letras Gregas Maiúsculas

Δ	acréscimo, variação, deslocamento
Σ	somatório

Índices Romanos Minúsculos

ax	axial
b	aderência
bal	referente a estados limites de deformação com duas deformações conhecidas
c	concreto, compressão
cc	concreto confinado
d	dano, cálculo, direita
e	elástico, esquerda
ef	efetivo
eq	equivalente
estr	estribo
exp	experimental
f	ruptura
fl	flexão
i	inicial, i-ésima camada, caso de carga
inf	inferior
j_b	número de segmentos do subelemento no banzo tracionado
j_1	número do subelemento
j_2	ponto da barra da armadura dentro do subelemento
j_c	número de camadas de concreto
j_s	número de camadas de armadura
k	característico
l	longitudinal
lim	limite
m	médio

max	máximo
min	mínimo
origem	referente à origem do diagrama momento-curvatura
p	protensão, plástico
pl	plástico
r	fissuração, fissura
s	aço, armadura, secante
sh	encruamento da deformação
sp	separação
sup	superior
t	transversal, tração, transmissão, tangente
teor	teórico, teoria
test	teste, experimental
tot	total
u	último
w	alma, cúbico
y	escoamento do aço
z _f	número da fissura

Índices Romanos Maiúsculos

A	apoio
B	zona B
D	dano, amolecimento, zona D
E	subelemento de concreto (trecho da barra entre duas fissuras sucessivas)
I	referente à região do corpo de prova fora da zona de localização de deformação, estádio, direção principal
II	referente à região de localização de deformação do corpo de prova, estádio, direção principal
LN	linha neutra
M	máquina ou aparato de ensaio, momento fletor

M+N-	flexo-compressão normal
R	nervura da barra da armadura
V	volume, cisalhamento

Índices Gregos Minúsculos

ε_{c1}	referente ao momento e à curvatura correspondentes à deformação ε_{c1} , na borda mais comprimida da seção, associada à tensão de pico na curva tensão-deformação do concreto
σ_c	referente à tensão do concreto
σ_s	referente à tensão na armadura

Índices Numéricos

0	centro de gravidade
02	referente, no diagrama momento-curvatura, à curvatura resultante da interseção da reta de inclinação 1: $(EI)_2$ com o eixo da curvatura
0-0	eixo passante pelo centro de gravidade
1,2,3	direções principais
5%, 95%	quantis

BUCHAIM, Roberto. A influência da não-linearidade física do concreto armado na rigidez à flexão e na capacidade de rotação plástica. 2001. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo

RESUMO

O presente trabalho é uma contribuição para o esclarecimento e a quantificação das influências na deformabilidade e na capacidade portante de elementos unidimensionais de concreto armado em solitação plana, decorrentes da não-linearidade física dos materiais concreto e aço, bem como da fissuração e do enrijecimento da armadura tracionada, também na sua fase plástica. Para aplicações práticas determinam-se a rigidez à flexão e a capacidade de rotação plástica dos elementos estruturais, o que permite limitar com mais precisão e coerência a demanda de rotação plástica obtida na análise. De início, descrevem-se os comportamentos não-lineares do concreto e do aço, aplicando-se conceitos da Mecânica da Fratura, bem como a atuação conjunta destes materiais, sob os aspectos de aderência e de fissuração. O núcleo deste trabalho concentra-se na obtenção do diagrama momento-curvatura e dos seus pontos principais, e na subsequente determinação da capacidade de rotação plástica dos mencionados elementos. Consideram-se as seções geradas a partir da seção duplo T assimétrico, com várias camadas de armadura, sujeitas à flexão composta normal. Com dados deste diagrama e através do modelo da viga equivalente simétrica, posteriormente estendido à viga equivalente assimétrica e às vigas contínuas de pórticos planos, determina-se a capacidade de rotação plástica, considerando-se nesta suas múltiplas influências. Por fim, comparam-se os resultados teóricos e experimentais da capacidade de rotação plástica, e resumem-se as principais conclusões encontradas e os pontos que exigem subsequente desenvolvimento.

ABSTRACT

The present study is a contribution to the enlightenment and evaluation of the influences on deformability and load carrying capacity of one-dimensional elements of reinforced concrete subject to in-plane loading, arisen from the constitutive non-linearity of concrete and steel, as well as from the concrete cracking and the tension stiffening of the reinforcement, prior and after yielding. For practical applications, the flexural rigidity and the plastic rotation capacity of structural elements are determined, which makes it possible to limit, more precisely and coherently, the plastic rotation demand coming from the analysis. Firstly, the non-linear behaviors of concrete and steel are described, applying concepts of Fracture Mechanics, and then the joint action of both materials concerning bond and cracking is studied. The core of this study lies on obtaining the bending moment-curvature diagram, specially its main points, and on the subsequent determination of the plastic rotation capacity of the aforementioned elements. The cross-sections generated from an asymmetric double T cross-section are considered, with several layers of reinforcement, acted upon simple or combined bending about one principal axis. With data based on this diagram and through the model of equivalent symmetric beam, later extended to equivalent asymmetric beam and to continuous beams of plane frames, the plastic rotation capacity is determined, considering its multiple influences. Finally, theoretical and experimental results of plastic rotation capacity are compared, and the main conclusions and points in need of subsequent development are summarized.