



UNIC

**Centro de Investigação em
Estruturas e Construção da UNL**

**COMPORTAMENTO DE COLUNAS DE BETÃO ARMADO DE
SECÇÃO CIRCULAR REFORÇADAS COM COMPÓSITOS DE
FRP E ENSAIADAS À COMPRESSÃO AXIAL MONOTÓNICA
OU CÍCLICA**

Carlos Chastre Rodrigues

Índice

Lista de figuras	iii
Lista de tabelas	vii
Lista de símbolos	ix
1 Introdução	1
2 Apresentação dos Modelos	3
2.1 Concepção e Geometria	3
2.2 Parâmetros analisados	3
2.2.1 Geometria (diâmetro)	5
2.2.2 Tipo de coluna	5
2.2.3 Nível de cintagem	6
2.2.4 Tipo de confinamento exterior com FRP	6
2.2.5 Número de camadas de FRP	7
2.2.6 Tipo de carregamento axial	7
2.3 Pormenorização de Armaduras	8
3 Preparação dos Modelos	9
3.1 Preparação das armaduras, betonagem e cura do betão	9
3.2 Rectificação dos topos das colunas	10
3.3 Preparação da superfície do betão	11
3.4 Aplicação do FRP	11
3.4.1 Aplicação do CFRP - <i>Replark</i> ou <i>MBrace</i>	11
3.4.2 Aplicação do GFRP - <i>Tyfo</i>	12
4 Sistema de Ensaio e Instrumentação	13
4.1 Equipamento de ensaio e de aquisição de dados	13
4.2 Instrumentação	14
4.3 Procedimento de ensaio	19
4.3.1 Modelos sujeitos a cargas monotónicas	19
4.3.2 Modelos sujeitos a cargas cíclicas	19
4.3.3 Critério de Rotura	20

5	Apresentação e Análise dos Resultados	21
5.1	Modelos de betão simples com 150mm de diâmetro	22
5.1.1	Modelos de betão simples não reforçados com FRP	22
5.1.2	Modelos de betão simples reforçados com CFRP	24
5.1.3	Modelos de betão simples reforçados com GFRP	26
5.1.4	Comparação entre os modelos de betão simples reforçados com FRP	28
5.2	Modelos de betão armado com 150 mm de diâmetro	29
5.2.1	Modelos de betão armado não reforçados com FRP	29
5.2.2	Modelos de betão armado reforçados com CFRP	34
5.2.3	Modelos de betão armado reforçados com GFRP	39
5.2.4	Comparação entre os modelos de betão armado reforçados com FRP	41
5.3	Comparação entre os modelos de betão simples e de betão armado com 150 mm de diâmetro	42
5.4	Modelos de betão armado com 150 mm de diâmetro realizados na UNL	46
5.5	Modelos de betão simples com 250 mm de diâmetro	48
5.5.1	Modelos de betão simples não reforçados com FRP	50
5.5.2	Modelos de betão simples reforçados com CFRP	50
5.5.3	Modelos de betão simples reforçados com GFRP	53
5.5.4	Comparação entre os modelos de betão simples reforçados com FRP	55
5.6	Modelos de betão armado com 250 mm de diâmetro	57
5.6.1	Modelos de betão armado não reforçados com FRP	57
5.6.2	Modelos de betão armado reforçados com CFRP	58
5.6.3	Modelos de betão armado reforçados com GFRP	66
5.6.4	Comparação entre os modelos de betão armado reforçados com FRP	71
5.7	Comparação entre os modelos de betão simples e de betão armado com 250 mm de diâmetro	74
5.8	Dilatância e deformações axial, lateral e volumétrica	76
6	Análise global dos resultados	81
6.0.1	Geometria (diâmetro 150 vs 250)	81
6.1	Tipo de coluna (betão simples versus betão armado)	81
6.2	Nível de cintagem	83
6.3	Tipo de confinamento com FRP	83
6.4	Número de camadas de FRP	84
6.5	Tipo de carregamento axial	84
	Referências Bibliográficas	85

Lista de Figuras

2.1	Afastamento das cintas nos modelos com 150 ou 250 mm de diâmetro	6
2.2	Pormenorização das camadas de FRP nos diversos modelos	7
2.3	Pormenorização das armaduras das colunas	8
3.1	Colocação das armaduras nos moldes e betonagem	10
4.1	Vista panorâmica dos sistemas de ensaio utilizados	13
4.2	Pormenor da colocação dos transdutores de deslocamentos	14
4.3	Aspecto geral dos extensómetros colocados nos modelos	15
4.4	Localização dos extensómetros nos modelos com 150 mm de diâmetro	15
4.5	Localização dos extensómetros nos modelos com 250 mm de diâmetro	16
4.6	Pormenor dos extensómetros colocados nas cintas e no betão	17
4.7	Pormenor dos extensómetros colocados em GFRP (<i>Tyfo</i>)	17
4.8	Pormenor dos extensómetros colocados em CFRP (<i>Replark</i>)	17
4.9	Pormenor dos extensómetros colocados em CFRP (<i>MBrace</i>)	18
4.10	Extensómetros verticais colocados nos modelos de betão e com CFRP	18
4.11	História de deslocamentos a que os modelos foram sujeitos	19
5.1	Diagrama tensão-deformação axial dos modelos C1 e C3	23
5.2	Aspecto da rotura dos modelos de betão simples	23
5.3	Diagramas tensão-deformação dos modelos C1, C3, C4, C5, C6 e C28	25
5.4	Aspecto da rotura dos modelos de betão simples com 2 ou 3 CFRP . .	25
5.5	Diagramas tensão-deformação dos modelos C1, C3, C4, C5, C6 e C26	26
5.6	Diagramas tensão-deformação dos modelos C1, C3, C21, C22, C23 e C27	27
5.7	Aspecto da rotura dos modelos de betão simples com 2 ou 3 GFRP . .	27
5.8	Diagramas tensão-deformação dos modelos C1, C3, C6, C22, C28 e C45	29
5.9	Diagramas tensão-deformação dos modelos C7, C8 e C9 ($\emptyset 3//0.10$) . .	30
5.10	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado ($\emptyset 3//0.10$)	30
5.11	Diagramas tensão-deformação dos modelos C13 e C14 ($\emptyset 3//0.15$) . .	31
5.12	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado com cintas de $\emptyset 3//0.15$ (C13 e C14) e $\emptyset 3//0.05$ (C17 e C18)	31
5.13	Diagramas tensão-deformação dos modelos C17 e C18 ($\emptyset 3//0.05$) . .	32
5.14	Pormenor da rotura de uma cinta do modelo C18	32

5.15	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples e de betão armado com diversos afastamentos das cintas	33
5.16	Pormenores da rotura dos modelos de betão armado	33
5.17	Diagramas tensão-deformação dos modelos C10, C11, C12 ($\emptyset 3//0.10$) com 2CFRP	35
5.18	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado ($\emptyset 3//0.10$) com 2 CFRP	35
5.19	Diagramas tensão-deformação dos modelos C15 e C16 ($\emptyset 3//0.15$) com 2 CFRP	36
5.20	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado ($\emptyset 3//0.15$) com 2 CFRP	36
5.21	Diagramas tensão-deformação dos modelos C19 e C20 ($\emptyset 3//0.05$) com 2 CFRP	37
5.22	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado com cintas $\emptyset 3//0.05$ reforçados ou não com 2 CFRP	37
5.23	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com diferentes afastamentos das cintas, reforçados com 2 CFRP e sujeitos a cargas monotónicas	38
5.24	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com diferentes afastamentos das cintas, reforçados com 2 CFRP e sujeitos a cargas cíclicas	39
5.25	Diagramas tensão-deformação dos modelos C24 e C25 com cintas de $\emptyset 3//0.10$ reforçados com 3 GFRP	40
5.26	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado com cintas $\emptyset 3//0.10$ reforçados com 3 GFRP	40
5.27	Pormenores do encamisamento e da rotura do modelo C25	41
5.28	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com CFRP ou GFRP e sujeitos a cargas monotónicas . . .	42
5.29	Diagramas tensão-deformação de modelos de betão simples ou armado reforçados com 2 CFRP e sujeitos a cargas monotónicas	43
5.30	Diagramas tensão-deformação de modelos de betão simples ou armado reforçados com 2 ou 3 GFRP e sujeitos a cargas monotónicas	43
5.31	Diagramas tensão-deformação de modelos de betão simples ou armado reforçados com 2 CFRP e sujeitos a cargas cíclicas	45
5.32	Diagramas tensão-deformação de modelos de betão simples ou armado reforçados com 3 GFRP e sujeitos a cargas cíclicas	45
5.33	Diagrama tensão-deformação axial dos modelos realizados na UNL .	46
5.34	Diagrama tensão-deformação axial dos modelos de betão simples sujeitos a cargas monotónicas (C29) ou cíclicas (C35)	49
5.35	Aspecto da rotura dos modelos de betão simples	49
5.36	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples com 2 CFRP, sujeitos a cargas monotónicas (C33) ou cíclicas (C39)	51
5.37	Aspecto da rotura por descolamento interlaminar do CFRP	51
5.38	Modo de rotura e andamento das extensões laterais dos modelos C33 e C39	52

5.39	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples com 2 GFRP, sujeitos a cargas monotónicas (C31) ou cíclicas (C37)	53
5.40	Modo de rotura e andamento das extensões laterais dos modelos C31 e C37	54
5.41	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples reforçados com CFRP ou GFRP e sujeitos a cargas monotónicas . . .	56
5.42	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples reforçados com CFRP ou GFRP e sujeitos a cargas cíclicas	56
5.43	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado sujeitos a cargas monotónicas (C30) ou cíclicas (C36)	57
5.44	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado e andamento em altura das extensões laterais do modelo C36	58
5.45	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com 1 CFRP, sujeitos a cargas monotónicas (C41) ou cíclicas (C42)	59
5.46	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado reforçados com 1 CFRP (C41 e C42) e respectivo andamento das extensões laterais . . .	60
5.47	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com 2 CFRP sujeitos a cargas monotónicas (C34) ou cíclicas (C40)	61
5.48	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado reforçados com 2 CFRP (C34 e C40) e respectivo andamento das extensões laterais . . .	63
5.49	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com 1 CFRP (C42) ou 2 CFRP (C40) e sujeitos a cargas cíclicas	64
5.50	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado sujeitos a cargas monotónicas e reforçados com 1, 2, 3 ou 4 CFRP	65
5.51	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado reforçados com 1, 2, 3 ou 4 CFRP	65
5.52	Pormenor da abertura da cinta no modelo C43	66
5.53	Andamento em altura da extensão lateral do modelo C41 (1 CFRP) . .	67
5.54	Andamento em altura da extensão lateral do modelo C34 (2 CFRP) . .	68
5.55	Andamento em altura da extensão lateral do modelo C43 (3 CFRP) . .	69
5.56	Andamento em altura da extensão lateral do modelo C44 (4 CFRP) . .	70
5.57	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com 2 GFRP sujeitos a cargas monotónicas (C32) ou cíclicas (C38)	71
5.58	Aspecto da rotura dos modelos de betão armado reforçados com 2 GFRP (C32 e C38) e respectivo andamento das extensões laterais . . .	72
5.59	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com 2 CFRP ou GFRP e sujeitos a cargas monotónica	73
5.60	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com 2 CFRP ou 2 GFRP e sujeitos a cargas cíclicas	73
5.61	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples ou armado sujeitos a cargas monotónicas (C29 e C30) ou cíclicas (C35 e C36)	74
5.62	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples ou armado reforçados com CFRP	75

5.63	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples ou armado reforçados com GFRP	75
5.64	Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples ou armado reforçados com CFRP ou GFRP	76
5.65	Diagramas tensão-deformação volumétrica e tensão-dilatância dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44	77
5.66	Diagramas extensão lateral-extensão axial dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44	78
5.67	Diagramas extensão volumétrica-extensão axial ou lateral dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44	79
5.68	Diagramas dilatância-extensão volumétrica dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44	79
5.69	Diagramas dilatância-extensão axial ou lateral dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44	80

Lista de Tabelas

2.1	Características dos modelos ensaiados	4
6.1	Resumo dos ensaios das colunas à compressão axial	82

Lista de Símbolos

Siglas

ACI	- American Concrete Institute
CFRP	- polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de carbono (do inglês Carbon Fiber Reinforced Polymers)
ECCS	- European Convention for Constructional Steelwork
ELSA	- European Laboratory of Structural Analysis
EMPA	- Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research
FEMA	- Agência Federal de Gestão de Emergências (do inglês Federal Emergency Management Agency)
FEUP	- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FIB	- Fédération Internationale du Béton
FRP	- família dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras contínuas (do inglês Fiber Reinforced Polymers)
GFRP	- polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de vidro (do inglês Glass Fiber Reinforced Polymers)
IST	- Instituto Superior Técnico
INEGI	- Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
JSCE	- Japan Society of Civil Engineers
LNEC	- Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT	- transdutor de deslocamentos (do inglês Linear Voltage Displacement Transformer)
NCHRP	- National Cooperative Highway Research Program
REBAP	- Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado
RSA	- Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes
SIA	- Société Suisse de Ingénieurs et des Architectes
UC	- Universidade de Coimbra
UNL	- Universidade Nova de Lisboa
UM	- Universidade do Minho

Notações Escalares Latinas

A_c	- área da secção de betão
A_{conf}	- área da secção transversal do sistema de confinamento
A_e	- área da secção de betão efectivamente confinado
A_f	- área da secção transversal do FRP
A_g	- área total da secção de betão
A_s	- área da armadura ordinária
A_{sl}	- área total de armaduras longitudinais
A_{sw}	- área da armadura transversal
B	- largura da secção de betão
D	- diâmetro ou largura da secção de betão
E	- módulo de elasticidade
E_c	- módulo de elasticidade tangente do betão
E_{cm}	- valor médio do módulo de elasticidade do betão
E_f	- módulo de elasticidade à tracção do FRP
E_{fib}	- módulo de elasticidade à tracção das fibras
E_{fm}	- valor médio do módulo de elasticidade do FRP
E_j	- módulo de elasticidade à tracção do colete de FRP
E_m	- módulo de elasticidade à tracção da matriz
E_r	- módulo de elasticidade à tracção da resina
E_s	- módulo de elasticidade do aço
E_{sec}	- módulo de elasticidade secante do betão
F	- força horizontal
F_m	- valor médio da força
F_y	- força horizontal na cedência
K_0	- rigidez inicial
K_e	- coeficiente de eficácia do confinamento
K_{eff}	- rigidez efectiva
L	- altura total do pilar
L_t	- altura total do pilar incluindo troço da rótula plástica que entra na fundação
M	- momento
M_u	- momento na secção crítica
M_y	- momento de cedência
M_n	- momento nominal de cedência
N	- esforço normal
RDI	- índice de deformação residual
V_{conf}	- volume do sistema de confinamento
V_{fib}	- fracção volumétrica de fibras
V_r	- fracção volumétrica da matriz
V_o	- volume do núcleo de betão confinado
W_{acum}	- energia dissipada acumulada por ciclo
W_d	- energia dissipada em cada ciclo ou amortecimento histerético
W_s	- energia de deformação elástica

c	- coesão
d	- diâmetro do núcleo de betão confinado, medido em relação à linha média do sistema de confinamento
d_0	- deslocamento de referência
d_{be}	- diâmetro da armadura longitudinal
d_s	- diâmetro do núcleo de betão confinado, medido em relação ao eixo das armaduras transversais
f_c	- tensão de compressão do betão
f_{cc}	- tensão máxima de compressão do betão confinado
f_{cd}	- valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
f_{conf}	- tensão de tracção do sistema de confinamento
$f_{c,cub}$	- tensão de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos
f_{ck}	- tensão característica de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos
f_{cm}	- valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos
$f_{cm,cub}$	- valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos
$f_{cm,t}$	- valor médio da tensão de rotura à compressão do betão aos t dias
$f_{ct,fl}$	- valor médio da tensão de rotura à tracção por flexão do betão
f_{ctk}	- valor característico da tensão de rotura à tracção do betão
f_{ctm}	- valor médio da tensão de rotura à tracção do betão
f_{e0}	- tensão máxima de compressão do betão não confinado
f_f, f_{fu}	- tensão de rotura à tracção do FRP
f_{fib}	- tensão de rotura à tracção das fibras
f_{fm}	- valor médio da tensão de rotura do FRP
f_{fu}	- tensão de rotura à tracção do FRP
f_j	- tensão de tracção do colete de FRP
f_l	- tensão lateral de confinamento
$f_{l,ef}$	- tensão lateral efectiva de confinamento
$f_{l,eq}$	- tensão lateral equivalente de confinamento
f_m	- tensão de rotura à tracção da matriz
f_{pc}	- tensão de rotura à compressão do betão polimérico
f_{pct}	- tensão de rotura à tracção do betão polimérico
f_{pctm}	- valor médio da tensão de rotura à tracção do betão polimérico
f_r	- tensão de rotura à tracção da resina
f_{su}	- tensão de rotura do aço
f_{sum}	- valor médio da tensão de rotura do aço
f_{sy}	- tensão de cedência do aço
f_{syd}	- valor de cálculo da tensão de cedência do aço
f_{sym}	- valor médio da tensão de cedência do aço
f_t	- tensão máxima no aço
f_y	- tensão de cedência do aço
$f_{0,2m}$	- valor médio da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%

h	- altura da coluna
k_e	- coeficiente de eficácia do confinamento
l_p	- comprimento da rótula plástica
n_K	- rigidez efectiva normalizada
n_{sl}	- número de varões longitudinais
s	- espaçamento das armaduras transversais
s'	- espaçamento livre das armaduras transversais
t	- espessura, tempo
t_{fib}	- espessura das fibras (manta, tecido, etc.)
t_{FRP}	- espessura do FRP
t_j	- espessura do colete de FRP

Notações Escalares Gregas

α	- coeficiente de eficácia do confinamento
γ	- peso volúmico do betão
γ_c	- coeficiente de segurança do betão
γ_s	- coeficiente de segurança do aço
δ	- deslocamento, deslocamento horizontal
δ_f	- deslocamento do FRP
δ_R	- deslocamento da resina
δ_r	- deformação lateral permanente
δ_t	- deslocamento total
δ'_y	- deslocamento no início da cedência
ε	- extensão
ε_{AN}	- extensão no aço, lado Norte
ε_{AS}	- extensão no aço, lado Sul
ε_{BN}	- extensão no betão, lado Norte
ε_{BS}	- extensão no betão, lado Sul
ε_c	- extensão axial de compressão do betão
ε_{cc}	- extensão axial do betão correspondente à tensão máxima de compressão do betão confinado (f_{cc})
$\varepsilon_{c0}, \varepsilon_{c1}$	- extensão axial do betão correspondente à tensão máxima de compressão do betão não confinado f_{c0}, f_{cm}
ε_{fm}	- valor médio da extensão de rotura à tracção do FRP
ε_{fu}	- extensão de rotura à tracção do FRP
ε_j	- extensão de tracção do colete de FRP
ε_l	- extensão lateral de confinamento
ε_{mx}	- extensão máxima
ε_{md}	- extensão média

ε_{pc}	- extensão de rotura do betão polimérico
ε_r	- extensão de rotura da resina
ε_{rm}	- valor médio da extensão de rotura da resina
ε_{sh}	- extensão de endurecimento do aço
ε_{sr}	- extensão do aço na rotura
ε_{srm}	- valor médio da extensão do aço na rotura
ε_{su}	- extensão total no aço para a força máxima
ε_v	- extensão volumétrica
ε_y	- extensão de cedência no aço
θ	- ângulo entre a orientação principal das fibras e o eixo longitudinal do elemento estrutural
θ_p	- rotação plástica
μ_φ	- coeficiente de ductilidade em curvatura
μ_Δ	- coeficiente de ductilidade em deslocamento
$\mu_{d,rot}$	- deslocamento normalizado na rotura
$\mu_{d,Fmax}$	- deslocamento normalizado para a força máxima
$\mu_{F,rot}$	- força normalizada na rotura
$\mu_{F,max}$	- força normalizada para a força máxima
ν	- esforço normal reduzido
ξ_{eq}	- taxa de amortecimento viscoso equivalente
ρ_{conf}	- relação volumétrica do confinamento
ρ_f	- relação volumétrica do FRP de confinamento
ρ_{sc}	- percentagem de armaduras longitudinais em relação à área da secção de betão confinado
ρ_s	- percentagem de armaduras longitudinais em relação à área total da secção de betão
ρ_{sw}	- relação volumétrica de armaduras transversais
σ	- tensão
σ_c	- tensão de compressão no betão
σ_l	- tensão lateral efectiva (de confinamento)
σ_s	- tensão de tracção na armadura
τ	- tensão de aderência
ϕ	- ângulo de atrito interno do material
\emptyset	- diâmetro da armadura
φ	- curvatura
φ_{lp}	- curvatura no topo da rótula plástica
φ_u	- curvatura na secção crítica
φ_y	- curvatura de cedência
ω_j	- percentagem mecânica volumétrica do colete de FRP
ω_w	- percentagem mecânica volumétrica de armaduras transversais

Capítulo 1

Introdução

O confinamento de pilares com coletes de FRP aumenta consideravelmente a sua resistência e ductilidade, uma vez que impede a deformação transversal até valores muito superiores aos da deformação transversal sem FRP e conseqüentemente a encurvadura da armadura longitudinal. Este comportamento sintetiza as principais vantagens do confinamento de pilares de betão armado e necessita ser integrado nos modelos de cálculo [13], objectivo para o qual se pretendeu contribuir com uma campanha de ensaios que abrangeu quarenta e cinco colunas.

Por forma a observar e quantificar o comportamento dos diferentes modelos sujeitos a compressão axial monotónica ou cíclica foi inicialmente concebida uma primeira série de vinte e nove modelos com 750 mm de altura e 150 mm de diâmetro que começaram a ser ensaiados no Verão de 1999 no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Estes modelos eram constituídos por betão simples ou armado, com diferentes espaçamentos de armaduras transversais, encamisados com coletes de compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono (CFRP) ou de vidro (GFRP).

Uma segunda série de ensaios com dezasseis modelos foi realizada em 2003 no LNEC e na UNL na sequência e em conformidade com os ensaios dos pilares ensaiados sob acções horizontais cíclicas. Foram utilizados o mesmo diâmetro (250 mm) e os mesmos materiais, o que permitiu complementar a informação recolhida na primeira série de ensaios e, além disso, estudar a secção do pilar quando sujeita apenas a compressão axial.

Capítulo 2

Apresentação dos Modelos

2.1 Concepção e Geometria

Na concepção dos modelos a ensaiar tiveram-se em atenção as várias condicionantes existentes, quer em termos de equipamento, de materiais ou de meios humanos. Pretendeu-se que os modelos se realizassem a uma escala razoável, que se adaptassem ao equipamento de laboratório disponível e que se mantivesse o mesmo tipo de modelo independentemente do tipo de acção, o que corresponde a fixar alguns parâmetros para, desta forma, poder variar outros.

Produziram-se quarenta e cinco modelos com 750 mm de altura, vinte e seis de betão armado e dezanove de betão simples, descritos na Tabela 2.1. Dos quarenta e cinco modelos, trinta e um foram encamisados com FRP e catorze correspondem a provetes de referência que não foram encamisados. Dos provetes encamisados, vinte foram encamisados com CFRP e onze com GFRP. No total dos quarenta e cinco modelos, vinte e nove têm 150 mm de diâmetro, enquanto os restantes dezasseis têm 250 mm de diâmetro.

2.2 Parâmetros analisados

Estudou-se a influência de diversos parâmetros no comportamento de colunas reforçadas, tal como a geometria da coluna (variação do diâmetro), o tipo de coluna (betão simples ou armado), o nível de cintagem das colunas de betão armado, o tipo de confinamento exterior com FRP (dois tipos de CFRP e um de GFRP), o número de camadas de FRP (1 a 4 CFRP; 2 e 3 GFRP) e o tipo de carregamento axial (monotónico ou cíclico).

No sentido de poder comparar os resultados obtidos, consideraram-se como referência os provetes não reforçados com FRP e de características idênticas, geométricas ou de armadura, em betão simples ou armado e fixaram-se os seguintes parâmetros: tipo de secção (colunas circulares); altura da coluna (750mm); tipo de betão (uma amassadura para colunas de $\varnothing 150$ e outra para as de $\varnothing 250$) e o tipo de armadura (A400).

Modelo	Ø (mm)	Tipo de Coluna	Cintas	Confinamento Exterior	Tipo de Carregamento
c1	150	Betão simples	-	sem FRP	monotónico
c2					
c3					
c4					
c5				2 CFRP	monotónico
c6					
c26				3 CFRP	monotónico
c28					
c45				2 GFRP	monotónico
c21					
c22				3 GFRP	monotónico
c23					
c27				3 GFRP	cíclico
c7					
c8	Betão armado arm. vert.: 6Ø6	Ø3//0,10	sem FRP	monotónico	
c9					
c13					
c14		Ø3//0,15	sem FRP	monotónico	
c17					
c18		Ø3//0,05	sem FRP	monotónico	
c10					
c11		Ø3//0,10	2 CFRP	monotónico	
c12					
c15		Ø3//0,15	2 CFRP	monotónico	
c16					
c19		Ø3//0,05	2 CFRP	monotónico	
c20					
c24		Ø3//0,10	3 GFRP	monotónico	
c25					
c29	250	Betão simples	-	sem FRP	monotónico
c35					
c31				2 GFRP	monotónico
c37					
c33				2 CFRP	monotónico
c39					
c30		Betão armado arm. vert.: 6Ø12	Ø6//0,15	sem FRP	monotónico
c36					
c32				2 GFRP	monotónico
c38					
c41				1 CFRP	monotónico
c42					
c34				2 CFRP	monotónico
c40					
c43	3 CFRP	monotónico			
c44					
				4 CFRP	monotónico

Tabela 2.1: Características dos modelos ensaiados

Apresentam-se em seguida os parâmetros analisados:

2.2.1 Geometria (diâmetro)

Atendendo ao conjunto de variáveis em questão optou-se no âmbito deste estudo por fixar o tipo de secção em análise - colunas circulares - sendo o tema das colunas de secção quadrada objecto de um outro estudo desenvolvido na UNL [11, 12]. Consideraram-se dois tipos de secção circular de diferentes diâmetros: 150 mm (vinte e nove modelos) e 250 mm de diâmetro (dezasseis modelos). A altura das colunas foi fixada em 750mm.

Optou-se na primeira série por modelos com 150 mm de diâmetro, dado que os primeiros ensaios conhecidos [5, 6, 8, 10, 14] se realizaram com esta dimensão. Desta forma é possível comparar os resultados e também aquilatar da validade de algumas expressões existentes [15, 17] calibradas essencialmente com resultados de provetes de 150 mm de betão simples e 300 mm de altura, encamisados com FRP.

Os modelos com 150 mm de diâmetro e 750 mm de altura (h) apresentam uma relação $\lambda = h/D = 5$ que corresponde a um valor geralmente considerado aceitável e evita, desta forma, as críticas endereçáveis a trabalhos com menores valores de λ [3, 5, 6, 10]. São também conhecidos estudos feitos com provetes de pequeno diâmetro (D) que, face a essa dimensão, suscitam dúvidas quanto à sua aplicabilidade a protótipos. De facto, os incrementos de resistência e ductilidade não são extrapoláveis para peças de dimensões reais, visto que uma única camada de compósito nesses provetes confere ao colete uma rigidez relativa muito alta. A rigidez do colete é crucial porque (i) coletes flexíveis geram baixa tensão de confinamento e (ii) coletes muito rígidos conduzem a roturas frágeis sem deformação prévia observável [16]. As dimensões adoptadas reflectem um compromisso que responde parcialmente a esse problema.

Na segunda série de ensaios pretendeu-se um diâmetro idêntico ao dos pilares ensaiados à flexão composta com cargas horizontais alternadas, o que implicou um diâmetro de 250 mm. Manteve-se, por razões logísticas, a altura de 750 mm das colunas desta série em relação à primeira, resultando uma relação $\lambda = h/D = 3$.

2.2.2 Tipo de coluna

Foram preparadas dezanove colunas em betão simples e vinte e seis em betão armado. Os modelos de betão armado com 150 mm de diâmetro tinham como armadura vertical 6Ø6, enquanto os modelos de 250 mm de diâmetro tinham 6Ø12. Esta densidade de armadura corresponde a 1% no caso dos 6Ø6 e a cerca de 1,4% no caso dos 6Ø12.

A percentagem de armadura considerada encontra-se dentro dos limites razoáveis do intervalo de 1 a 2% em ambas as séries. Com a escolha de 6Ø6 na primeira série pretendeu-se estar no limite inferior deste intervalo, assumindo como princípio que o reforço se destina a elementos pouco armados. Contudo, após a realização da primeira série de ensaios constatou-se que a diferença em termos de tensão de rotura entre os modelos com e sem armaduras não foi significativa, razão pela qual se optou

na segunda série por utilizar 6Ø12 nos modelos com 250 mm de diâmetro, o que representa aproximadamente uma percentagem de armadura de 1,4%.

O betão utilizado na primeira série de ensaios corresponde a uma única amassadura, o mesmo acontecendo com os modelos da segunda série. No entanto, como os modelos da primeira série não foram todos ensaiados na mesma altura, as características do betão são ligeiramente diferentes (cerca de 1,3 MPa) entre os primeiros e os últimos modelos ensaiados.

2.2.3 Nível de cintagem

Outro dos parâmetros estudado foi o nível de cintagem da armadura vertical, tendo-se considerado três níveis diferentes na primeira série: quatro modelos com cintas de Ø3//0.15; oito modelos com cintas Ø3//0.10 e quatro modelos com cintas de Ø3//0.05.

Na segunda série executaram-se dez modelos de betão armado com um afastamento constante entre cintas de Ø6//0.15. A opção por este afastamento foi deliberada, assumindo, mais uma vez, o princípio de que o reforço dos pilares se destina essencialmente a elementos pouco ou insuficientemente armados.

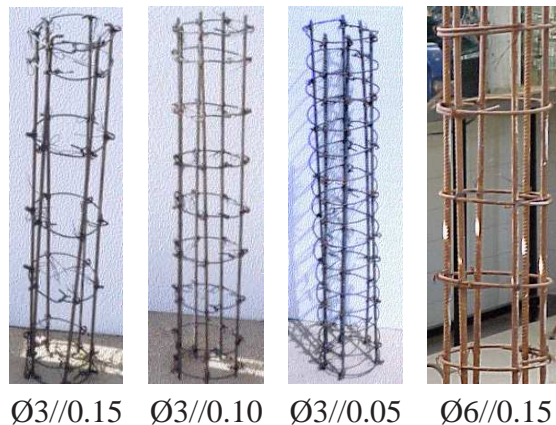


Figura 2.1: Afastamento das cintas nos modelos com 150 ou 250 mm de diâmetro

2.2.4 Tipo de confinamento exterior com FRP

A fim de comparar soluções de reforço com CFRP e GFRP, optou-se pela utilização de três sistemas diferentes de FRP. O primeiro correspondeu a uma manta de CFRP (*Replark 30*) pré-impregnada com resina que se utilizou em doze modelos da primeira série; o segundo a um tecido de GFRP (*Tyfo SEH-51*), utilizado em onze modelos (sete da primeira série e quatro da segunda) e o terceiro a um tecido de CFRP (*MBrace C1-30*) utilizado em oito modelos da segunda série.

As resinas e as técnicas utilizadas foram as propostas pelos respectivos fabricantes [1, 4, 9]. Assim, as fibras do sistema *Replark* foram aplicadas com a resina *Epothem*

- L700S; as fibras do sistema *Tyfo* com a resina *Tyfo S Epoxy* e as fibras do sistema *MBrace* com as resinas *MBrace Saturante*.

2.2.5 Número de camadas de FRP

A força de rotura dos modelos confinados depende do nível de confinamento existente no modelo. Por forma a poder estimar os incrementos de tensões e extensões obtidos, optou-se por estudar esta influência, colocando duas ou três camadas nos modelos com 150 mm de diâmetro em betão simples, reforçados com CFRP (*Replark*) ou GFRP (*Tyfo*).

Nos modelos de betão armado com 250 mm de diâmetro, reforçados com CFRP (*MBrace*), a opção foi colocar uma, duas, três ou quatro camadas (veja-se Tabela 2.1). Dois destes modelos foram ensaiados com cargas cíclicas e os outros quatro com cargas monotónicas. Na Figura 2.2 apresenta-se a pormenorização executada para duas ou três camadas de FRP nos modelos com 150 mm de diâmetro e para uma a quatro camadas nos modelos com 250 mm de diâmetro.

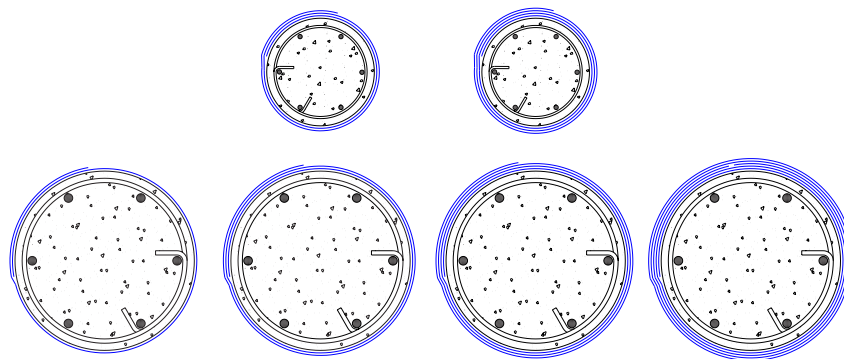


Figura 2.2: Pormenorização das camadas de FRP nos diversos modelos

2.2.6 Tipo de carregamento axial

A influência do tipo de carregamento axial no comportamento das colunas reforçadas com FRP foi estudada impondo cargas monotónicas a trinta e um modelos e ciclos de carga e descarga com incrementos de deslocamento constante a catorze modelos. Para analisar a influência do tipo de carregamento variou-se: o tipo de coluna, o diâmetro do modelo, o nível de cintagem, o tipo de confinamento e o número de camadas de FRP. Como se pode verificar na Tabela 2.1, para todos os modelos ensaiados com cargas cíclicas foi realizado pelos menos um ensaio monotónico com um modelo idêntico.

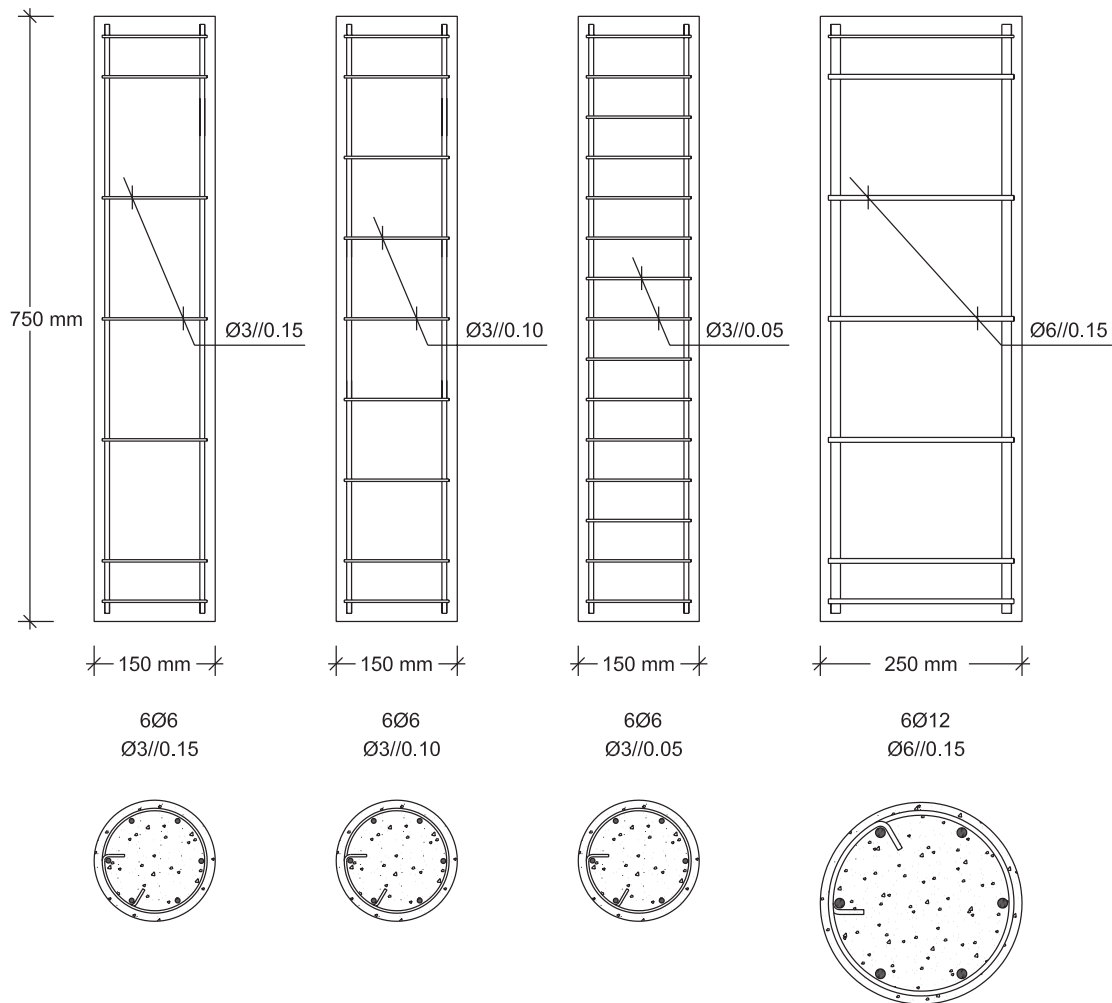


Figura 2.3: Pormenorização das armaduras das colunas

2.3 Pormenorização de Armaduras

Apresentam-se na Figura 2.3 as armaduras consideradas nos modelos de betão armado. Os modelos com 150 mm de diâmetro têm 6Ø6 como armadura vertical e cintas de Ø3 afastadas de 0.15, 0.10 ou 0.05 m, consoante os casos (Tabela 2.1). Nos modelos de betão armado com 250 mm de diâmetro a armadura é idêntica em todos e constituída por seis varões de Ø12 confinados por cintas de Ø6/0.15.

Capítulo 3

Preparação dos Modelos

Ao preparar os modelos a ensaiar teve-se um cuidado especial nas diversas fases de execução: preparação das armaduras, betonagem e cura do betão, rectificação dos topos das colunas, preparação da superfície do betão e aplicação do FRP. Tentou-se em cada uma destas fases compatibilizar a forma adequada de execução com os procedimentos habituais em obra. Descrevem-se, em seguida, os procedimentos adoptados em cada uma destas fases de execução.

3.1 Preparação das armaduras, betonagem e cura do betão

A betonagem da primeira série de modelos ($\varnothing 150$) foi realizada em Agosto de 1998 no início da construção do actual edifício do Departamento de Engenharia Civil da UNL, nos terrenos onde hoje existe o Laboratório de Estruturas Pesadas, e utilizando o betão aplicado na obra, como se pode observar na Figura 3.1. Em Abril de 2002 a betonagem da segunda série de modelos ($\varnothing 250$) realizada em conjunto com os dez pilares já decorreu dentro do referido laboratório.

Em ambas as situações foi feita a preparação das armaduras garantindo o recobrimento de um centímetro e o afastamento das cintas pretendido, tendo o nivelamento dos modelos e a cura dos mesmos sido bastante cuidada. Na primeira série o acabamento dos topos dos modelos, apesar de bastante razoável para obra, não ficou perfeito para o fim pretendido.

Na segunda série, tendo em conta a experiência anterior, o acabamento do topo superior dos modelos durante a betonagem foi objecto de uma atenção redobrada, tendo-se realizado pequenos cortes laterais na parte superior da cofragem e colocado uma chapa metálica por forma a garantir uma superfície plana e paralela ao topo inferior do modelo.

Embora a superfície final não tenha ficado perfeitamente lisa, veio a constatar-se que se tratou de uma opção correcta, dado que os topos dos modelos ficaram paralelos entre si, simplificando bastante a rectificação da superfície.

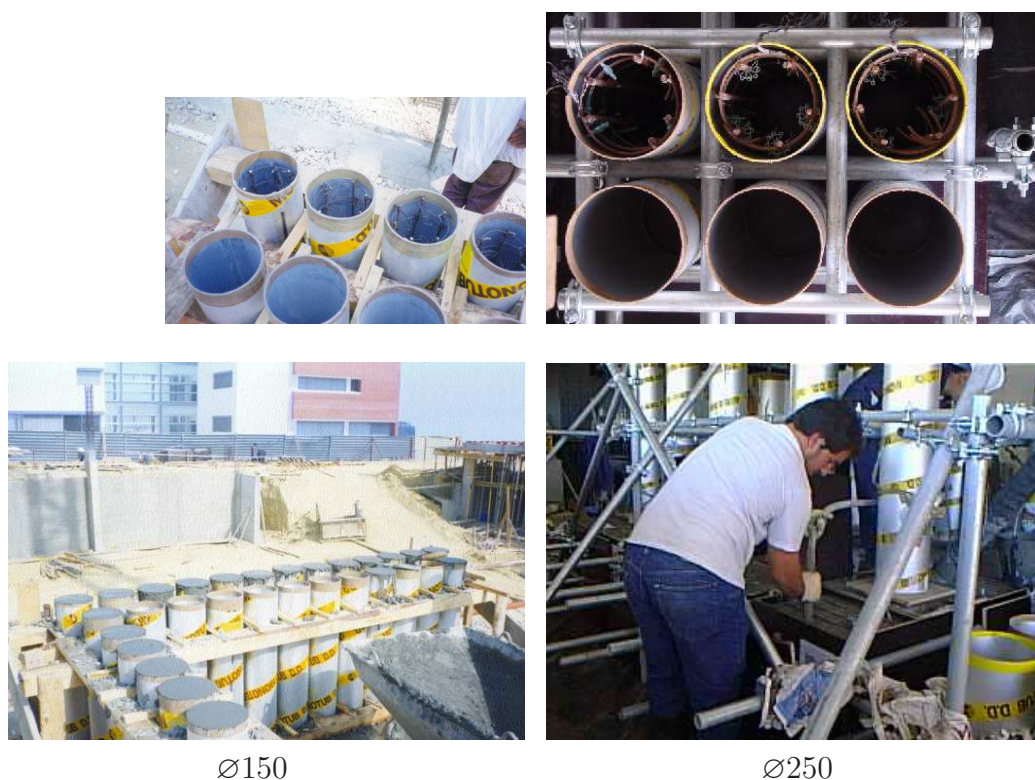


Figura 3.1: Colocação das armaduras nos moldes e betonagem

3.2 Rectificação dos tops das colunas

Com a rectificação das colunas pretende-se que os tops das mesmas fiquem paralelos entre si e perpendiculares ao seu eixo, o que é fundamental para o bom comportamento dos modelos ensaiados à compressão axial, especialmente dos modelos não reforçados.

Nos provetes cilíndricos de betão esta rectificação é realizada recorrendo a equipamento específico que está adaptado aos provetes standard existentes no mercado, o que impossibilitou a sua utilização na rectificação das colunas. Das opções existentes chegou-se a considerar a hipótese de colocar uma camada regularizadora de um outro material, mas, atendendo ao tipo de instrumentação utilizado para medir a deformação axial do modelo, tal não foi possível.

Assim, na primeira série optou-se por serrar os tops da maioria dos modelos num equipamento do LNEC normalmente utilizado para cortar carotes de rochas. Na segunda série, como os modelos eram muito mais pesados, tornava-se difícil transportá-los e manuseá-los. No entanto, como os tops dos modelos ficaram paralelos e contendo apenas pequenos chochos superficiais, a solução encontrada foi o preenchimento dos chochos com *MBrace epoxikleber*, lixando posteriormente a superfície com uma lixa fina.

3.3 Preparação da superfície do betão

A superfície do betão foi preparada de modo a retirar a leitada superficial deste na zona em contacto com a resina epoxídica e tornar a superfície rugosa e "homogénea".

Os processos mais utilizados na preparação da superfície do betão são: a preparação com jacto de areia; a preparação utilizando o martelo de agulhas; a picagem da superfície com bujarda, utilizando nos bordos martelo e escopro; a fresagem utilizando equipamento específico ou utilizando rebarbadora com um disco apropriado para este fim. Foi este último o processo utilizado na preparação dos modelos, dadas as condicionantes logísticas existentes.

3.4 Aplicação do FRP

Após a rectificação dos topos e a preparação da superfície do betão dos modelos procedeu-se à aplicação do FRP consoante a técnica especificada por cada fabricante [1, 4, 9].

Em qualquer dos sistemas a aplicação é essencialmente condicionada pelo *pot life* específico de cada uma das resinas que começa a contar a partir do momento em que são misturadas, nas proporções especificadas, o endurecedor com a resina epoxídica. Consoante os sistemas e, dependendo da temperatura e humidade ambiente, o *pot life* das resinas aplicadas variou aproximadamente entre uma e quatro horas.

A largura dos rolos de fibra fornecidos dependeu do fabricante. Assim, a largura era de 33 centímetros nas mantas do sistema *Replark*, de 30 centímetros nos tecidos do sistema *MBrace* e de 130 centímetros no sistema *Tyfo*.

3.4.1 Aplicação do CFRP - *Replark* ou *MBrace*

Na aplicação dos sistemas de CFRP as técnicas propostas pelos fabricantes são semelhantes, variando apenas o tipo de produto utilizado e a respectiva proporção de mistura dos diversos componentes, bem como os respectivos tempos de aplicação e de cura.

Dependendo do sistema, após a limpeza da superfície, procedeu-se à aplicação com um rolo do primário *Epothem Primer* no sistema *Replark* ou *MBrace Primário* no sistema *MBrace*. De acordo com um dos fabricantes [1, 7] a aplicação do primário tem por objectivo melhorar a resistência superficial, garantindo uma tensão de arranque superior a 1,5 MPa, e limitar a absorção do adesivo epóxico pelo betão.

Os tempos de espera são diferentes consoante os sistemas. Enquanto no sistema *Replark* o período de cura é de quatro a oito horas e não se deve passar à fase seguinte enquanto a superfície estiver pegajosa, no sistema *MBrace* deve-se esperar aproximadamente trinta minutos antes de passar à aplicação do produto seguinte do sistema, nunca excedendo as quarenta e oito horas.

Sempre que necessário procedeu-se nesta fase à regularização da superfície do betão, aplicando, consoante o sistema, *Epothem Putty* ou *MBrace Putty* com espátula,

deixando o produto secar e passando uma lixa em seguida.

No dia seguinte procedeu-se à aplicação com rolo da primeira camada de resina de colagem *Epothem Resin* ou *MBrace Saturante* e de seguida colocou-se a primeira camada de manta *Replark 30* ou de tecido *MBrace C1-30* em torno da coluna, pressionando-se com um rolo de estrias. Decorridos vinte minutos no sistema *Replark* ou trinta minutos no sistema *MBrace* aplicou-se a segunda camada de resina e de fibra e assim sucessivamente até se perfazer o número de camadas pretendido. Após a colocação da última camada de fibra terminou-se a aplicação com uma camada de resina, por forma a impregnar a face exterior da manta ou do tecido.

De acordo com o manual de aplicação do sistema *Replark* [9] o processo completo de cura dura entre uma (a 23 °C) a duas semanas (a 10 °C). No manual do sistema *MBrace*[7] refere-se apenas que o tempo de cura do sistema será superior a vinte e quatro horas.

3.4.2 Aplicação do GFRP - Tyfo

O sistema *Tyfo* é distinto dos sistemas descritos anteriormente. A regularização da superfície com a aplicação de um *putty* não é sugerida pelo fabricante [4]. Contudo, e atendendo a que a superfície do betão apresentava algumas irregularidades, optou-se por aplicar nessas zonas *Epothem Putty* disponível no laboratório.

No dia seguinte aplicou-se sobre a superfície do betão a própria resina *Tyfo S Epoxy* como primário, tendo-se seguido as especificações do fabricante [4]. Aguardou-se que a superfície ficasse pouco pegajosa e de seguida saturou-se totalmente o tecido *Tyfo SEH-51* numa tina contendo a resina *Tyfo S Epoxy* (por forma a que este ficasse impregnado numa proporção aproximada de 1 para 0,8) e procedeu-se à aplicação do tecido sobre a coluna.

Durante este processo, e à medida que se esticava o tecido, tentava-se expulsar as bolhas de ar que se formavam durante a aplicação de uma só vez das duas ou três camadas pretendidas. De acordo com o fabricante [4] o processo total de cura do sistema tem uma duração superior a setenta e duas horas.

Capítulo 4

Sistema de Ensaio e Instrumentação

4.1 Equipamento de ensaio e de aquisição de dados

Os ensaios da primeira série de colunas bem como todos os ensaios da segunda série cuja carga de rotura se estimava acima de 3000kN foram realizados no Laboratório do Núcleo de Betões do LNEC que dispõe de uma prensa servocontrolada (Figura 4.1) da marca *Form+Test/Seidner* com capacidade de carga até 5000kN ou de imposição de deslocamentos até 100 mm.

Parte dos ensaios da segunda série foi realizada no Laboratório de Estruturas Pesadas da UNL que dispõe de uma prensa servocontrolada (Figura 4.1) da marca *Seidner* modelo 3000D (actualizada pela *walter+bay*) com capacidade de carga até 3000kN ou de imposição de deslocamentos até 50 mm.

A aquisição de dados foi realizada através de um Datalogger Centipede 100 (UPM100) da HBM com capacidade para 60 canais e de um computador portátil pentium II a 266MHz na primeira série ou um pentium IV a 2GHz na segunda série. O software de aquisição de dados utilizado foi o Catman 2.2 e o 4.0 da HBM, respectivamente na primeira e segunda séries de ensaios.



LNEC



UNL

Figura 4.1: Vista panorâmica dos sistemas de ensaio utilizados

4.2 Instrumentação

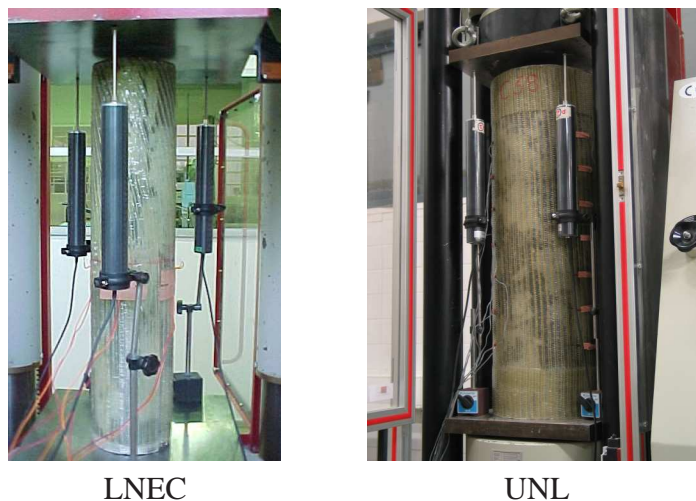


Figura 4.2: Pormenor da colocação dos transdutores de deslocamentos

Na primeira série utilizaram-se três transdutores de deslocamento vertical (TML-CDP100) colocados em torno do modelo (Figura 4.2) e quatro extensómetros colocados a meia altura (Figura 4.4) ou, nos modelos C5 e C11, doze extensómetros (Figura 4.4) com o objectivo de verificar a variação das deformações ao longo da altura do modelo. Metade dos extensómetros foram utilizados para medir a deformação vertical e os restantes para medir a deformação transversal (Figuras 4.3 a 4.5).

Após a realização dos ensaios constatou-se que, quer os transdutores de deslocamento, quer os extensómetros colocados transversalmente ao modelo, ou seja, na direcção principal das fibras, tiveram um bom comportamento, enquanto os extensómetros colocados verticalmente nos modelos reforçados com FRP não eram compatíveis com as deformações observadas (Figura 4.10). Por esta razão, não se apresentam os resultados obtidos com estes extensómetros, tendo-se optado, na segunda série, por não colocar extensómetros verticais.

Na superfície dos modelos de betão simples ou armado foram utilizados alguns extensómetros com o objectivo principal de verificar o andamento das deformações transversais e em especial tentar identificar o início da fendilhação, o que não foi possível constatar com exactidão. Daí ter-se optado por não apresentar os resultados destes extensómetros e por não colocar quaisquer extensómetros na superfície de betão aquando da segunda série de ensaios.

Atendendo à experiência anterior continuaram a utilizar-se na segunda série os três transdutores de deslocamento vertical (TML-CDP100) colocados em torno do modelo (Figura 4.2). Optou-se também por aumentar o número de extensómetros colocados transversalmente nos modelos reforçados com FRP, passando de dois em cada nível na primeira série (1x2x2 ou 3x2x2) para três em cada nível na segunda série. Utilizaram-se primeiro três níveis no modelo C31 (3x3) e sete níveis nos modelos

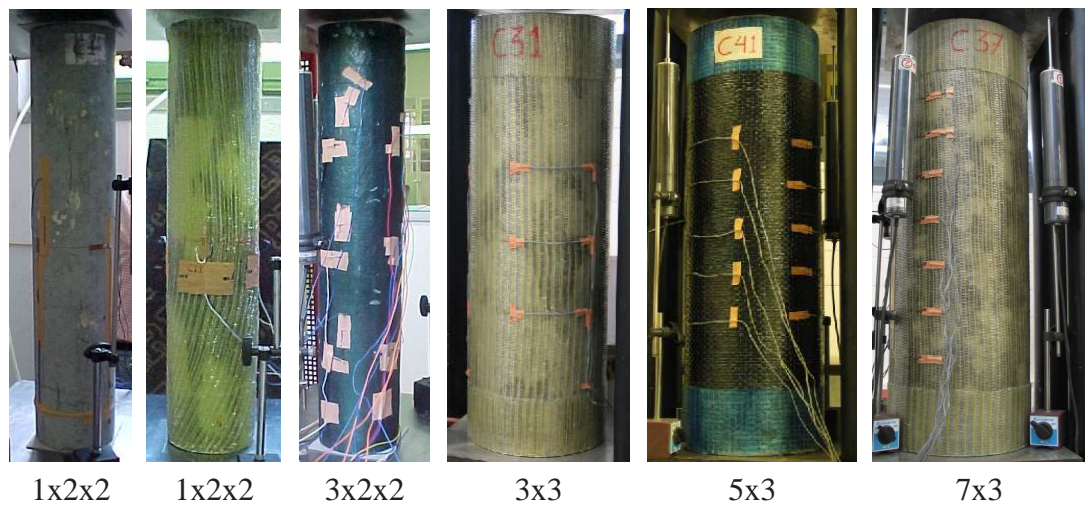


Figura 4.3: Aspecto geral dos extensómetros colocados nos modelos

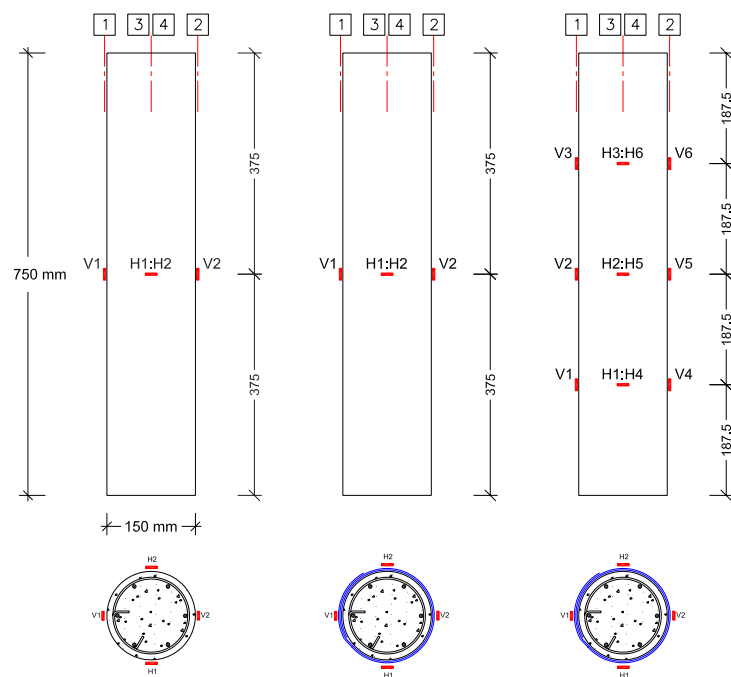


Figura 4.4: Localização dos extensómetros nos modelos com 150 mm de diâmetro

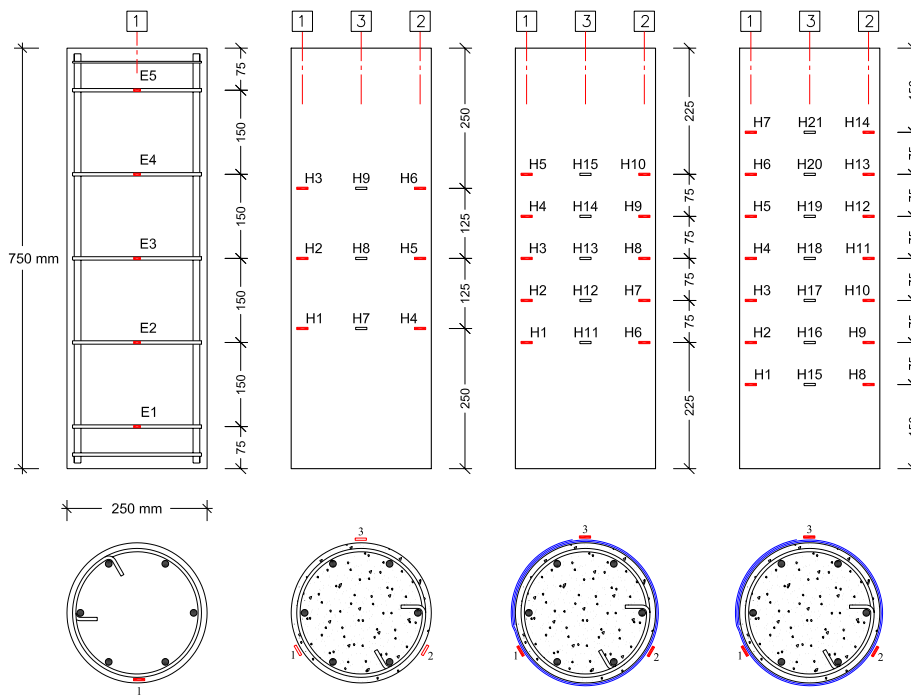


Figura 4.5: Localização dos extensômetros nos modelos com 250 mm de diâmetro

C37, C38 e C39 (7x3). Nos restantes modelos desta série com 250 mm de diâmetro colocaram-se cinco níveis (5x3), com duas exceções: a do modelo C45 que tinha um diâmetro de 150 mm onde se utilizaram três níveis de dois extensómetros (3x2) e a dos modelos de betão simples ou armado em que não se utilizaram extensómetros aplicados na superfície do betão.

No modelo C32 de betão armado e nos modelos C34 de betão armado reforçado com CFRP e C36 de betão armado reforçado com GFRP colocaram-se cinco extensómetros nas cintas, de acordo com o esquema apresentado na Figura 4.5.

Na Figura 4.3 apresenta-se um aspecto geral dos extensómetros colocados nos diferentes modelos e nas Figuras 4.4 e 4.5 apresenta-se a localização dos extensómetros nos modelos com 150 e 250 mm de diâmetro respectivamente.

Utilizaram-se extensómetros eléctricos de resistência (120 Ω) que funcionam em quarto de ponte, os quais foram escolhidos em função dos materiais onde se pretendiam aplicar, das empresas disponíveis no mercado ou das disponibilidades existentes no laboratório à data dos ensaios.

Assim, optou-se por colocar nas cintas os extensómetros TML-FLA-5-11, visto serem apropriados para aço, serem de pequena dimensão e já virem soldados de fábrica (Figura 4.6).

No modelos reforçados quer com GFRP quer com CFRP optou-se pela colocação transversal dos extensómetros HBM-LY58-6-120 (Figuras 4.7 e 4.8) na primeira série e dos extensómetros TML-BFLA-5-8 na segunda série (Figuras 4.7 e 4.9).



TML-FLA-5-11

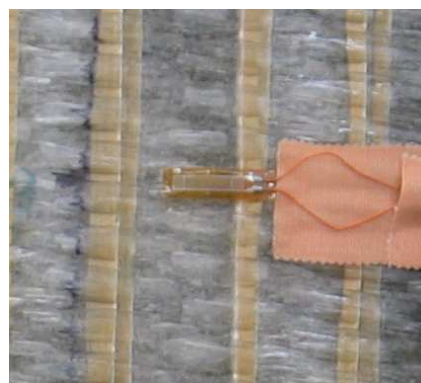


HBM-LY41-20-120

Figura 4.6: Pormenor dos extensómetros colocados nas cintas e no betão



HBM-LY58-6-120



TML-BFLA-5-8

Figura 4.7: Pormenor dos extensómetros colocados em GFRP (Tyfo)



HBM-LY41-20-120

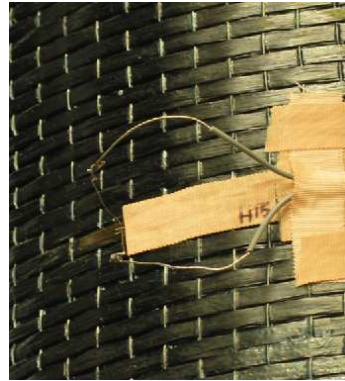


HBM-LY58-6-120

Figura 4.8: Pormenor dos extensómetros colocados em CFRP (Replark)



TML-BFLA-5-8



TML-BFLA-5-8

Figura 4.9: Pormenor dos extensómetros colocados em CFRP (*MBrace*)

Figura 4.10: Extensómetros verticais colocados nos modelos de betão e com CFRP

4.3 Procedimento de ensaio

4.3.1 Modelos sujeitos a cargas monotónicas

Todos os modelos foram levados até à rotura a uma velocidade de ensaio de $10 \mu\text{m/s}$, continuando-se o ensaio após a rotura por forma a obter o andamento da curva tensão-deformação até valores da força aplicada na ordem dos 150kN.

4.3.2 Modelos sujeitos a cargas cíclicas

Os modelos ensaiados com cargas cíclicas na primeira série foram realizados com uma velocidade de carga de $0,2 \text{ MPa/s}$ até ao início do último ciclo, altura em que se alterou para controlo de deslocamentos e uma velocidade de ensaio de $10 \mu\text{m/s}$.

A velocidade de ensaio em todos os modelos ensaiados com cargas cíclicas na segunda série foi de $10 \mu\text{m/s}$.

Como não se encontrou nenhum procedimento de ensaio para este tipo de testes admitiu-se um critério que passa primeiro pela determinação do valor do deslocamento na rotura (Δ_{c0}) de um modelo idêntico não reforçado com FRP e sujeito a cargas monotónicas, sendo os ciclos de carga e descarga aplicados função deste deslocamento Δ_{c0} .

Assim, começa-se por realizar um primeiro ciclo a $0,5\Delta_{c0}$ seguido de outros a 0,75; 1; 1,25; 1,5 e 2 até $n \Delta_{c0}$, terminando-se o ensaio assim que ocorre a rotura ou logo que se alcance um valor mínimo pré-fixado para a força instalada no modelo, no caso de se pretender analisar o comportamento deste após a rotura.

Na Figura 4.11 apresenta-se um diagrama com a história de deslocamentos cíclicos aplicada aos modelos da segunda série.

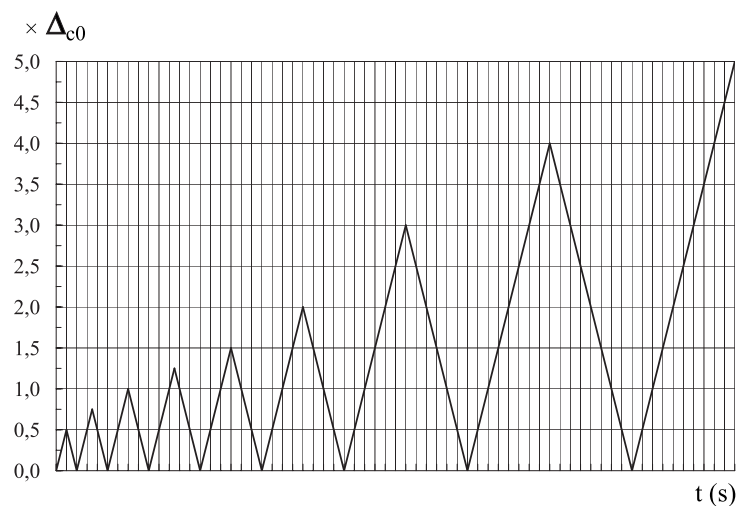


Figura 4.11: História de deslocamentos a que os modelos foram sujeitos

4.3.3 Critério de Rotura

Em todos os modelos ensaiados o critério utilizado para definir a força de rotura foi o da força máxima obtida no ensaio. Em alguns modelos a rotura parcial ou total das fibras só ocorreu alguns instantes após a obtenção da força máxima, em especial nos modelos de betão armado.

Capítulo 5

Apresentação e Análise dos Resultados

Apresentam-se, em seguida, os resultados obtidos com os ensaios realizados às colunas de betão simples ou armado reforçadas ou não com FRP. Optou-se por expôr primeiro os resultados dos ensaios dos modelos de 150 mm de diâmetro correspondentes à primeira série, em seguida os de 250 mm de diâmetro correspondentes à segunda série e no final faz-se uma comparação dos resultados obtidos nas duas séries.

Os modelos são apresentados por classes de acordo com as suas características e não pela ordem que foram ensaiados. Deste modo, em qualquer das séries começa-se por referir os modelos sem armadura, em seguida os modelos com armadura e no final comparam-se os resultados entre os modelos com e sem armadura. Em cada uma destas situações expõem-se primeiro os modelos sem FRP, seguidos dos modelos com CFRP e dos modelos com GFRP e por fim comparam-se os resultados. Por forma a tornar mais sintética, a apresentação optou-se sempre que possível por incluir num mesmo diagrama os ensaios realizados com modelos da mesma classe.

Por cada ensaio realizado agrupam-se num mesmo diagrama dois gráficos, um com a evolução da tensão de compressão (f_c) em função da extensão axial (ε_c) e outro com a evolução da tensão de compressão em função da extensão lateral (ε_l). Como se verificou anteriormente a extensão axial é obtida com base nos transdutores de deslocamento colocados em torno do modelo com o objectivo de medir o deslocamento vertical do mesmo, enquanto a extensão lateral é obtida com base nos extensómetros colocados no perímetro do modelo ensaiado. A extensão lateral indicada nos diagramas corresponde à média dos valores obtidos no conjunto dos extensómetros colocados a meia altura do modelo. Tal só não acontecerá nos casos em que um dos extensómetros registou algum problema de leitura, considerando-se, nessa situação, apenas os resultados dos extensómetros que não evidenciaram qualquer tipo de anomalia. Por vezes existe uma rotura local na fibra que não provoca imediatamente a rotura do modelo, pelo que nos gráficos tensão-deformação axial os resultados são apresentados até à rotura do modelo, enquanto nos gráficos tensão-deformação lateral os resultados são indicados até ao momento em que há a rotura local da fibra.

Sempre que se considerar pertinente ou caso existam resultados que o permitam apresentam-se, para além dos diagramas referidos anteriormente, gráficos com a evolução das extensões laterais ao longo da altura do modelo. Juntamente com estes

diagramas incluem-se fotografias dos mesmos onde são visíveis alguns pormenores relacionados com a rotura ocorrida.

5.1 Modelos de betão simples com 150mm de diâmetro

5.1.1 Modelos de betão simples não reforçados com FRP

Na Figura 5.1 apresentam-se os diagramas tensão-deformação axial obtidos nos ensaios dos modelos de betão simples com 150 mm de diâmetro e 750 mm de altura (C1 e C3) e na Figura 5.2 os respectivos modelos após a rotura.

O valor médio da tensão de rotura à compressão foi de 26,6 MPa, tendo o comportamento final dos modelos sido afectado por uma ligeira falta de paralelismo nas respectivas faces decorrente da dificuldade de proceder à rectificação das mesmas como se pode observar na Figura 5.2.

De acordo com a expressão 5.1 referida num relatório técnico da *Concrete Society* [2] estimou-se o valor de f_c nos modelos com 150 mm de diâmetro (D) e 750 mm de altura (h) partindo do valor de $f_{cm}=38,0$ MPa. O que significa:

$$f_{D \times h} = \frac{1,5 + \frac{D}{h}}{2} \times f_{cm} \quad (5.1)$$

$$f_{150 \times 750} = \frac{1,5 + \frac{150}{750}}{2} \times f_{cm} = 0,85 \times f_{cm} = 0,85 \times 38,0 = 32,3 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

Constata-se, assim, que o resultado obtido experimentalmente corresponde à média dos ensaios dos modelos C1, C2 e C3 (26,6 MPa), ou seja, cerca de 18% inferior ao valor estimado (32,3 MPa) pela expressão 5.2. Se compararmos o valor estimado pela expressão 5.2 apenas com o valor obtido no ensaio do modelo C3 (32,2 MPa), cujo comportamento parece ter sido o mais aceitável, quer em termos de andamento do diagrama tensão-deformação (Figura 5.1), quer em termos do modo de rotura apresentado (Figura 5.2), verifica-se que o valor do ensaio do modelo C3 é aproximadamente igual ao valor estimado pela expressão 5.2.

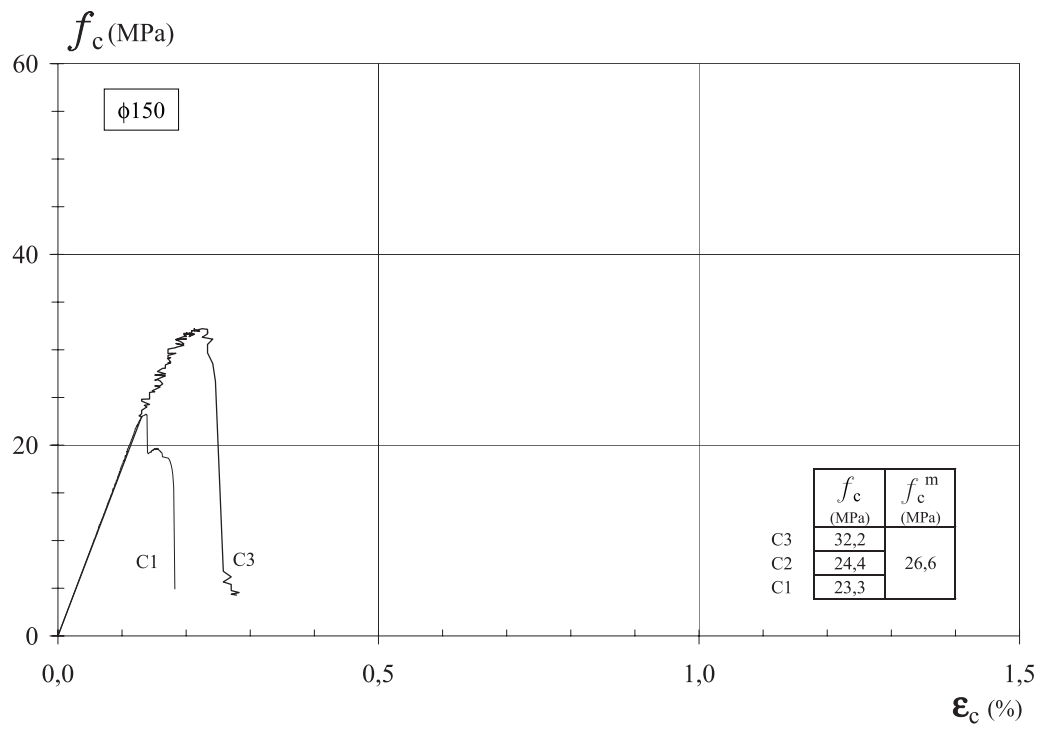


Figura 5.1: Diagrama tensão-deformação axial dos modelos C1 e C3

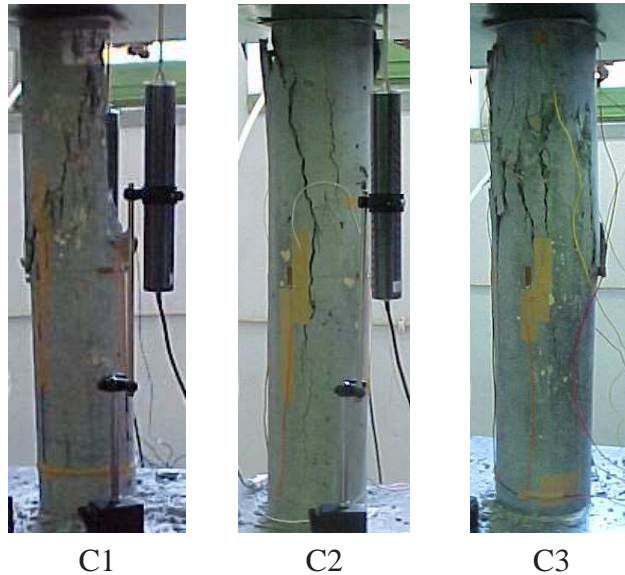


Figura 5.2: Aspecto da rotura dos modelos de betão simples

5.1.2 Modelos de betão simples reforçados com CFRP

Na Figura 5.3 estão patentes os diagramas tensão-deformação dos modelos C1, C3, C4, C5, C6 e C28 ensaiados com cargas monotónicas. Voltam a mostrar-se os diagramas dos modelos C1 e C3 para uma melhor percepção do incremento verificado nos modelos C4, C5 e C6 reforçados com duas camadas de CFRP (*Replark*) e no modelo C28 reforçado com três camadas de CFRP (*Replark*). Na Figura 5.5 estão patentes os mesmos diagramas da Figura 5.3, à excepção do modelo C28, e integra-se o modelo C26 igualmente reforçado com duas camadas de CFRP (*Replark*) mas ensaiado com cargas cíclicas. Pode observar-se na Figura 5.4 o tipo de rotura obtido nos modelos C4, C5, C6, C26 e C28. A rotura dos modelos C6 e C26 foi de tal forma violenta que estes foram projectados para fora da prensa.

Da análise dos diagramas apresentados e dos resultados obtidos constata-se que existe alguma coincidência entre o andamento dos gráficos tensão-deformação axial dos modelos C4 e C5 e na rotura entre os modelos C6, ensaiado monotonicamente, e o modelo C26, ensaiado com cargas cíclicas.

Apesar de todos os modelos à partida terem as mesmas características, os modelos C4 e C5 foram ensaiados primeiro que os modelos C6 e C26, tendo-se obtido para os primeiros um f_{cm} de 38,0 MPa enquanto para os segundos houve um acréscimo no f_{cm} de 1,4 MPa, passando este valor para 39,4 MPa. Estes valores de f_{cm} não justificam, contudo, por si só, a diferença de 11,2 MPa verificada entre o valor médio de $f_{cc}=73,2$ MPa dos modelos C4 e C5 e o valor médio de $f_{cc}=84,4$ MPa dos modelos C6 e C26. A justificação para estes valores poderá estar associada ao facto da rotura se ter dado por descolamento interlaminar das fibras no caso dos modelos C4 e C5 ao contrário dos modelos C6 e C26 em que a rotura do modelo se deu por rotura das próprias fibras. Apesar de tudo, a extensão axial (ε_{cc}) teve uma variação pequena entre os modelos C4 (1,28%), C6 (1,25%) e C26 (1,31%), tendo o modelo C5 um valor inferior da extensão axial (0,99%).

Em termos de extensão lateral na rotura (ε_{ℓ}) a diferença observada entre os valores dos modelos C5 (0,47%) e C26 (0,37%) e dos modelos C4 (0,85%) e C6 (0,92%) pode justificar-se por a rotura, no caso dos modelos C5 e C26, ter ocorrido mais junto à base dos provetes, na zona em contacto com a prensa, uma vez que os extensómetros se encontram a meio do provete.

Comparando o valor médio dos resultados obtidos nos provetes reforçados com duas camadas de CFRP ($f_{cc}=78,8$ MPa; $\varepsilon_{cc}=1,20\%$; $\varepsilon_{\ell(C4,C6)}=0,89\%$) e o valor médio dos resultados obtidos no provete C28 reforçado com três camadas de CFRP ($f_{cc}=108,9$ MPa; $\varepsilon_{cc}=1,87\%$; $\varepsilon_{\ell}=1,22\%$) obteve-se um incremento de 38,2% em termos de f_{cc} , de 55,8% em termos de ε_{cc} e de 37,1% em termos de $\varepsilon_{\ell}=1,22\%$.

Fazendo a mesma comparação entre o valor médio obtido nos provetes de betão simples não reforçados com CFRP ($f_c=26,6$ MPa) e o valor médio obtido nos provetes reforçados com duas camadas de CFRP ($f_{cc}=78,8$ MPa) e o valor médio obtido no provete C28 reforçado com três camadas de CFRP ($f_{cc}=108,9$ MPa) constata-se um incremento de 196,2% nos provetes reforçados com duas camadas de CFRP e de 309,4% no provete reforçado com 3 camadas de CFRP.

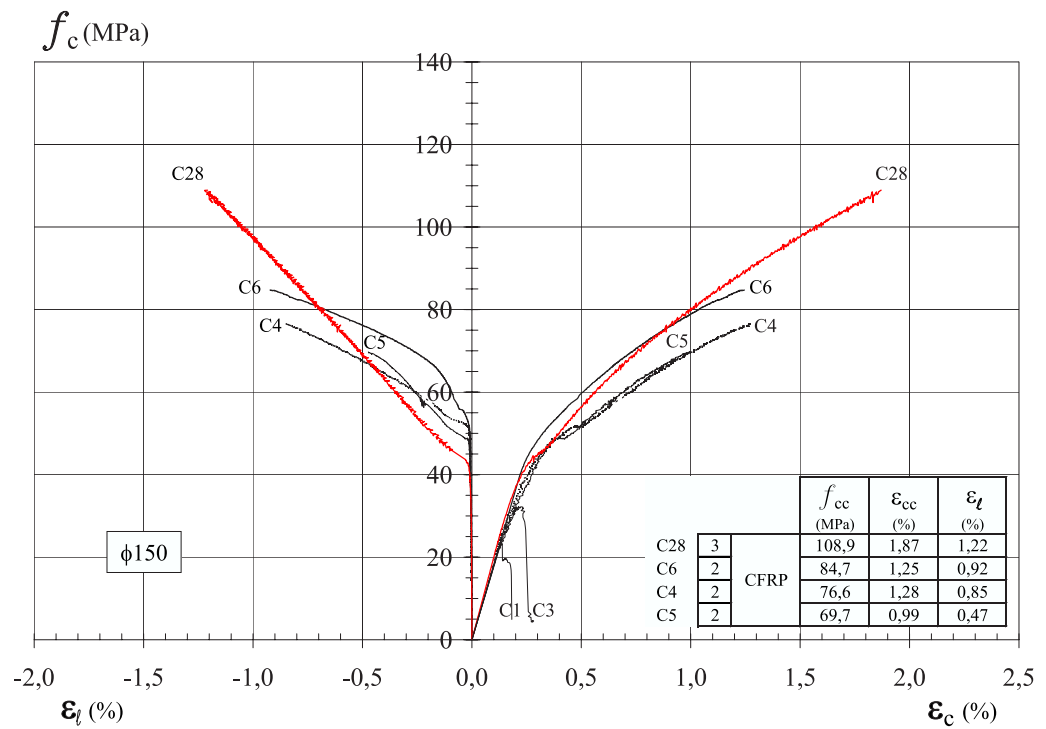


Figura 5.3: Diagramas tensão-deformação dos modelos C1, C3, C4, C5, C6 e C28

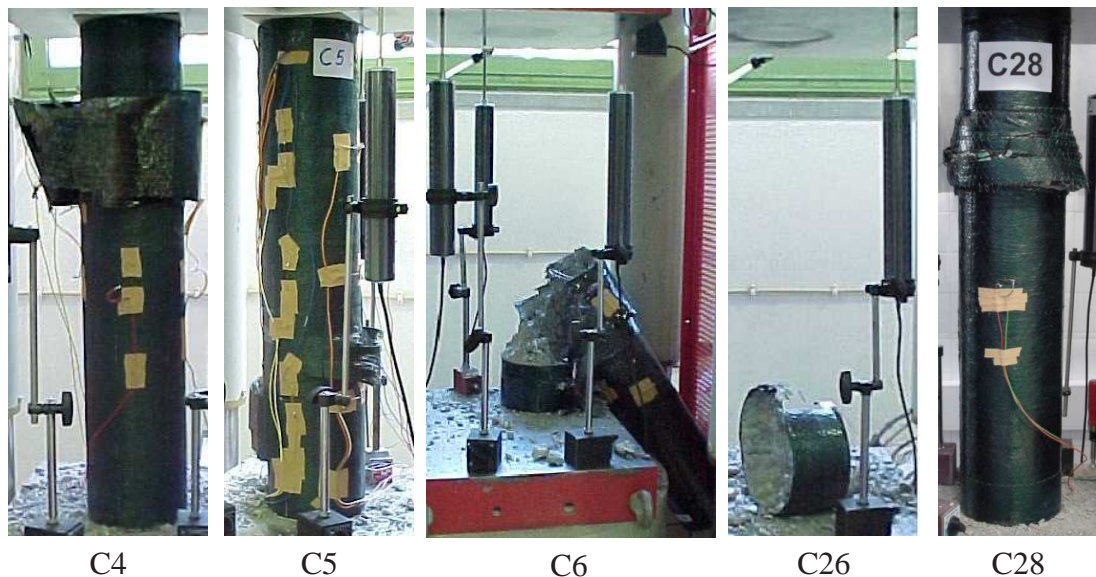


Figura 5.4: Aspecto da rotura dos modelos de betão simples reforçados com 2 ou 3 CFRP

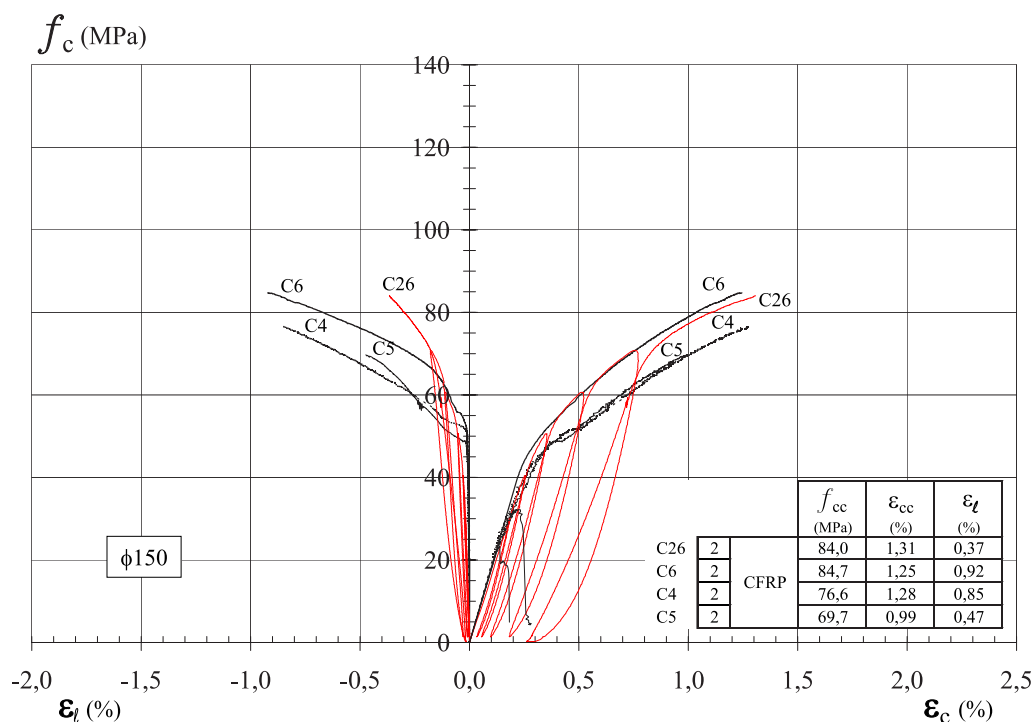


Figura 5.5: Diagramas tensão-deformação dos modelos C1, C3, C4, C5, C6 e C26

5.1.3 Modelos de betão simples reforçados com GFRP

Os modelos C21, C22, C23 e C27 foram reforçados com três camadas de GFRP (*Tyfo*), enquanto o modelo C45 foi reforçado com apenas duas camadas. Os modelos C21, C22 e C45 foram ensaiados com cargas monotónicas, tendo os modelos C23 e C27 sido ensaiados com cargas cíclicas. Na Figura 5.6 encontram-se representados os diagramas tensão-deformação dos modelos C21, C22, C23 e C27. Na Figura 5.7 é possível observar o tipo de rotura ocorrida em cada um destes modelos.

Destes ensaios constata-se que a rotura dos provetes é sempre condicionada pela rotura da fibra, o que nem sempre se verifica nos provetes de CFRP. O comportamento do modelo C21 foi nitidamente afectado pelo facto da rotura se ter dado junto ao prato superior da prensa (Figura 5.7), situação que se tentou evitar na série 2. Por esta razão todos os modelos desta série passaram a ter um reforço adicional de mais uma camada junto às extremidades, conforme se pode constatar no modelo C45 (segunda série) - Figura 5.7. O modelo C27 ensaiado com cargas cíclicas evidencia um andamento praticamente coincidente com o modelo C22 ensaiado com cargas monotónicas, situação que já não se verifica no caso do modelo C23.

O valor médio da tensão de rotura à compressão dos modelos reforçados com três camadas de GFRP (C22, C23 e C27), não considerando os resultados do modelo C21, é de 126,3 MPa, enquanto o valor médio da extensão axial é de 2,60% e o da extensão lateral é de 1,58%. O valor médio da tensão de rotura representa, neste caso, um

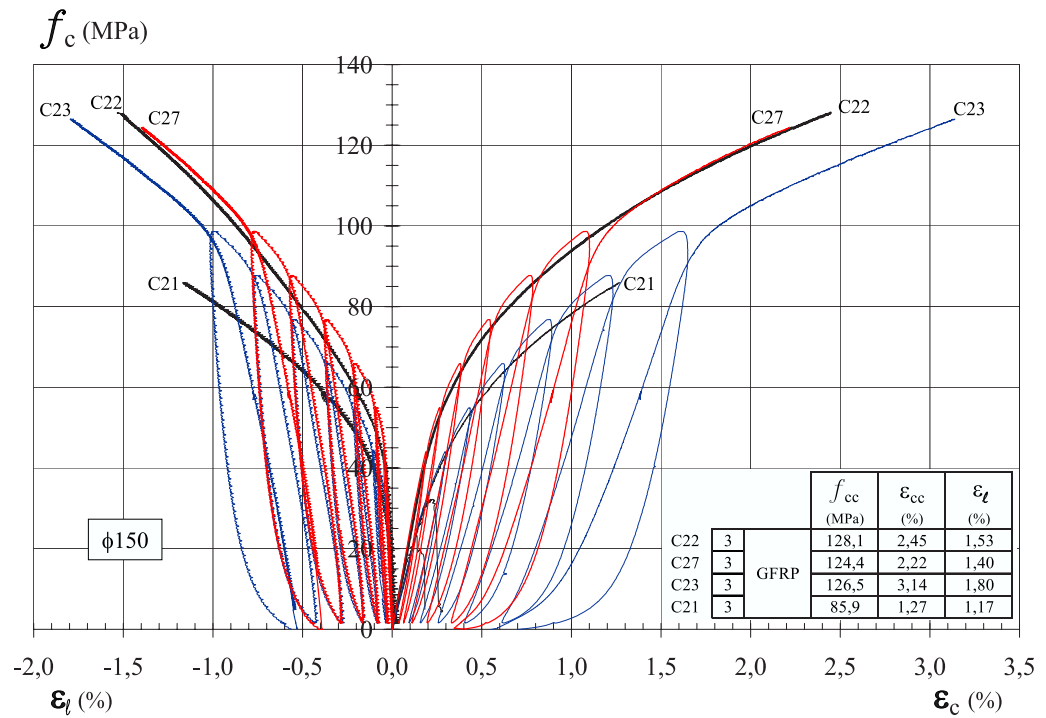


Figura 5.6: Diagramas tensão-deformação dos modelos C1, C3, C21, C22, C23 e C27

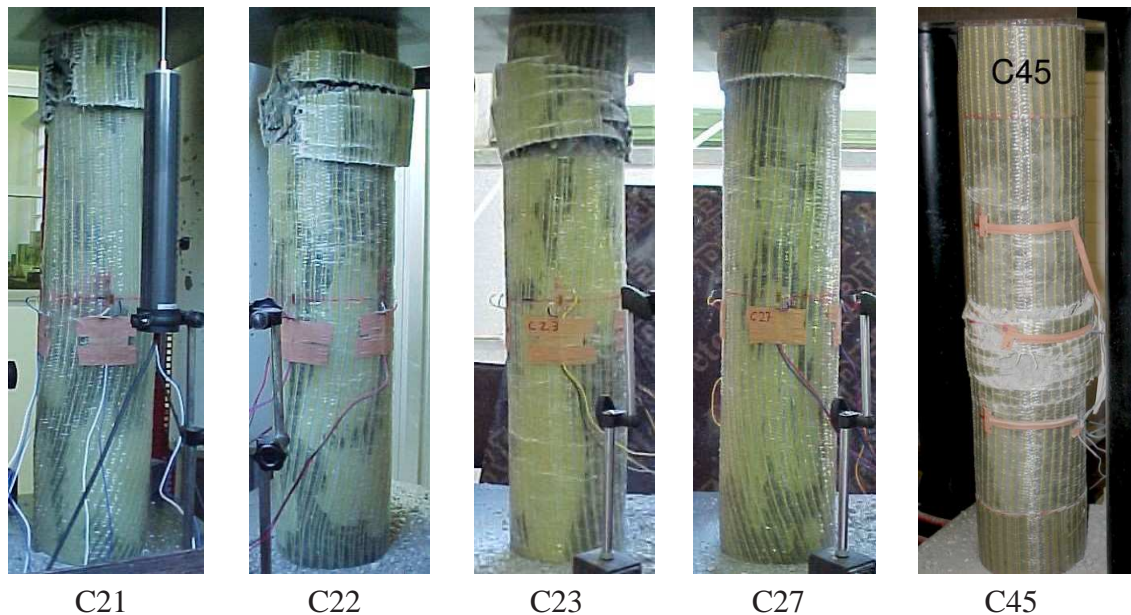


Figura 5.7: Aspecto da rotura dos modelos de betão simples reforçados com 2 ou 3 GFRP

incremento de 374,8% relativamente ao valor médio dos modelos de betão simples não reforçados.

O modelo C45 ($f_{cm} = 30,4$ MPa) não é da mesma amassadura dos restantes modelos reforçados com GFRP ($f_{cm} = 39,4$ MPa), o que limita, em parte, a comparação entre os modelos reforçados com duas e três camadas. A tensão de rotura à compressão do modelo C45 foi de 89,1 MPa, enquanto o valor da extensão axial foi de 1,87% e o valor da extensão lateral de 1,71%.

5.1.4 Comparação entre os modelos de betão simples reforçados com FRP

Como já se referiu anteriormente, a técnica de aplicação especificada pelos fabricantes é diferente consoante se trate de tecidos de GFRP (*Tyfo*), em que o tecido é totalmente impregnado com resina antes da aplicação, ou de mantas de CFRP (*Replark*), que são fornecidas já pré-impregnadas e em obra são aplicadas diversas demãos de resina à medida que se vão sobrepondo as diferentes camadas.

A técnica utilizada nos materiais da *Replark* é mais fácil de aplicar, enquanto a técnica em que se procede à impregnação total do material é bastante mais difícil, pelo menos com GFRP, uma vez que passamos a ter um "lençol molhado" ao qual é difícil dar a orientação ou a pressão pretendida. A rotura precoce do modelo C21 poderá estar associada a esta situação, em especial por ter sido difícil dar a mesma pressão no enrolamento do tecido em torno da coluna e ao longo da sua altura. Contudo, e desde que a experiência do aplicador esteja consolidada, esta técnica (*Tyfo*) parece ser mais eficiente porque leva a roturas sempre pela fibra e não por descolamento interlaminar, como ocorreu nos modelos C4 e C5 reforçados com a técnica especificada pelo fornecedor de CFRP (*Replark*).

Em termos de comportamento, pode observar-se na Figura 5.8 que o andamento, quer dos modelos de CFRP, quer dos de GFRP, é aproximadamente bi-linear, seja nas curvas tensão-deformação axial, seja nas curvas tensão-deformação lateral. Em qualquer dos materiais o primeiro troço destas curvas é linear e condicionado pelo comportamento do betão até valores de aproximadamente 30% acima da tensão de rotura do betão à compressão, altura a partir da qual as curvas passam a ter um segundo troço governado pela rigidez do confinamento até à rotura do modelo.

Uma vez que a qualidade do betão no modelo C45 ($f_{cm} = 30,4$ MPa) não é idêntica à dos modelos C6, C22 e C28 ($f_{cm} = 39,4$ MPa), para avaliar o comportamento relativo destes modelos teremos de normalizar o valor de f_{cc} de cada um dos modelos, dividindo-o pelo respectivo f_{cm} . Obtém-se, assim, uma tensão de rotura normalizada de 2,25 para o modelo C6; 2,90 para o modelo C28; 2,93 para o modelo C45 e de 3,41 para o modelo C22, o que significa um incremento de resistência de 28,9% , no caso do aumento de uma camada de CFRP, e de 16,4% no caso do aumento de uma camada de GFRP nos modelos sem armadura e com 150 mm de diâmetro.

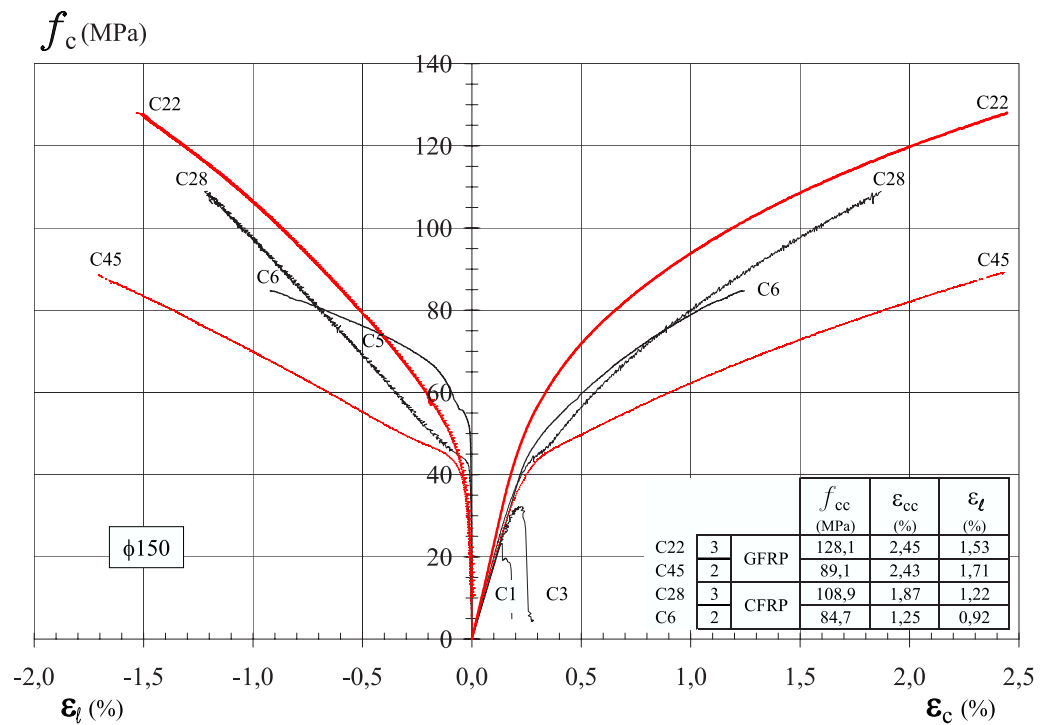


Figura 5.8: Diagramas tensão-deformação dos modelos C1, C3, C6, C22, C28 e C45

5.2 Modelos de betão armado com 150 mm de diâmetro

Nos modelos com 150 mm de diâmetro foram utilizados diferentes níveis de cintamento, conforme se referiu em 2.2. Assim, os modelos C7 a C12 e C24 e C25 possuem cintas $\emptyset 3//0.10$, enquanto os modelos C13 a C16 possuem cintas $\emptyset 3//0.15$ e os modelos C17 a C20 cintas $\emptyset 3//0.05$. Nas secções seguintes começa-se por apresentar os resultados obtidos com os modelos não reforçados com FRP; em seguida apresentam-se os modelos reforçados com CFRP e depois com GFRP; e por fim estabelece-se uma comparação entre os resultados obtidos com CFRP e GFRP.

5.2.1 Modelos de betão armado não reforçados com FRP

Nas Figuras 5.9, 5.11 e 5.13 apresentam-se os diagramas tensão-deformação axial dos modelos de betão armado não reforçados com FRP com cintas de $\emptyset 3//0.10$, $\emptyset 3//0.15$ e $\emptyset 3//0.05$ respectivamente. Os modos de rotura obtidos nos modelos com cintas de $\emptyset 3//0.10$ (C7, C8 e C9) podem ser observados na Figura 5.10 enquanto os modos de rotura obtidos nos modelos com $\emptyset 3//0.15$ (C13 e C14) e $\emptyset 3//0.05$ (C17 e C18) podem-se observar na Figura 5.12.

Na Figura 5.15 encontram-se representados os diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples (C1 e C3) e de betão armado com cintas de $\emptyset 3//0.10$ (C7 a C9), com cintas de $\emptyset 3//0.15$ (C13 e C14) e com cintas de $\emptyset 3//0.05$ (C17 e C18).

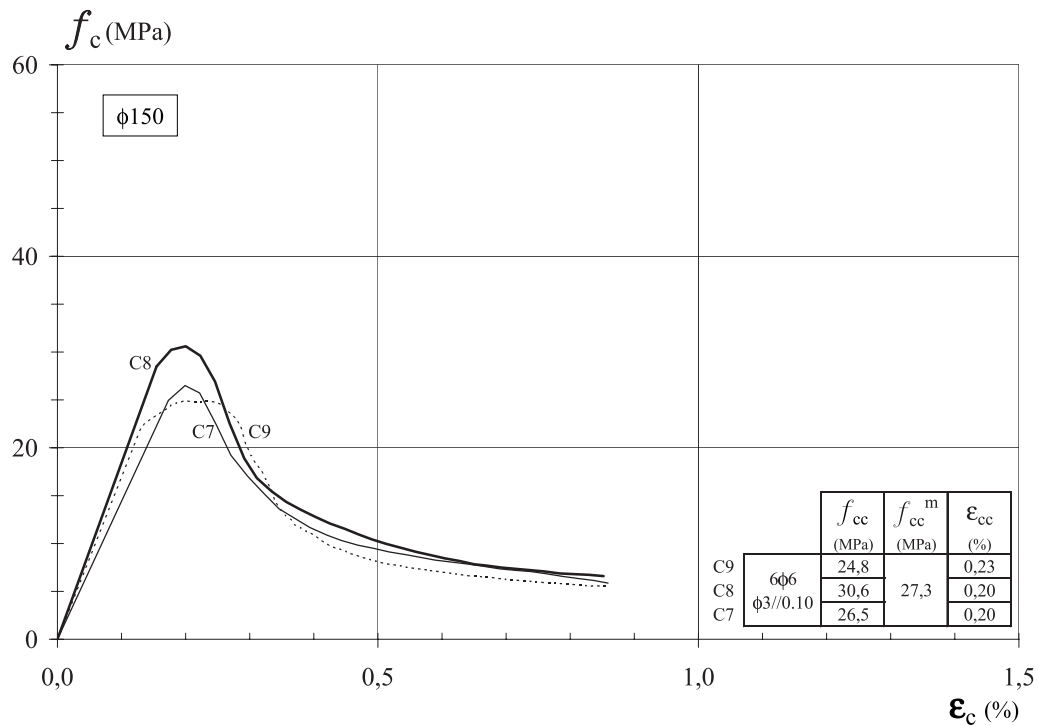


Figura 5.9: Diagramas tensão-deformação dos modelos C7, C8 e C9 com cintas de Ø3//0.10



Figura 5.10: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado com cintas de Ø3//0.10

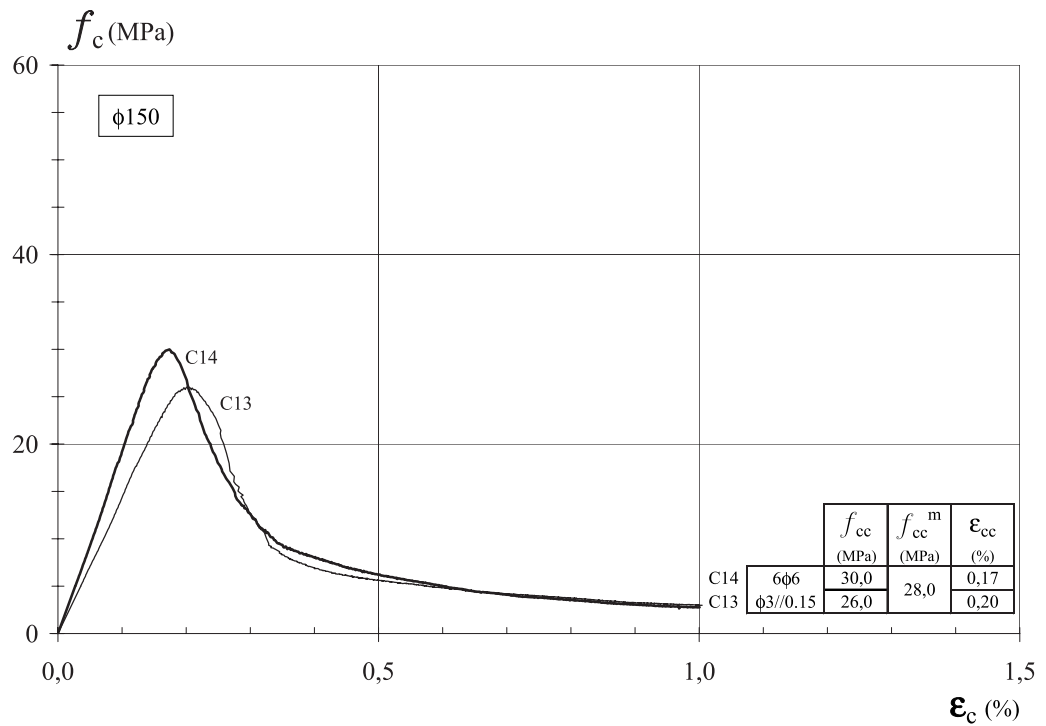


Figura 5.11: Diagramas tensão-deformação dos modelos C13 e C14 com cintas de Ø3//0.15

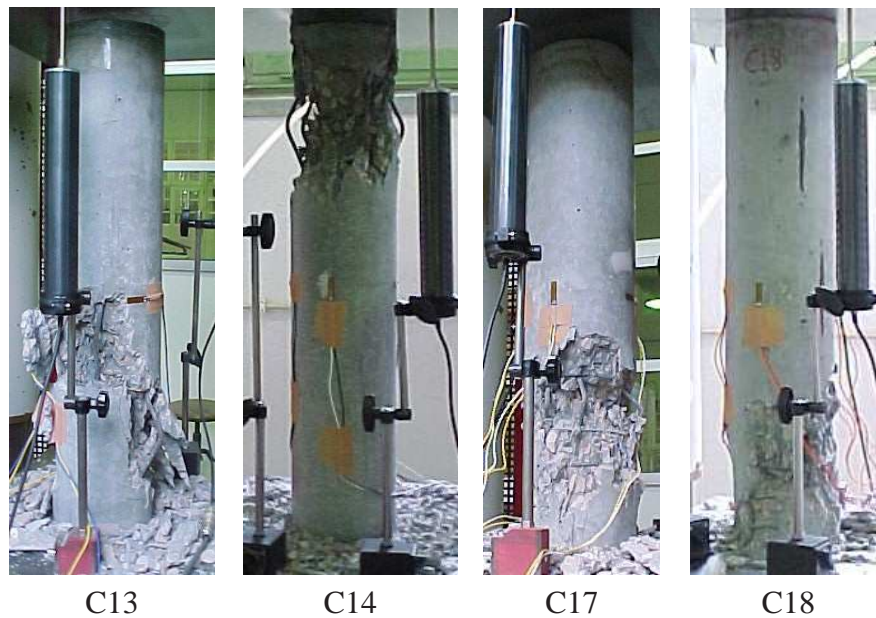


Figura 5.12: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado com cintas de Ø3//0.15 (C13 e C14) e Ø3//0.05 (C17 e C18)

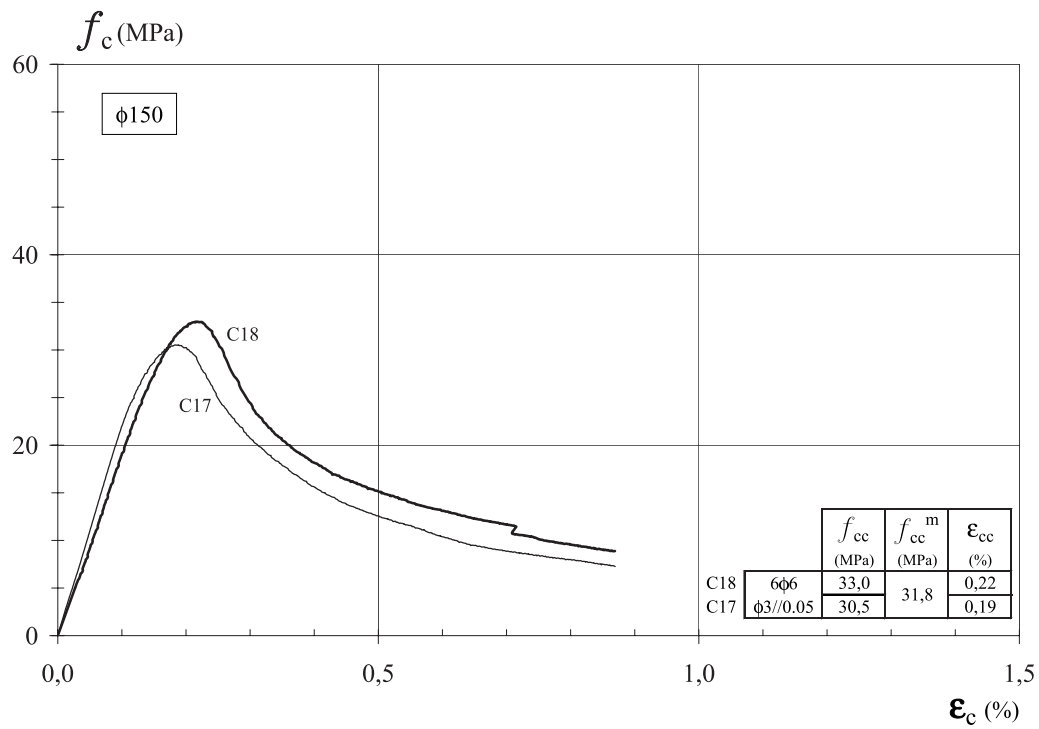


Figura 5.13: Diagramas tensão-deformação dos modelos C17 e C18 com cintas de Ø3//0.05



Figura 5.14: Pormenor da ruptura de uma cinta do modelo C18

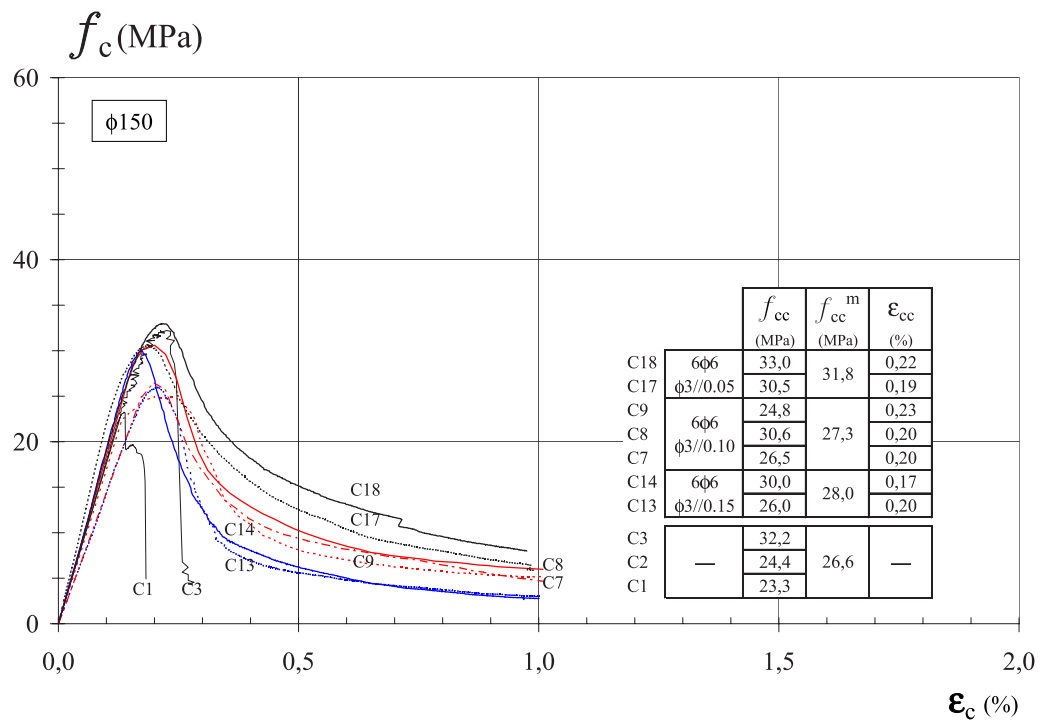


Figura 5.15: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples e de betão armado com diversos afastamentos das cintas



Figura 5.16: Pormenores da rotura dos modelos de betão armado

Da observação dos diagramas tensão-deformação axial constata-se que a grande diferença no comportamento destes modelos reside no ramo descendente da curva após a rotura, com os modelos de betão simples a exibirem uma curva descendente praticamente vertical, enquanto os restantes modelos de betão armado evidenciam curvas descendentes mais ou menos suaves, consoante o afastamento das cintas seja menor ou maior, respectivamente.

5.2.2 Modelos de betão armado reforçados com CFRP

Na Figura 5.17 apresentam-se os diagramas tensão-deformação e na Figura 5.18 os respectivos modos de rotura dos modelos C10, C11 e C12 de betão armado reforçado com duas camadas de CFRP (*Replark*) e com cintas de Ø3//0.10. Os modelos C10 e C11 foram ensaiados monotonicamente, enquanto o modelo C12 foi ensaiado com cargas cíclicas.

A partir da observação dos diagramas da Figura 5.17 verifica-se que existe bastante sintonia no andamento das diversas curvas, incluindo a envolvente do diagrama cíclico obtida do ensaio do modelo C12.

O valor médio da tensão de rotura à compressão destes modelos é de 82,4 MPa, sendo o valor médio da extensão axial de 1,24% e o da extensão lateral de 0,69%. No entanto, se considerarmos o valor médio das extensões máximas que ocorrem em cada modelo, este valor sobe para 0,87%. O valor médio da tensão de rotura regista um incremento de 202% relativamente ao valor médio dos modelos de betão armado com cintas de Ø3//0.10.

Na Figura 5.19 apresentam-se os diagramas dos modelos de betão armado com cintas de Ø3//0.15 ensaiados com cargas monotónicas (C13, C14 e C15) ou com cargas cíclicas (C16). Verifica-se um certo desfasamento entre o andamento das curvas relativas ao modelo C16 e as respectivas curvas do modelo C15. Observando os modos de rotura obtidos (Figura 5.18) poder-se-á justificar, em parte, o desfasamento verificado com o facto de o afastamento das cintas ser muito grande, o que provoca um fenómeno de encurvadura dos varões e o correspondente empurrar das fibras. Outra possível justificação poderá estar associada a alguma irregularidade existente na fabricação dos modelos. Em termos de tensão de rotura este fenómeno acaba por não ter muito significado, uma vez que a variação entre os dois modelos é de apenas 2 MPa.

Ao contrário dos modelos anteriores (cintas Ø3//0.15), nos modelos C19 e C20 que têm um afastamento muito menor das cintas (Ø3//0.05) existe uma grande concordância (5.21) no andamento dos diagramas tensão-deformação axial e nos valores da tensão de rotura (85,4 e 85,9 MPa) e da extensão axial (1,28 e 1,35%). Em termos de extensão lateral, a análise fica condicionada pelo facto de os extensómetros laterais do modelo C19 terem deixado de funcionar para valores da tensão de compressão superiores a 60 MPa, o que não permitiu a comparação com os resultados obtidos no ensaio do modelo C20.

Apesar do reduzido número de ensaios, talvez se possa concluir da análise dos resultados dos modelos C15, C16, C19 e C20 que a eficiência do reforço com sistemas

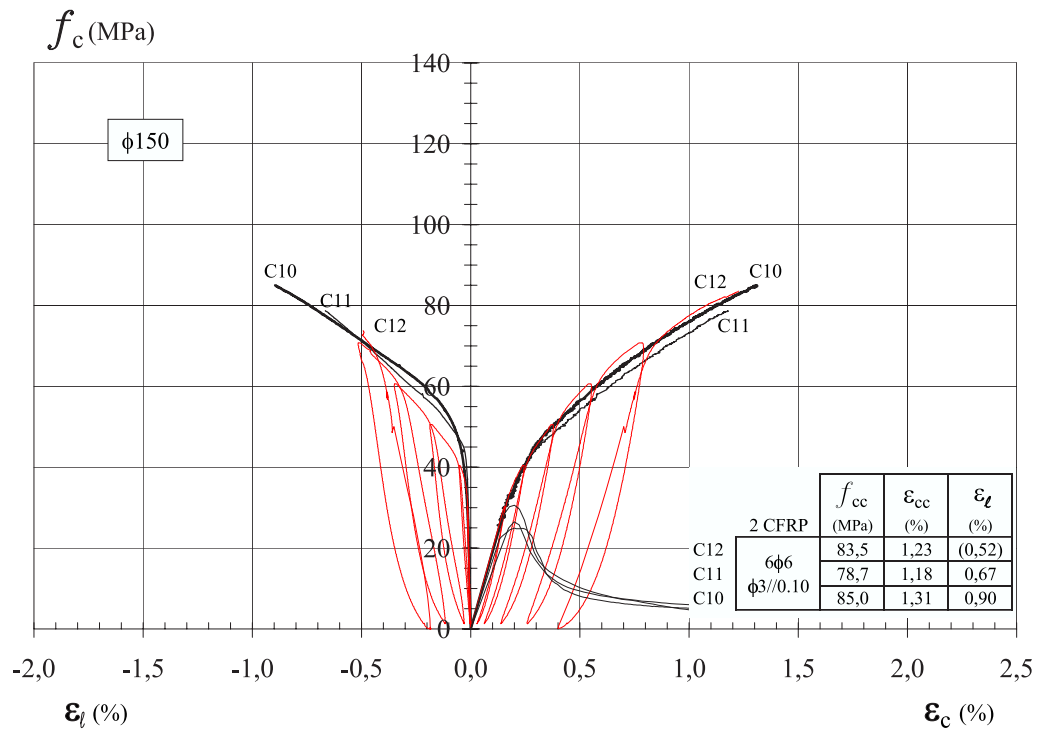


Figura 5.17: Diagramas tensão-deformação dos modelos C10, C11, C12 com cintas de Ø3//0.10 reforçados com 2CFRP



Figura 5.18: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado com cintas Ø3//0.10 reforçados com 2 CFRP

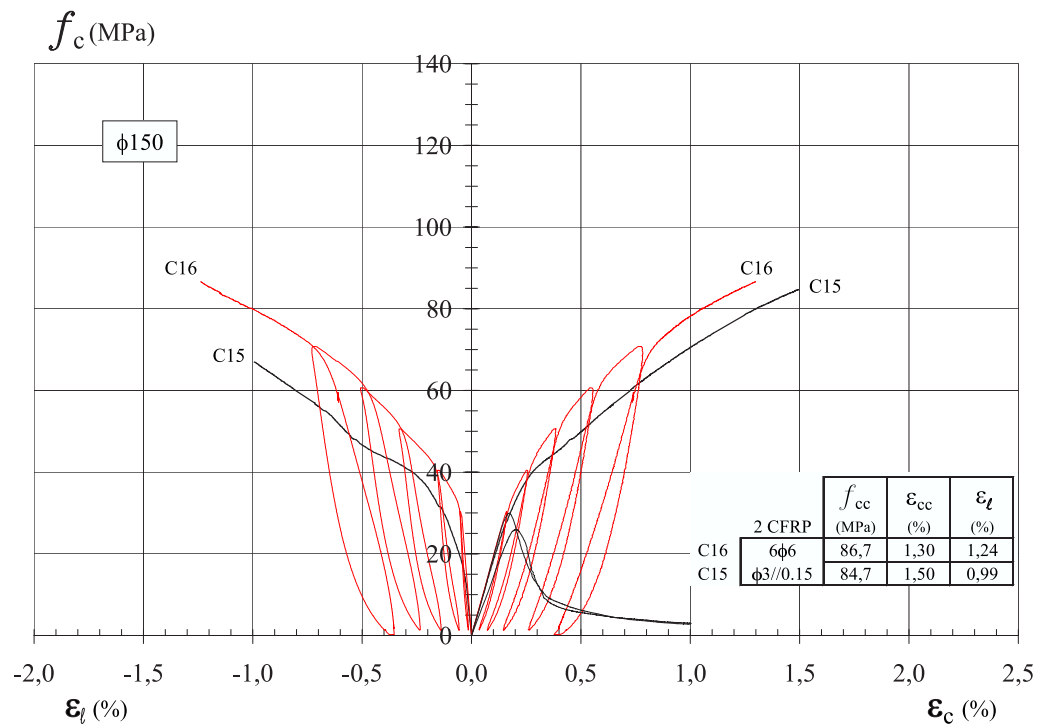


Figura 5.19: Diagramas tensão-deformação dos modelos C15 e C16 com cintas de Ø3//0.15 reforçados com 2 CFRP

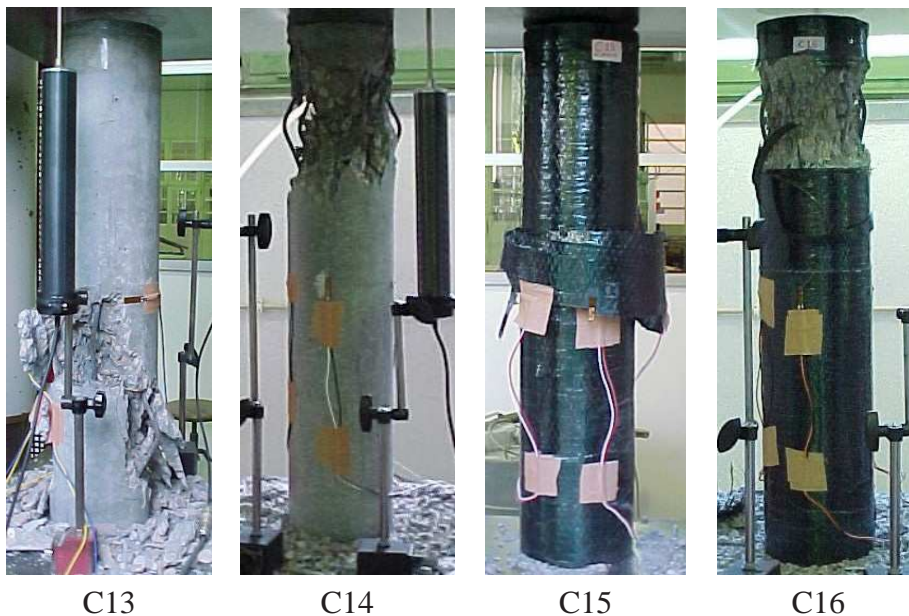


Figura 5.20: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado com cintas Ø3//0.15 reforçados ou não com 2 CFRP

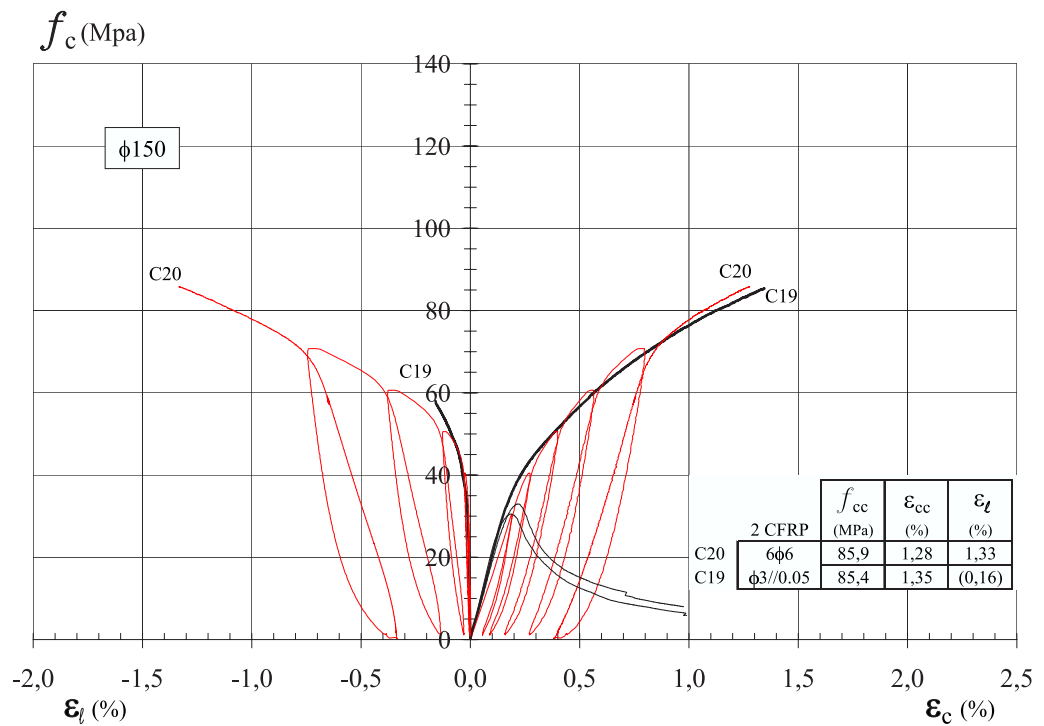


Figura 5.21: Diagramas tensão-deformação dos modelos C19 e C20 com cintas de Ø3//0.05 reforçados com 2 CFRP

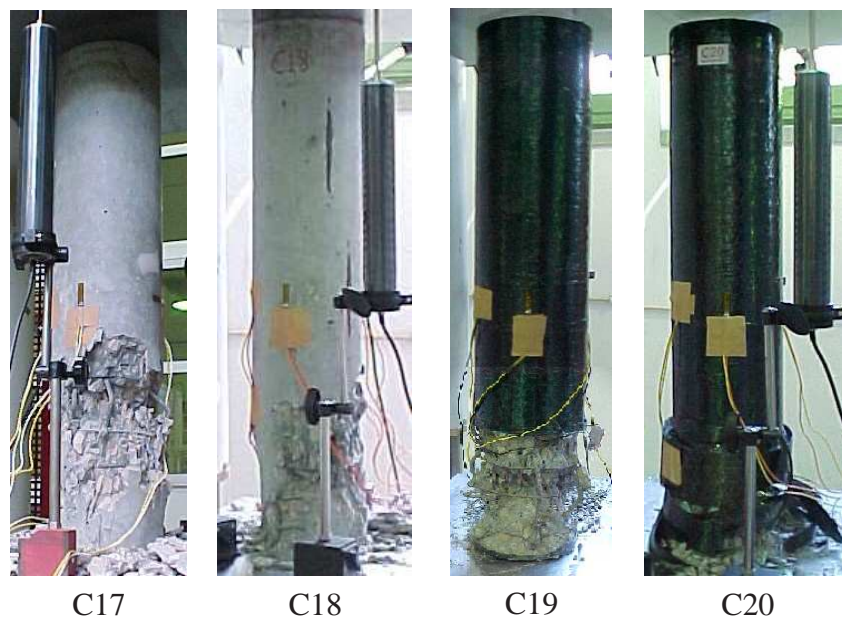


Figura 5.22: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado com cintas Ø3//0.05 reforçados ou não com 2 CFRP

de FRP e a sua contabilização poderá ser algo condicionada pelo nível de cintagem existente nos pilares a reforçar.

Na Figura 5.23 encontram-se indicadas as diversas curvas dos ensaios realizados monotonicamente com afastamento das cintas de $\text{Ø}3//0.15$, $\text{Ø}3//0.10$ e $\text{Ø}3//0.05$.

Observa-se que, independentemente da força de rotura, o primeiro ramo destas curvas é coincidente e que o andamento do segundo ramo nos diversos modelos é paralelo entre si e dependente do afastamento das cintas.

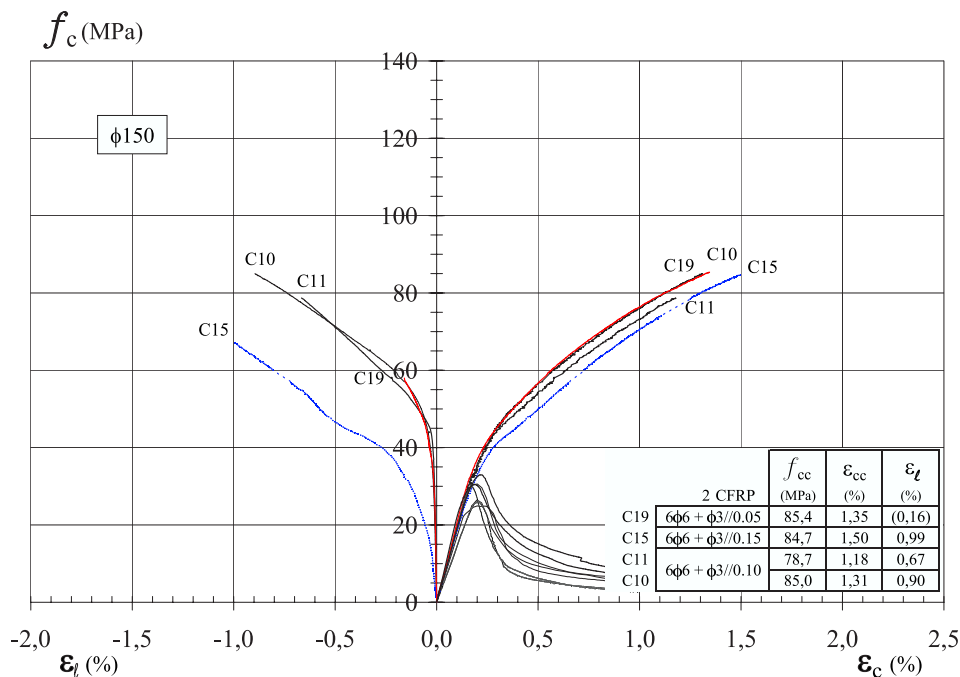


Figura 5.23: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com diferentes afastamentos das cintas, reforçados com 2 CFRP e sujeitos a cargas monotónicas

Da comparação dos modelos ensaiados com cargas cíclicas constata-se que, independentemente do afastamento das cintas, há uma grande sintonia no andamento das curvas, em especial nas curvas tensão-deformação axial. Uma explicação possível para este facto pode estar relacionada com o reduzido confinamento oferecido por qualquer dos afastamentos das cintas, o que pode ter permitido um certo ajuste entre os materiais durante o ensaio, tal como se verifica na compactação, e que terá levado a uma resposta mais uniforme por parte dos modelos.

Em termos de tensão de rotura e de deformação axial dos diversos modelos constata-se que as diferenças não são significativas. Por outro lado, em termos de deformação transversal, o andamento das curvas, apesar de ser similar em termos globais nos modelos C16 e C20, denota a existência de algum desfaseamento nos primeiros ciclos (incluindo no modelo C12), provavelmente por causa do afastamento diferente das cintas. No modelo C12, a partir dos 70 MPa, os extensómetros

transversais deixaram de funcionar, o que não permite avaliar totalmente o seu comportamento.

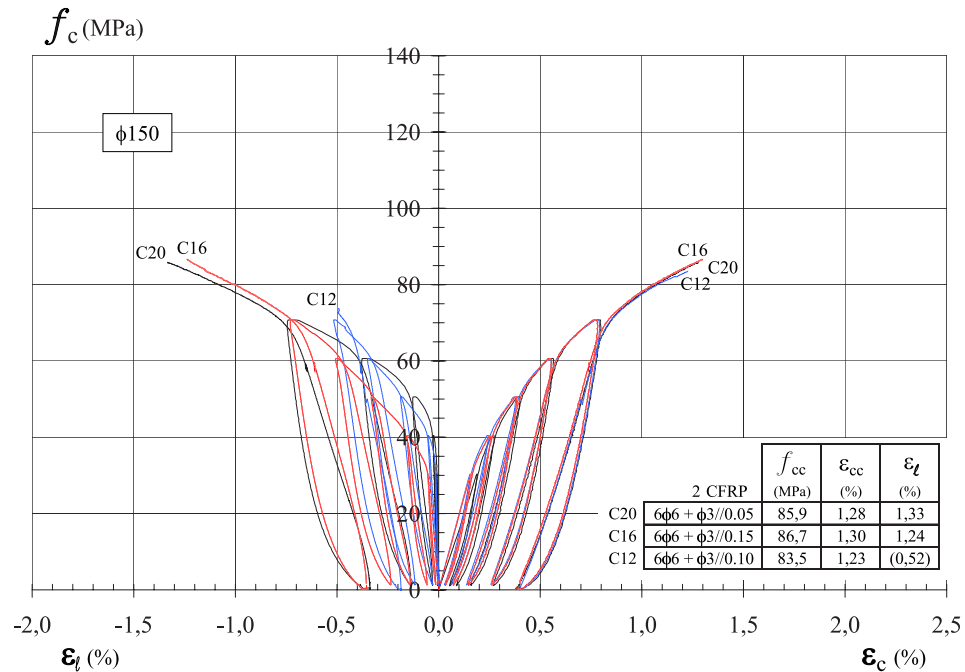


Figura 5.24: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado com diferentes afastamentos das cintas, reforçados com 2 CFRP e sujeitos a cargas cíclicas

5.2.3 Modelos de betão armado reforçados com GFRP

Na Figura 5.25 apresentam-se os diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado C24 e C25 com cintas $\phi3//0.10$ reforçados com três camadas de GFRP (*Tyfo*). Da observação das curvas dos ensaios verifica-se que a envolvente do modelo C25 sujeito a cargas cíclicas não acompanhou, a partir de certa altura, o andamento do modelo C24 sujeito a cargas monotónicas.

Atendendo a que ambos os modelos são de betão armado é de estranhar que o modelo C25 tenha na rotura valores inferiores em 22% em termos de força, de 25% em termos de extensão axial e de 19% em termos de extensão lateral em relação ao modelo C24 que possui as mesmas características.

As explicações para este desfazamento podem ser variadas. A primeira está associada ao facto de não se ter enrolado o tecido em torno da coluna da mesma forma devido a dificuldades associadas ao difícil manuseamento do tecido quando se encontrava totalmente impregnado. Veja-se na Figura 5.26 o desalinhamento existente nas fibras de côr mais amarelada que estão dispostas perpendicularmente à direcção principal das fibras de vidro, o que levou, inclusive, a que junto à base o modelo não tivesse sido devidamente encamisado, como se pode observar no pormenor

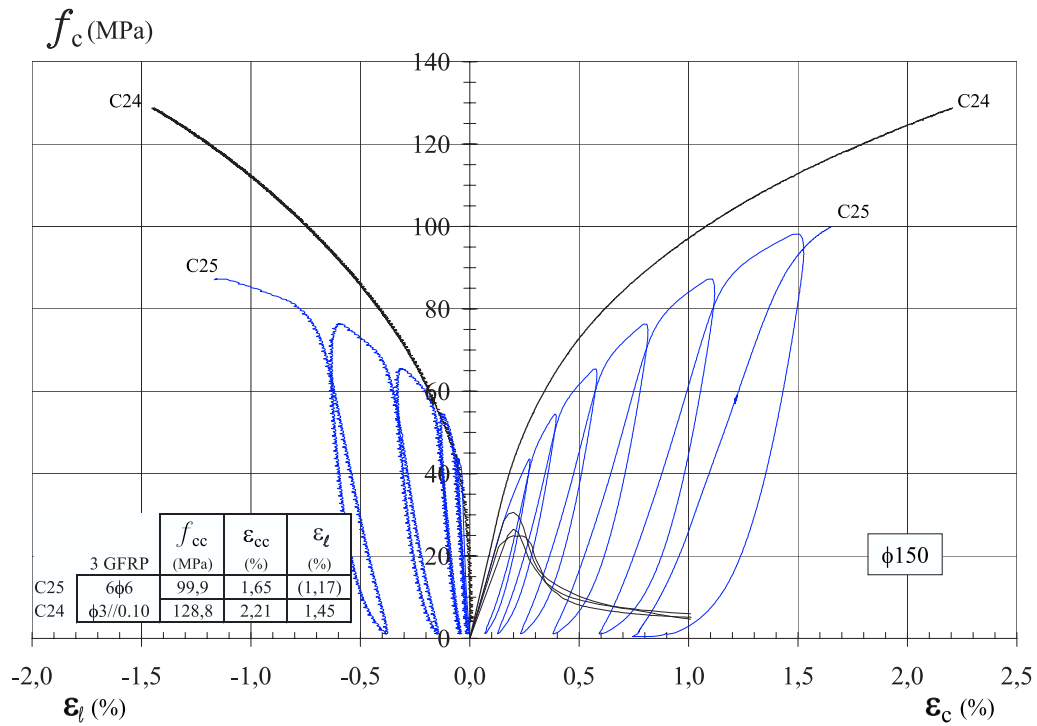


Figura 5.25: Diagramas tensão-deformação dos modelos C24 e C25 com cintas de Ø3//0.10 reforçados com 3 GFRP



Figura 5.26: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado com cintas Ø3//0.10 reforçados com 3 GFRP

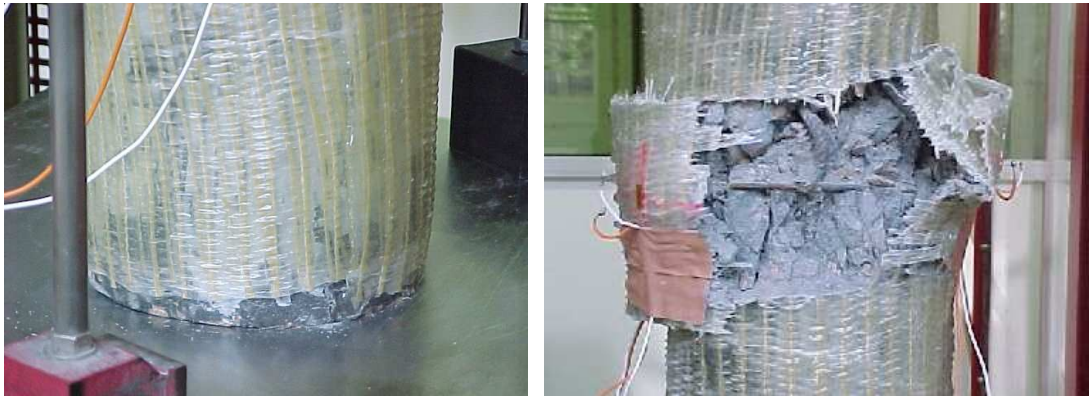


Figura 5.27: Pormenores do encamisamento e da rotura do modelo C25

da Figura 5.27. A segunda justificação pode estar, em parte, associada à primeira. Conforme se pode observar na Figura 5.27, existe uma abertura ou rotura da cinta nesta zona do modelo, que aconteceu muito provavelmente devido ao menor confinamento existente neste local, levando a uma perda precoce de capacidade resistente do modelo.

5.2.4 Comparação entre os modelos de betão armado reforçados com FRP

Na Figura 5.28 encontram-se representados os diagramas correspondentes aos modelos de betão armado reforçados com duas camadas de CFRP (C10 e C11) ou com três camadas de GFRP (C24) com cintas de $\varnothing 3//0.10$ e ensaiados monotonicamente.

A comparação directa entre estes modelos torna-se difícil porque a quantidade de fibra não é igual e, conseqüentemente, há uma diferença entre a rigidez do colete e a tensão lateral a que os modelos estão sujeitos na rotura. Tendo por base a extensão lateral na rotura em cada um dos modelos, pode-se estimar o correspondente valor da tensão lateral em 15,70 MPa no modelo C24, em 9,52 MPa no modelo C10 e em 7,09 MPa no modelo C11.

As extensões laterais na rotura dos diversos modelos (1,45% no C24, 0,90% no C10 e 0,67% no C11) não atingiram os valores da extensão de rotura obtida em provetes planos de FRP (2,18% no GFRP e 1,44% no CFRP (*Replark*)), o que implica que os valores obtidos para a tensão lateral na rotura são menores que os valores previstos para a mesma tensão (23,75 MPa para 3 GFRP e 15,24 MPa para 2 CFRP), caso considerássemos a extensão de rotura no FRP em vez da extensão lateral na rotura dos modelos.

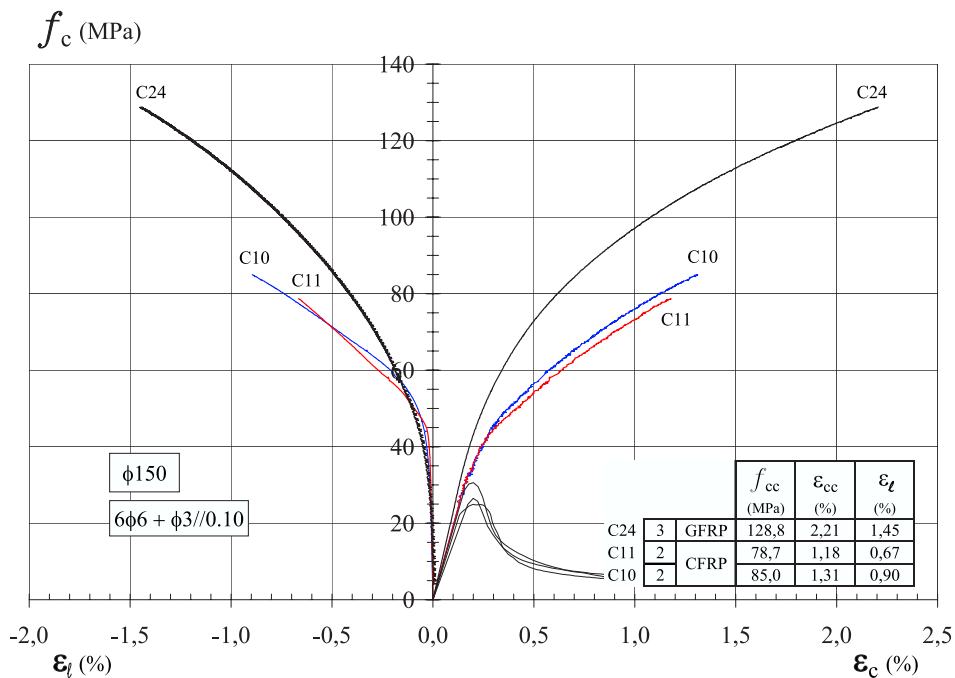


Figura 5.28: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com CFRP ou GFRP e sujeitos a cargas monotónicas

5.3 Comparação entre os modelos de betão simples e de betão armado com 150 mm de diâmetro

Na Figura 5.29 apresentam-se os diagramas correspondentes aos modelos ensaiados monotonicamente e reforçados com duas camadas de CFRP, em betão simples (C4) ou betão armado com afastamentos das cintas de 0,15 m (C15); 0,10 m (C10 e C11) ou 0,05 m (C19).

A comparação entre os modelos de betão armado e os modelos de betão simples reforçados com CFRP mantém o já referido na página 38: independentemente da tensão de rotura, o primeiro ramo destas curvas é coincidente e o andamento do segundo ramo da curva tensão-deformação axial nos diversos modelos é paralelo entre si e dependente do afastamento das cintas ou da não existência destas.

Em termos de tensão de rotura dos modelos de diâmetro 150 mm, reforçados com duas camadas de CFRP, verifica-se que o valor médio da tensão de rotura nos modelos de betão armado (C10, C11, C15 e C19) é de 83,5 MPa e nos modelos de betão simples (C4, C5 e C6) é de 77,0 MPa, o que significa um acréscimo de 6,5 MPa devido à existência de 6Ø6. Se considerarmos que a extensão axial média na rotura dos modelos de betão armado ronda os 1,4% e que a tensão de cedência no aço é de 458 MPa, de acordo a caracterização do aço apresentada em ??, isto significa um

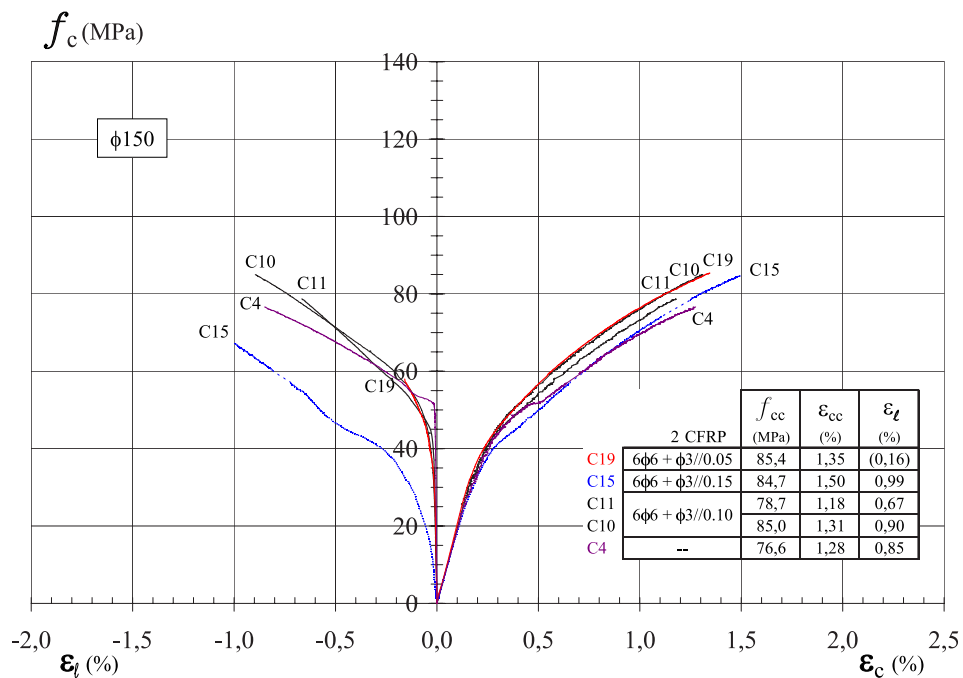


Figura 5.29: Diagramas tensão-deformação de modelos de betão simples ou armado reforçados com 2 CFRP e sujeitos a cargas monotónicas

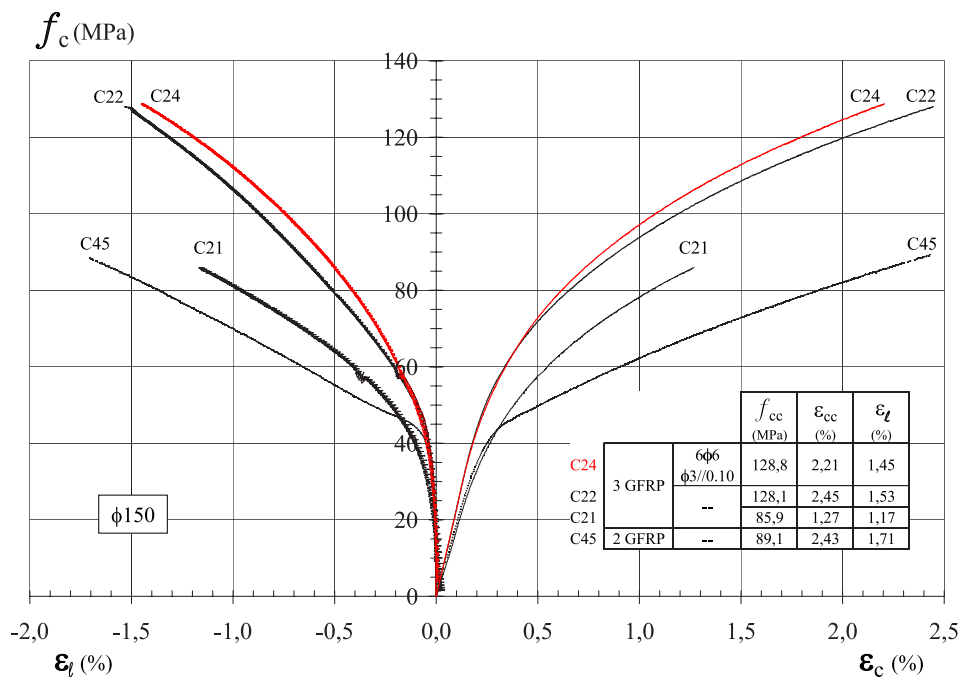


Figura 5.30: Diagramas tensão-deformação de modelos de betão simples ou armado reforçados com 2 ou 3 GFRP e sujeitos a cargas monotónicas

acréscimo de capacidade resistente no modelo de 4,4 MPa devido apenas à armadura existente (6Ø6), justificando-se, desta forma, o valor médio do acréscimo registado de 6,5 MPa.

Na Figura 5.30 apresentam-se os diagramas correspondentes aos modelos ensaiados monotonicamente: de betão simples reforçado com duas (C45) ou com três camadas de GFRP (C21 e C22) e de betão armado, com cintas de Ø3//0.10 (C24), reforçado com três camadas de GFRP.

Se observarmos os diagramas da Figura 5.30 constata-se que a tensão de rotura do modelo de betão armado (C24) é muito semelhante à do modelo de betão simples (C22). Contudo, há que realçar que a rotura do modelo C24 se deu junto à base do modelo (Figura 5.26), o que pode significar que a sua capacidade resistente não se encontrava completamente esgotada na altura da rotura. Se compararmos a diferença entre os valores das tensões de compressão nos modelos C22 e C24, para o valor da extensão axial correspondente à rotura do modelo C24 (2,21%), verifica-se que é de 5,3 MPa, o que corresponde à mesma ordem de grandeza dos 4,4 MPa referidos anteriormente como sendo a contribuição das armaduras para a capacidade resistente do modelo. O comportamento relativo entre os modelos de betão simples reforçados com GFRP (C21, C22 e C45) já foi abordado na página 28.

Nas Figuras 5.31 e 5.32 comparam-se os diagramas referentes aos modelos ensaiados com cargas cíclicas de betão simples reforçados com CFRP (C26) ou com GFRP (C27) com os de betão armado, com cintas de Ø3//0.10 e reforçados com CFRP (C12) ou GFRP (C25).

A análise dos diagramas tensão-deformação axial dos modelos C12 e C26 mostra que estes são similares em termos dos respectivos diagramas envolventes e em termos de tensão de rotura obtida. Porém, os ramos ascendentes e descendentes do digrama do modelo de betão armado (C12) são mais inclinados que os do modelo de betão simples (C26), o que é natural dada a maior rigidez conferida ao modelo pelas respectivas armaduras. Em termos do diagrama tensão-deformação lateral não é possível retirar conclusões porque no modelo C12 os extensómetros deixaram de funcionar a partir de certa altura e no modelo C26 a rotura do modelo deu-se junto à base e os extensómetros estavam colocados a meia altura, o que influenciou as leituras realizadas.

A comparação dos modelos C25 e C27 patentes na Figura 5.32 está condicionada pelo facto já referido de o modelo C25 ter tido um desempenho bastante inferior ao modelo correspondente e ensaiado monotonicamente, de acordo com o já referido na página 39, e como tal, não ser de todo possível fazer uma análise comparativa.

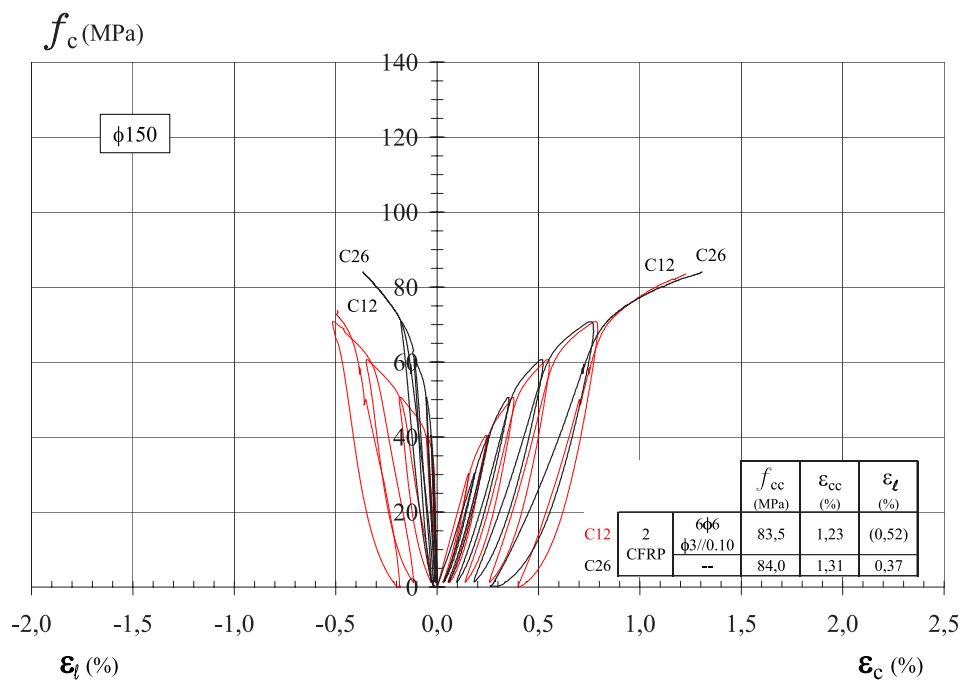


Figura 5.31: Diagramas tensão-deformação de modelos de betão simples ou armado reforçados com 2 CFRP e sujeitos a cargas cíclicas

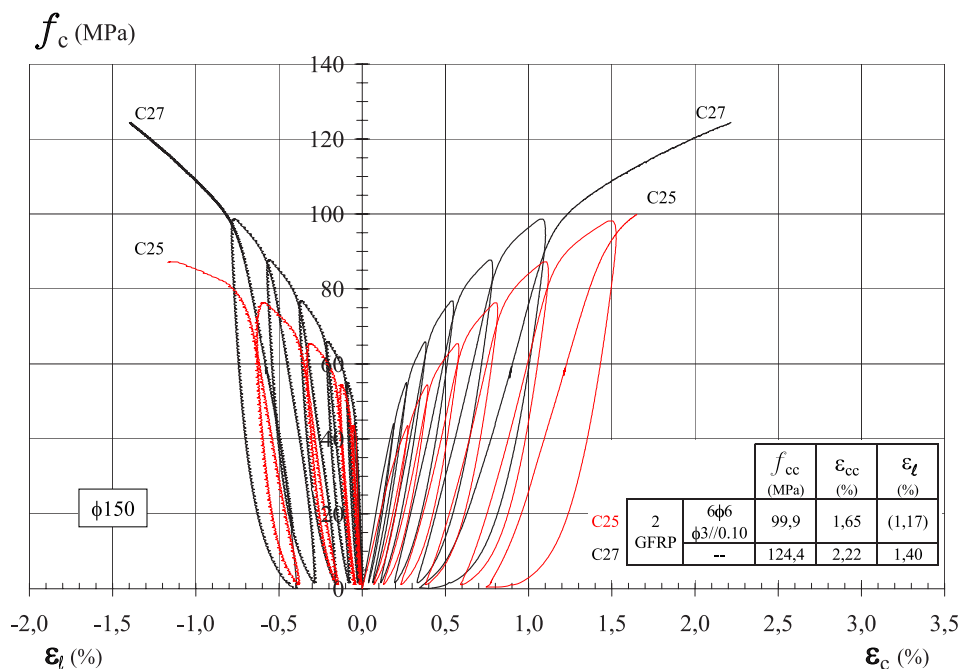


Figura 5.32: Diagramas tensão-deformação de modelos de betão simples ou armado reforçados com 3 GFRP e sujeitos a cargas cíclicas

5.4 Modelos de betão armado com 150 mm de diâmetro realizados na UNL

Na Figura 5.33 apresentam-se seis ensaios realizados na UNL no âmbito da tese de mestrado da Engenheira Raquel de Paula [11]. Todos os modelos têm secção circular com 150 mm de diâmetro e 750 mm de altura. A referência a estes modelos justifica-se por se tratar de ensaios de modelos de betão armado com 150 mm de diâmetro e encamisados com duas camadas de CFRP-*MBrace* - o sistema utilizado nos modelos da segunda série com 250 mm de diâmetro reforçados com CFRP. Assim, com a referência a estes ensaios será possível comparar o comportamento dos modelos de 250 com os de 150 mm de diâmetro reforçados com o mesmo sistema e ensaiados monotonicamente.

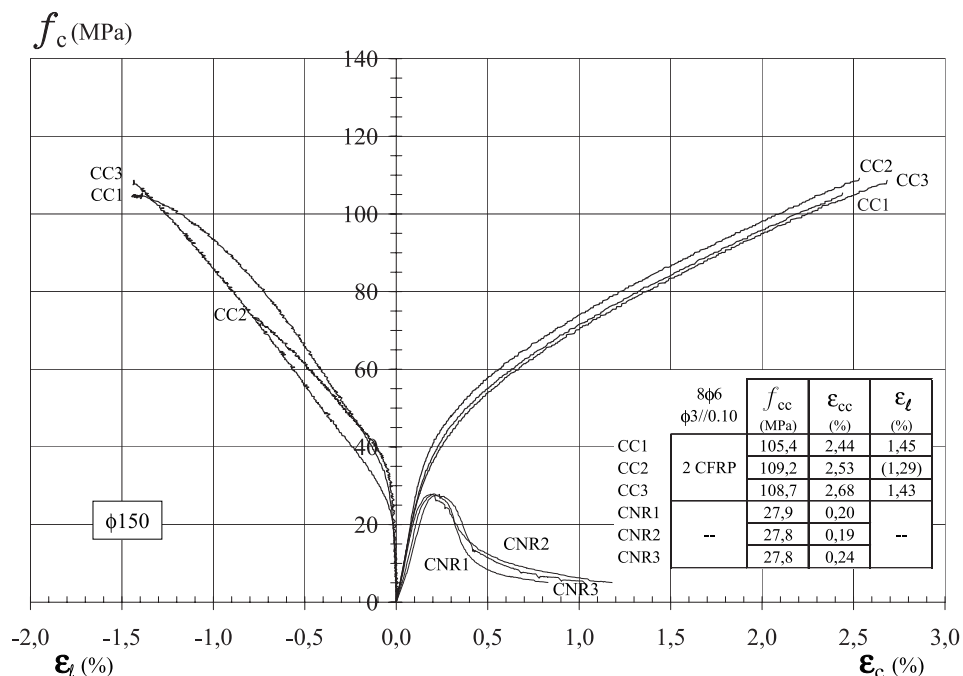


Figura 5.33: Diagrama tensão-deformação axial dos modelos realizados na UNL [11]

Dos seis modelos apresentados três são de betão armado (8Ø6 e cintas de 3//0.10) e designam-se por CNR1, CNR2 e CNR3 e três são de betão armado reforçados com duas camadas de CFRP (*MBrace* C1-30) e designam-se por CC1, CC2 e CC3.

O comportamento dos modelos não reforçados é bastante uniforme, sendo o valor médio da tensão de rotura dos três ensaios de 27,8 MPa e o valor médio da extensão axial de 0,21%. O comportamento dos modelos reforçados com duas camadas de CFRP também é uniforme, sendo o valor médio da tensão de rotura à compressão de 107,8 MPa e o valor médio da extensão axial de 2,55%. O valor médio da extensão lateral dos modelos CC1 e CC3 é de 1,44%, não se considerando para o efeito o modelo

CC2 uma vez que a dada altura os extensómetros deixaram de funcionar.

5.5 Modelos de betão simples com 250 mm de diâmetro

Um dos objectivos da realização da segunda série de ensaios com colunas de 250 mm de diâmetro e 750 mm de altura foi a avaliação da capacidade resistente à compressão axial dos pilares ensaiados à flexão composta. Realizaram-se dez ensaios em modelos de betão armado com ou sem FRP e cujos resultados se apresentam na secção 5.6 e seguintes. Outro dos objectivos complementares foi o de realizar alguns ensaios de colunas que permitissem comparar o seu desempenho com o dos ensaios já realizados nos modelos com 150 mm de diâmetro e verificar principalmente o efeito do aumento da secção no comportamento dos modelos. Neste sentido, além dos dez ensaios em modelos de betão armado realizaram-se outros oito reforçados com FRP e ainda mais seis ensaios em modelos de betão simples, quatro dos quais reforçados com FRP e cujos resultados se apresentam nesta secção. Dos ensaios realizados nesta série, nove foram ensaiados monotonicamente e sete sob o efeito de cargas cíclicas.

Atendendo ao maior controlo de qualidade realizado no fabrico dos modelos desta série, optou-se por realizar apenas dois modelos para cada tipo de reforço considerado, sendo um dos modelos ensaiado monotonicamente e outro sob o efeito de cargas cíclicas. Tendo em conta a instrumentação efectuada nos modelos com 250 mm de diâmetro, passou-se a dispôr nos ensaios destes modelos de uma informação adicional e que foi o andamento em altura da extensão lateral. Assim, e, independentemente do número de extensómetros colocados, passa-se a mostrar para cada modelo um diagrama representativo do andamento da extensão lateral ao longo da sua altura, onde será possível observar, quer em altura, quer para diferentes níveis de carga ou de deslocamento, o andamento da extensão lateral resultante da média dos valores obtidos nos três extensómetros colocados em cada nível. Além destas curvas representam-se em cada diagrama e a tracejado as curvas correspondentes à extensão lateral máxima obtida em cada alinhamento vertical de extensómetros (veja-se Figura 5.38).

Estes diagramas permitem obter duas informações muito importantes. A primeira corresponde à distância da base do modelo a que ocorreu a rotura, dado que as extensões máximas nem sempre se verificam a meia altura do modelo; a segunda relaciona-se com a obtenção dos valores máximos da extensão lateral em cada um dos alinhamentos (veja-se Figura 4.5), que é um indicador fundamental para poder comparar com o valor médio da extensão obtida em provetes planos de FRP.

Nos modelos com uma (C41), duas (C34), três (C43) ou quatro camadas de CFRP (C44) pormenorizou-se um pouco mais a informação, indicando o andamento em altura da extensão lateral para os três alinhamentos verticais de extensómetros, bem como o respectivo andamento da extensão lateral resultante da média dos três alinhamentos. Por uma questão de coerência com os resultados dos modelos de 150 mm de diâmetro, optou-se por continuar a registar nos diagramas tensão-deformação desta série a extensão lateral média a meia altura do modelo.

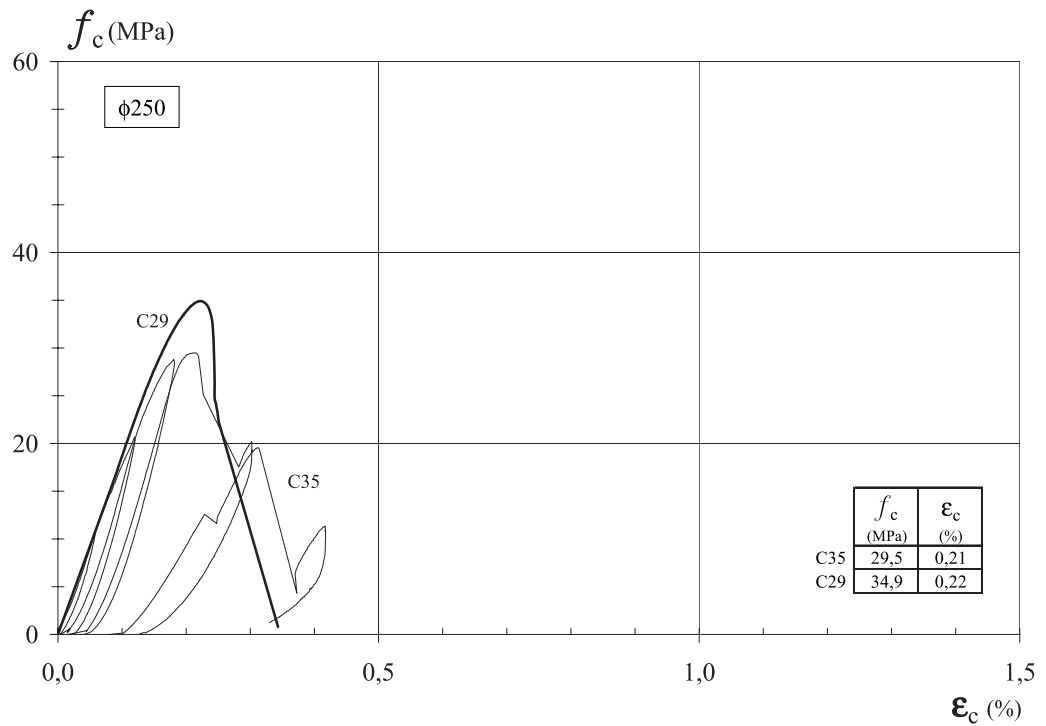


Figura 5.34: Diagrama tensão-deformação axial dos modelos de betão simples sujeitos a cargas monotónicas (C29) ou cíclicas (C35)



Figura 5.35: Aspecto da rotura dos modelos de betão simples

5.5.1 Modelos de betão simples não reforçados com FRP

Realizaram-se dois ensaios em modelos de betão simples não reforçados com FRP, cujos resultados se apresentam na Figura 5.34 sendo os respectivos modos de rotura indicados na figura 5.35. No modelo C29, ensaiado monotonicamente, obteve-se uma tensão de rotura de 34,9 MPa e uma extensão axial na rotura de 0,21%, enquanto no modelo C35, ensaiado com cargas cíclicas, se obteve uma tensão de rotura de 29,5 MPa e uma extensão axial na rotura de 0,22%. A tensão média de rotura obtida nos ensaios de caracterização deste betão à data do ensaio foi de $f_{cm}=35,2$ MPa.

Recorrendo uma vez mais à expressão 5.1, pode-se estimar o valor de f_c nos modelos com 250 mm de diâmetro (D) e 750 mm de altura (h) partindo do valor de $f_{cm}=35,2$ MPa. O que significa:

$$f_{250 \times 750} = \frac{1,5 + \frac{250}{750}}{2} \times f_{cm} \quad (5.3)$$

$$f_{250 \times 750} = 0,917 \times f_{cm} = 0,917 \times 35,2 = 32,3 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

Refira-se apenas (a amostra não pode ser considerada significativa dadas as diferentes condições de ensaio e o número de provetes) que o resultado obtido do ensaio do modelo C29 é cerca de 8% superior ao valor estimado pela expressão 5.4. Mas é praticamente igual à média (32,2 MPa) dos valores do ensaio do modelo C29 (cargas monotónicas) e do modelo C35 (cargas cíclicas).

5.5.2 Modelos de betão simples reforçados com CFRP

Apresentam-se na Figura 5.36 os diagramas tensão-deformação dos modelos C33 e C39 de betão simples reforçados com duas camadas de CFRP (*MBrace*).

O modelo C33 foi ensaiado monotonicamente, enquanto o modelo C39 foi ensaiado com cargas cíclicas. Na figura 5.38 é possível observar a rotura dos referidos modelos, bem como o andamento das respectivas extensões laterais. Em ambos os modelos a rotura do modelo ocorreu essencialmente devido ao descolamento interlaminar do tecido, com o conseqüente desenrolamento do mesmo, o que provocou a rotura de algumas fibras.

Da observação dos diagramas tensão-deformação constata-se que a envolvente do diagrama cíclico do modelo C39 tem um andamento ligeiramente abaixo do diagrama monotónico do modelo C33. Contudo, o modelo C39 regista em relação ao modelo C33 valores superiores da tensão de rotura e das extensões axial e lateral.

O troço inicial do diagrama monotónico (C33) apresenta-se linear até cerca dos 45 MPa, o que corresponde a aproximadamente 30% (10 MPa) acima da tensão de rotura do modelo de betão simples não reforçado.

Em termos de andamento do diagrama cíclico verifica-se que nos ciclos acima de 0,3% o ramo ascendente do diagrama, que até esta altura era quase paralelo ao diagrama monotónico, passa a ter uma menor inclinação fruto da perda de rigidez do modelo.

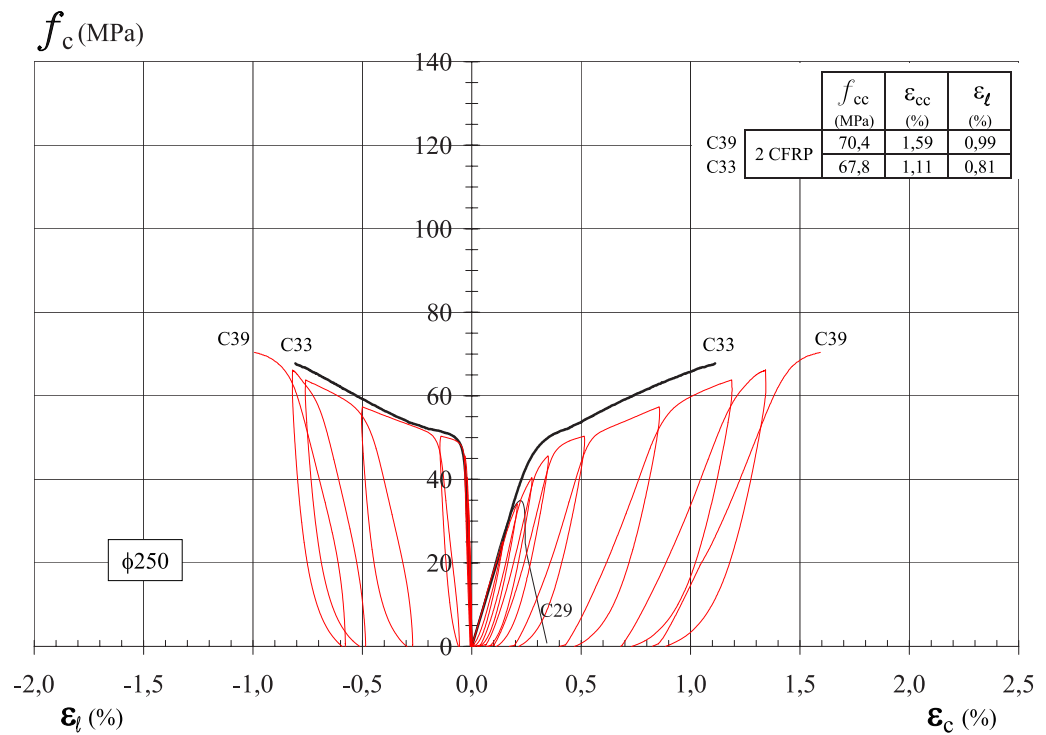


Figura 5.36: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples reforçados com 2 CFRP sujeitos a cargas monotónicas (C33) ou cíclicas (C39)

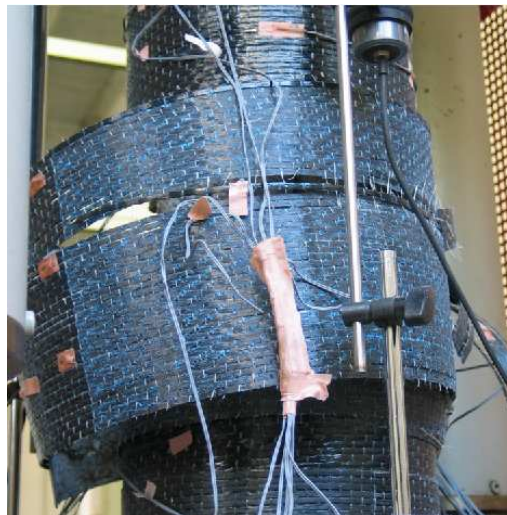


Figura 5.37: Aspecto da rotura por descolamento interlaminar do CFRP

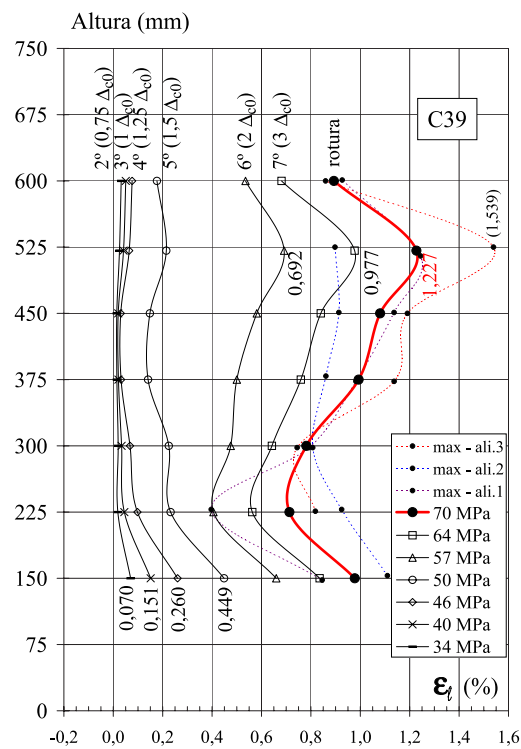
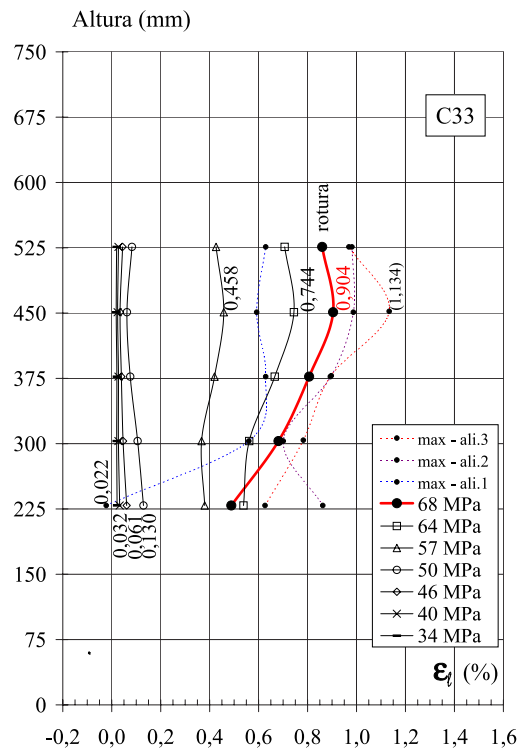


Figura 5.38: Modo de rotura e andamento das extensões laterais dos modelos C33 e C39

Na Figura 5.38 pode observar-se que a extensão lateral máxima no modelo C33 ocorreu no alinhamento vertical 3 (1,13%) a 450 mm de altura do provete, enquanto no modelo C39 a extensão lateral máxima ocorreu no alinhamento 3 para 1,54% a 525 mm de altura do modelo. Os valores médios das extensões laterais para os referidos níveis foram respectivamente de 0,90% no modelo C33 e de 1,28 % no modelo C39. Refira-se ainda que o diagrama tensão-deformação lateral indicado na Figura 5.36 corresponde ao andamento da extensão lateral média a meia altura do modelo, o que neste caso conduz a valores inferiores (C33-0,81% e C39-0,99%) aos obtidos nas secções de máxima deformação referidos anteriormente (C33-0,90% e C39-1,28%).

O descolamento do tecido entre camadas (Figura 5.37) faz pressupor que a rotura do modelo foi precoce e que uma maior impregnação do tecido com resina poderia melhorar o comportamento do modelo reforçado com este sistema.

5.5.3 Modelos de betão simples reforçados com GFRP

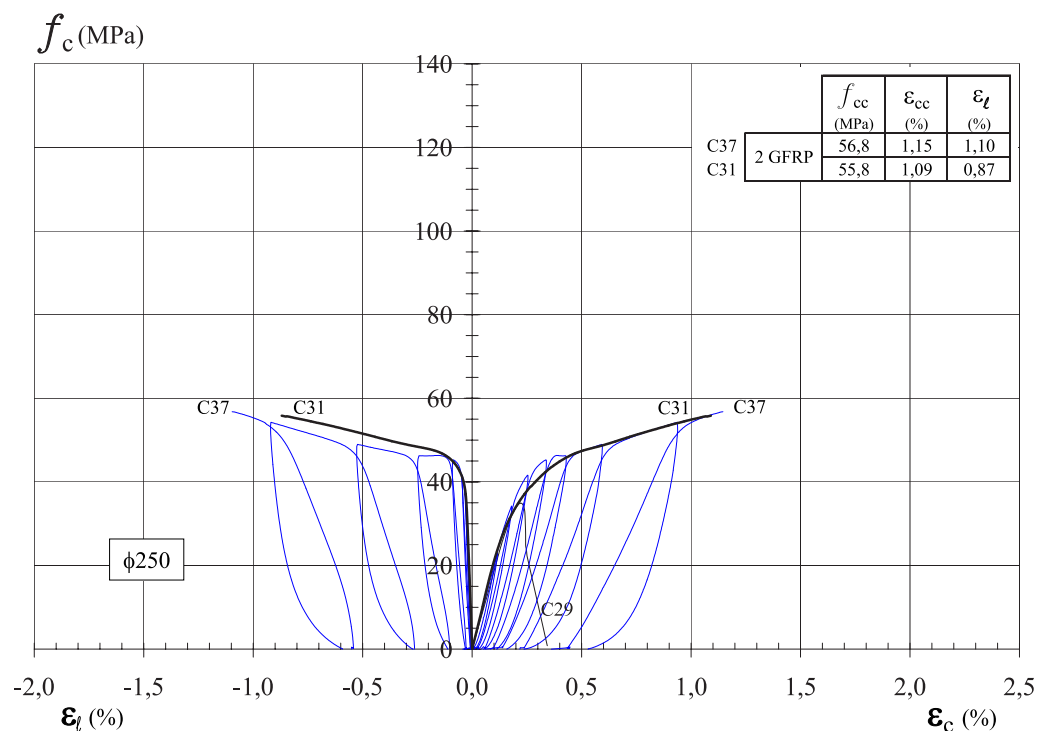


Figura 5.39: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples reforçados com 2 GFRP sujeitos a cargas monotónicas (C31) ou cíclicas (C37)

Na Figura 5.39 estão representados os diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples ensaiados com cargas monotónicas (C31) ou cíclicas (C37) reforçados com duas camadas de GFRP (*Tyfo*) e na Figura 5.40, para além de um aspecto geral dos modelos C31 e C37 após a rotura, é possível observar o andamento

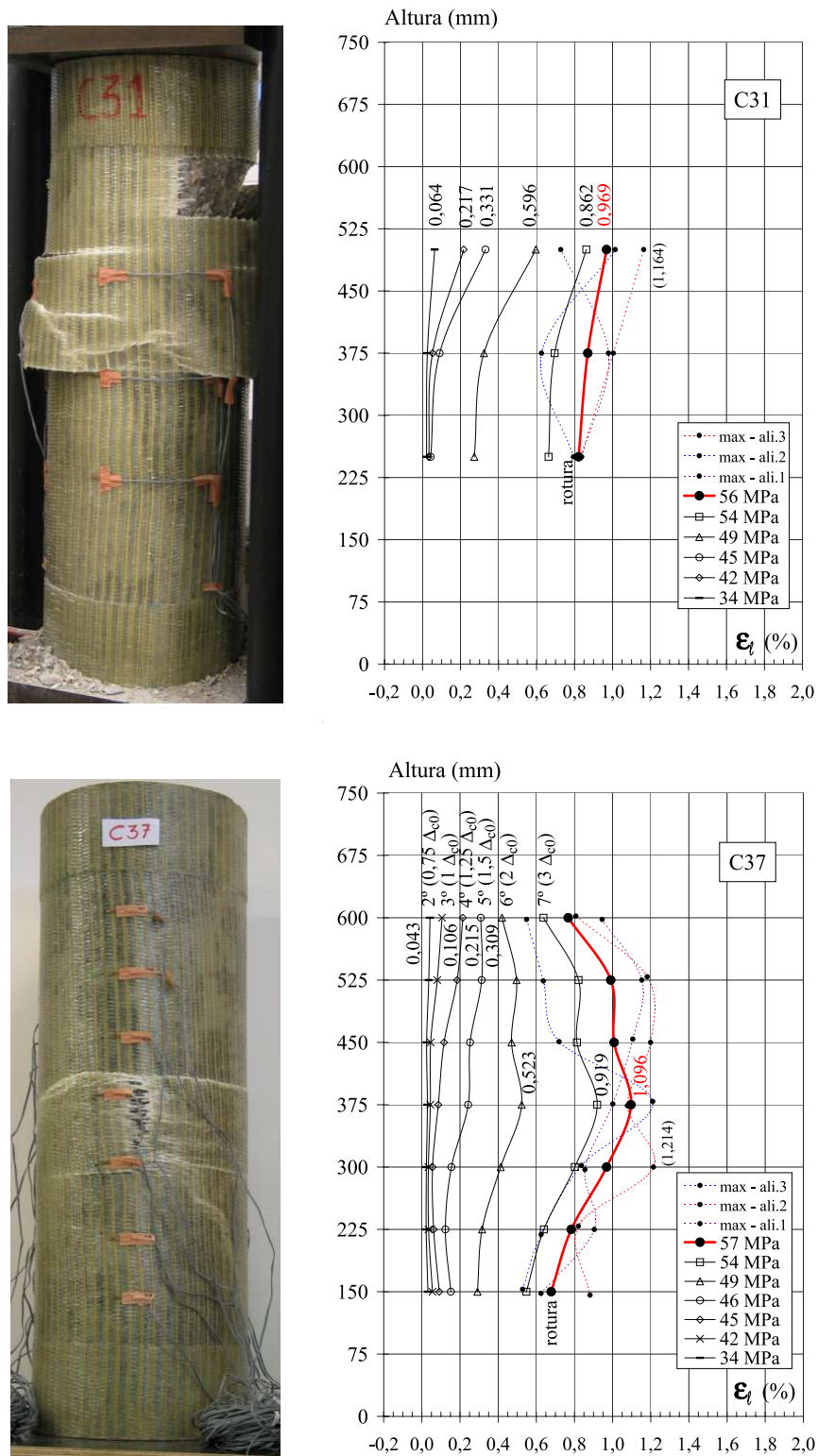


Figura 5.40: Modo de rotura e andamento das extensões laterais dos modelos C31 e C37

das respectivas extensões laterais. Verifica-se que, ao contrário dos modelos anteriores reforçados com CFRP, a rotura das colunas ocorreu por rotura das fibras.

O andamento do diagrama monotónico e da envolvente do diagrama cíclico é muito similar, coincidindo mesmo no caso do diagrama tensão-deformação axial para valores da extensão axial superiores a 0,4%. O diagrama monotónico inflecte rapidamente para a inclinação do segundo troço assim que atinge o valor da tensão de rotura do modelo monotónico. Para valores da extensão axial entre 0,2% e 0,4% o diagrama cíclico apresenta valores ligeiramente acima do diagrama monotónico.

Em termos de comportamento na rotura verifica-se que o modelo ensaiado com cargas cíclicas regista valores ligeiramente superiores ao modelo ensaiado monotonicamente.

Pode observar-se na Figura 5.40 que a extensão lateral máxima de 1,16% ocorreu a 500 mm de altura no modelo C31 e a 300 mm de altura no modelos C37 (1,214%). Constata-se ainda que neste modelo (C37) o valor máximo da extensão lateral média (1,10%) ocorre a meia altura do modelo e não na secção onde se deu a extensão lateral máxima. Refira-se ainda que os valores das extensões laterais registados na rotura destes modelos são significativamente menores do que os valores da extensão na rotura obtidos em provetes planos (2,17%) e mesmo bastante inferiores aos valores observados nos modelos de betão armado reforçados com GFRP. Este facto é estranho porque a rotura deu-se pela fibra e existem extensómetros junto ao local onde ocorreu a rotura da fibra, como se pode observar na Figura 5.40 (C37).

5.5.4 Comparação entre os modelos de betão simples reforçados com FRP

Apresentam-se na Figura 5.41 os diagramas dos modelos de betão simples reforçados com FRP e ensaiados monotonicamente e na Figura 5.42 os diagramas dos correspondentes modelos ensaiados com cargas cíclicas.

Em termos de ensaios monotónicos verifica-se que o modelo reforçado com CFRP exhibe uma tensão de rotura de 67,8 MPa, 21,5% acima do modelo reforçado com GFRP (55,8 MPa) e 94% acima do modelo de betão simples não reforçado (34,9 MPa). Quer as extensões axiais quer as extensões laterais possuem valores da mesma ordem de grandeza nos dois modelos, embora a extensão lateral máxima no modelo C31 seja apenas de 54% do valor de rotura num provete plano de GFRP, enquanto no modelo C33 a mesma extensão atinge 70% da extensão de rotura de um provete plano de CFRP.

Relativamente aos modelos C37 e C39 ensaiados com cargas cíclicas, constata-se que o seu comportamento global é similar ao dos modelos ensaiados monotonicamente. Revelam, contudo, valores superiores quer das extensões axiais quer das extensões laterais relativamente a estes modelos.

Ao contrário do andamento na rotura dos modelos C31 e C33, o modelo C39 regista valores significativamente superiores da extensão axial (1,59%) e da extensão lateral máxima na rotura (1,54%) comparativamente com o modelo C37 que apresenta, respectivamente, valores de 1,15% e de 1,10% para as mesmas extensões.

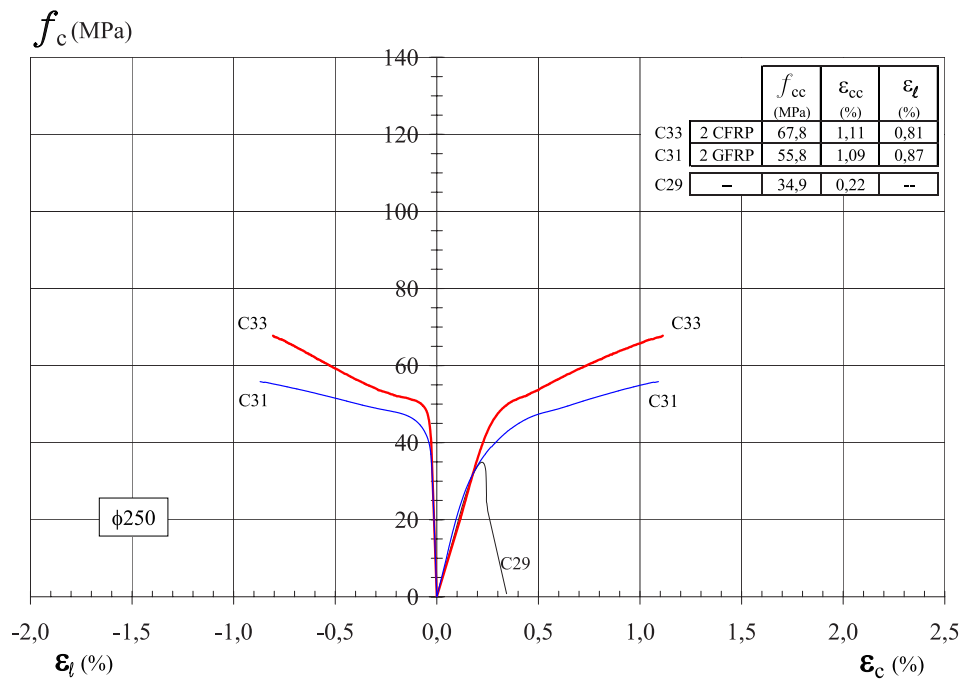


Figura 5.41: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples reforçados com CFRP ou GFRP e sujeitos a cargas monotónicas

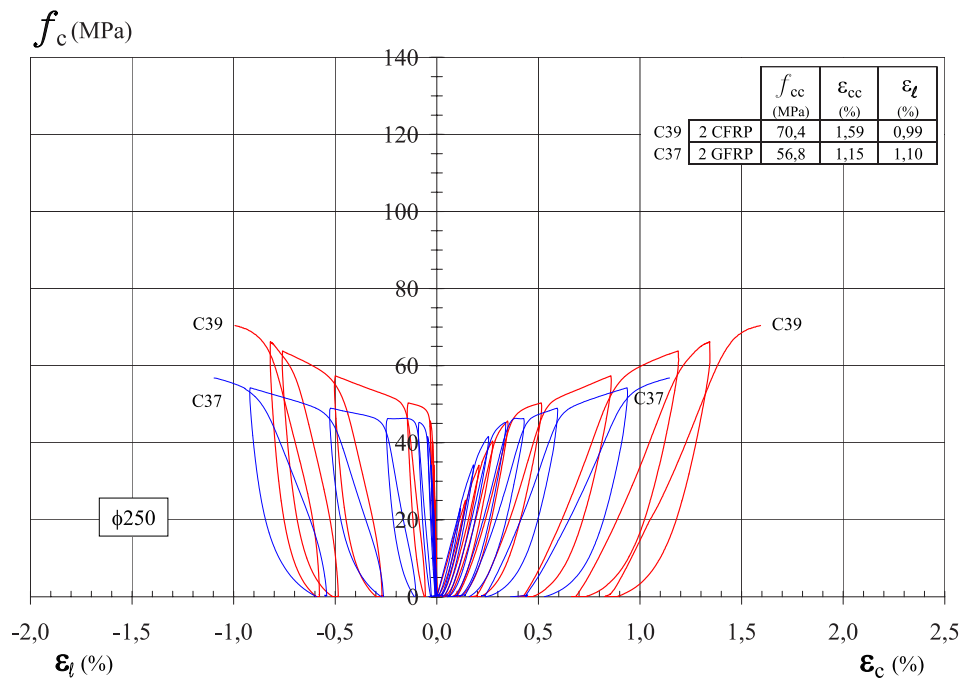


Figura 5.42: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples reforçados com CFRP ou GFRP e sujeitos a cargas cíclicas

Um aspecto que se pode observar na comparação dos modelos C37 e C39 é o da maior inclinação do ramo ascendente do diagrama cíclico do modelo C39 (CFRP) comparativamente com o modelo C37 (GFRP), a que não deverá ser alheia a rigidez do colete de FRP condicionada pelo valor superior do módulo de elasticidade do CFRP.

5.6 Modelos de betão armado com 250 mm de diâmetro

5.6.1 Modelos de betão armado não reforçados com FRP

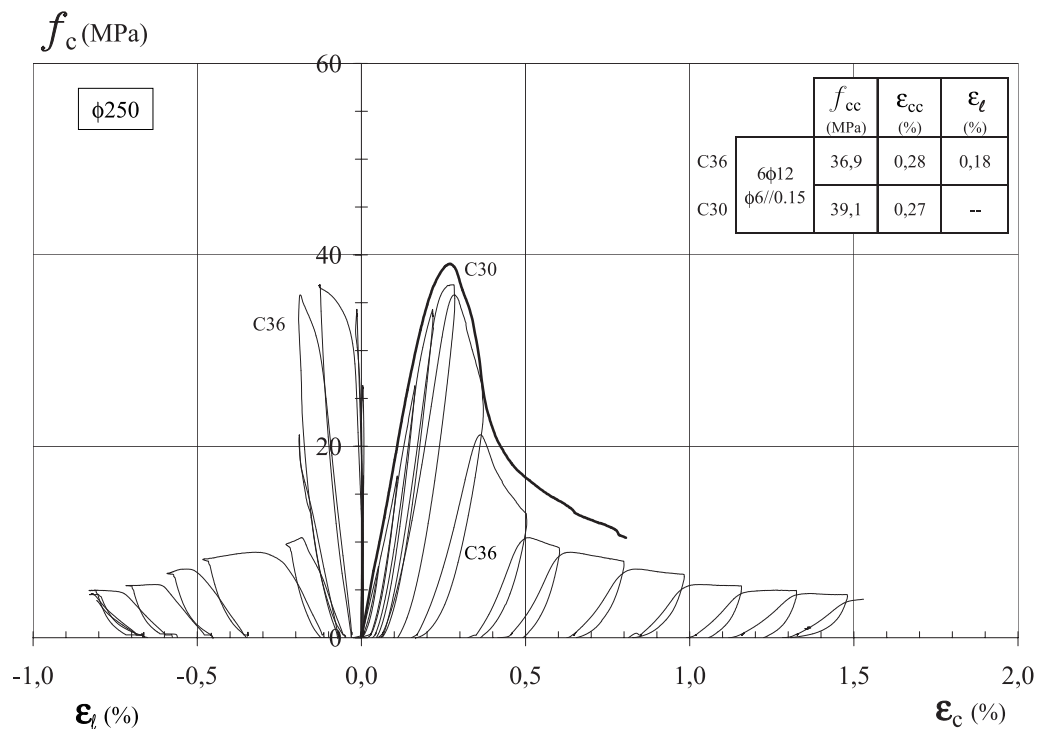


Figura 5.43: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado sujeitos a cargas monotónicas (C30) ou cíclicas (C36)

Nesta série foram ensaiados dois modelos de betão armado não reforçados com FRP, o modelo C30 sob a acção de cargas monotónicas e o modelo C36 de com cargas cíclicas.

O modelo C36 foi instrumentado com cinco extensómetros colocados ao nível das cintas, o que permitiu conhecer melhor o comportamento do modelo de betão armado.

Na Figura 5.43 apresentam-se os diagramas tensão-deformação obtidos para os modelos C30 e C36 e na Figura 5.44 o aspecto da rotura dos referidos modelos. Pode-se constatar da observação dos diagramas que o andamento da envolvente do diagrama cíclico é praticamente coincidente com o andamento do correspondente diagrama monotónico. Em termos de valores máximos verifica-se a mesma coincidência,

existindo apenas uma diferença de 2,2 MPa em termos de tensão máxima de compressão e de 0,01% em termos de extensão axial máxima correspondente.

No diagrama da Figura 5.44, representando o andamento em altura da extensão lateral no modelo C36, observa-se que a extensão lateral máxima (0,18%) ocorreu no 5º ciclo a 675 mm de altura do modelo, tendo o mesmo suportado mais um ciclo a uma tensão semelhante mas com uma extensão lateral que aumentou para 0,23%. Nos dois ciclos seguintes consolidou-se a rotura do modelo, tendo a tensão diminuído para 21 MPa e depois para 10 MPa e a extensão lateral máxima deixado de ocorrer na cinta a 675 mm de altura para passar a ocorrer na cinta inferior a 525 mm de altura até ao fim do ensaio, que aconteceu para uma resistência do modelo de 5 MPa e uma extensão na cinta de aproximadamente 0,8%.

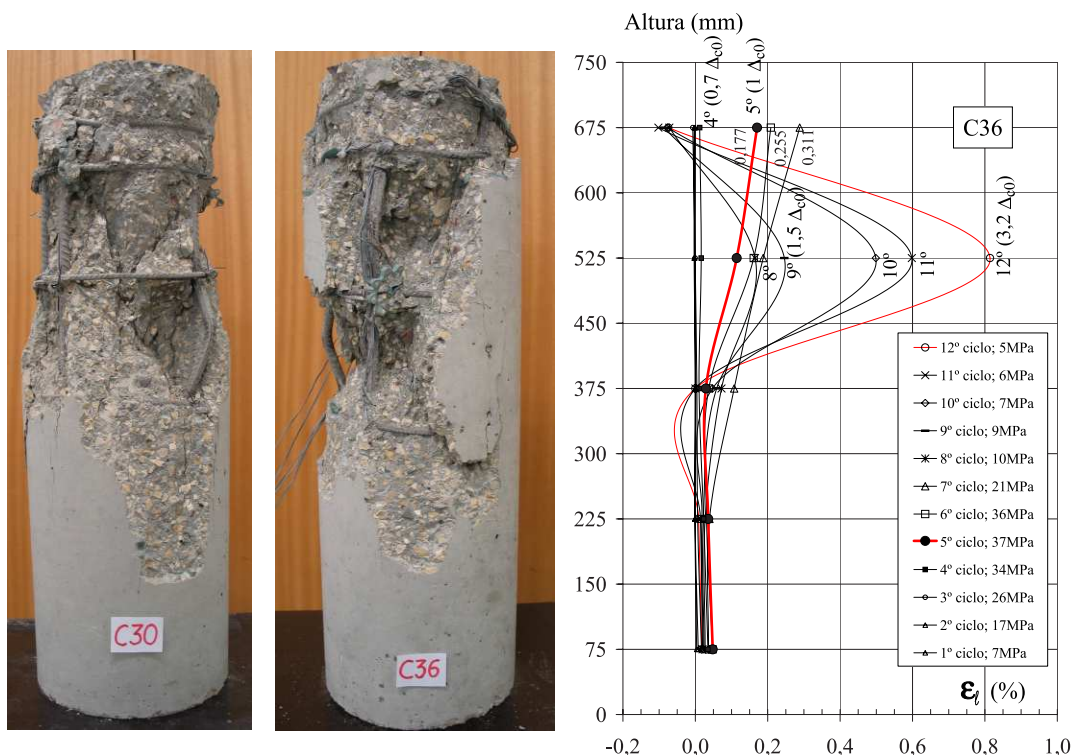


Figura 5.44: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado e andamento em altura das extensões laterais do modelo C36

5.6.2 Modelos de betão armado reforçados com CFRP

Um dos objectivos deste estudo era saber qual o comportamento dos modelos de betão armado para diferentes níveis de confinamento com FRP. Tendo em conta este propósito, considerou-se o betão como um parâmetro fixo, bem como as armaduras e em especial o seu afastamento (cintas de 6//0.15), tendo-se variado o número de

camadas de CFRP (mantendo as duas camadas como uma referência de comparação) e o tipo de carregamento em alguns dos modelos. Assim, reforçaram-se com uma camada de CFRP os modelos C41 e C42, com duas os modelos C34 e C40 e com três e quatro camadas os modelos C43 e C44, respectivamente. Os modelos C34, C41, C43 e C44 foram ensaiados monotonicamente, enquanto os modelos C40 e C42 foram ensaiados com cargas cíclicas.

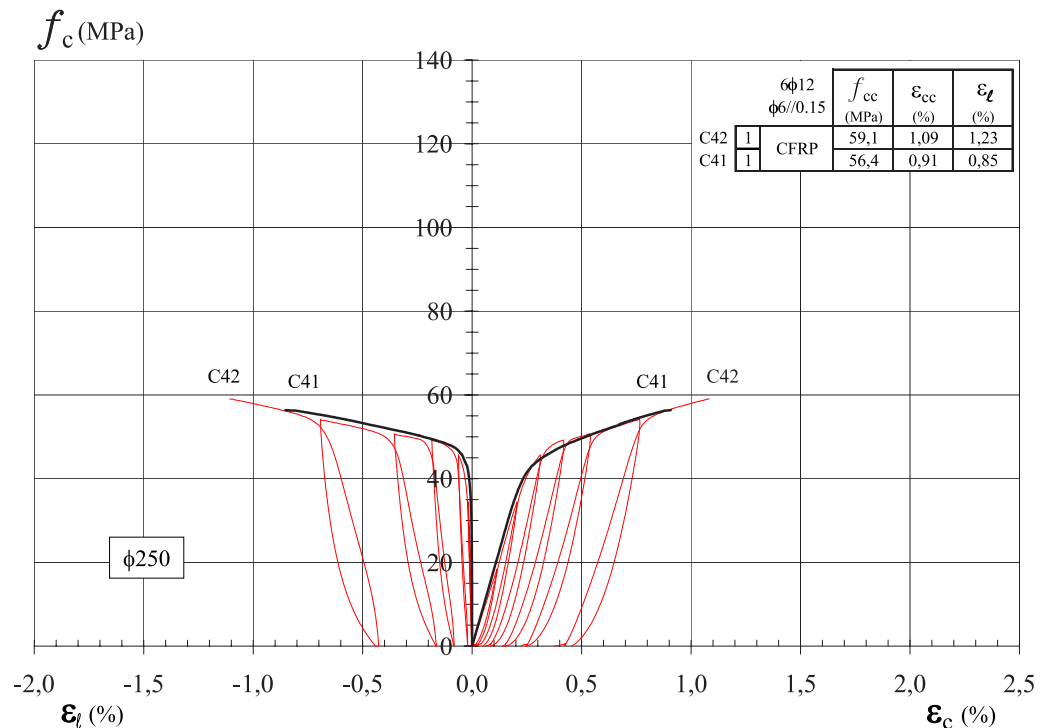


Figura 5.45: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com 1 CFRP sujeitos a cargas monotónicas (C41) ou cíclicas (C42)

Na Figura 5.45 apresentam-se os diagramas tensão-deformação para os modelos de betão armado reforçados com uma camada de CFRP. O modelo C41 foi sujeito a um carregamento monotónico até à rotura, sendo o modelo C42 sujeito a um carregamento cíclico.

Em termos de andamento global constata-se uma grande coincidência entre a envolvente do diagrama cíclico (C42) e o correspondente diagrama monotónico (C41).

Quanto ao andamento da extensão lateral pode confirmar-se na Figura 5.46 a rotura das fibras em ambos os modelos, observada no local, com os valores máximos obtidos no alinhamento 3 (450 mm) do modelo C41 (1,486%) e no alinhamento 2 (375 mm) do modelo C42 (1,57%). Estes valores são bastante diferentes dos valores médios observados na rotura, em especial no modelo C41, cujo extensómetro H14, no alinhamento 3, deixou de funcionar antes da rotura do modelo.

Um aspecto interessante que se pode verificar nestes dois modelos é que a extensão

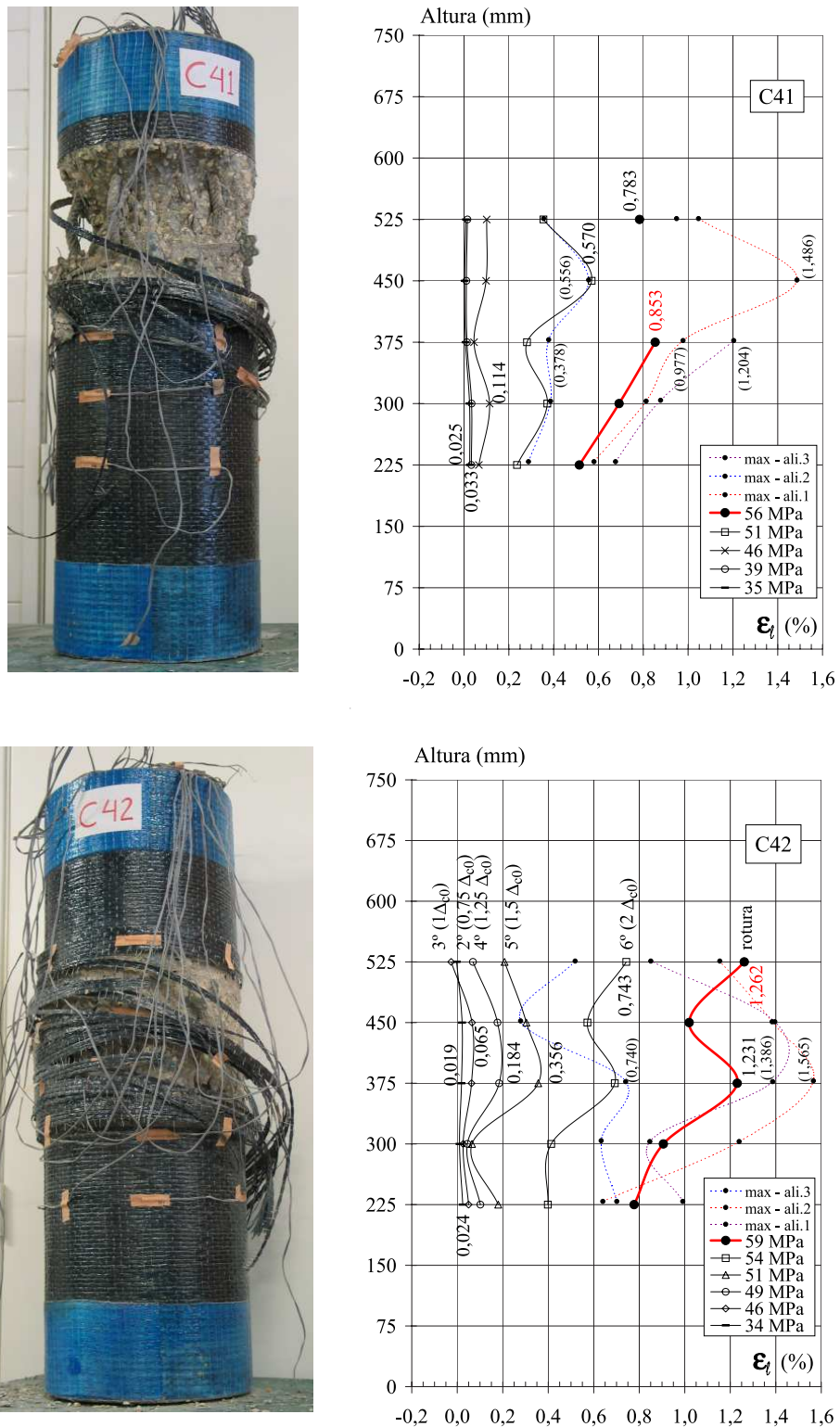


Figura 5.46: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado reforçados com 1 CFRP (C41 e C42) e respectivo andamento das extensões laterais

máxima lateral aconteceu independentemente da localização da cinta, uma vez que no modelo C41 ocorreu entre cintas e no modelo C42 verificou-se junto a uma cinta colocada a meia altura do modelo.

Apresentam-se na Figura 5.47 os diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com duas camadas de CFRP ensaiados com cargas monotónicas (C34) ou cargas cíclicas (C40) e na Figura 5.48 um aspecto geral da rotura obtida. Verifica-se que existe em termos globais grande concordância entre o andamento da envolvente do diagrama cíclico (C40) e o correspondente diagrama monotónico (C34). Contudo, esta concordância é um pouco menor que a verificada entre os dois modelos reforçados com uma camada de CFRP (C41 e C42) dado a envolvente do modelo C40 se encontrar ligeiramente acima das curvas do modelo C34, situação que não se verificou nos ensaios dos correspondentes modelos de betão simples ensaiados com duas camadas de CFRP (C33 e C39).

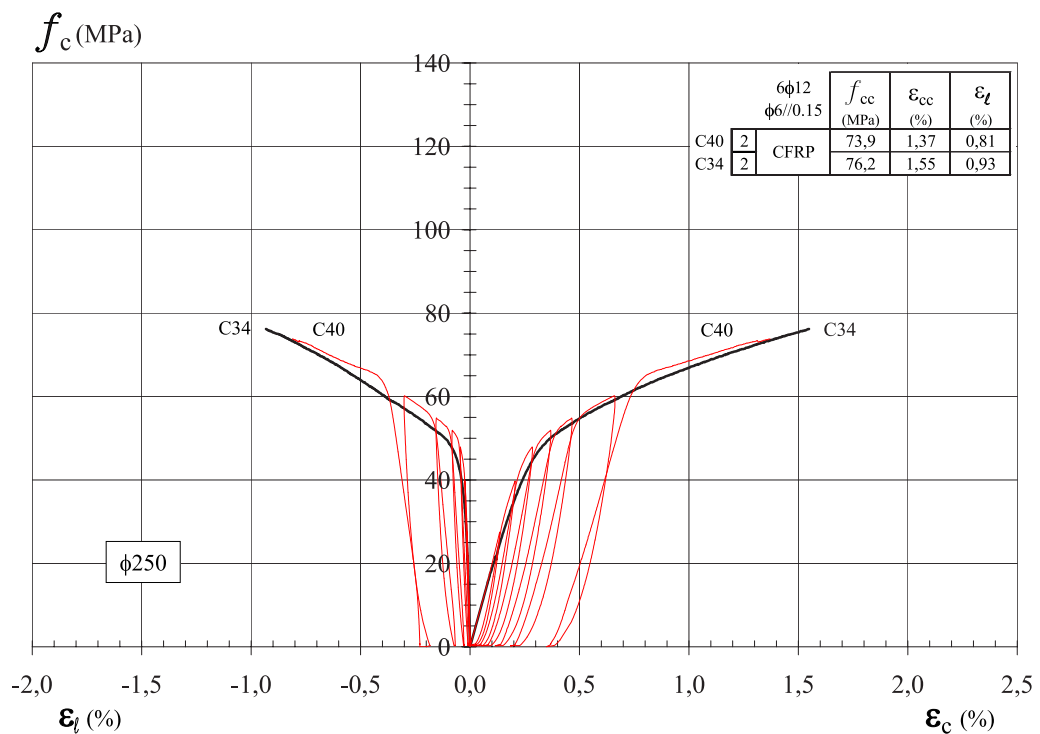


Figura 5.47: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com 2 CFRP sujeitos a cargas monotónicas (C34) ou cíclicas (C40)

Em termos de andamento da extensão lateral máxima constata-se (Figura 5.48) que no modelo C34 as extensões laterais máximas ocorrem ao nível das cintas, fenómeno que não é facilmente detectável no caso do modelo C40. A extensão lateral máxima ocorre a 525 mm de altura do modelo C34 para um valor de 1,42% e no modelo C40 a 225 mm de altura para um valor da extensão lateral de 0,96%. O valor máximo da extensão lateral média foi de 0,98%, no caso do modelo C34, e de 0,77%, no caso do

modelo C40 e não coincide necessariamente com a zona de ocorrência da extensão lateral máxima, nem se verifica obrigatoriamente a meia altura do modelo.

Na Figura 5.49 faz-se a comparação entre os modelos ensaiados ciclicamente com uma (C42) e duas camadas de CFRP (C40) e constata-se que a inclinação dos ramos ascendentes do diagrama, após o primeiro ciclo, são paralelos no troço inicial. Esta situação é contrária à que se tinha observado aquando da comparação (veja-se Figura 5.42) entre um modelo de betão simples reforçado com CFRP (C39) e outro com GFRP (C37), sendo igualmente oposta ao verificada através da comparação (veja-se Figura 5.60) entre os modelos de betão armado reforçados com duas camadas de CFRP (C40) ou de GFRP (C38). Isto demonstra que o troço inicial de carga, após o primeiro ciclo, depende essencialmente do módulo de elasticidade da fibra e não tanto da sua quantidade, ao contrário do segundo ramo que depende mais da relação $\varepsilon_l E_{ft} t_f / D$.

Na Figura 5.50 apresentam-se, para além do diagrama tensão-deformação do modelo de betão armado não reforçado (C30), os diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado ensaiados monotonicamente e reforçados com uma (C41), duas (C34), três (C43) ou quatro camadas de CFRP (C44), enquanto na Figura 5.51 observa-se um aspecto geral dos mesmos modelos após a rotura.

A Figura 5.50 mostra que os diagramas tensão-deformação se mantêm bi-lineares com um primeiro ramo praticamente coincidente em todos os modelos e um segundo ramo em que a inclinação vai aumentando em função do número de camadas de CFRP quer seja diagrama tensão-deformação axial quer seja no diagrama tensão-deformação lateral.

A extensão lateral média obtida a meia altura dos modelos varia entre 0,79% e 0,93%, enquanto a extensão axial varia entre 0,91% (no modelo reforçado com uma camada) e 2,25% (no modelo reforçado com quatro camadas de CFRP), o que corresponde a um incremento médio de 0,45% por cada camada de CFRP a partir da primeira .

A tensão de rotura varia entre 56,4 MPa para uma camada de CFRP e 98,4 MPa para quatro camadas de CFRP, o que corresponde a um incremento médio por camada de CFRP de aproximadamente 14,8 MPa em relação ao modelo não reforçado.

Os valores apresentados pelo modelo C43, cuja rotura parece ter sido um pouco precoce, foram condicionados pela abertura de uma das cintas, conforme se pode observar na Figura 5.52.

Nas Figuras 5.54 a 5.56 apresentam-se em pormenor, para cada um dos modelos C41, C34, C43 e C44, o andamento em altura da extensão lateral para os três alinhamentos de extensómetros e para a extensão lateral resultante da média dos três alinhamentos.

Analisados os diagramas das Figuras 5.54 a 5.56 verifica-se que a rotura dos modelos correspondeu, em alguns dos alinhamentos, a valores da extensão lateral máxima próximos da rotura do CFRP em provetes planos (1,61%). Assim, a extensão lateral máxima obtida foi de 1,486% no modelo C41, de 1,42% no modelo C34, de 0,95% no modelo C43 e de 1,49% no modelo C44. O máximo da extensão lateral resultante da média dos alinhamentos em cada modelo foi de 0,85% no modelo C41, de 0,98% no modelo C34, de 0,57% no modelo C43 e de 0,80% no modelo C44.

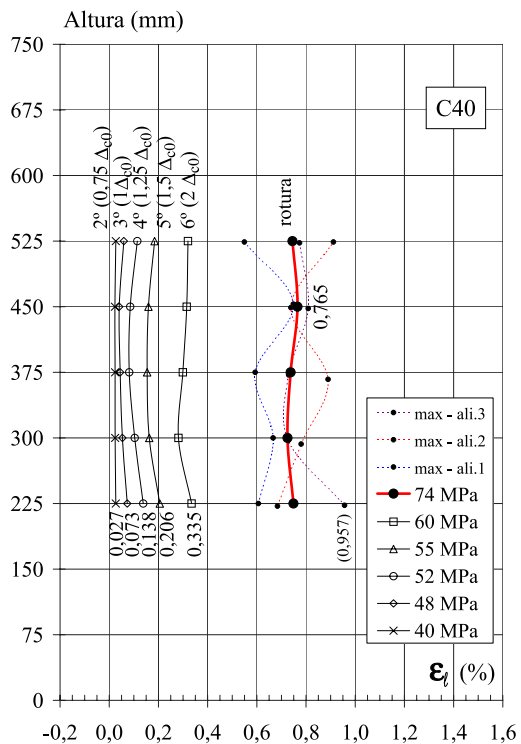
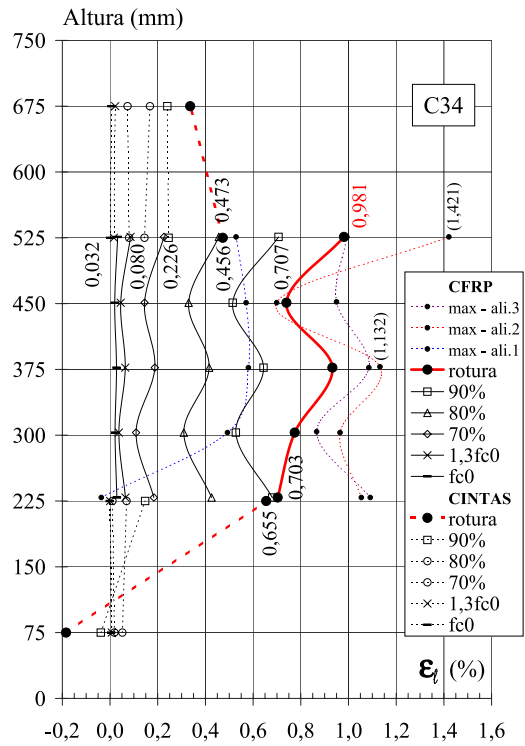


Figura 5.48: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado reforçados com 2 CFRP (C34 e C40) e respectivo andamento das extensões laterais

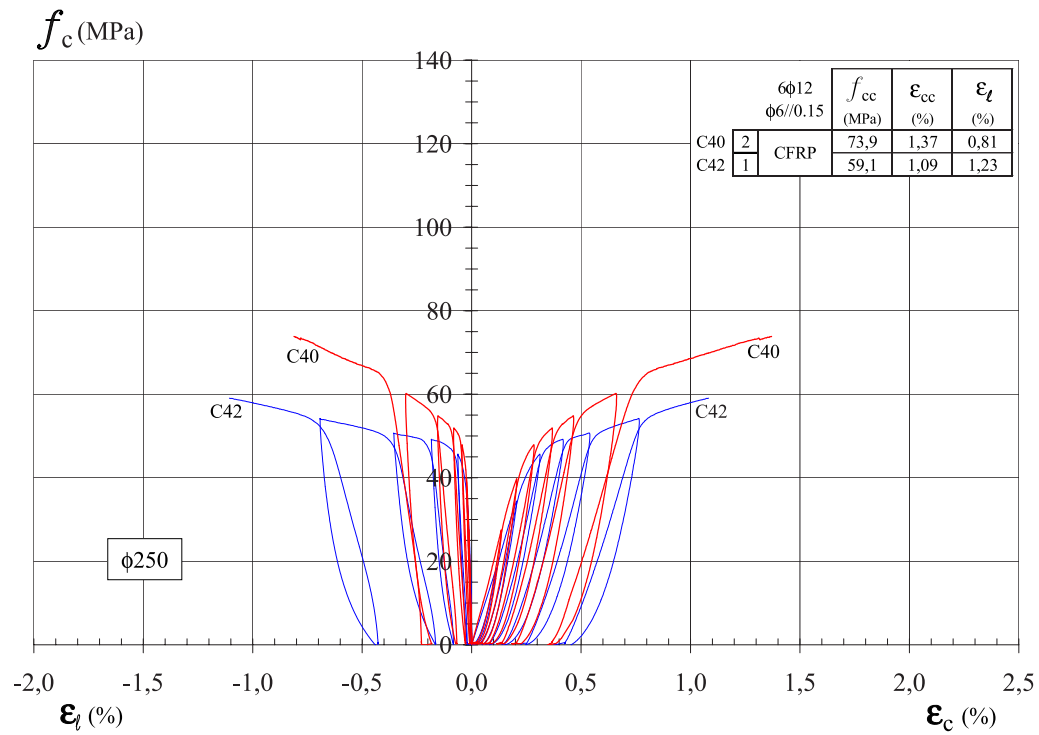


Figura 5.49: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com 1 CFRP (C42) ou 2 CFRP (C40) e sujeitos a cargas cíclicas

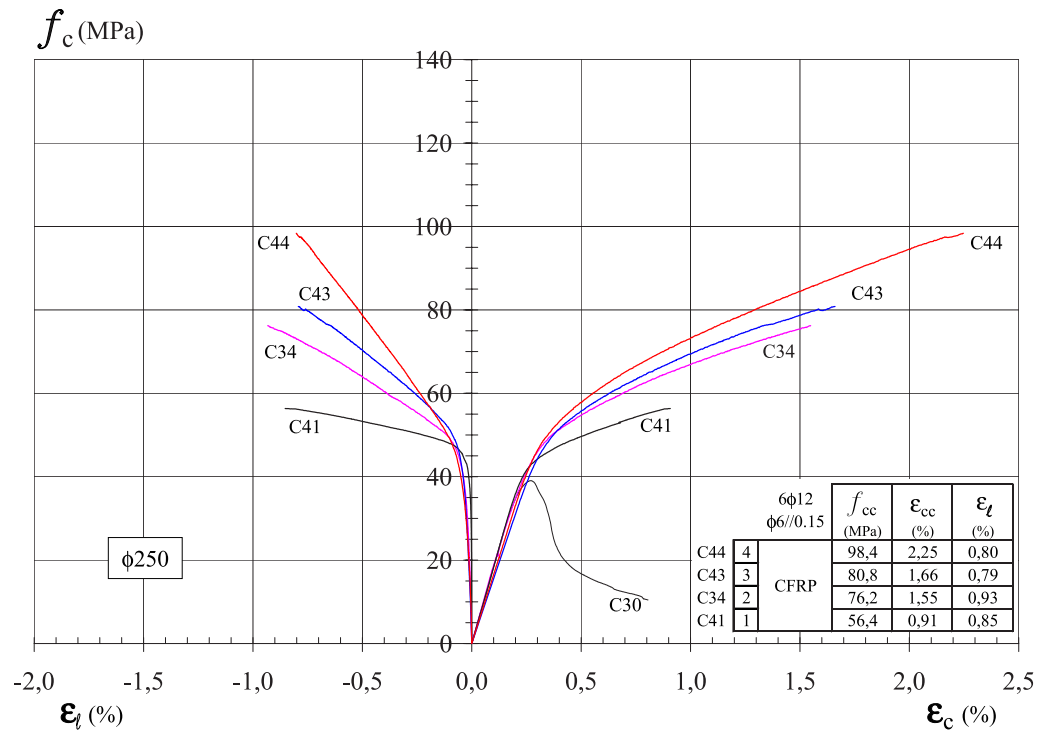


Figura 5.50: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado sujeitos a cargas monotónicas e reforçados com 1, 2, 3 ou 4 CFRP



Figura 5.51: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado reforçados com 1, 2, 3 ou 4 CFRP

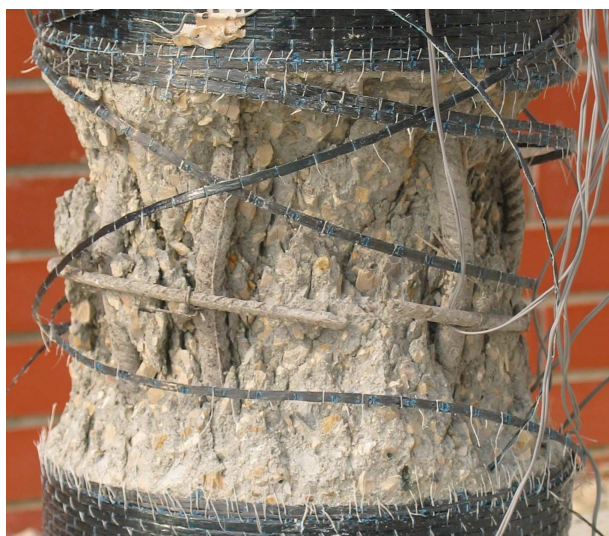


Figura 5.52: Pormenor da abertura da cinta no modelo C43

Se considerarmos apenas os valores obtidos nos modelos C41, C34 e C44, não considerando para este efeito os valores de C43 pelas razões atrás invocadas, obtém-se um valor médio nos três modelos de 1,47% para a extensão lateral máxima e de 0,88% para a extensão lateral média, o que significa que a extensão lateral média é de cerca de 60% do valor da extensão lateral máxima obtida nestes modelos e de 55% do valor de rotura do CFRP (1,61%) obtida em provetes planos, enquanto o valor médio da extensão lateral máxima é cerca de 91% da extensão máxima obtida em provetes planos de CFRP (*MBrace*).

5.6.3 Modelos de betão armado reforçados com GFRP

Na Figura 5.57 apresentam-se os diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com duas camadas de GFRP ensaiados monotonicamente (C32) ou com cargas cíclicas (C38). Na Figura 5.58 pode observar-se o aspecto global da rotura dos referidos modelos, bem como o andamento das respectivas extensões laterais.

Da observação dos diagramas verifica-se mais uma vez que existe grande sintonia nos modelos de betão armado reforçados com FRP entre a envolvente do diagrama cíclico (C38) e o correspondente diagrama monotónico (C32).

Em termos de tensões máximas na rotura verifica-se que os valores são semelhantes (70,8 e 71,3 MPa), o mesmo acontecendo com os valores da extensão axial (1,47% e 1,53%) ou da extensão lateral média a meia altura do modelo (1,49 e 1,44%).

Quanto à extensão lateral máxima os valores obtidos foram de 1,83% no C32 e de 1,99% no C38, o que corresponde em termos médios a 88% da extensão máxima (2,17%) obtida em provetes planos de GFRP (*Tyfo*).

Os valores máximos da extensão lateral média foram de 1,46% no modelo C32 e de 1,70% no modelo C38, o que corresponde em termos médios a cerca de 73% do

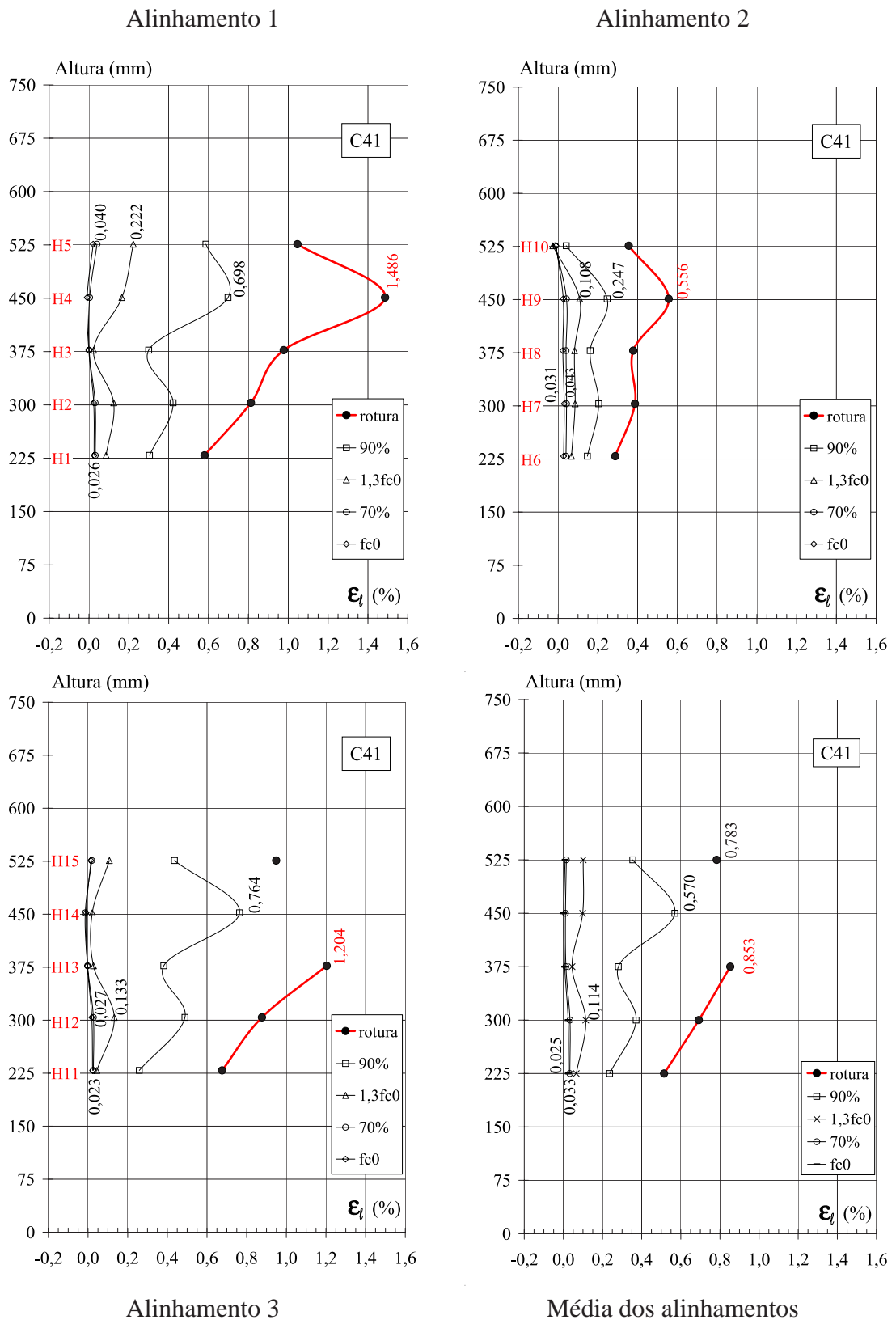


Figura 5.53: Andamento em altura da extensão lateral do modelo C41 (1 CFRP)

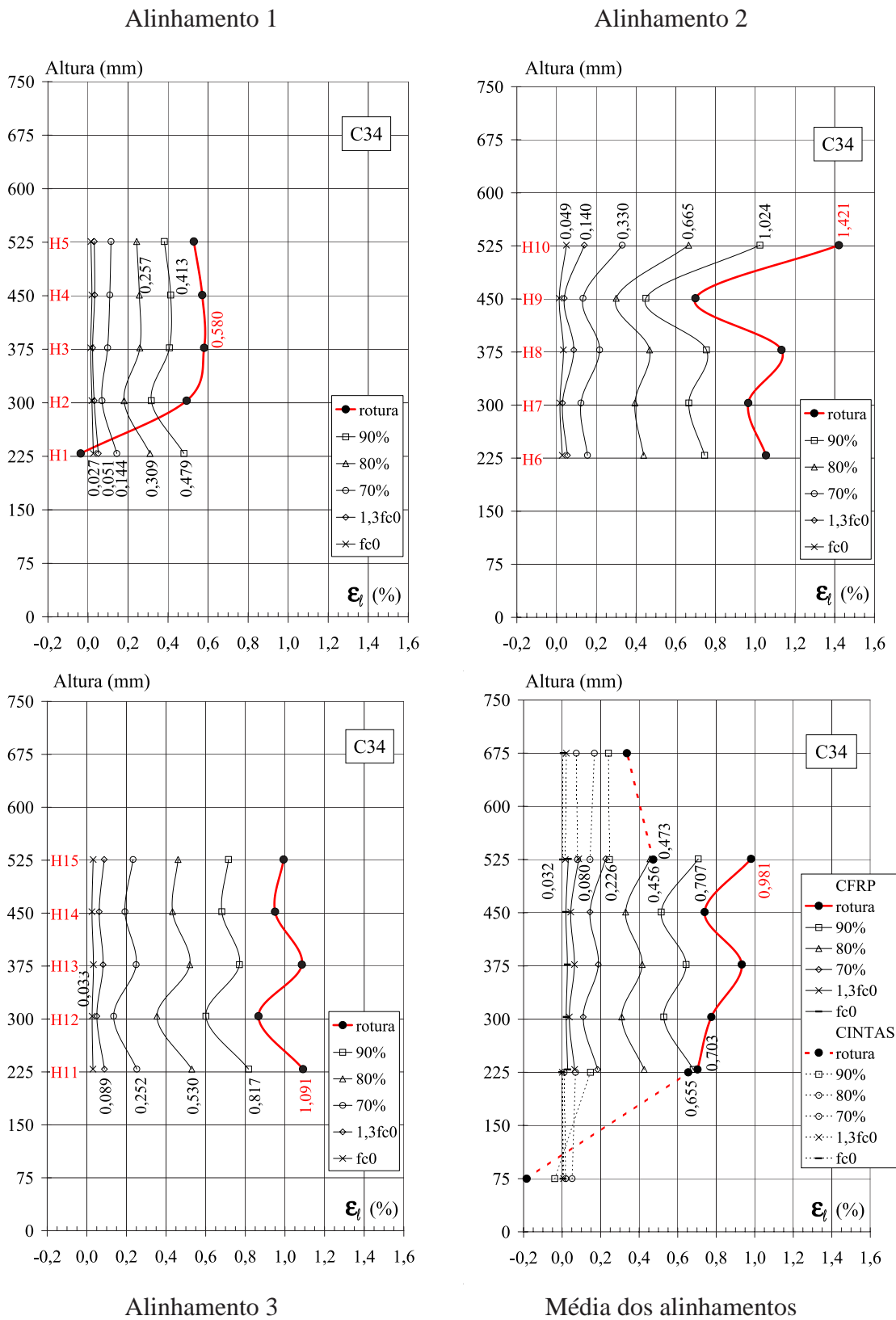


Figura 5.54: Andamento em altura da extensão lateral do modelo C34 (2 CFRP)

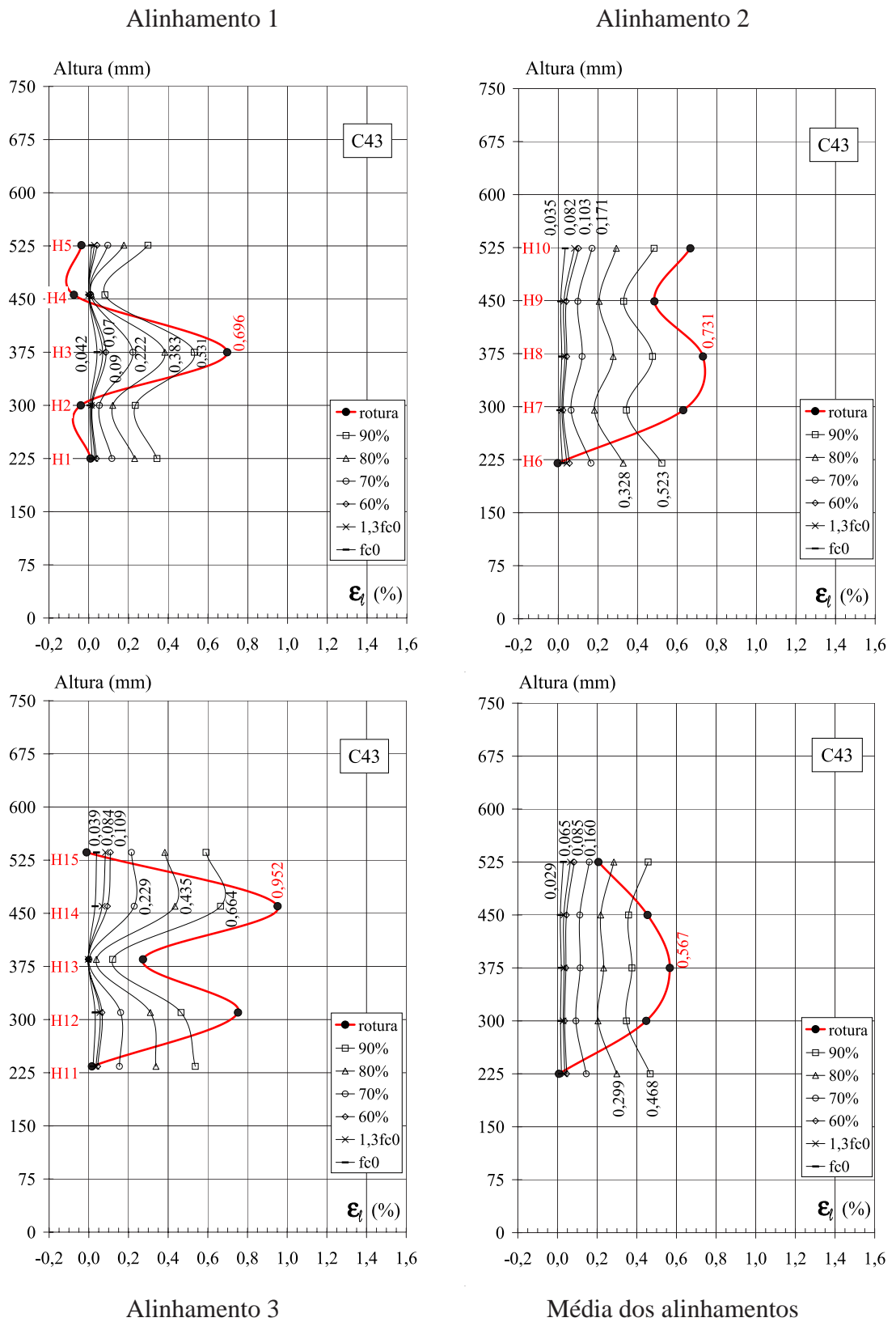


Figura 5.55: Andamento em altura da extensão lateral do modelo C43 (3 CFRP)

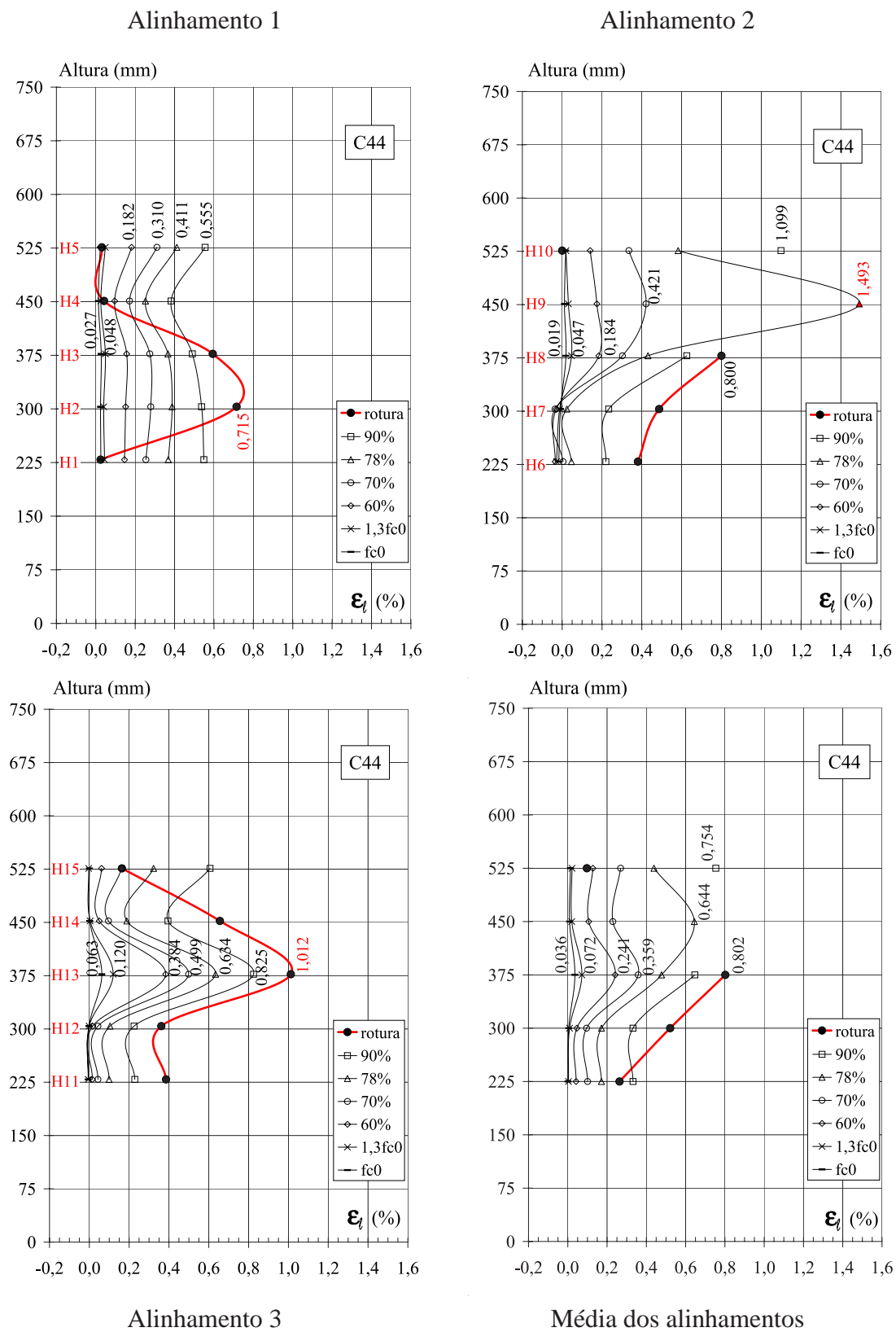


Figura 5.56: Andamento em altura da extensão lateral do modelo C44 (4 CFRP)

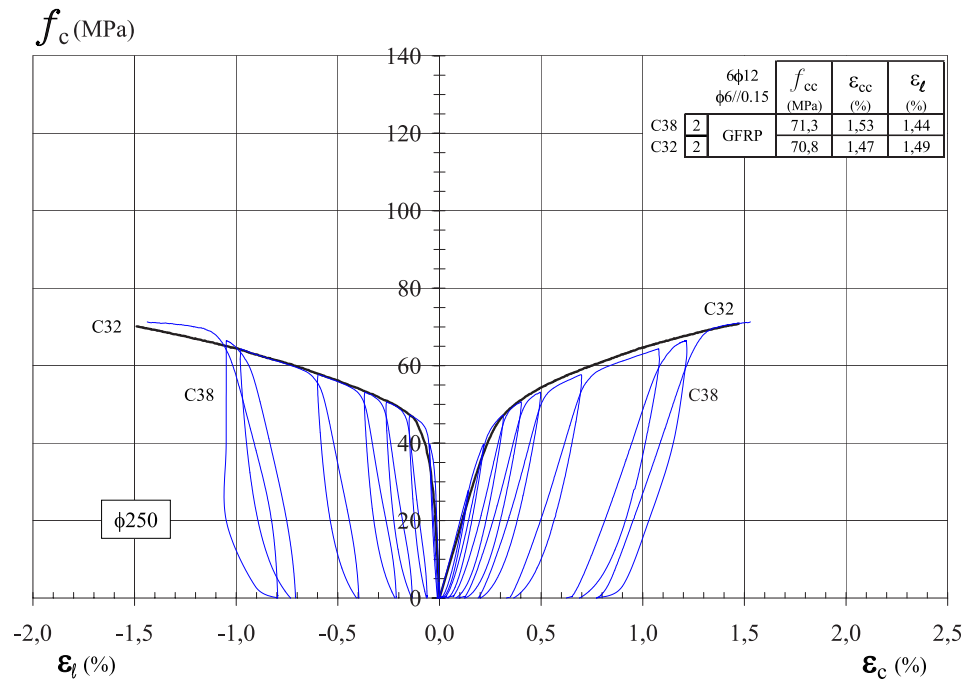


Figura 5.57: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com 2 GFRP sujeitos a cargas monotónicas (C32) ou cíclicas (C38)

valor obtido em provetes planos de GFRP ($Tyfo$).

Na Figura 5.58 é também possível observar a tracejado o andamento da extensão lateral obtida através dos extensómetros colocados nas cintas do modelo C32.

5.6.4 Comparação entre os modelos de betão armado reforçados com FRP

Nos diagramas das Figuras 5.59 e 5.60 é feita uma comparação entre os modelos de betão armado reforçados com CFRP ($Mbrace$) ou com GFRP ($Tyfo$) ensaiados monotonicamente (C32 e C34) ou com cargas cíclicas (C38 e C40).

Relativamente aos diagramas dos ensaios monotónicos (5.59) constata-se que as curvas são bi-lineares com um primeiro troço praticamente coincidente nos dois modelos e um segundo troço dependente da relação $\epsilon_l E_f t_f / \varnothing$.

Esta observação continua válida no caso dos modelos ensaiados com cargas cíclicas (Figura 5.60), voltando a constatar-se que as inclinações dos ramos ascendentes dos diagramas cíclicos são superiores no modelo reforçado com CFRP.

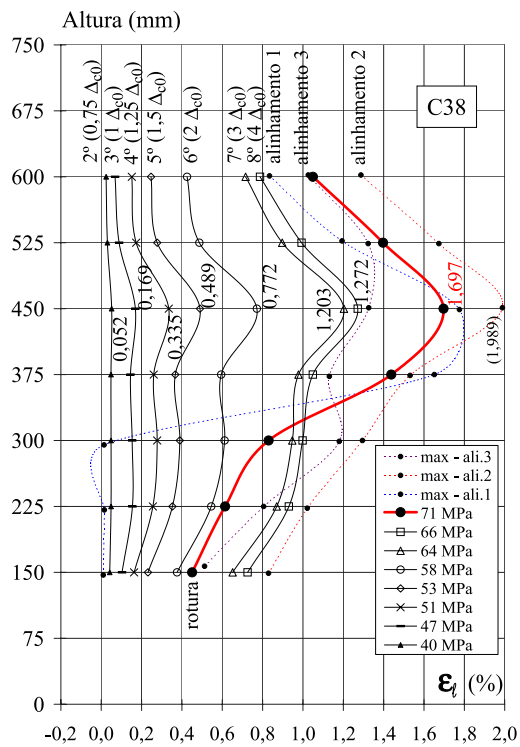
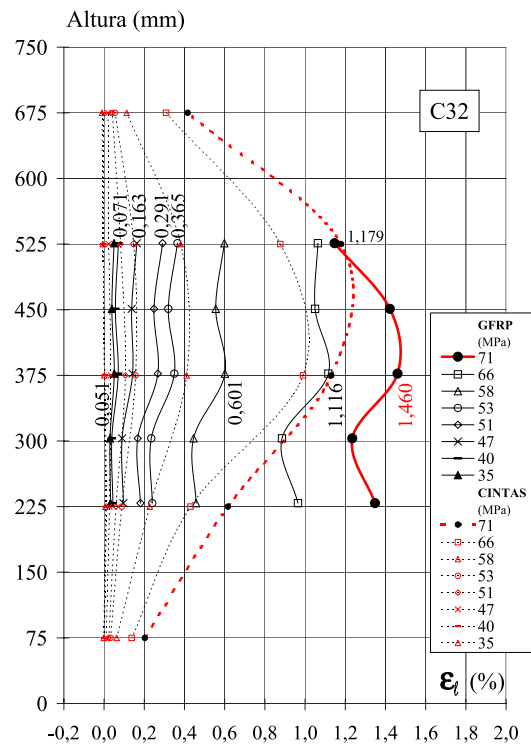


Figura 5.58: Aspecto da rotura dos modelos de betão armado reforçados com 2 GFRP (C32 e C38) e respectivo andamento das extensões laterais

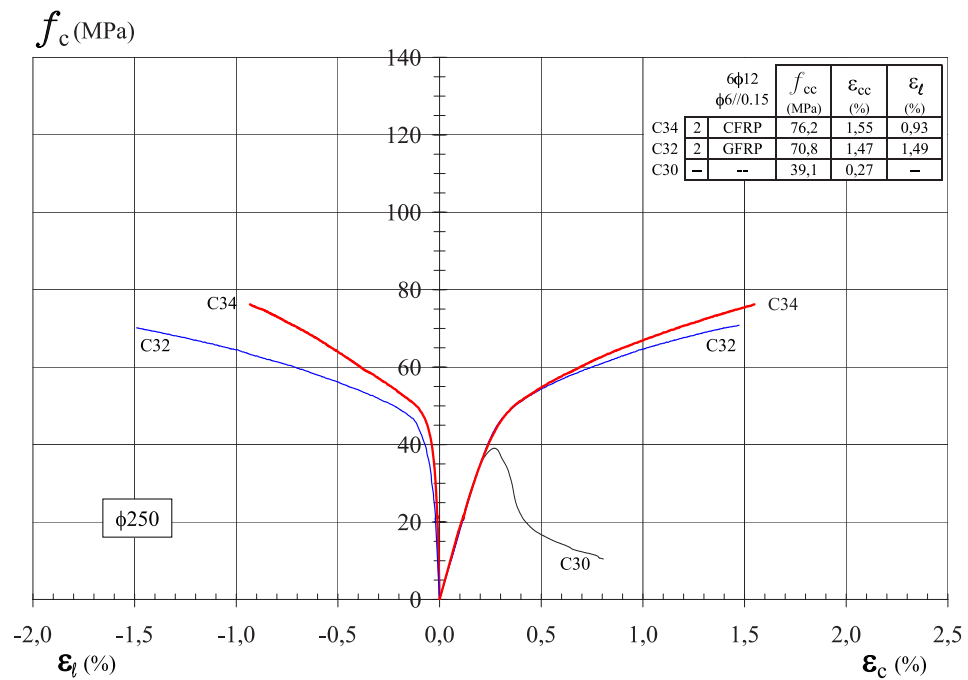


Figura 5.59: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com 2 CFRP ou GFRP e sujeitos a cargas monotónicas

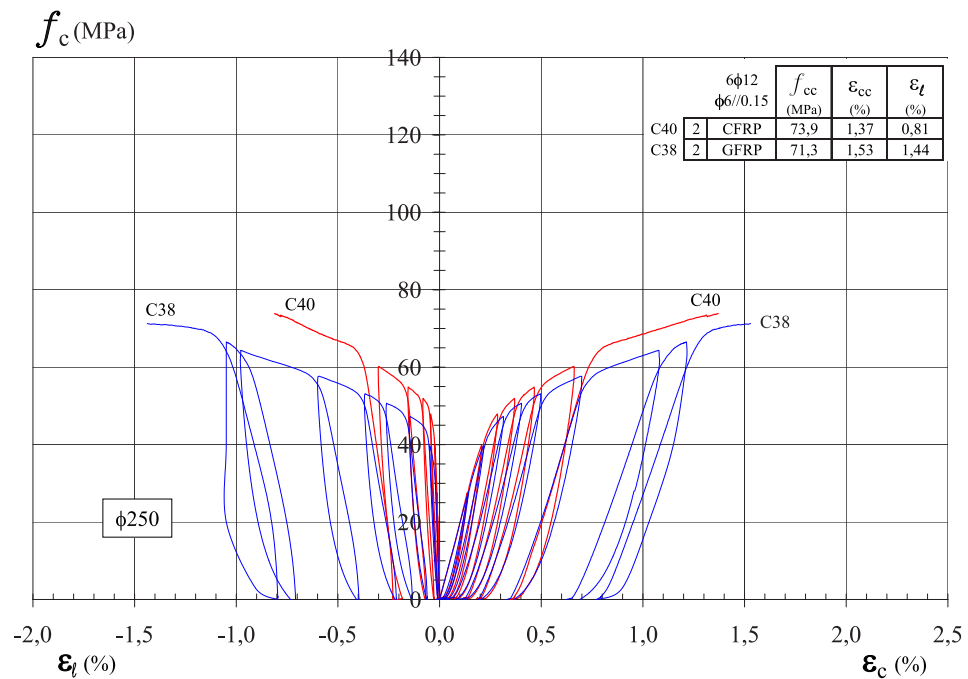


Figura 5.60: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão armado reforçados com 2 CFRP ou 2 GFRP e sujeitos a cargas cíclicas

5.7 Comparação entre os modelos de betão simples e de betão armado com 250 mm de diâmetro

Na Figura 5.61 é possível observar algumas diferenças de comportamento entre os modelos de betão simples (C29 e C35) e de betão armado (C30 e C36) sujeitos a cargas monotónicas ou cíclicas. Constata-se, assim, que os modelos de betão simples e betão armado apresentam um troço inicial idêntico do diagrama tensão-deformação. Contudo, a existência de armaduras longitudinais (6Ø12) nos modelos C30 e C36 faz com que a tensão máxima e a correspondente extensão sejam superiores nestes modelos. Em termos do ramo descendente da curva, verifica-se que nos modelos de betão armado a sua inclinação é mais suave, consequência directa das armaduras transversais (cintas Ø6//0.15).

Nos modelos de betão armado observa-se que a envolvente do diagrama cíclico, apesar de se encontrar ligeiramente abaixo da curva monotónica, acompanha em termos gerais o seu andamento.

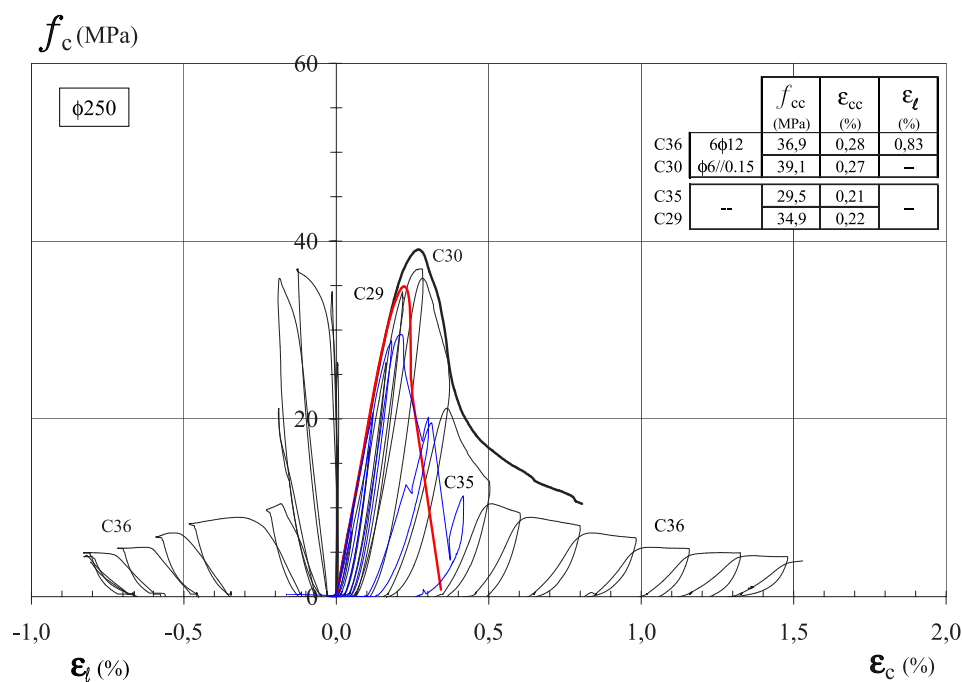


Figura 5.61: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples ou armado sujeitos a cargas monotónicas (C29 e C30) ou cíclicas (C35 e C36)

Em termos dos modelos reforçados com FRP constata-se, por observação das Figuras 5.62 e 5.63, que a principal diferença entre os modelos de betão simples (a vermelho nas figuras) e de betão armado se situa ao nível da tensão máxima de compressão e da correspondente extensão. Quer nos modelos de betão simples quer nos de betão armado o andamento dos diagramas tensão-deformação axial são do tipo

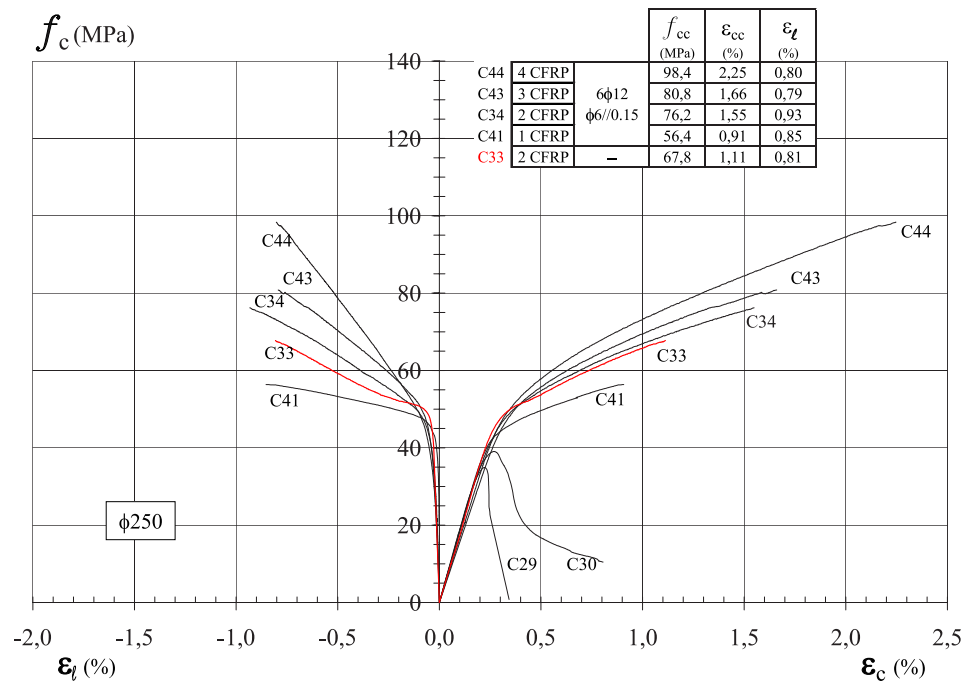


Figura 5.62: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples ou armado reforçados com CFRP

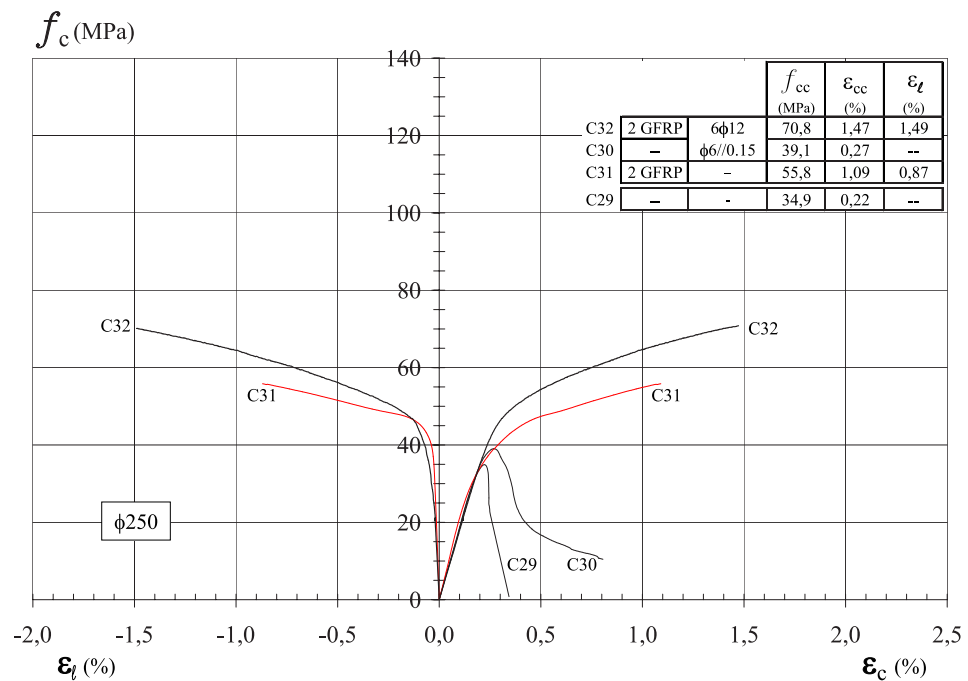


Figura 5.63: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples ou armado reforçados com GFRP

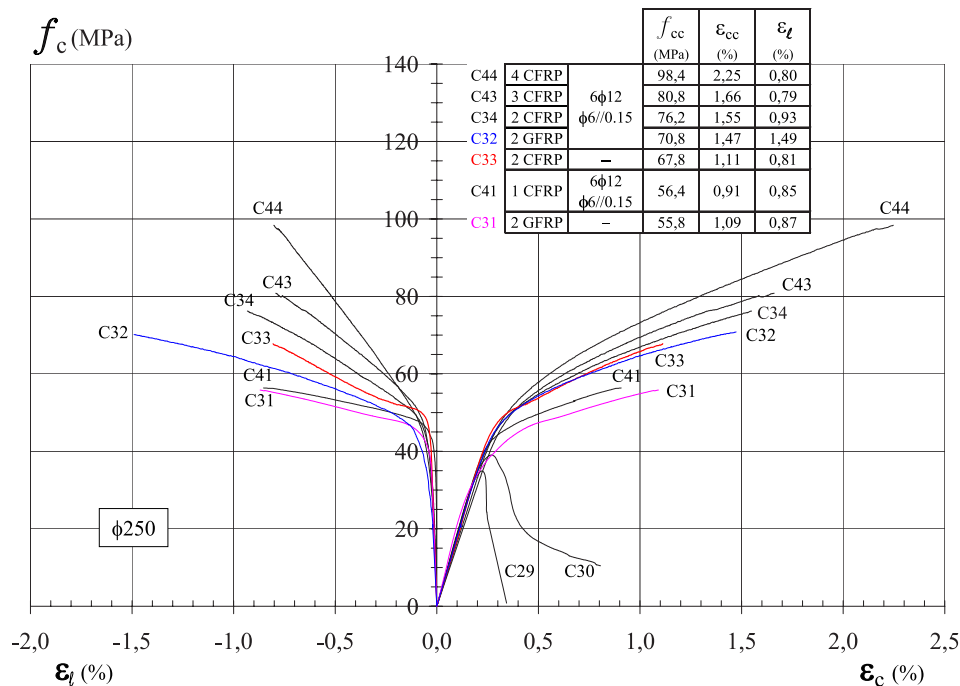


Figura 5.64: Diagramas tensão-deformação dos modelos de betão simples ou armado reforçados com CFRP ou GFRP

bi-linear. O ramo inicial coincide em ambos os modelos até se atingir a resistência à compressão do betão simples, apresentando o segundo ramo uma inclinação idêntica entre os modelos de betão simples e betão armado com o mesmo confinamento.

Ao contrário dos modelos de betão armado reforçados com CFRP, os modelos reforçados com GFRP apresentam uma extensão lateral cerca de 70% superior à do correspondente modelo sem armaduras.

5.8 Dilatância e deformações axial, lateral e volumétrica

De modo a analisar o comportamento da dilatância e das deformações axial, lateral e volumétrica encontra-se representado nos diagramas das Figuras 5.65 a 5.69 o andamento dos modelos de betão armado ensaiados monotonicamente e reforçados com 1 CFRP (C41), 2 CFRP (C34), 3 CFRP (C43) e 4 CFRP (C44).

Representa-se além disso o andamento das referidas grandezas ao nível das cintas do modelo C36 de betão armado não reforçado e ensaiado com cargas cíclicas (uma vez que não se dispunham de extensómetros no modelo ensaiado monotonicamente). A nível de exemplo apresenta-se também o andamento das deformações das cintas do modelo C34, confinadas por duas camadas de CFRP.

No diagrama tensão-extensão volumétrica (Figura 5.65) observa-se nos modelos

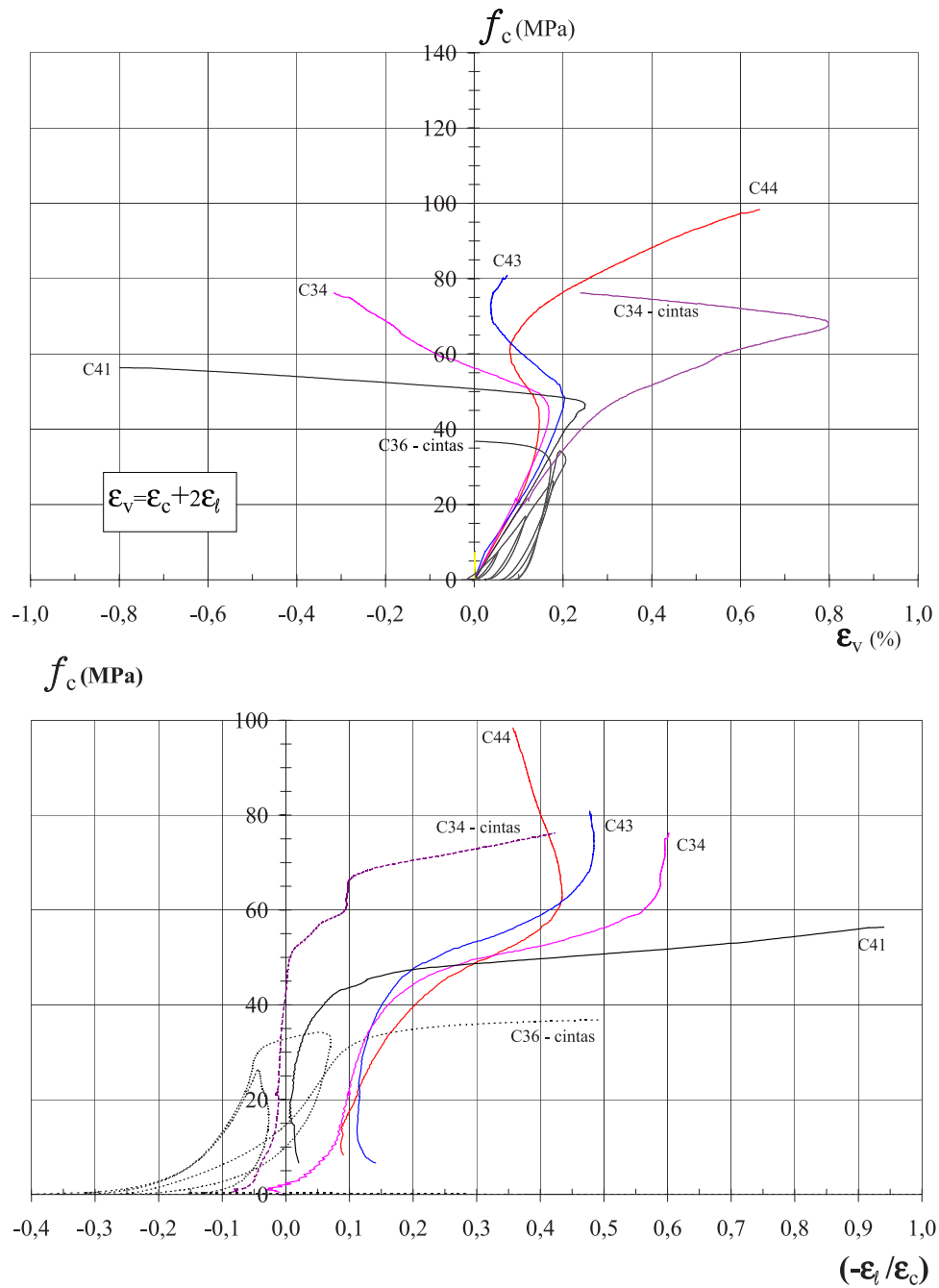


Figura 5.65: Diagramas tensão-deformação volumétrica e tensão-dilatância dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44

reforçados uma primeira inversão da curva tensão-deformação volumétrica cerca de 30% acima da tensão máxima do modelo de betão simples, C29 ($1,3f_{cm}$) para uma extensão volumétrica entre 0,25% (1CFRP) e 0,15% (4CFRP), valor este que se verifica para uma dilatação ($-\frac{\epsilon_\ell}{\epsilon_c}$) entre 0,15 e 0,20 (Figura 5.68). Nos modelos menos confinados (1 e 2 CFRP) a curva mantém até à rotura a inclinação adquirida após a inversão, rompendo com uma extensão volumétrica negativa (dilatação). No caso dos modelos mais confinados (C43 e C44) verifica-se uma segunda inversão da curva, rompendo os modelos com uma extensão volumétrica positiva (contração).

Verifica-se, igualmente, que a extensão volumétrica é nula quando o modelo C34 de betão armado não reforçado atinge a tensão máxima de compressão.

Em termos de dilatação ($-\frac{\epsilon_\ell}{\epsilon_c}$) observa-se que o valor máximo obtido vai diminuindo à medida que os modelos se encontram mais confinados e ocorre entre $1,6$ e $1,7f_{cm}$.

No diagrama extensão volumétrica-extensão axial ou lateral da Figura 5.67, constata-se que as curvas extensão volumétrica-extensão lateral apresentam uma primeira inflexão com um máximo local para $\epsilon_\ell=0,05\%$, enquanto as curvas extensão volumétrica-extensão axial registam a primeira inflexão para ϵ_c entre 0,3% e 0,4%.

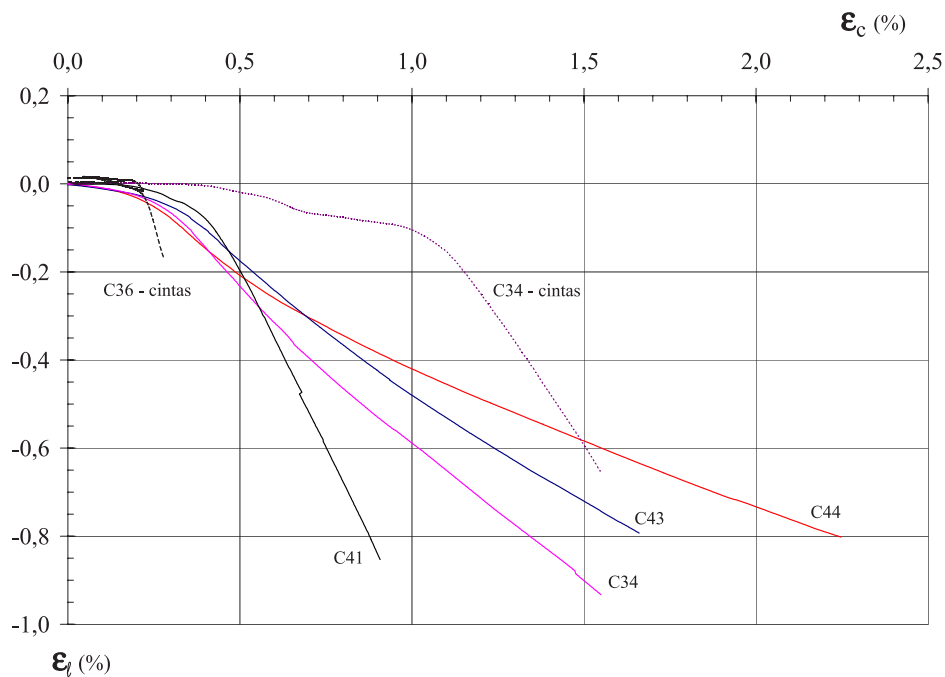


Figura 5.66: Diagramas extensão lateral-extensão axial dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44

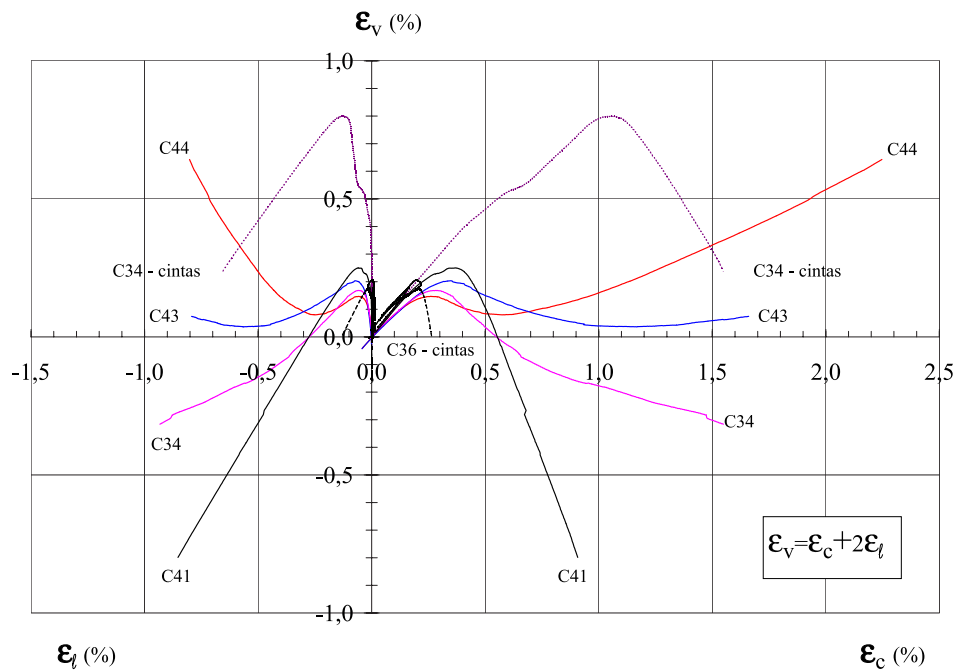


Figura 5.67: Diagramas extensão volumétrica-extensão axial ou lateral dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44

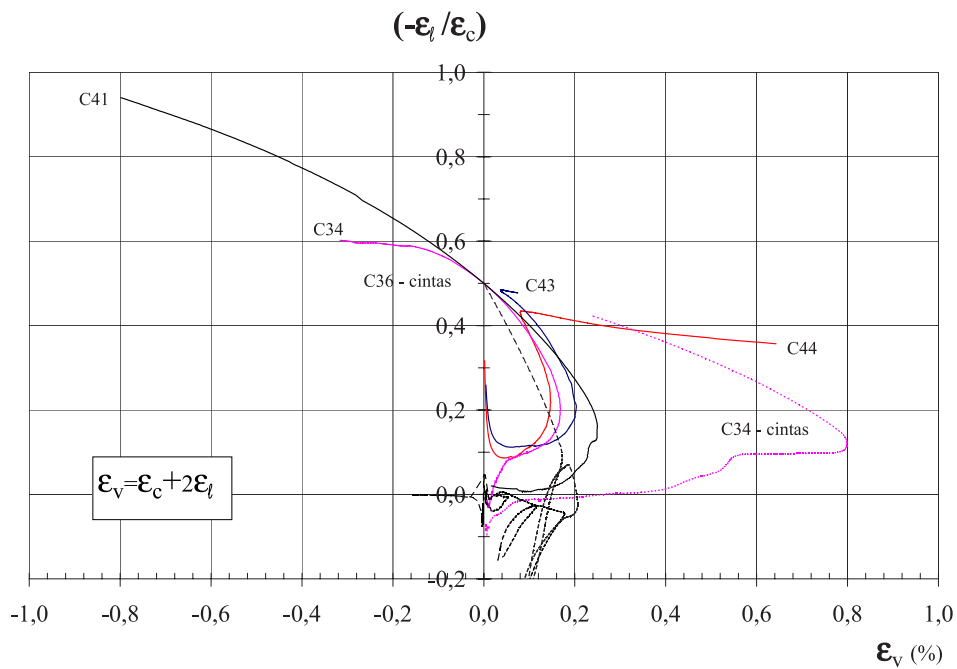


Figura 5.68: Diagramas dilatação-extensão volumétrica dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44

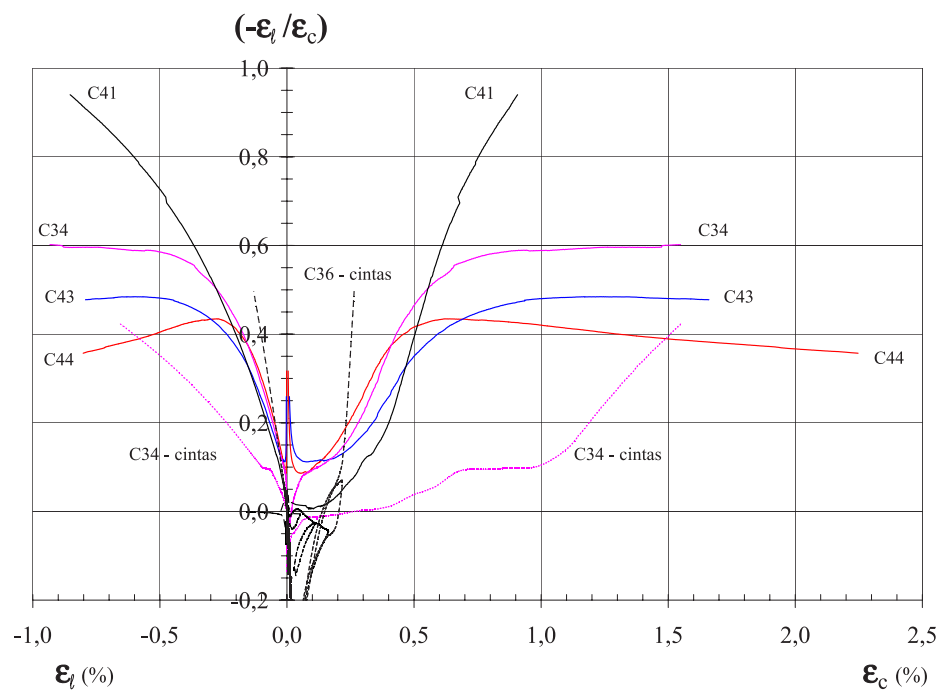


Figura 5.69: Diagramas dilatância-extensão axial ou lateral dos modelos C36, C41, C34, C43 ou C44

Capítulo 6

Análise global dos resultados

Ao longo deste relatório, e à medida que se têm apresentado os resultados, tem-se procedido à sua análise. Na tabela 6.1 encontra-se o resumo dos resultados apresentados no que respeita à compressão axial das colunas.

Em termos globais verifica-se uma grande eficácia das colunas de betão armado ou betão simples em termos de resistência ou de ductilidade quando reforçadas por CFRP ou GFRP. Salienta-se em relação aos parâmetros considerados o seguinte:

6.0.1 Geometria (diâmetro 150 vs 250)

Apesar das diferenças a nível da qualidade do betão e do número de camadas, assim como do tipo de FRP, verifica-se uma influência considerável da geometria na tensão e nas extensões axiais máximas. Assim, uma diminuição de 40% no diâmetro (250 mm para 150 mm) corresponde a uma diminuição de 64% em área e a um aumento de 80% da tensão máxima e de 109% da extensão axial máxima nas colunas de betão armado reforçadas com 2 CFRP (C34, C40 - CC1 a CC3 página 46). Nas colunas de betão simples reforçadas com 2 GFRP (C45 - C31, C37) o aumento foi de 58% na tensão máxima e de 117% na extensão máxima axial.

6.1 Tipo de coluna (betão simples versus betão armado)

Nos modelos de 250 mm de diâmetro o incremento verificado entre o valor médio da tensão máxima de compressão nos modelos reforçados com CFRP de betão simples (C33 e C39) e de betão armado (C34, C40) é de 8,5% e corresponde na íntegra à soma da parcela referente aos 6Ø12 das armaduras longitudinais (311 kN ou 6,4 MPa). O mesmo não acontece entre os modelos reforçados com GFRP de betão simples (C31 e C37) e de betão armado (C32 e C38) em que esse incremento é de 26,3% em termos de tensão máxima de compressão e de 34,0% em termos de extensão axial máxima.

Nos modelos de 150 mm reforçados com 2 CFRP a diferença entre os modelos de betão simples (C4 a C6 e C24) e os de betão armado (C7 a C9) é de 4,6% ou de 7,3%

ϕ (mm)	Tipo	Mod.	FRP	F_{max} (kN)	f_{cc} (MPa)	$f_{cc,med}$ (MPa)	ε_{cc} (%)	$\varepsilon_{cc,med}$ (%)	ε_l (%)	$\varepsilon_{l,med}$ (%)	
150	BS	C1		406,6	23,3		0,14		–		
		C2	–	427,3	24,4	26,6	–	0,18	–	–	
		C3		563,3	32,2		0,22		–		
		C4		1339,6	76,6		1,28		0,85		
		C5	2C		1219,2	69,7	78,8	0,99	1,20	0,47	0,65
		C6		1481,2	84,7		1,25		0,92		
		C26		1469,2	84,0		1,31		0,37		
		C28	3C		1904,2	108,9	–	1,87	–	1,22	–
		C45	2G		1575,2	89,1	–	2,43	–	1,71	–
		C21		1502,0	85,9		1,27		1,17		
		C22	3G		2238,6	128,1	116,2	2,45	2,27	1,53	1,47
		C23		2211,0	126,5		3,14		1,80		
	C27		2175,4	124,4		2,22		1,40			
	BA	C7		455,6	26,5		0,20		–		
		C8	2C		535,4	30,6	27,3	0,20	0,21	–	–
		C9		426,5	24,8		0,23		–		
		C13	2C		454,9	26,0	28,0	0,20	0,19	–	–
		C14		524,2	30,0		0,17		–		
		C17	2C		533,9	30,5	31,8	0,19	0,20	–	–
		C18		576,4	33,0		0,22		–		
		C10		1485,7	85,0		1,31		0,90		
		C11	2C		1375,8	78,7	82,4	1,18	1,24	0,67	0,69
		C12		1460,3	83,5		1,23		0,52		
		C15	2C		1480,9	84,7	85,7	1,50	1,40	0,99	1,12
C16			1515,3	86,7		1,30		1,24			
C19	2C		1492,3	85,4	85,6	1,35	1,31	0,16	0,75		
C20		1501,1	85,9		1,28		1,33				
C24	2C		2251,7	128,8	114,3	2,21	1,93	1,45	1,31		
C25		1745,8	99,9		1,65		1,17				
250	BS	C29	–	1713,7	34,9	32,2	0,22	0,22	–	–	
		C35		1447,9	29,5		0,21		–		
		C31	2G		2740,8	55,8	56,3	1,09	1,12	0,87	0,98
		C37		2787,0	56,8		1,15		1,10		
		C33	2C		3326,2	67,8	69,1	1,11	1,35	0,81	0,90
		C39		3456,3	70,4		1,59		0,99		
	BA	C30	–	1917,3	39,1	38,0	0,27	0,27	–		
		C36		1810,5	36,9		0,28		0,83	0,83	
		C32	2G		3476,9	70,8	71,1	1,47	1,50	1,49	1,46
		C38		3499,9	71,3		1,53		1,44		
		C41	1C		2766,7	56,4	57,7	0,91	1,00	0,85	1,04
		C42		2902,8	59,1		1,09		1,23		
C34	2C		3741,6	76,2	75,0	1,55	1,46	0,93	0,87		
C40		3625,3	73,9		1,37		0,81				
C43	3C		3966,8	80,8	–	1,66	–	0,79	–		
C44	4C		4828,3	98,4	–	2,25	–	0,80	–		

Tabela 6.1: Resumo dos ensaios das colunas à compressão axial

(se se considerar os modelos C7 a C9, C15, C16, C19 e C20) e corresponde em grande parte à influência dos 6Ø6 da armadura longitudinal (78 KN ou 4,41 MPa). Quanto aos modelos reforçados com 3 GFRP, o incremento é de apenas 2%, o que corresponde a cerca de 57% do incremento potencial devido às armaduras. Nos modelos reforçados com 3 GFRP verifica-se ainda uma diminuição de 15% da extensão axial máxima entre os modelos de betão simples e os de betão armado.

A comparação entre os resultados obtidos nas colunas de 150 e 250 mm de diâmetro reforçadas com CFRP sugere que se pode adicionar o efeito da resistência das armaduras à resistência da coluna de betão simples confinada com FRP.

6.2 Nível de cintagem

O afastamento das cintas de 50, 100 e 150 mm nos modelos de 150 mm de diâmetro tem alguma influência em termos de andamento do diagrama tensão-deformação, quer nos modelos não reforçados, quer nos reforçados com 2 CFRP. Constata-se nestes últimos que a um menor afastamento das cintas corresponde uma maior translacção para cima no segundo ramo do diagrama tensão-deformação (Figura 5.29, página 43). Nos modelos de betão armado não reforçados verifica-se alguma diferença no ramo descendente do diagrama tensão-deformação, em que os modelos com menor afastamento das cintas apresentam uma curva descendente mais suave (Figura 5.15, página 33).

6.3 Tipo de confinamento com FRP

Os três tipos de FRP utilizados revelam um bom desempenho. Todavia, o sistema da *Mbrace* apresenta, por vezes, uma rotura na aderência entre as camadas de CFRP, o que não acontece nos outros sistemas em que a rotura ocorre por rotura das fibras. Refira-se, no entanto, que nos modelos ensaiados à flexão composta com cargas cíclicas este tipo de rotura não se verificou.

Constatam-se algumas diferenças em todos os sistemas entre a extensão máxima obtida em provetes planos e a verificada na extensão lateral dos diversos modelos. Assim, os valores médios obtidos para a extensão lateral na rotura nos modelos de 150 mm e 2 CFRP foi de 0,65% nos modelos de betão simples e de 0,69% a 1,12% nos modelos de betão armado ($\varepsilon_f=1,44\%$, *Replark*).

Nos modelos de 250 mm reforçados com CFRP a extensão lateral média varia entre 0,87 e 1,04% ($\varepsilon_f=1,54\%$, *Mbrace*).

Relativamente à extensão lateral média nos modelos reforçados com 2 GFRP, verifica-se que esta varia nos modelos de betão simples entre 0,98% nos modelos de 250 mm e 1,71% nos modelos de 150 mm de diâmetro.

6.4 Número de camadas de FRP

O número de camadas de FRP tem um efeito considerável na capacidade resistente das colunas à compressão. Por exemplo, nas colunas de 250 mm reforçadas com CFRP, em que se variou entre uma e quatro camadas (Figura 5.62, página 75), observou-se um ganho médio de resistência à compressão axial de 13,7 MPa por camada de FRP colocada a partir da primeira, o que corresponde a um incremento de 35% por camada de FRP colocada relativamente à coluna não reforçada. A colocação de uma única camada de CFRP correspondeu a incremento de 18,6 MPa relativamente ao modelo de betão armado não reforçado, o que significa por si só um incremento de 48%.

6.5 Tipo de carregamento axial

A comparação entre os modelos ensaiados ciclicamente com diferentes camadas de CFRP (Figura 5.49) permite constatar que os ramos ascendentes do diagrama cíclico são paralelos no troço inicial, o que não se verifica quando se comparam os modelos reforçados com diferentes tipos de FRP e o mesmo número de camadas, em que as inclinações desses ramos são superiores nos modelo reforçados com CFRP (Figuras 5.42 e 5.60). Conclui-se, assim, que os troços de carga correspondentes ao primeiro ramo do diagrama bi-linear, após o primeiro ciclo, dependem essencialmente do módulo de elasticidade do FRP e não tanto da sua quantidade, ao contrário do segundo ramo que depende mais da relação $\varepsilon_l E_f t_f / D$.

Na generalidade dos modelos ensaiados (exceptuando os modelos C16, C25 e C39 pelas razões já referidas aquando da apresentação dos seus resultados), quer de 150 mm, quer de 250 mm, a envolvente monotónica do diagrama tensão-deformação cíclica é praticamente coincidente com os modelos correspondentes ensaiados monotonicamente, o que demonstra o excelente comportamento e fiabilidade deste tipo de solução de reforço.

Referências Bibliográficas

- [1] BETTOR MBT PORTUGAL. *Sistema MBrace - Fichas Técnicas*, 2001.
- [2] CS-11. Concrete Core Testing for Strength, Report of a Concrete Society Working Party. The Concrete Society Technical Report N^o11, May 1976.
- [3] DEMERS, K. W. The Strengthening of Structural Concrete with an Aramid Woven Fiber/Epoxy Resin Composite. In *Advanced Composite Materials In Bridges & Structures* (1995), pp. 435–442.
- [4] FYFE CO. LLC. *Quality Control Manual for the Tyfo Fibrwrap System*, December 1999.
- [5] HARMON, T. G., AND SLATERRY, K. T. Advanced Composite Confinement of Concrete. In *Advanced Composite Materials In Bridges & Structures* (1992), CSCE, pp. 292–302.
- [6] HOWIE, E., AND KARBHARI, V. M. Efficiency of Composite Wraps for Deteriorating Columns in the North-East. In *Third Materials Engineering Conference* (San Diego, 1994), pp. 192–206.
- [7] MASTER BUILDERS INC. AND STRUCTURAL PRESERVATION SYSTEMS. *MBrace Composite Strengthening System, Engineering Design Guidelines*, September 1998.
- [8] MIRMIRAN, A., AND SHAHAWY, M. Behaviour of Concrete Columns Confined by Fiber Composites. *Journal of Structural Engineering, ASCE 123, 5* (1997), 583–590.
- [9] MITSUBISHI CHEMICAL CORPORATION. *Replark System - Material Properties & Standard Application Procedures*, November 1997.
- [10] NANNI, A. E. A. Lateral Confinement of Concrete Using FRP Reinforcement. *ACI Structural Journal, SP138* (1992), 193–209.
- [11] PAULA, R. F. *Influência da Geometria das Secções no Confinamento de Pilares de Betão Armado com Compósitos de FRP*. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2002.

- [12] PAULA, R. F., AND SILVA, M. G. Sharp Edge Effects on FRP Confinement of RC Square Columns. In *ICCI 02 - Third International Conference on Composites in Infrastructure* (S. Francisco, California, June 2002).
- [13] RODRIGUES, C. C., AND SILVA, M. G. Comportamento à Compressão Uniaxial de Pilares Circulares de Betão Armado Encamisados com CFRP. In *Repar 2000-Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas* (Lisboa, Junho 2000), GPEE, LNEC, pp. 639–648.
- [14] SAADATMANESH, H., EHSANI, M. R., AND LI, M. W. Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps. *ACI Structural Journal* 91, 4 (July-August 1994), 434–447.
- [15] SAAMAAN, M., MIRMIRAN, A., AND SHAHAWY, M. Model of Concrete Confined by Fiber Composites. *Journal of Structural Engineering, ASCE* 124, 9 (September 1998), 1025–1031.
- [16] SILVA, M. G., AND RODRIGUES, C. C. Size and Relative Stiffness Effects on Compressive Failure of Concrete Columns Wrapped with GFRP. *Journal of Composite Materials, ASCE* (submetido para publicação) (2004).
- [17] SPOELSTRA, M. R., AND MONTI, G. FRP-Confined Concrete Model. *Journal of Composite for Construction, ASCE* 3, 3 (1999), 143–150.