



## Mantas de CFRP no confinamento de elementos de betão submetidos a compressão

Débora Ferreira<sup>(1)</sup>; Joaquim. Barros<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Aluna de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Escola Engenharia, Universidade do Minho  
email: [debora@jpb.pt](mailto:debora@jpb.pt)

<sup>(2)</sup>Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Escola Engenharia, Universidade do Minho  
email: [barros@civil.uminho.pt](mailto:barros@civil.uminho.pt)

Universidade do Minho, Escola de Eng<sup>a</sup>, Departamento Eng<sup>a</sup> Civil, Azurém, 4810-058 Guimarães, Portugal

### Resumo

Para aumentar a resistência e a capacidade de absorção de energia de elementos de betão submetidos a compressão, provetes cilíndricos de betão de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura foram confinados com faixas de manta de fibras de carbono. Foram aplicados diversos arranjos de confinamento, por forma a avaliar a influência da largura e do número de faixas, bem como do número de camadas por faixa, no aumento quer da resistência à compressão, quer da ductilidade do betão. Os principais resultados obtidos são apresentados e analisados.

## 1 Introdução

Os danos induzidos por acções sísmicas têm revelado que a deficiente ductilidade dos elementos de pilar é uma das causas subjacentes ao colapso das estruturas que suportam (Xiao *et al.*, 1999). A ductilidade de elementos de betão pode ser aumentada por intermédio da aplicação de reforço que eleve o grau de confinamento do betão. Desta estratégia resulta geralmente um aumento da capacidade de carga e de absorção de energia dos elementos reforçados. Este confinamento pode ser obtido colando mantas de fibras de vidro ou de carbono (FRP) à superfície exterior do elemento a reforçar, (Seible *et al.*, 1997, Mirmiran e Shahawy, 1997; Xiao e Wu, 2000; Untiveros, 2002). Apesar do êxito alcançado pela aplicação de sistemas confinamento com mantas de FRP em modelos laboratoriais, protótipos e aplicações in situ, a investigação sobre os mecanismos de interacção entre o reforço e o betão é ainda limitada, assim como os resultados disponíveis para a elaboração de modelos de análise e de dimensionamento.

O presente trabalho pretende dar um contributo para o aumento do conhecimento nesta área. Para tal, foram efectuadas séries de ensaios de compressão uniaxial com provetes cilíndricos cintados com diferentes arranjos de faixas de manta de fibras de carbono (CFRP). Foi analisada a influência da largura destas faixas, do seu número ao longo da altura do provete e do número de camadas por faixa, no comportamento à compressão

uniaxial de provetes de betão. Os modos de rotura registados são apresentados e interpretados, bem como os principais resultados obtidos.

## 2 - Sistemas de confinamento

Os tipos de sistemas de confinamento adoptados estão representados na Figura 1 e Tabela 1. Na Figura 2 incluem-se fotos de provetes representativos de alguns dos sistemas de confinamento adoptados. Estes sistemas são compostos por faixas de manta de fibras de carbono (CFRP), fixas ao betão e às camadas subjacentes por intermédio de resina epoxi. Na presente campanha pretendeu-se avaliar a influência da largura das faixas,  $W$ , do seu número ao longo da altura do provete,  $S$ , e do número de camadas em cada faixa,  $L$ , no comportamento em compressão do provete. Para tal, foram efectuadas as séries de ensaios indicadas na Tabela 1. Cada série era constituída por três provetes. A variação de  $W$ ,  $S$  e  $L$  conduziu a provetes com diferente percentagem confinamento ( $\rho_f = A_f/A_{c,t}$ ), em que  $A_f = 2 \times S \times W \times L \times 0.167 \text{ mm}^2$  é a secção transversal do sistema de confinamento (segundo o fornecedor, a manta de CFRP tem 0.167mm de espessura) e  $A_{c,t} = 150 \times 300 \text{ mm}^2$  é a secção longitudinal do provete (150 mm de largura por 300 mm de altura). Assim, tendo em conta os valores de  $\rho_f$  e a melhoria de propriedades proporcionada por cada sistema de confinamento, pretende-se concluir da importância relativa de  $W$ ,  $S$  e  $L$  para o aumento da resistência e da ductilidade do betão, sendo esta última representada pela área sob a curva tensão-extensão até determinada extensão. Cada provete é designado por  $WiSjLk$ , em que  $i$  é a largura da faixa (15, 30, 45, 60 e 300 mm),  $j$  é o número de faixas ao longo do provete (1 a 5) e  $k$  é o número de camadas por faixa (1 a 7). Na Tabela 1,  $t$  é o espaço de betão livre entre cintas.

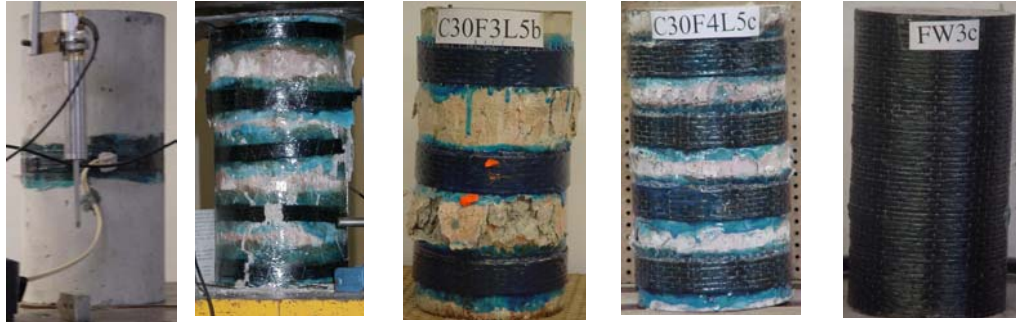
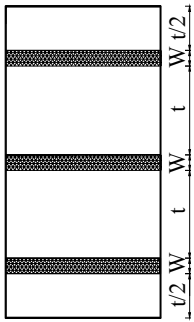


Figura 1 - Sistema genérico de confinamento  
 Figura 2 - Fotos de alguns dos sistemas de confinamento adotados

Tabela 1 – Series de ensaios (continua)

W [mm]	S [-]	t [mm]	L [-]	$A_f$ [mm <sup>3</sup> ]	$\rho_f$ [%]	Designação do provete	Sistema de confinamento
15	1	-	1	5.01	1.11E-02	W15S1L1	
			2	10.02	2.23E-02	W15S1L2	
			3	15.03	3.34E-02	W15S1L3	
			4	20.04	4.45E-02	W15S1L4	
			6	30.06	6.68E-02	W15S1L6	
			6	30.06	6.68E-02	W15S1L6	
	3	85	1	15.03	3.34E-02	W15S3L1	
			2	30.06	6.68E-02	W15S3L2	
			3	45.09	1.00E-01	W15S3L3	
			4	60.12	1.34E-01	W15S3L4	
			6	90.18	2.00E-01	W15S3L6	
			6	90.18	2.00E-01	W15S3L6	
	5	45	1	25.05	5.57E-02	W15S5L1	
			2	50.1	1.11E-01	W15S5L2	
			3	75.15	1.67E-01	W15S5L3	
			4	100.2	2.23E-01	W15S5L4	
			6	150.3	3.34E-01	W15S5L6	
			6	150.3	3.34E-01	W15S5L6	
30	3	70	3	90.18	2.00E-01	W30S3L3	
			5	150.3	3.34E-01	W30S3L5	
			7	210.42	4.68E-01	W30S3L7	
	4	45	3	120.24	2.67E-01	W30S4L3	
			5	200.4	4.45E-01	W30S4L5	
			7	280.56	6.23E-01	W30S4L7	
45	4	30	3	180.36	4.01E-01	W45S4L3	
			5	300.6	6.68E-01	W45S4L5	
			7	420.84	9.35E-01	W45S4L7	
60	3	40	3	180.36	4.01E-01	W60S3L3	
			5	300.6	6.68E-01	W60S3L5	
			7	420.84	9.35E-01	W60F3L7	
300	1	-	3	300.6	6.68E-01	W300S1L3	
			5	501	1.11E+00	W300S1L5	
			7	701.4	1.56E+00	W300S1L7	

### 3 - Propriedades dos materiais

#### 3.1 - Betão

A Tabela 2 inclui a composição do betão utilizado na fabricação dos provetes ensaiados. Ensaio de compressão efectuados aos 28 dias com provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura indicaram tratar-se de um betão com 23 MPa de resistência média (desvio padrão de 1.8 MPa num universo de 3 provetes).

Tabela 2 – Composição do betão dos provetes cilíndricos [kg/m<sup>3</sup>]

Cimento Secil 32.5 II	Brita grossa	Brita média	Areia	Água
350.0	725.93	438.23	694.59	155.83

#### 3.2 - Mantas de CFRP

Neste trabalho foi utilizada manta flexível de fibras de carbono curada “in situ”, designada comercialmente por MBrace Manta C1-30 que, segundo o fornecedor, tem espessura de 0.167 mm, resistência à tracção superior a 3700 MPa, módulo de elasticidade segundo a direcção das fibras de 240 GPa e extensão última próxima de 15 %. A manta MBrace é fornecida em rolos de 50 m de comprimento por 0.3 m de largura.

Para tratamento da superfície dos provetes foi aplicado um primário designado por Mbrace primário, transparente e de baixa viscosidade que, segundo o fornecedor, desenvolve 12 MPa de resistência à tracção.

O saturante aplicado era constituído por uma resina epoxi de alto conteúdo de sólidos e de fácil aplicação para aderência e colocação de mantas à base de fibras de carbono. Segundo o fabricante, esta resina apresenta valores de resistência à tracção da ordem dos 54 MPa.

### 4 - Aplicação dos sistemas de confinamento

As fases essenciais que constituem a técnica de confinamento utilizada estão ilustradas nas figuras 3 a 7. A 1ª fase consistiu na preparação da superfície do provete nas zonas onde as faixas de manta iam ser fixadas, tendo-se procedido ao esmerilamento dessas zonas, por forma a retirar a goma de cimento. Na 2ª fase, os provetes eram limpos com jactos de ar comprimido, por forma a retirar as poeiras depositadas. Na 3ª fase, as zonas onde as faixas de manta iriam ser fixadas eram limpas com álcool, seguindo-se a aplicação do primário (4ª fase). Passados aproximadamente trinta minutos, iniciava-se a 5ª fase que era constituída pela aplicação de resina epoxi nas zonas de fixação das faixas de manta, tendo-se utilizado uma brocha, e tido o cuidado necessário de forma a ser garantida uma distribuição uniforme da resina. Na 6ª fase as faixas eram colocadas sobre uma superfície lisa e plana, para sua impregnação com resina epoxi. Com a ajuda de um rolo, a faixa era aplicada sobre o provete, tendo havido o cuidado de evitar a formação de vazios entre as faixas de manta e o provete. Após 30 minutos, uma segunda camada de resina era aplicada, seguida da aplicação da segunda faixa de manta. Este último procedimento era repetido para cada uma das camadas de manta. Sobre a última camada de manta foi aplicada uma demão de resina epoxi.

As faixas de manta de CFRP aplicadas tinham um comprimento total igual ao perímetro do cilindro mais o comprimento de entrega. As faixas foram colocadas por forma a que os comprimentos de entrega fossem desencontrados (ver figura 8) e assim garantir a todas as séries ensaiadas um igual comprimento de entrega das faixas de manta.



Figura 3 – Esmerilamento do provete nas zonas de fixação das faixas.



Figura 4 – Aplicação do primário nas zonas de fixação das faixas.



Figura 5 – Aplicação da resina nas zonas de fixação das faixas.



Figura 6 – Aplicação da resina nas faixas de manta.



Figura 7 – Aplicação das faixas de manta.

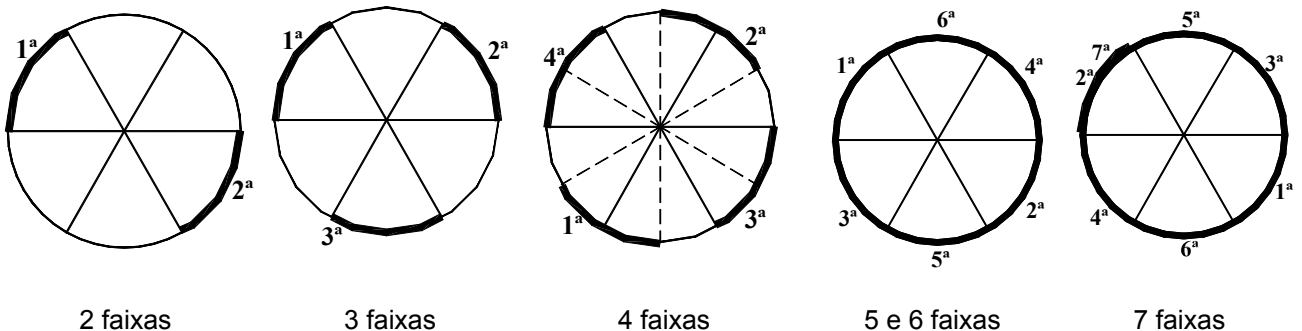


Figura 8 – Disposição do comprimento de entrega das faixas de manta de carbono.

## 5 - Equipamento e procedimentos de ensaio

Os ensaios de compressão foram efectuados numa prensa de 2000 kN de capacidade máxima de carga, controlada por um servo-mecanismo. A extensão axial do provete foi determinada por intermédio de três LVDTs de  $\pm 12.5$  mm de campo, dispostos segundo o esquema representado na Figura 9. Estes LVDTs mediram os deslocamentos entre os pratos da prensa, tendo a extensão sido obtida dividindo o deslocamento ocorrido no eixo do provete pela altura do provete. Os ensaios foram efectuados sob controlo de deslocamentos, tendo-se para tal utilizado um LVDT de  $\pm 5$  mm de campo. Para determinar as extensões ocorridas nas faixas de manta de CFRP, foram utilizados

extensômetros de 120  $\Omega$  de resistência e 5 mm de comprimento. Nos provetes com faixa de manta a meia altura do provete, apenas esta faixa foi instrumentada com um extensômetro, no centro da faixa. Nos restantes casos foi colocado um extensômetro em cada uma das duas faixas simetricamente dispostas em relação à meia altura do provete (ver Figura 10). Os extensômetros foram colados na face exterior da camada mais externa (última camada aplicada), no sentido das fibras.

Para diminuir o efeito de confinamento no provete, induzido pelos pratos de aço da prensa, entre as extremidades do provete e os pratos da prensa foi colocado uma interface constituída por duas folhas de teflón de 0.1 mm de espessura, entre as quais foi aplicado óleo.

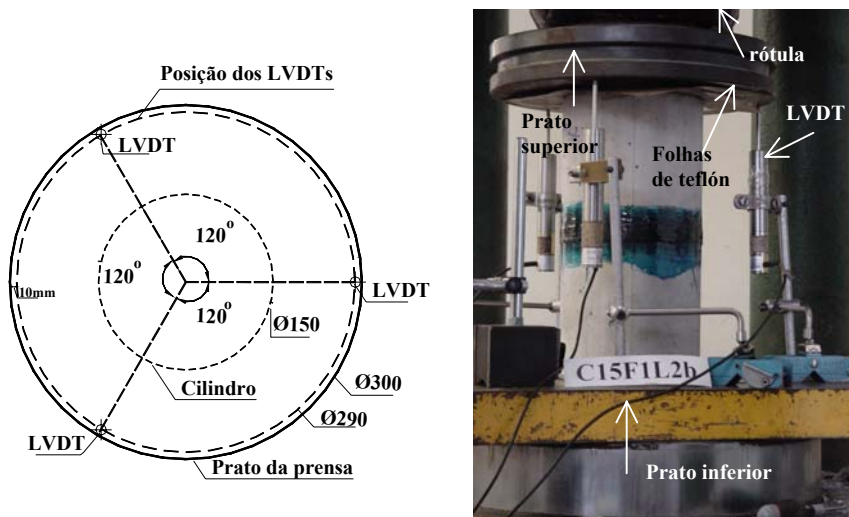


Figura 9 – Posição dos três LVDTs.

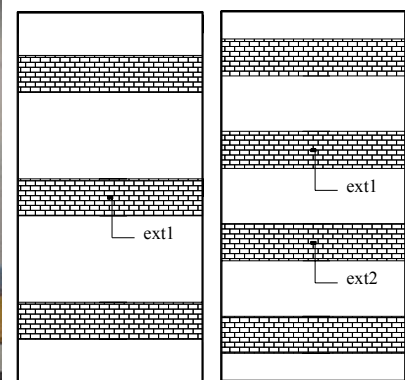


Figura 10 – Disposições dos extensômetros

## 6 - RESULTADOS

### 6.1 - Modos de rotura

Na Figura 11a representa-se o modo de rotura típico dos provetes de betão simples (BS), enquanto na Figuras 11b a 11h ilustram-se os modos de rotura típicos ocorridos nas séries com três camadas por cada faixa de manta de CFRP. Nos provetes de BS ocorreu a formação de fissuras verticais, no sentido da aplicação da carga. Nos provetes confinados com uma percentagem de reforço,  $\rho_f$ , superior a  $\approx 0.2$  e nos quais foi alcançada a sua rotura, esta foi acompanhada pela rotura de, pelo menos, uma das faixas de manta. Em geral, nos provetes com  $\rho_f > 0.4$  não foi possível alcançar a carga de rotura do provete, dado se ter atingido, ou o limite do campo de medida do LVDT de controlo, ou a capacidade máxima de carga da prensa. Em geral, nestes provetes nenhuma das suas faixas de manta rompeu. Nestes casos ocorreu elevada deformação transversal do betão entre as faixas.

Nos provetes em que faixas de manta romperam, a rotura foi violenta, precedida por estalidos relacionados com o rompimento de fibras. Nestes casos, a rotura era, geralmente, ortogonal à orientação das fibras. Após análise da face da camada de CFRP colada ao provete, verificou-se que uma fina camada de betão ficou ligada à manta, revelando ter ocorrido uma adequada ligação entre a manta e o betão. Nos provetes da série W300 (confinamento total do provete), à data do ensaio dos seus provetes verificou-se que a epoxi não tinha alcançado o grau de endurecimento esperado para o período de cura a que foi submetida, devido às baixas temperaturas registadas nesse

período na sala onde os provetes ficaram acondicionados ( $\approx 5^\circ \text{C}$ ). Assim, o nível de confinamento obtido nesta série terá sido, eventualmente, inferior ao que seria obtido, caso as condições de cura tivessem sido iguais às das restantes séries.

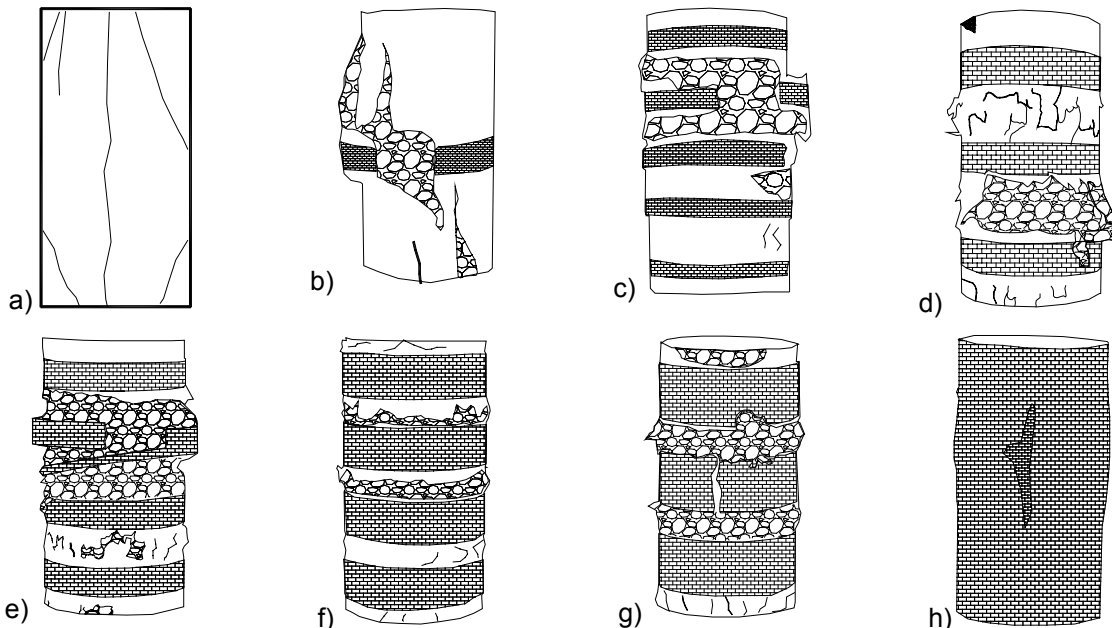


Figura 11 - Modos de rotura típicos nas séries: a) BS; b) W15S1L3; c) W15S5L3; d) W30S3L3; e) W30S4L3; f) W45S4L3; g) W60S3L3; h) W300S1L3.

## 6.2 - Curvas tensão versus extensão

Na Figura 12 representa-se a relação entre a tensão e a extensão axial do provete das séries W15S1 e W15S5. Nestas séries não foi possível obter a relação entre a tensão e a extensão na manta de CFRP, dado não terem sido colocados extensómetros nas mantas de CFRP.

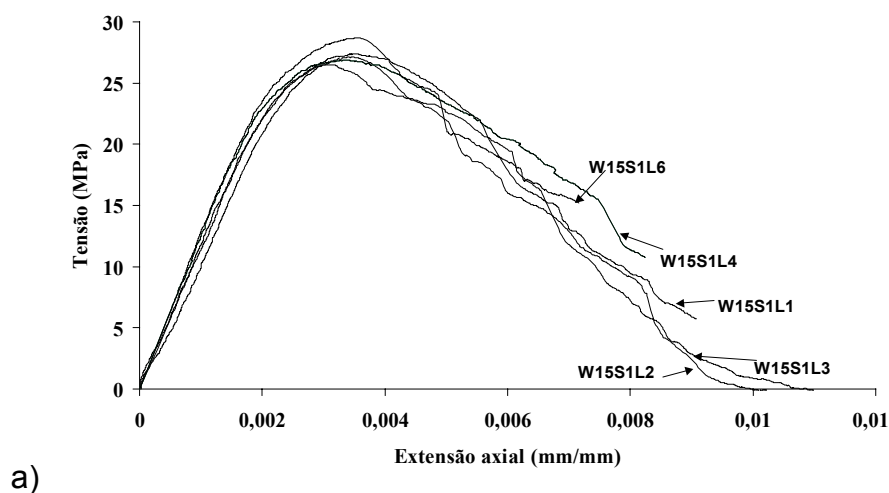
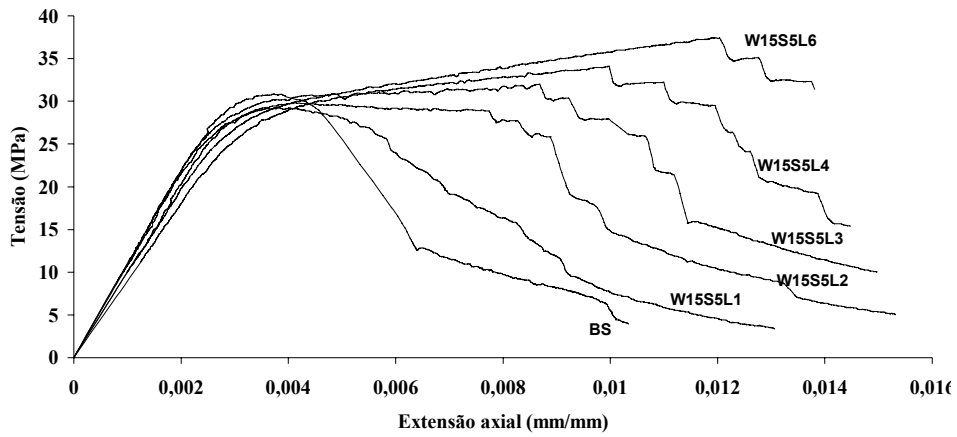


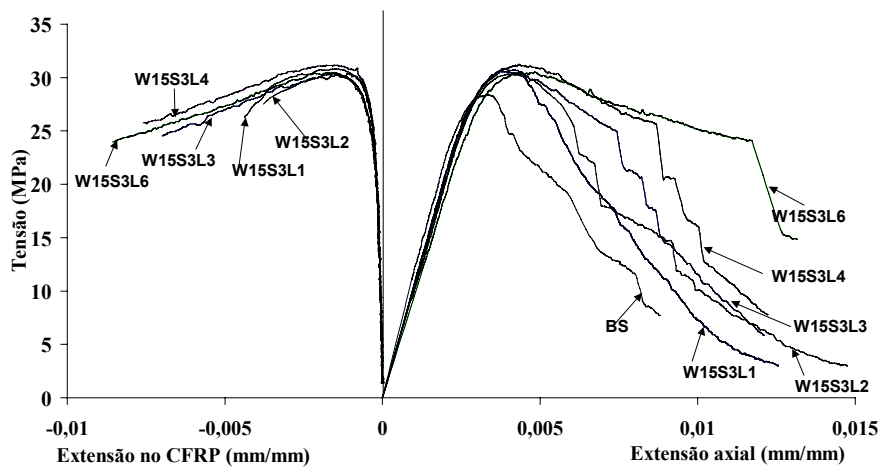
Figura 12 - Curvas tensão vs extensão axial nas séries a) W15S1; b) W15S5 (continua).



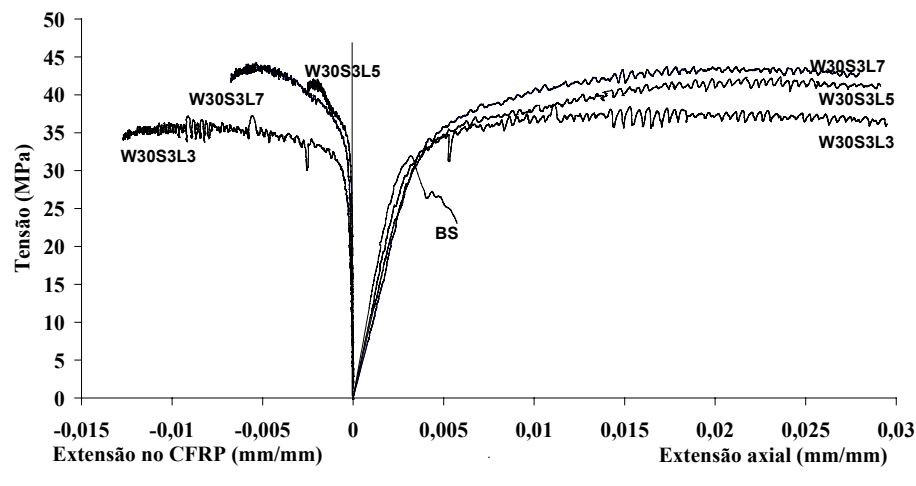
b)

Figura 12 (continuação) - Curvas tensão vs extensão axial nas séries a) W15S1; b) W15S5.

Na Figura 13 representam-se as curvas que relacionam a tensão, quer com a extensão axial do provete, quer com a extensão na manta de CFRP (na direcção das fibras), nas restantes séries. Cada uma das curvas das Figuras 12 e 13 representa a média das respostas registadas em três provetes. A tensão é o cociente entre a força aplicada no provete e a secção transversal deste. Para facilitar a exposição gráfica dos resultados, foram atribuídos os sinais positivo e negativo às extensões axial e no CFRP, respectivamente.



a)



b)

Figura 13 - Curvas tensão vs extensão axial e extensão no CFRP nas series: a) W15S3; b) W30S3; c) W30S4; d) W45S4; e) W60S3; f) W300S1 (continua).

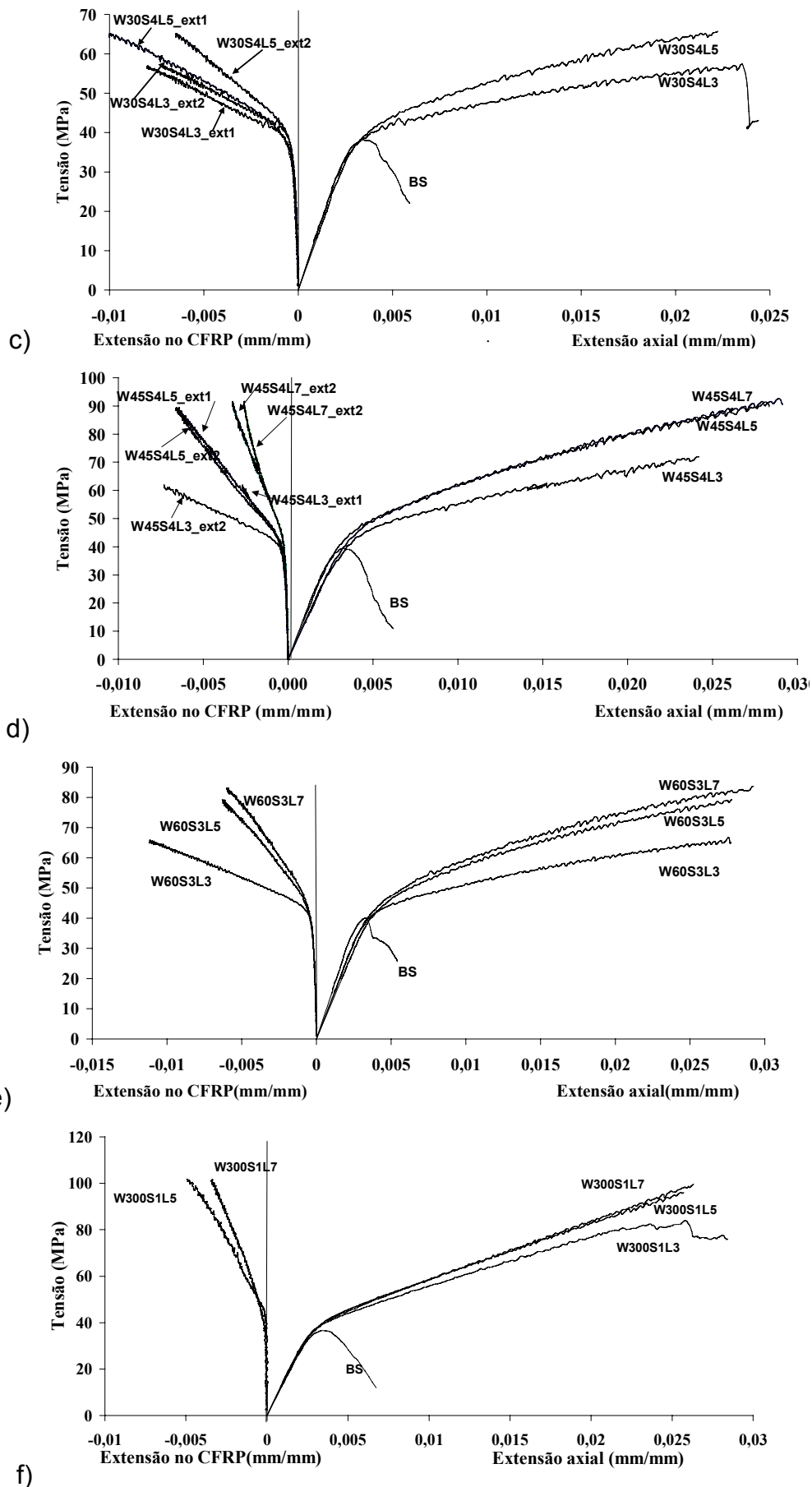


Figura 13 (continuação) - Curvas tensão vs extensão axial e extensão no CFRP nas series: a) W15S3; b) W30S3; c) W30S4; d) W45S4; e) W60S3; f) W300S1.

Da análise dos gráficos das Figura 12a e 13a verifica-se que o sistema de confinamento aplicado na série W15S1 é ineficaz, e o adoptado na série W15S3 proporciona aumento da capacidade de absorção de energia do betão, mas a capacidade de carga não é aumentada, i.e., todos os provetes revelam uma fase de amolecimento. Na Figura 12b constata-se que, após a extensão de pico da série de provetes de BS, os provetes da série W15S5 com um número de camadas superior a três apresentaram um ramo de "endurecimento". Na série W15S3, a extensão máxima no CFRP aumentou com o número de camadas.

Nos provetes confinados com faixas de largura superior a 15 mm, além do aumento significativo da capacidade de absorção de energia, a carga máxima também aumentou. Os provetes confinados com três faixas de 30 mm de largura (W30S3), Figura 13b, apresentaram um comportamento "pseudo-plástico", dado que a capacidade de carga aumentou suavemente até à rotura do provete (extensão axial cerca de 30‰). Nesta série, o aumento da capacidade de carga foi mais significativo na passagem de três para cinco camadas de CFRP do que na passagem de cinco para sete camadas. Por sua vez, as extensões no CFRP diminuíram com o aumento do número de camadas.

Nos provetes confinados com quatro faixas de 30 mm de largura (W30S4), Figura 13c, a rigidez da resposta deformacional, após a extensão de pico da correspondente série de provetes de BS, aumentou significativamente com o número de camadas de CFRP. As extensões nas faixas centrais dos provetes confinados com três camadas por faixa foram semelhantes, tendo alcançado um valor máximo próximo dos 7.6‰, o que corresponde a aproximadamente 50% de  $\epsilon_{fu}$ . Nos provetes com cinco camadas por faixa, na faixa logo acima do plano de simetria transversal do provete (ext1, ver Figura 10) foram registadas extensões superiores às obtidas na faixa logo abaixo daquele plano (ext2), devido à maior deformabilidade transversal ocorrida na parte superior dos provetes desta série (ver Figura 11e). Na faixa superior foi alcançada uma extensão máxima próxima de 65% de  $\epsilon_{fu}$ .

Na série de provetes W45S4, i.e., nos provetes com quatro faixas de 45mm de largura registou-se um comportamento similar ao dos provetes da série W30S4. No entanto, a série W45S4 permite maiores aumentos de carga e de absorção de energia. Acima de cinco camadas os benefícios são diminutos, quer em termos de capacidade de carga, como de absorção de energia. As extensões das faixas de CFRP diminuíram com o aumento do número de camadas, tendo as extensões nas faixas acima e abaixo do plano de simetria transversal do provete sido praticamente iguais nos provetes reforçados com cinco e sete camadas, enquanto nos provetes reforçados com três camadas, as extensões na faixa acima daquele plano voltaram a ser superiores às extensões registadas na faixa abaixo do referido plano. A extensão máxima no CFRP foi de  $\approx 48\%$  de  $\epsilon_{fu}$ .

As séries W45S4 e W60S3, apesar de terem o mesmo  $\rho_f$ , proporcionaram níveis diferentes de confinamento. Assim, em termos de aumento da capacidade de carga, foi mais elevado na série W45S4, revelando ser mais influente o número de faixas que a largura da faixa. No entanto, em termos de aumento de extensão máxima no CFRP, os maiores valores foram registados na série W60S3.

Nas séries em que os provetes foram envolvidos em toda a sua altura com manta de CFRP (W300S1) verificou-se que a partir de cinco camadas o acréscimo de carga e de capacidade de absorção de energia é marginal. Nestas séries também se verificou uma diminuição da extensão máxima no CFRP com o número de camadas de manta aplicadas.

### 6.3 – Principais indicadores de eficácia dos sistemas de confinamento

Os principais indicadores da eficácia dos sistemas de confinamento utilizados estão incluídos na Tabela 3, onde  $\sigma_{\max}$  é a tensão máxima de compressão (nas séries de provetes de BS,  $\sigma_{\max}$  representa o valor médio da resistência à compressão,  $f_c$ , registado nessas séries),  $\epsilon_{cp}$  é a extensão correspondente a  $f_c$ ,  $\epsilon_{cfp}$  é a extensão correspondente a  $\sigma_{\max}$  (nas séries de provetes de BS  $\epsilon_{cfp} = \epsilon_{cp}$ ),  $\epsilon_{f\max}$  é a extensão máxima no CFRP e  $\epsilon_{fu}$  é a extensão de rotura do CFRP. Cada um dos valores indicados na Tabela 3 é a média dos resultados registados nos três provetes que constituem cada série.

Para representar graficamente a eficácia, quer em termos de incremento de capacidade de carga, quer em termos de incremento de ductilidade, proporcionada pelos sistemas de confinamento aplicados, foi determinada a relação  $\sigma/f_c$  vs  $\epsilon/\epsilon_{cp}$  em que  $\sigma$  e  $\epsilon$  são a tensão e a extensão no provete confinado. A referida relação está representada na Figura 14, para todas as séries ensaiadas. Ainda com o mesmo objectivo, representa-se na Figura 15 a relação entre  $\sigma/f_c$  e  $\rho_f$ , para diferentes estados de extensão axial relativa dos provetes confinados,  $\epsilon/\epsilon_{cp}$ , nomeadamente,  $\epsilon/\epsilon_{cp}=2, 3, 4, 6$  e  $8$ . A relação  $\sigma/f_c-\rho_f$  para diferentes  $\epsilon/\epsilon_{cp}$  permite averiguar quais são as características dos sistemas de reforço mais relevantes em termos de aumento da capacidade de carga, para diferentes níveis de deformação alcançados pelos provetes confinados.

Da análise dos valores incluídos na Tabela 3 e da leitura dos gráficos representados nas Figura 14 e 15 verifica-se que:

- A capacidade de carga aumentou com  $\rho_f$ ;
- Para  $\rho_f$  inferior a 0.167 não se regista aumento da capacidade de carga, qualquer que seja o sistema de confinamento;
- Acima de cinco camadas de CFRP por faixa, o aumento da capacidade de carga é significativamente inferior que entre sistemas com menor número de camadas;
- Para o sistema constituído por faixas de 15mm de largura, o aumento da capacidade de carga só foi significativo no sistema constituído por cinco faixas de seis camadas (aumento de 21%);
- Nos provetes da série W30S3 o incremento da capacidade de carga foi de 19%, 28% e 33% para três, cinco e sete camadas, respectivamente;
- Nos provetes da série W30S4 o incremento da capacidade de carga foi de 48% e 70% para três e cinco camadas, respectivamente;
- Comparando os resultados obtidos nas séries W30S3 e W30S4 verifica-se que, para o aumento da capacidade de carga, é mais importante diminuir a distância entre faixas ( $t$  - ver Figura 1) do que aumentar o número de camadas. Esta conclusão também pode ser extraída da análise dos resultados obtidos nas séries W45S4 e W60S3 que, apesar de possuírem mesma percentagem de CFRP, o aumento da capacidade de carga foi superior na série W45S4, cujo afastamento entre faixas é de 30 mm, enquanto na série W60S3 é de 40 mm;
- Nas séries W300S1 o aumento da capacidade de carga foi de 127%, 162% e 172% para provetes com três, cinco e sete camadas por faixa, respectivamente.
- A resistência à compressão do betão simples pode ser duplicada utilizando-se um dos seguintes sistemas de confinamento: W45S4L4, W60S3L5, W300S2;
- Em termos do parâmetro  $\epsilon_{cfp}/\epsilon_{cp}$  verifica-se que aumenta com a percentagem de confinamento. Até  $\rho_f=0.2$  o aumento é inferior a três, aumentando significativamente

para  $\rho_f$  superior a 0.2, atingindo valores próximo de nove. De sublinhar que, por limitação da capacidade de carga da prensa, nalgumas séries não foi possível alcançar a rotura do provete, pelo que, nestas séries, o valor real daquele parâmetro teria sido superior, caso tivesse sido possível levar esses provetes à rotura;

- No que se refere à extensão máxima alcançada nos CFRP constata-se que, em termos gerais, diminui com o aumento do número de camadas de CFRP por faixa (ver Tabela 3). A extensão máxima variou entre 16% e 82% da extensão de rotura do CFRP. A série com resultados mais homogêneos foi a W30S4, com variação entre 46% e 65% de  $\varepsilon_{fu}$ . De notar que os valores registados dependem significativamente dos modos de rotura ocorridos, dado que as extensões registadas apenas representam o estado de extensão da zona onde os extensómetros ficaram colados.

Tabela 3 - Principais indicadores da eficácia dos sistemas de confinamento

Designação do provete	S	L	$\rho_f$ [%]	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{max}/f_c$	$\varepsilon_{cfp}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\varepsilon_{cfp}/\varepsilon_c$ $\rho$	$\varepsilon_{fmax}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$
W15S1	1	1	1.11E-02	27.46	-	3511	-	-	-
		2	2.23E-02	27.12	-	3488	-	-	-
		3	3.34E-02	26.48	-	3098	-	-	-
		4	4.45E-02	26.86	-	3347	-	-	-
		6	6.68E-02	28.68	-	3598	-	-	-
Betão simples	-	0		28.5 ( $f_c$ )	1.0	3298 ( $\varepsilon_{cp}$ )	1.0	-	
W15S3	3	1	3.34E-02	30.6	1.07	3975	1.20	4375.4	0.284
		2	6.68E-02	30.3	1.06	4228	1.28	3775.9	0.245
		3	1.00E-01	30.4	1.07	4038	1.22	6990.3	0.454
		4	1.34E-01	31.2	1.09	4358	1.32	7588.9	0.493
		6	2.00E-01	30.5	1.07	4982	1.51	8560.2	0.556
Betão simples	-	0		30.8 ( $f_c$ )	1.0	3922 ( $\varepsilon_{cp}$ )	1.0	-	
W15S5	5	1	5.57E-02	29.2	0.95	4040	1.03	-	
		2	1.11E-01	29.8	0.97	4119	1.05	-	
		3	1.67E-01	32.0	1.04	8685	2.21	-	
		4	2.23E-01	34.0	1.10	9990	2.55	-	
		6	3.34E-01	37.4	1.21	12062	3.08	-	
Betão simples	-	0		32.7 ( $f_c$ )	1.0	3807 ( $\varepsilon_{cp}$ )	1.0	-	
W30S3	3	3	2.00E-01	38.85	1.19	11220	2.94	12706.2	0.825
		5	3.34E-01	42.04	1.28	23644	6.21	2485.3	0.161
		7	4.68E-01	43.46	1.33	24108	6.33	6748.1	0.438
Betão simples	-	0		38.8 ( $f_c$ )	1.0	3411 ( $\varepsilon_{cp}$ )	1.0	-	
W30S4	4	3	2.67E-01	57.48	1.48	23540	6.9	Ext1- 7959.1	0.517
								Ext2- 7159.1	0.465
		5	4.45E-01	65.76	1.70	22235	6.5	Ext1- 10036	0.652
								Ext2- 6493.5	0.422
Betão simples	-	0		39.2 ( $f_c$ )	1.0	3339 ( $\varepsilon_{cp}$ )	1.0	-	
W45S4	4	3	4.01E-01	71.99	1.84	24182	7.24	Ext1- 2686.6	0.175
								Ext2- 7321.9	0.475
		5	6.68E-01	91.05	2.33	28239	8.45	Ext1- 6491.0	0.422
								Ext2- 6632.6	0.431
		7	9.35E-01	91.85	2.35	29030	8.69	Ext1- 2573.5	0.167
								Ext2- 3269.1	0.212
Betão simples	-	0		40.0 ( $f_c$ )	1.0	3323 ( $\varepsilon_{cp}$ )	1.0	-	
W60S3	3	3	4.01E-01	65.87	1.65	27640	8.32	11203.0	0.727
		5	6.68E-01	79.28	1.98	27778	8.36	6300.9	0.409
		7	9.35E-01	83.72	2.09	29243	8.80	6016.5	0.394
Betão simples	-	0		36.7 ( $f_c$ )	1.0	3518 ( $\varepsilon_{cp}$ )	1.0	-	
W300S1	-	3	6.68E-01	83.33	2.27	25960	7.38	-	-
		5	1.11E00	95.98	2.62	25720	7.31	4948	0.321
		7	1.56E00	99.58	2.72	26320	7.48	3428	0.222

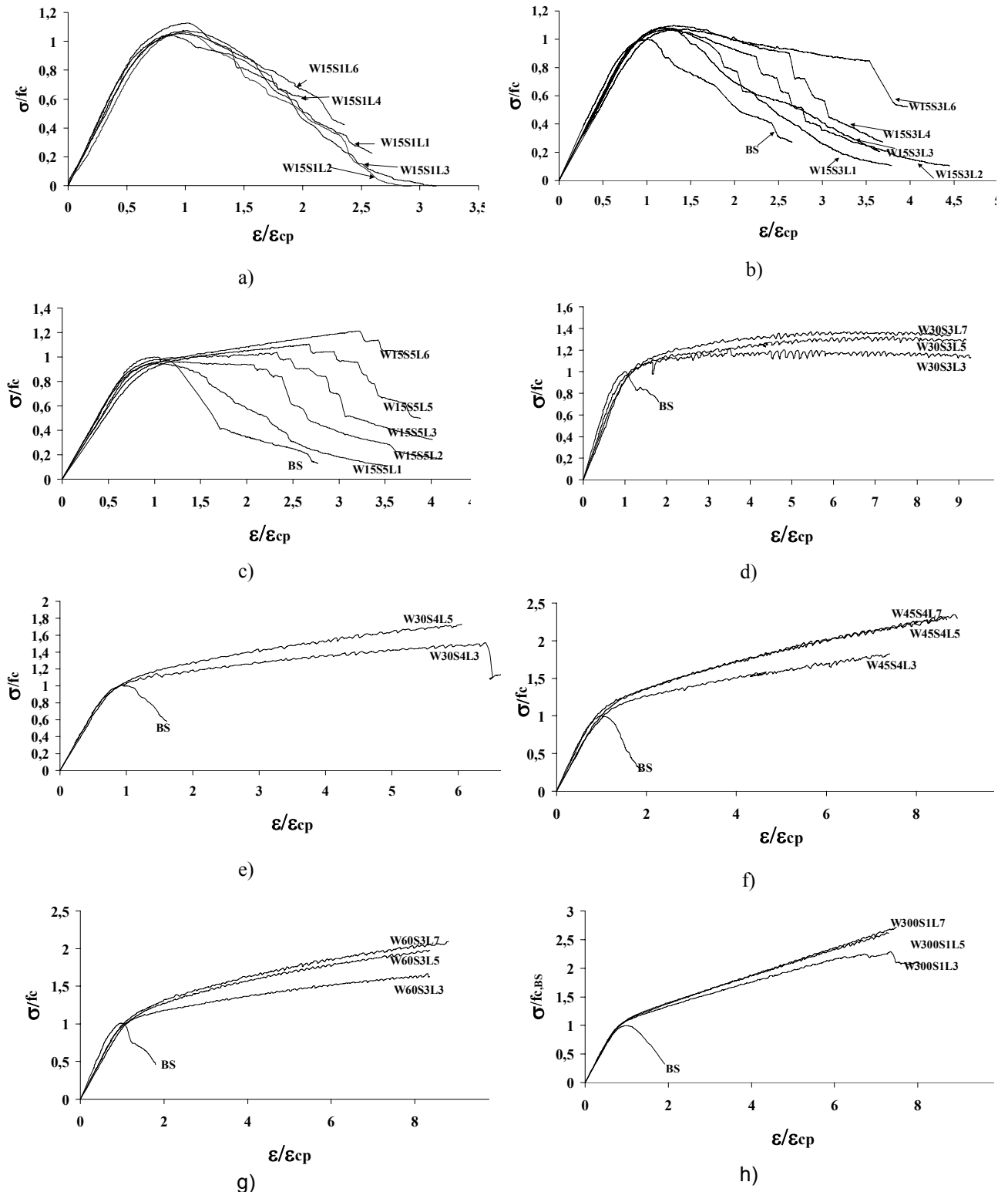


Figura 14 – Curvas  $\sigma/f_c$  versus  $\epsilon/\epsilon_{cp}$  nas séries: a)W15S1; b) W15S3; c) W15S5; d) W30S3; e) W30S4; f) W45S4; g) W60S3; h) W300S1.

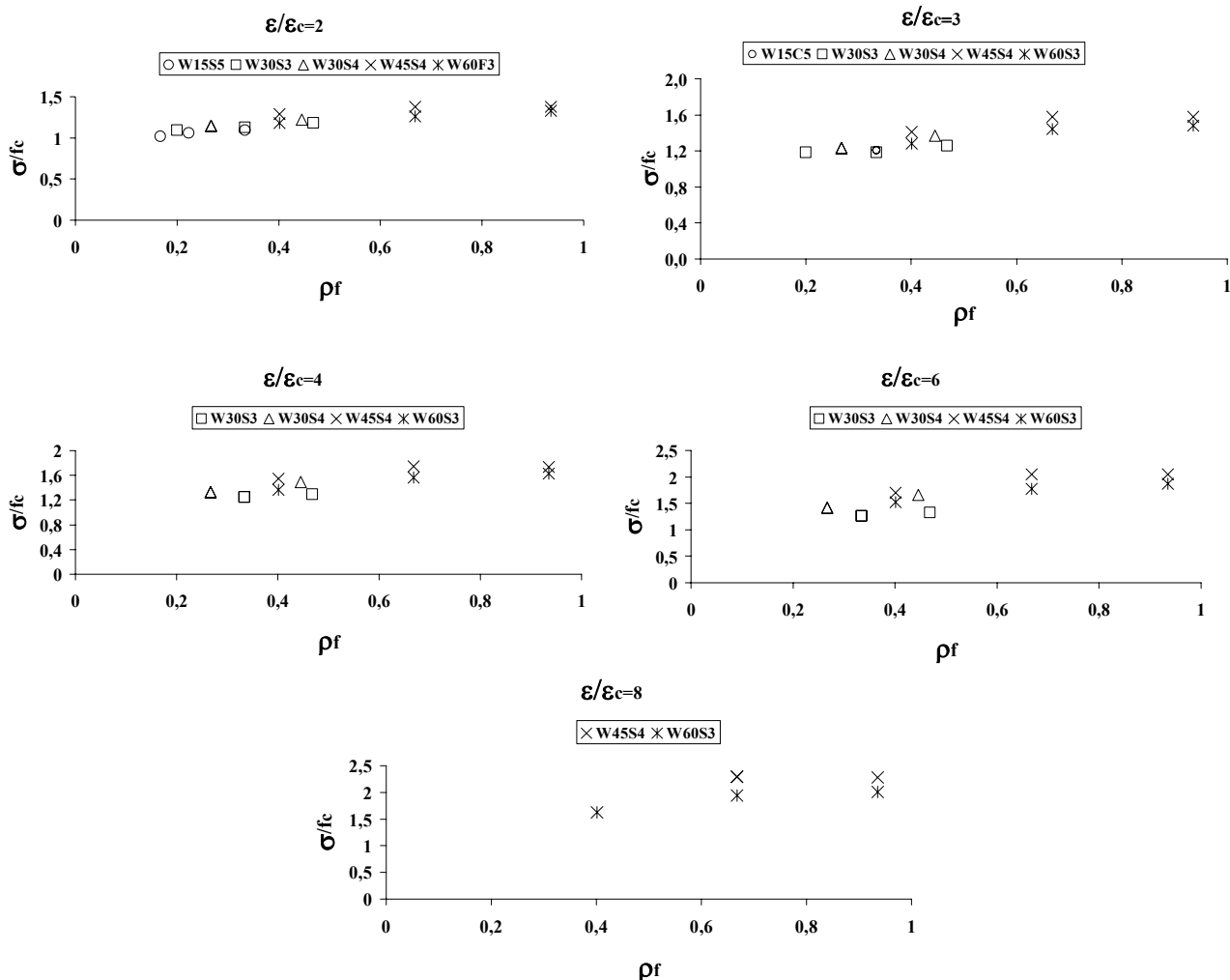


Figura 15 – Curvas  $\sigma/f_c$  versus percentagem de reforço ( $\rho_f$ )

## 7 - CONCLUSÕES

No presente trabalho é estudado o comportamento à compressão uniaxial de provetes cilíndricos betão confinados com faixas de manta de CFRP. Foi analisada a influência do número de faixas, da largura das faixas e do número de camadas de manta por cada faixa, no aumento da resistência, da capacidade de absorção de energia, nos níveis de extensão máxima alcançados pelo CFRP e nos modos de rotura observados.

Da análise dos resultados obtidos nos diferentes sistemas de confinamento utilizados pode-se concluir que a tensão máxima registada nos correspondentes provetes de betão simples (BS), i.e., não confinados, só foi ultrapassada nas séries com uma percentagem de confinamento superior a 0.17 ( $\rho_f > 0.17$ ). Nas séries com  $\rho_f < 0.17$  apenas se registou um aumento da capacidade de absorção de energia. Em todas as séries verificou-se um aumento da capacidade de carga e de absorção de energia com o aumento do número de camadas de CFRP por faixa. Porém, acima de cinco camadas o aumento não foi tão significativo como o registado até cinco camadas.

A influência da largura e do número de faixas no grau de confinamento alcançado está relacionada com o espaço livre de betão entre as faixas. Assim, em séries com a mesma percentagem de confinamento de CFRP verificou-se maiores aumentos de capacidade de carga e de energia absorvida nas que dispunham de menor espaço livre entre faixas. Tal deve-se ao facto de nestes espaços ter ocorrido grande concentração de dano no betão.

A extensão máxima na camada mais externa de manta de CFRP diminuiu com o aumento do número de camadas aplicadas nas faixas.

A capacidade de carga de provetes de betão simples com níveis de resistência de 30 a 40 MPa pode ser duplicada utilizando um dos três seguintes tipos de sistemas de confinamento: quatro faixas de 45 mm de largura com quatro camadas por faixa; três faixas de 60 mm de largura com cinco camadas por faixa; completo envolvimento do provete com duas camadas.

## **8 - AGRADECIMENTOS**

Os autores do presente trabalho agradecem a colaboração prestada pela empresa BeTTor MBT Portugal.

## **9 - BIBLIOGRAFIA**

CEB-FIB, Structural Concrete- textbook on behaviour, design and performance, vol.1, July 1999.

Choi, S.; Thienel K.-C.; Shah, S. P., Strain softening of concrete, RILEM Round Robin Test, Committee 148-SSC-Strain softening of concrete, Evaston, IL, USA, July, 1994.

Mirmiran A.; Shahawy M., Behaviour of concrete columns confined by fiber composites, ASCE Journal of structural Engineering, Vol 123, nº5, pp 583-590, 1997.

Publicação técnico/comercial da MBTBettor, Master Builders Technologies.

Seible, F.; Priestley, M. J. N.; Hegemier, G. A.; Innamorato, D., Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets, ASCE, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 1, nº2, pp 52-62, 1997.

Untiveros, C. M. A., Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión, Tese de Doutoramento, UPC, Barcelona, Setembro de 2002.

Van Vliet, M. R. A.; Van Mier, J. G. M., Experimental investigation of concrete fracture under uniaxial compression, *Mechanics of cohesive frictional material*, vol. 1, pp 115-127, 1996.

Xiao Y. and Wu H., and Martin, G. R., "Prefabricated composite jacketing of RC columns for enhanced shear strength", ASCE Journal of structural Engineering, Vol 124, nº3, pp 255-264, 1999.

Xiao, Y.; Wu H., Compressive behaviour of concrete confined by carbon fiber composites jackets, ASCE Journal of Material in Civil Engineering, Vol 12, nº2, pp 139-146, May, 2000.

Zangelmi, E. J., Caracterización del comportamiento de hormigones de altas prestaciones com y sin fibras metálicas a compresión uniaxial, Tese de Doutoramento, UPC, Barcelona, Abril de 1999.