

# CONFINAMENTO PARCIAL E TOTAL DE PROVETES CILÍNDRICOS DE BETÃO COM CFRP

Débora Ferreira <sup>1</sup>; Joaquim Barros <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Prof. Adjunta, <sup>2</sup>Prof. Auxiliar,

<sup>(1)</sup> Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança  
Campus de Santa Apolónia, Apartado 134, 5301-857 Bragança, Portugal, [debora@ipb.pt](mailto:debora@ipb.pt)

<sup>(2)</sup> Professor Auxiliar, Departamento de Eng<sup>a</sup> Civil, Escola de Eng<sup>a</sup>, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, [barros@civil.uminho.pt](mailto:barros@civil.uminho.pt)



## RESUMO

*Para aumentar a resistência e a capacidade de absorção energia do betão quando submetido a cargas de compressão, provetes cilíndricos de betão de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura foram cintados com faixas de manta em fibras de carbono (CFRP). Com o objectivo de avaliar a influência da largura e do número de faixas, do número de camadas e do tipo de betão no aumento da resistência e da ductilidade do betão, distintos arranjos de confinamento foram aplicados. Os resultados mais significativos são apresentados e comentados.*

## 1- INTRODUÇÃO

Os danos provocados por acções sísmicas têm revelado que as roturas catastróficas de edifícios e pontes estão geralmente associadas ao colapso dos pilares. O aumento da segurança deste tipo de estruturas, erigidas em zonas de risco sísmico elevado, passa pelo aumento da capacidade de carga e de absorção de energia dos seus elementos verticais (Xiao *et al.* 1999). Tal pode ser alcançado por intermédio da aplicação de elementos de reforço que aumentem o grau de confinamento do betão, (Triantafillou, 1998). Este confinamento pode ser garantido colando mantas de tecido de fibras de vidro ou de carbono (FRP) à superfície exterior do elemento a reforçar, (CEB-FIB, 2001; Untiveros, 2002). Esta colagem pode ser total ou parcial, isto é, toda a superfície, ou parte da superfície é

envolvida por FRP, alcançando-se distintos níveis de confinamento.

No presente trabalho pretende-se analisar a acção de confinamento proporcionada pela aplicação de manta de fibras de carbono (CFRP). Para tal, foram efectuadas séries de ensaios de compressão uniaxial com provetes cilíndricos cintados com diferentes arranjos de faixas de CFRP. Foi analisada a influência da largura destas faixas, do seu número ao longo da altura do provete, do número de camadas por faixa, da classe resistente do betão e do tipo de manta no comportamento à compressão uniaxial de provetes de betão.

## 2- SISTEMAS DE CONFINAMENTO

Os sistemas de confinamento adoptados estão apresentados nas Tabelas 1 a 4. O sistema genérico está representado na

Figura 1, incluindo-se na Figura 2 fotos de provetes representativos de alguns dos sistemas de confinamento adotados. Estes sistemas são compostos por faixas de manta de CFRP, fixas ao betão e às camadas subjacentes por intermédio de resina epóxi. A cada provete foi atribuída a designação  $WiSjLk$ , em que  $Wi$  é a largura da faixa  $c/i = 15, 30, 45, 60$  e  $300$  mm,  $Sj$  é o número de faixas ao longo do provete  $c/j$  de 1 a 5 e  $Lk$  é o número de camadas por faixa  $c/k$  de 1 a 7. No presente programa experimental 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 por faixa,  $L$ , no comportamento em compressão do provete. Estes parâmetros foram estudados em provetes de betão de baixa e moderada resistência à compressão, cintados com mantas do tipo S&P C-240 ( $200 \text{ gm/m}^2$ ) e S&P C-240 ( $300 \text{ gm/m}^2$ ). No total foram efectuados os quatro grupos de séries de ensaios descritos nas tabelas. 1 a 4. Cada série é constituída por três provetes. A variação de  $W$ ,  $S$  e  $L$  conduziu a provetes com diferente percentagem de confinamento ( $\rho_f = A_f/A_{c,t}$ ), em que  $A_f = 2 \times S \times W \times L \times E \text{ mm}^2$  é a secção transversal da manta de CFRP utilizada no sistema de confinamento e  $E$  é a espessura efectiva da manta. A manta de  $300 \text{ gm/m}^2$  tem espessura efectiva de  $0.167 \text{ mm}$ , enquanto a manta de  $200 \text{ gm/m}^2$  tem  $E = 0.111 \text{ mm}$ . A secção longitudinal do provete,  $A_{c,t}$ , é igual a  $150 \times 300 \text{ mm}^2$  ( $150 \text{ mm}$  de largura por  $300 \text{ mm}$  de altura). Assim, tendo em conta os valores de  $\rho_f$  e a melhoria de propriedades proporcionada por cada sistema de confinamento, pretende-se avaliar a importância relativa de  $W$ ,  $S$  e  $L$  no aumento da resistência e da ductilidade do betão.

Cada uma das tabelas 1 a 4 corresponde a um grupo de ensaios com distinta classe de resistência de betão e tipo de manta de CFRP. Por exemplo, o grupo de ensaios da tabela 1 designa-se por C23S300 por ser constituída por provetes com resistência média à compressão de  $23 \text{ MPa}$  e cintados com manta de  $300 \text{ g/m}^2$ .

**Tabela1** – Séries de ensaios do grupo C23S300

| Desig. do provete | W [mm] | S [-] | t [mm] | L [-] | $A_f$ [mm <sup>2</sup> ] | $\rho_f$ [%] | Sistema onf. |
|-------------------|--------|-------|--------|-------|--------------------------|--------------|--------------|
| W15S1L1           | 15     | 1     | -      | 1     | 5.01                     | 0.01         |              |
| W15S1L2           |        |       |        | 2     | 10.02                    | 0.02         |              |
| W15S1L3           |        |       |        | 3     | 15.03                    | 0.03         |              |
| W15S1L4           |        |       |        | 4     | 20.04                    | 0.05         |              |
| W15S1L6           |        |       |        | 6     | 30.06                    | 0.07         |              |
| W15S3L1           |        | 3     | 85     | 1     | 15.03                    | 0.03         |              |
| W15S3L2           |        |       |        | 2     | 30.06                    | 0.07         |              |
| W15S3L3           |        |       |        | 3     | 45.09                    | 0.10         |              |
| W15S3L4           |        |       |        | 4     | 60.12                    | 0.13         |              |
| W15S3L6           |        |       |        | 6     | 90.18                    | 0.20         |              |
| W15S5L1           |        | 5     | 45     | 1     | 25.05                    | 0.06         |              |
| W15S5L2           |        |       |        | 2     | 50.1                     | 0.11         |              |
| W15S5L3           |        |       |        | 3     | 75.15                    | 0.17         |              |
| W15S5L4           |        |       |        | 4     | 100.2                    | 0.22         |              |
| W15S5L6           |        |       |        | 6     | 150.3                    | 0.33         |              |
| W30S3L3           | 30     | 3     | 70     | 3     | 90.18                    | 0.20         |              |
| W30S3L5           |        |       |        | 5     | 150.3                    | 0.33         |              |
| W30S3L6           |        |       |        | 7     | 210.4                    | 0.47         |              |
| W30S4L3           |        | 4     | 45     | 3     | 120.2                    | 0.27         |              |
| W30S4L5           |        |       |        | 5     | 200.4                    | 0.45         |              |
| W30S4L6           |        |       |        | 7     | 280.6                    | 0.62         |              |
| W45S4L3           | 45     | 4     | 30     | 3     | 180.4                    | 0.40         |              |
| W45S4L5           |        |       |        | 5     | 300.6                    | 0.67         |              |
| W45S4L6           |        |       |        | 7     | 420.8                    | 0.94         |              |
| W60S4L3           | 60     | 3     | 40     | 3     | 180.4                    | 0.40         |              |
| W60S4L5           |        |       |        | 5     | 300.6                    | 0.67         |              |
| W60S4L6           |        |       |        | 7     | 420.5                    | 0.94         |              |
| W300S1L3          | 300    | 1     | -      | 3     | 300.6                    | 0.67         |              |
| W300S1L5          |        |       |        | 5     | 501                      | 1.11         |              |
| W300S1L7          |        |       |        | 7     | 701.4                    | 1.56         |              |

As fases essenciais que constituem a técnica de confinamento, bem como a disposição dos comprimentos de entrega das faixas de CFRP estão descritas em (Ferreira e Barros, 2003).

**Tabela 2 – Séries de ensaios do grupo C23S200**

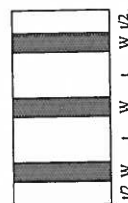
| Desig. provete | W [mm] | S [-] | t [mm] | L [-] | A <sub>r</sub> [mm <sup>2</sup> ] | p <sub>r</sub> [%] | Sistema conf. |
|----------------|--------|-------|--------|-------|-----------------------------------|--------------------|---------------|
| W45S4L3        | 45     | 4     | 30     | 3     | 119                               | 0.26               |               |
| W45S4L5        |        |       |        | 5     | 198                               | 0.44               |               |
| W60S4L3        | 60     | 3     | 40     | 3     | 119                               | 0.26               |               |
| W60S4L5        |        |       |        | 5     | 198                               | 0.44               |               |
| W300S1L3       | 300    | 1     | -      | 3     | 198                               | 0.44               |               |
| W300S1L5       |        |       |        | 5     | 330                               | 0.73               |               |

**Tabela 3 – Séries de ensaios do grupo C16S200**

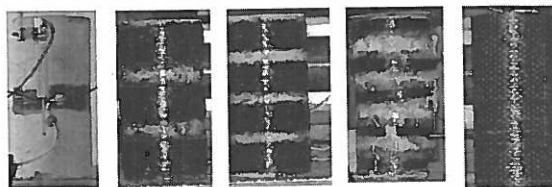
| Desig. provete | W [mm] | S [-] | t [mm] | L [-] | A <sub>r</sub> [mm <sup>2</sup> ] | p <sub>r</sub> [%] | Sistema conf. |
|----------------|--------|-------|--------|-------|-----------------------------------|--------------------|---------------|
| W45S4L3        | 45     | 4     | 30     | 3     | 119                               | 0.26               |               |
| W45S4L5        |        |       |        | 5     | 198                               | 0.44               |               |
| W60S4L3        | 60     | 3     | 40     | 3     | 119                               | 0.26               |               |
| W60S4L5        |        |       |        | 5     | 198                               | 0.44               |               |
| W300S1L3       | 300    | 1     | -      | 3     | 198                               | 0.44               |               |
| W300S1L5       |        |       |        | 5     | 330                               | 0.73               |               |

**Tabela 4 – Séries de ensaios do grupo C16S300**

| Desig. provete | W [mm] | S [-] | t [mm] | L [-] | A <sub>r</sub> [mm <sup>2</sup> ] | p <sub>r</sub> [%] | Sistema conf. |
|----------------|--------|-------|--------|-------|-----------------------------------|--------------------|---------------|
| W45S4L3        | 45     | 4     | 30     | 3     | 180.4                             | 0.40               |               |
| W45S4L5        |        |       |        | 5     | 300.6                             | 0.67               |               |
| W60S4L3        | 60     | 3     | 40     | 3     | 180.4                             | 0.40               |               |
| W60S4L5        |        |       |        | 5     | 300.6                             | 0.67               |               |
| W300S1L3       | 300    | 1     | -      | 3     | 300.6                             | 0.67               |               |
| W300S1L5       |        |       |        | 5     | 501                               | 1.11               |               |



**Fig. 1– Esquema de confinamento**



**Fig. 2 –Alguns dos sistemas de confinamento adotados**

### 3- PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

#### 3.1 – Betão

A Tabela 5 inclui a composição dos betões utilizados na fabricação dos provetes ensaiados, bem como a correspondente resistência média à compressão aos 28 dias em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

**Tabela 5 – Composições dos betões [kg/m<sup>3</sup>] e resistência média à compressão**

| Ref. | Cimento Secil 32.5 II | Brita grossa | Brita média | Areia | Água | f <sub>cm</sub> [MPa] |
|------|-----------------------|--------------|-------------|-------|------|-----------------------|
| C16  | 280                   | 727.7        | 420.6       | 769.3 | 126  | 16                    |
| C23  | 350.0                 | 725.9        | 438.2       | 694.6 | 156  | 23                    |

#### 3.2 – Mantas de CFRP

Neste trabalho foram utilizadas duas mantas flexíveis de fibras de carbono curadas “in situ”, designadas comercialmente por S&P C-240, uma com 300 g de fibras por m<sup>2</sup> de manta, com 0.167 mm de espessura efectiva e uma outra com 200 g de fibra por m<sup>2</sup> de manta com 0.111 mm de espessura efectiva. Segundo o fabricante ambas as mantas têm resistência à tracção superior a 3700 MPa, módulo de elasticidade de 240 GPa segundo a direcção das fibras e extensão última próxima de 15 %. As mantas foram fornecidas 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 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- EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Os ensaios de compressão foram efectuados numa prensa servo controlada. A extensão axial do provete foi determinada por intermédio de três LVDTs de  $\pm 12.5$  mm de campo dispostos de forma a fazerem  $120^\circ$  entre si. 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 [Zangelmi, 1999]. Para determinar as extensões ocorridas no CFRP foram aplicados extensómetros segundo a disposição indicada na figura 3. Assim, nos provetes que dispunham de uma faixa de manta a meia altura do provete, apenas esta faixa foi instrumentada com um extensómetro no seu centro. Nos restantes casos foi colocado um extensómetro em cada uma das duas faixas centrais simetricamente dispostas em relação à meia altura do provete. Os extensómetros foram colados na face exterior da camada mais externa, no sentido das fibras.

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

Mais detalhes sobre o equipamento podem ser encontrados em (Ferreira e Barros, 2003).

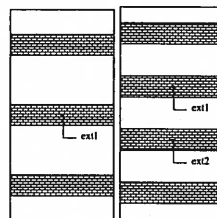


Fig. 3 – Disposição dos extensómetros.

#### 5 - RESULTADOS

Nas figuras 4 a 7 apresentam-se as curvas que relacionam a tensão, quer com a extensão axial do provete quer com a extensão na manta de CFRP, para os grupos de ensaios C23S300, C23S200, C16S200 e C16S300, respectivamente. Nas séries W15S1 e W15S5 do grupo C23S300 não foi registada a extensão no CFRP. Cada uma das curvas representa a média das respostas registadas em três provetes que compõem cada série. Os gráficos representados nas figuras 4 a 7 dizem respeito aos grupos de ensaios indicados nas tabelas 1 a 4.

A tensão é o cociente entre a força aplicada no provete e a secção transversal deste. Às extensões axiais do provete e às extensões no CFRP foram atribuídos os sinais positivo e negativo, respectivamente, por facilidade de exposição gráfica dos resultados.

Da análise das figuras 4 a 7 pode-se verificar que, tendo por base os resultados obtidos nas séries de provetes de betão não confinado, a capacidade de absorção de energia aumentou com percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) e, à excepção das séries com  $\rho_f < 0.167$ , nas restantes séries a capacidade de carga também aumentou com  $\rho_f$ .

Em termos gerais, para uma determinada deformação axial do provete verificou-se que a extensão no CFRP foi tão mais elevada quanto menor era o número de camadas aplicadas por faixa de manta. Na figura 4h pretende-se ilustrar esta ocorrência. Assim, para a extensão axial ( $\epsilon_{axial}^1$ ) correspondente à rotura dos provetes da série W300S1L3 (três camadas), a extensão no CFRP desta série

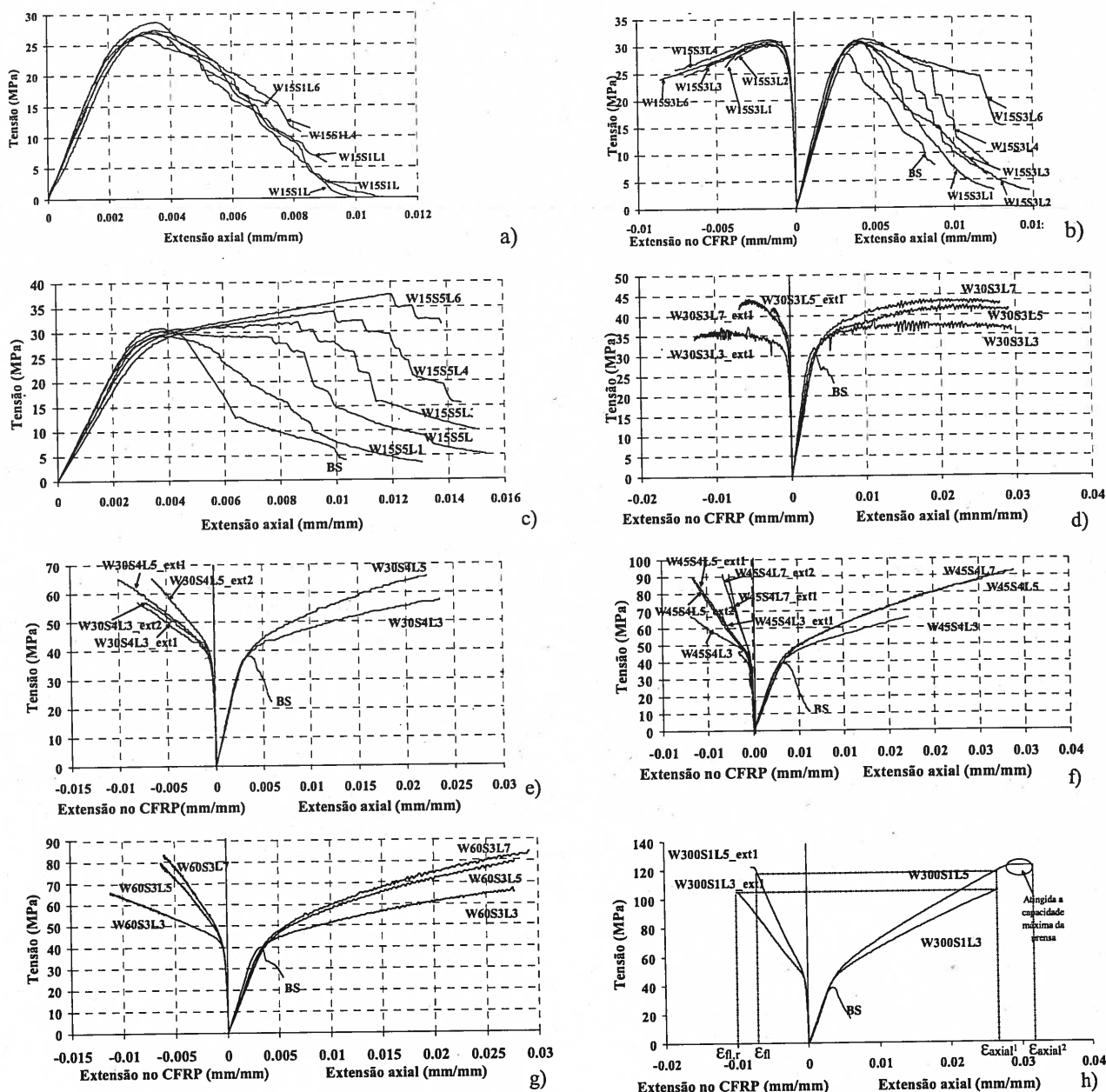


Fig. 4 – Relação tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C23S300

foi de 9736  $\mu\text{m}/\text{m}$ , enquanto a extensão no CFRP da série W300S1L5 (cinco camadas) foi de 7025  $\mu\text{m}/\text{m}$ , ou seja, houve uma diminuição da extensão no CFRP de 28%. Tal seria de esperar dado que, quanto mais camadas por faixa forem aplicadas, mais rígido é o sistema de confinamento, pelo que menor será a expansibilidade do betão confinado.

Após análise dos resultados obtidos nas séries do grupo C23S300 verificou-se que para mais de cinco camadas de CFRP o acréscimo de carga e de capacidade de

absorção de energia é marginal, o mesmo sucedendo quando se utiliza faixas de largura inferior a 45 mm. Assim, nos restantes grupos de ensaios apenas se efectuaram séries com provetes reforçados com três e cinco camadas e com faixas de largura de 45, 60 e 300 mm.

Os principais indicadores da eficácia dos sistemas de confinamento utilizados estão incluídos nas tabelas 6 a 9, onde  $\sigma_{\text{max}}$  é a tensão máxima de compressão (nas séries de provetes de BS,  $\sigma_{\text{max}}$  representa o valor médio da resistência à compressão,

$f_{cm}$ , registrado nessas séries),  $\epsilon_{cp}$  é a extensão axial do provete correspondente a  $f_{cm}$ ,  $\epsilon_{cmax}$  é a extensão axial correspondente a  $\sigma_{max}$  (nas séries de provetes de BS  $\epsilon_{cmax} = \epsilon_{cp}$ ),  $\epsilon_{fmax}$  é a extensão máxima no CFRP,  $\epsilon_{fl}$  é a extensão de referência no CFRP correspondente à menor extensão axial final ( $\epsilon_{axial}^1$ ) de uma determinada série de provetes e  $\epsilon_{fl}$  é a extensão no CFRP correspondente a  $\epsilon_{axial}^1$  (ver figura 4h). Cada um dos valores indicados nestas tabelas representa a média dos resultados registrados nos três provetes que constituem cada série.

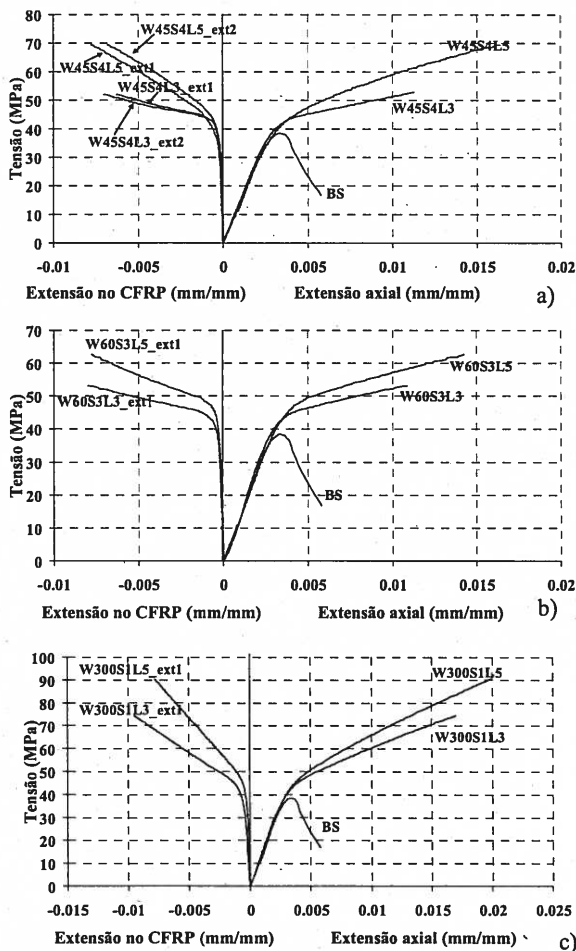


Fig.5- Relação tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C23S200.

Em termos do parâmetro  $\epsilon_{cmax}/\epsilon_{cp}$  verifica-se que aumenta com a percentagem de confinamento. Até  $\rho_f=0.2$  o aumento foi inferior a três, tendo aumentando significativamente para  $\rho_f$  superior a 0.2, tendo-se registrado valores de 3 a 20. De sublinhar que, por limitação da capacidade de carga da prensa, nalgumas séries não foi possível alcançar a rotura dos correspondentes provetes,

pelo que, nestas séries, o valor real daquele parâmetro teria sido superior caso tivesse sido possível levar esses provetes à rotura.

Nos ensaios a extensão máxima no CFRP variou entre 16% a 85% da extensão de rotura do CFRP. De notar que os valores registrados dependem significativamente dos modos de rotura ocorridos, dado que as extensões registradas apenas representam o estado de extensão da zona onde os extensómetros ficaram colados.

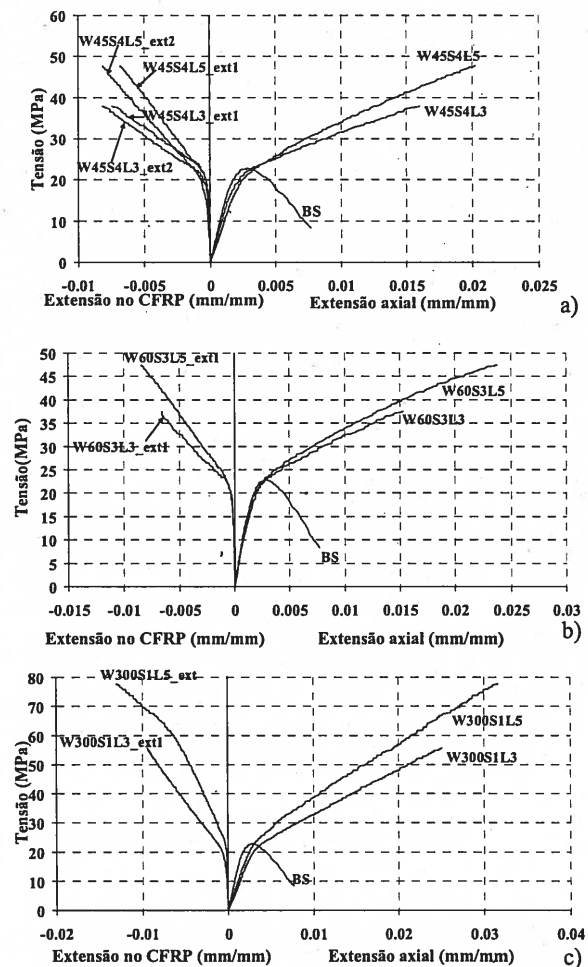


Fig.6 – Relação tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C16S200.

Da análise dos gráficos da figura 4 e dos valores incluídos na tabela 6 (grupo C23S300) podem-se extrair as seguintes observações:

- O sistema de confinamento com faixas de 15 mm (W15S1) é ineficaz, e o adoptado na série W15S5 proporciona aumento

de capacidade de absorção de energia do betão, mas a capacidade de carga não é

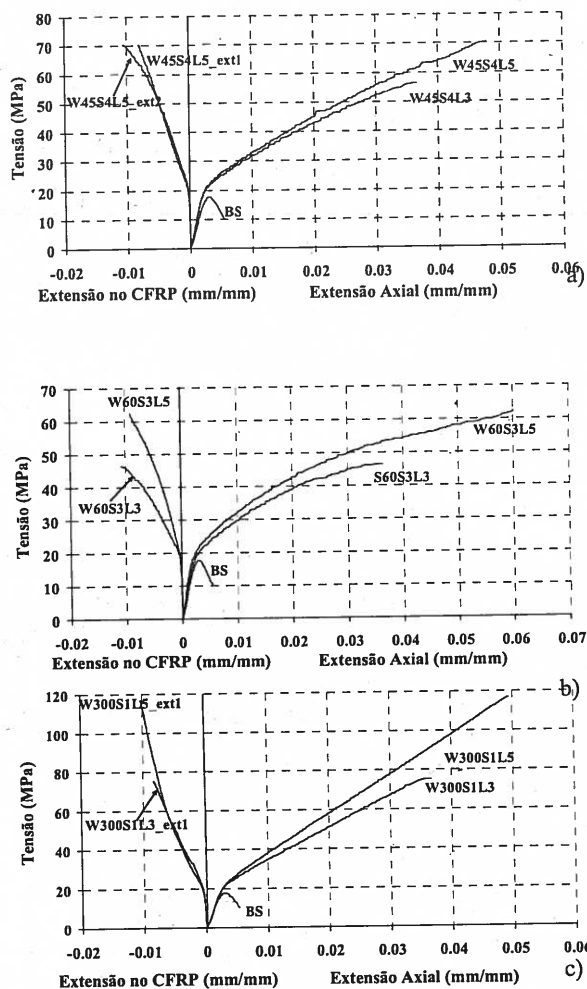


Fig. 7- Relação tensão versus extensão axial e extensão no CFRP nas séries do grupo C16S300.

aumentada, i.e., todos os provetes revelam uma fase de amolecimento. Na Figura 4c constata-se que, para extensões superiores a  $\epsilon_{cp}$ , os provetes da série W15S5 com um número de camadas superior a três apresentaram um ramo de "endurecimento";

- Nos provetes confinados com faixas de largura superior a 15 mm, além do aumento significativo de capacidade de absorção de energia, a carga máxima também aumentou. Assim, os provetes confinados com três faixas de 30 mm de largura (W30S3), Figura 4d, apresentaram um comportamento "pseudo-plástico", dado que a capacidade de carga aumentou suavemente até à rotura do provete. Nesta série, o aumento da capacidade de carga foi mais significativo na passagem de três (19%)

para cinco (28%) camadas de CFRP do que na passagem de cinco para sete (33%) camadas;

- Nos provetes confinados com quatro faixas de 30 mm de largura (W30S4), Figura 4e, a rigidez da resposta deformacional, para extensões superiores a  $\epsilon_{cp}$ , aumentou significativamente com o número de camadas de CFRP. Nesta série o incremento de capacidade de carga foi de 48% e 70% para três e cinco camadas, respectivamente. As extensões nas faixas centrais dos provetes confinados com três camadas por faixa foram semelhantes tendo-se 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 3) foram registadas extensões máximas superiores às obtidas na faixa logo abaixo daquele plano (ext2), devido à maior deformabilidade transversal ocorrida na parte superior dos provetes desta série. Na faixa superior foi alcançada uma extensão máxima próxima de 65% de  $\epsilon_{fu}$ ;
- Nas séries de provetes W45S4, i.e., nos provetes com quatro faixas de 45 mm de largura (Figura 4f) registou-se um comportamento similar ao dos provetes da série W30S4. No entanto, na série W45S4 registaram-se maiores aumentos de carga e de absorção de energia. Acima de cinco camadas por faixa os benefícios são diminutos, quer em termos de capacidade de carga como de absorção de energia. As extensões máximas nas faixas acima e abaixo do plano de simetria transversal do provete foram 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 de confinamento distintos. Assim, em

termos de aumento da capacidade de carga, foi mais elevado na série W45S4, revelando ser mais influente o número de faixas do que a largura da faixa. Como a rigidez axial dos provetes da série W60S3 foi inferior à da série W45S4, na primeira série foram registadas extensões máximas no CFRP maiores que as obtidas na série W45S4;

- Nas séries W300S1 o aumento da capacidade de carga foi de 176% e de 222% para provetes com três e cinco camadas por faixa, respectivamente;
- O valor máximo do parâmetro  $\varepsilon_{cmax}/\varepsilon_{cp}$  foi da ordem de 9;

- Neste grupo de ensaios o parâmetro  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  não apresentou uma tendência clara de variação com  $\rho_f$ , dado que os distintos modos de rotura ocorridos condicionaram significativamente o valor daquele parâmetro. No entanto, nas séries W45S4, W60S4 e W300S1 verifica-se a tendência de  $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$  diminuir com  $\rho_f$ .

Da análise dos gráficos da figura 5 e dos valores incluídos na tabela 7 (grupo C23S200) podem-se extrair as seguintes observações:

**Tabela 6** - Indicadores da eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C23S300

| Desig. do provete | S | Tipo betão | Tipo manta                        | L | $\rho_f$ [%] | $\sigma_{max}$ (MPa) | $\sigma_{max}/f_c$ | $\varepsilon_{cmax}/\varepsilon_{cp}$ | $\varepsilon_{flmax}/\varepsilon_{fl}$ | $\varepsilon_{fl}/\varepsilon_{fl,r}$ |
|-------------------|---|------------|-----------------------------------|---|--------------|----------------------|--------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| Betão simples     | - |            |                                   | - | -            | -                    | -                  | -                                     | -                                      | -                                     |
| W15S1L1           | 1 | C35/30     | S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> ) | 1 | 0.011        | 27.46                | -                  | -                                     | -                                      | -                                     |
| W15S1L2           |   |            |                                   | 2 | 0.022        | 27.12                | -                  | -                                     | -                                      | -                                     |
| W15S1L3           |   |            |                                   | 3 | 0.033        | 26.48                | -                  | -                                     | -                                      | -                                     |
| W15S1L4           |   |            |                                   | 4 | 0.045        | 26.86                | -                  | -                                     | -                                      | -                                     |
| W15S1L6           |   |            |                                   | 6 | 0.069        | 28.68                | -                  | -                                     | -                                      | -                                     |
| Betão simples     | - |            |                                   | 0 |              | 28.5 ( $f_c$ )       | 1.0                | 1.0                                   | -                                      | -                                     |
| W15S3L1           | 3 | C35/30     | S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> ) | 1 | 0.033        | 30.6                 | 1.07               | 1.20                                  | 0.284                                  | -                                     |
| W15S3L2           |   |            |                                   | 2 | 0.069        | 30.3                 | 1.06               | 1.28                                  | 0.245                                  | -                                     |
| W15S3L3           |   |            |                                   | 3 | 0.100        | 30.4                 | 1.07               | 1.22                                  | 0.454                                  | -                                     |
| W15S3L4           |   |            |                                   | 4 | 0.134        | 31.2                 | 1.09               | 1.32                                  | 0.493                                  | -                                     |
| W15S3L6           |   |            |                                   | 6 | 0.200        | 30.5                 | 1.07               | 1.51                                  | 0.556                                  | -                                     |
| Betão simples     | - | C35/30     |                                   | 0 |              | 30.8 ( $f_c$ )       | 1.0                | 1.0                                   | -                                      | -                                     |
| W15S5L1           | 5 | C35/30     | S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> ) | 1 | 0.058        | 29.2                 | 0.95               | 1.03                                  | -                                      | -                                     |
| W15S5L2           |   |            |                                   | 2 | 0.111        | 29.8                 | 0.97               | 1.05                                  | -                                      | -                                     |
| W15S5L3           |   |            |                                   | 3 | 0.167        | 32.0                 | 1.04               | 2.21                                  | -                                      | -                                     |
| W15S5L4           |   |            |                                   | 4 | 0.223        | 34.0                 | 1.10               | 2.55                                  | -                                      | -                                     |
| W15S5L6           |   |            |                                   | 6 | 0.334        | 37.4                 | 1.21               | 3.08                                  | -                                      | -                                     |
| Betão simples     | - | C35/30     |                                   | 0 |              | 32.7 ( $f_c$ )       | 1.0                | 1.0                                   | -                                      | -                                     |
| W30S3L3           | 3 | C35/30     | S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> ) | 3 | 0.200        | 38.85                | 1.19               | 2.94                                  | 0.825                                  | 1.41                                  |
| W30S3L5           |   |            |                                   | 5 | 0.334        | 42.04                | 1.28               | 6.21                                  | 0.161                                  | 0.30                                  |
| W30S3L6           |   |            |                                   | 7 | 0.468        | 43.46                | 1.33               | 6.33                                  | 0.438                                  | 1.00                                  |
| Betão simples     | - | C35/30     |                                   | 0 |              | 38.8 ( $f_c$ )       | 1.0                | 1.0                                   | -                                      | -                                     |
| W30S4L3           | 4 | C35/30     | S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> ) | 3 | 0.267        | 57.48                | 1.48               | 6.9                                   | 0.517                                  | 0.78                                  |
|                   |   |            |                                   |   |              |                      |                    |                                       | 0.465                                  | 1.07                                  |
| W30S4L5           |   |            |                                   | 5 | 0.445        | 65.76                | 1.70               | 6.5                                   | 0.652                                  | 1.00                                  |
|                   |   |            |                                   |   |              |                      |                    |                                       | 0.422                                  | 1.00                                  |
| Betão simples     | - | C35/30     |                                   | 0 |              | 39.2 ( $f_c$ )       | 1.0                | 1.0                                   | -                                      | -                                     |
| W45S4L3           | 4 | C35/30     | S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> ) | 3 | 0.401        | 71.99                | 1.84               | 7.24                                  | 0.175                                  | 1.00                                  |
|                   |   |            |                                   |   |              |                      |                    |                                       | 0.475                                  | 1.00                                  |
| W45S4L5           |   |            |                                   | 5 | 0.668        | 91.05                | 2.33               | 8.45                                  | 0.422                                  | 0.75                                  |
|                   |   |            |                                   |   |              |                      |                    |                                       | 0.431                                  | 1.43                                  |
| W45S4L7           |   |            |                                   | 7 | 0.935        | 91.85                | 2.35               | 8.69                                  | 0.167                                  | 0.32                                  |
|                   |   |            |                                   |   |              |                      |                    |                                       | 0.212                                  | 0.68                                  |
| Betão simples     | - | C35/30     |                                   | 0 |              | 40.0 ( $f_c$ )       | 1.0                | 1.0                                   | -                                      | -                                     |
| W60S4L3           | 3 | C35/30     | S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> ) | 3 | 0.401        | 65.87                | 1.65               | 8.32                                  | 0.727                                  | 1.00                                  |
| W60S4L5           |   |            |                                   | 5 | 0.668        | 79.28                | 1.98               | 8.36                                  | 0.409                                  | 0.56                                  |
| W60S4L7           |   |            |                                   | 7 | 0.935        | 83.72                | 2.09               | 8.80                                  | 0.394                                  | 0.53                                  |
| Betão simples     | - | C35/30     |                                   | 0 |              | 38.0 ( $f_c$ )       | 1.0                | 1.0                                   | -                                      | -                                     |
| W300S1L3          | - | C35/30     | S&P C-240 (300gm/m <sup>2</sup> ) | 3 | 0.668        | 105.08               | 2.76               | 7.45                                  | 0.631                                  | 1.00                                  |
| W300S1L5          |   |            |                                   | 5 | 1.11         | 122.45               | 3.22               | 8.77                                  | 0.508                                  | 0.72                                  |

- Os provetes das séries W45S4L3 e W60S3L3 apresentam comportamento similar. Apesar das séries W45S4L5 e W60S3L5 terem igual  $\rho_f$ , a primeira apresentou maior aumento de capacidade de carga e de absorção de energia do que a segunda;
- Nas séries de provetes totalmente confinados (W300S1) a capacidade de carga e de absorção de energia aumentaram quando se passou de três para cinco camadas de CFRP. O aumento da capacidade de carga foi de 93% e de 136% nos provetes com três e cinco camadas, respectivamente;
- O valor máximo do parâmetro  $\varepsilon_{cmax}/\varepsilon_{cp}$  foi próximo de 6;
- A extensão máxima variou entre 41% a 62% da extensão de rotura do CFRP;
- Da análise da evolução do parâmetro  $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$  com  $\rho_f$  verifica-se que as extensões no CFRP diminuem com o aumento da percentagem de confinamento.

Da análise dos gráficos da figura 6 e dos valores incluídos na tabela 8 (grupo C16S200) podem-se extrair as seguintes observações:

- As séries W45S4 e W60S3, com igual  $\rho_f$ , proporcionam níveis de confinamento muito semelhantes;

- Na série W300S1 o aumento da capacidade de carga foi de 144% e de 241% nos provetes com três e cinco camadas, respectivamente;
- O valor máximo do parâmetro  $\varepsilon_{cmax}/\varepsilon_{cp}$  foi da ordem de 11;
- A extensão máxima variou entre 42% e 85% da extensão de rotura do CFRP;
- Tal como no anterior grupo, no presente grupo de ensaios  $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$  diminuiu com  $\rho_f$ , indicando que as extensões no CFRP diminuem com  $\rho_f$ .

Da análise dos gráficos da figura 7 e dos valores incluídos na tabela 9 (grupo C16S300) podem-se extrair as seguintes observações:

- Apesar de W45S4 e W60S3 terem o mesmo  $\rho_f$ , o confinamento foi mais efectivo nas séries W45S4 do que nas séries W60S3;
- Nas séries W300S1 o aumento da capacidade de carga foi de 323% e de 558% nos provetes com três e cinco camadas, respectivamente;
- O valor máximo de  $\varepsilon_{cmax}/\varepsilon_{cp}$  foi próximo de 20;
- A extensão máxima no CFRP ( $\varepsilon_{fmax}$ ) variou entre 54% a 70% da sua extensão de rotura;

**Tabela 7** - Indicadores da eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C23S200

| Desig. do provete | S | Tipo betão | Tipo manta                            | L | $\rho_f$ [%] | $\sigma_{max}$ (MPa) | $\sigma_{max}/f_c$ | $\varepsilon_{cmax}/\varepsilon_{cp}$ | $\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$ | $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$ |
|-------------------|---|------------|---------------------------------------|---|--------------|----------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Betão simples     | - | C35/30     | S&P C-240<br>(200 gm/m <sup>2</sup> ) | 0 | -            | 38.4( $f_c$ )        | 1.0                | 1.0                                   | -                                     | -                                 |
| W45S4L3           | 4 |            |                                       | 3 | 0.26         | 52.76                | 1.37               | 3.14                                  | 0.408                                 | 1.00                              |
| W45S4L5           |   |            |                                       | 5 | 0.44         | 69.37                | 1.81               | 4.55                                  | 0.456                                 | 1.00                              |
| W60S4L3           | 3 |            |                                       | 3 | 0.26         | 53.13                | 1.38               | 3.21                                  | 0.506                                 | 0.85                              |
| W60S4L5           |   |            |                                       | 5 | 0.44         | 62.63                | 1.60               | 4.22                                  | 0.443                                 | 0.63                              |
| W300S1L3          | 1 |            |                                       | 3 | 0.44         | 74.22                | 1.93               | 5.02                                  | 0.518                                 | 1.00                              |
| W300S1L5          |   |            |                                       | 5 | 0.73         | 90.52                | 2.36               | 5.89                                  | 0.504                                 | 0.74                              |
|                   |   |            |                                       |   |              |                      |                    |                                       | 0.615                                 | 1.00                              |
|                   |   |            |                                       |   |              |                      |                    |                                       | 0.506                                 | 0.70                              |

**Tabela 8** - Indicadores da eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C16S200

| Desig. do provete | S | Tipo betão | Tipo manta                           | L | $\rho_f$ [%] | $\sigma_{max}$ (MPa) | $\sigma_{max}/f_c$ | $\varepsilon_{cmax}/\varepsilon_{cp}$ | $\varepsilon_{fmax}/\varepsilon_{fu}$ | $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,r}$ |
|-------------------|---|------------|--------------------------------------|---|--------------|----------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Betão simples     | - | C16/20     | S&P C-240<br>(200gm/m <sup>2</sup> ) | 0 |              | 22.79 ( $f_c$ )      | 1.0                | 1.0                                   |                                       | -                                 |
| W45S4L3           | 4 |            |                                      | 3 | 0.26         | 37.85                | 1.66               | 5.70                                  | 0.482                                 | 1.00                              |
|                   |   |            |                                      |   |              |                      |                    |                                       | 0.532                                 | 1.00                              |
| W45S4L5           |   |            |                                      | 5 | 0.44         | 47.69                | 2.09               | 7.20                                  | 0.444                                 | 0.74                              |
|                   |   |            |                                      |   |              |                      |                    |                                       | 0.529                                 | 0.83                              |
| W60S4L3           | 3 |            |                                      | 3 | 0.26         | 37.42                | 1.64               | 5.46                                  | 0.424                                 | 1.00                              |
| W60S4L5           |   |            |                                      | 5 | 0.44         | 47.40                | 2.08               | 8.48                                  | 0.550                                 | 0.91                              |
| W300S1L3          | 1 |            |                                      | 3 | 0.44         | 55.66                | 2.44               | 8.92                                  | 0.610                                 | 1.00                              |
| W300S1L5          |   |            |                                      | 5 | 0.73         | 77.75                | 3.41               | 11.24                                 | 0.85                                  | 0.92                              |

**Tabela 9** - Indicadores da eficácia dos sistemas de confinamento referentes ao grupo de ensaios C16S300

| Desig. do provete | S | Tipo betão | Tipo manta                           | L | $\rho_f$ [%] | $\sigma_{max}$ (MPa)    | $\sigma_{max}/f_c$ | $\epsilon_{cmax}/\epsilon_{cd}$ | $\epsilon_{fmax}/\epsilon_{fu}$ | $\epsilon_f/\epsilon_{f,r}$ |
|-------------------|---|------------|--------------------------------------|---|--------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Betão simples     | - | C16/20     | S&P C-240<br>(300gm/m <sup>2</sup> ) | 0 |              | 17.75 (f <sub>c</sub> ) | 1.0                | 1.0                             |                                 |                             |
| W45S4L3           | 4 |            |                                      | 3 | 0.40         | 56.24                   | 3.17               | 12.21                           | -                               | -                           |
| W45S4L5           |   |            |                                      | 5 | 0.67         | 70.25                   | 3.96               | 16.0                            | 0.516                           | -                           |
| W60S4L3           | 3 |            |                                      | 3 | 0.40         | 46.52                   | 2.62               | 12.15                           | 0.700                           | 1.00                        |
| W60S4L5           |   |            |                                      | 5 | 0.67         | 62.41                   | 3.52               | 20.08                           | 0.590                           | 0.59                        |
| W300S1L3          | 1 |            |                                      | 3 | 0.67         | 75.07                   | 4.23               | 12.26                           | 0.540                           | 1.00                        |
| W300S1L5          |   |            |                                      | 5 | 1.11         | 116.88                  | 6.58               | 16.54                           | 0.661                           | 1.02                        |

- Quanto ao parâmetro  $\epsilon_f/\epsilon_{f,r}$ , neste série não se verificou a tendência observada nas duas anteriores, dado que na série W60S4 aquele parâmetro diminuiu com  $\rho_f$ , mas na série W300S1 manteve-se praticamente inalterado.

## 5 - CONCLUSÕES

No presente trabalho é estudado o comportamento à compressão uniaxial de provetes cilíndricos de betão confinados com faixas de manta de CFRP. Foi analisada a influência do número de faixas ao longo da altura do provete, da largura das faixas, do número de camadas de manta por faixa, do tipo de manta e da classe de resistência do betão no aumento da resistência e da capacidade de absorção de energia em compressão daqueles elementos, bem como nos níveis de extensão máxima alcançados pelo CFRP.

A análise dos resultados obtidos nos distintos sistemas de confinamento utilizados permite concluir que a tensão máxima registada nos provetes de betão simples (BS), i.e., não confinados, foi excedida nas séries com uma percentagem de confinamento ( $\rho_f$ ) superior a 0.17. Nas séries com  $\rho_f > 0.17$  a capacidade de carga e de absorção de energia aumentaram com o 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 verificou-se maiores aumentos de tensão

máxima e de energia absorvida nas que dispunham de menor espaço livre entre faixas. Este comportamento foi mais vincado nas séries de ensaios com provetes reforçados com a manta de maior rigidez (300 g/m<sup>2</sup>), dado que, quanto mais rígido for o sistema de confinamento discreto, maior concentração de dano ocorre no betão entre as faixas de confinamento.

No que se refere à extensão máxima no CFRP, 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. No entanto, verificou-se a tendência para ser tanto menor quanto maior era a percentagem de confinamento, tendo registado valores de 16% a 85% da extensão de rotura do CFRP. Nas séries com maior percentagem de confinamento, a capacidade de carga máxima da prensa foi alcançada sem ter ocorrido a rotura do provete, pelo que, nestes casos, as extensões máximas registadas no CFRP são inferiores às que se desenvolveriam caso se tivesse levado os provetes à rotura.

O aumento da capacidade de carga foi maior nos provetes reforçados com a manta de rigidez mais elevada (S&P C-240 de 300 gm/m<sup>2</sup>) e o confinamento foi mais efectivo nos provetes de betão de menor resistência

## 6 - REFERÊNCIAS

- CEB-FIB, Structural Concrete- textbook on behaviour, design and performance, vol.1, July 1999.
- Ferreira, D., Barros, J., Mantas de CFRP no confinamento de elementos de betão sujeitos à compressão, V Simpósio EPUSP sobre

estruturas de concreto, São Paulo, Junho de 2003.

- Triantafillou, T.C., "Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy bonded FRP composites", ACI Structural Journal, Mar- Apr, pp. 107-115, 1998.
- Untiveros, C. M. A., Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión, Tese de Doutoramento, UPC, Barcelona, Setembro de 2002.

- 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.
- Zangelmi, E., "Caracterización del comportamiento de hormigones de altas prestaciones con y sin fibras metálicas a compresión uniaxial", tesis doctoral, Barcelona, Abril, 1999.

