

## CONFINAMENTO GARANTIDO AO BETÃO POR CINTAGEM TOTAL E PARCIAL COM MANTAS DE CFRP



**D.R.S.M FERREIRA**  
Aluna de Doutoramento  
UM  
Guimarães



**J.A.O. BARROS**  
Prof. Auxiliar  
UM  
Guimarães

### SUMÁRIO

Ensaio de compressão uniaxial com provetes cilíndricos de betão revelaram que sistemas constituídos por faixas de manta de fibras de carbono (CFRP) permitem aumentar significativamente o confinamento do betão. A aplicabilidade de um modelo analítico de confinamento foi avaliada para o caso dos sistemas de confinamento adoptados no presente programa experimental.

### 1. INTRODUÇÃO

Um deficiente confinamento do betão de pilares de edifícios localizados em zonas de risco sísmico pode conduzir ao colapso global destes. O confinamento do betão pode ser aumentado cintando total ou parcialmente os pilares com mantas de fibras de carbono (CFRP). Além de aumentarem a capacidade de dissipação de energia, estes sistemas de confinamento também permitem aumentar, significativamente, a capacidade de carga de elementos de betão submetidos a compressão.

Na tecnologia dos FRP, o confinamento do betão é geralmente garantido envolvendo toda a superfície do elemento por manta de FRP, técnica a que se atribui a designação de “full-wrapping” na nomenclatura inglesa [1], sendo neste trabalho designada por confinamento total. Trabalhos recentes revelaram que é possível obter níveis de confinamento similares ao desta técnica, aplicando-se sistemas de confinamento constituídos por faixas de CFRP [2,3]. Além da maior economia de material e de mão-de-obra despendidos neste último sistema de

confinamento, o facto da superfície exterior do elemento não ficar totalmente envolvido pelo FRP permite que água eventualmente retida no interior da micro-estrutura do betão se liberte para o exterior, diminuindo os riscos de corrosão das armaduras de aço. Os sistemas de confinamento discreto apresentam ainda a vantagem de conduzirem a roturas menos violentas, dado que permitem a dissipação de alguma energia por deformação elasto-plástica do betão entre faixas de FRP.

Para avaliar a influência do número e da largura das faixas de CFRP, bem como do número de camadas por faixa no aumento da resistência e da capacidade de absorção de energia de elementos de betão submetidos a compressão, foram efectuados ensaios de compressão directa com provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, confinados por distintos sistemas de confinamento. A influência da resistência à compressão do betão e da rigidez da manta no nível de confinamento obtido foi também avaliada [2,3], tendo-se para tal efectuado séries de ensaios com provetes de betão de baixa e moderada resistência, confinados com manta de 200 e 300 gm/m<sup>2</sup> de fibras de carbono [4]. Nestes ensaios foi determinada a relação entre a tensão axial no betão,  $\sigma_c$ , e a correspondente extensão axial,  $\varepsilon_c$ , bem como entre  $\sigma_c$  e a extensão no CFRP segundo a direcção das fibras de carbono,  $\varepsilon_f$ .

Para simular o comportamento de um elemento de betão totalmente encamisado com manta de FRP têm sido propostos vários modelos analíticos [5-12], a maior parte deles resulta de adaptações efectuadas a modelos desenvolvidos para simular o confinamento proporcionado por tubos de aço [12]. A principal adaptação atende ao facto do aço desenvolver escoamento plástico após atingida a sua tensão de cedência, enquanto os FRP têm comportamento linear-elástico até à sua rotura. Como os sistemas de confinamento investigados no programa experimental do presente projecto de investigação são constituídos, essencialmente, por faixas de CFRP, o modelo analítico de Mander et al. [13], desenvolvido para simular o comportamento de elementos confinados com cintas de aço, aparenta ser o mais apropriado, desde que o comportamento do CFRP seja devidamente simulado. Assim, o modelo de Mander foi adaptado, tendo por base os resultados obtidos no programa experimental, sendo a sua aplicabilidade avaliada no presente trabalho.

## 2. SISTEMAS DE CONFINAMENTO

Os sistemas de confinamento adoptados 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. Na Figura 1 está representado o sistema genérico de confinamento adoptado, sendo na Figura 2 apresentadas fotos de alguns destes sistemas. Os distintos sistemas de confinamento, os valores das propriedades dos materiais intervenientes, as características do equipamento de ensaio e de registo da força, deslocamentos e extensões e os procedimentos de ensaio estão apresentados em outros trabalhos [2,3].

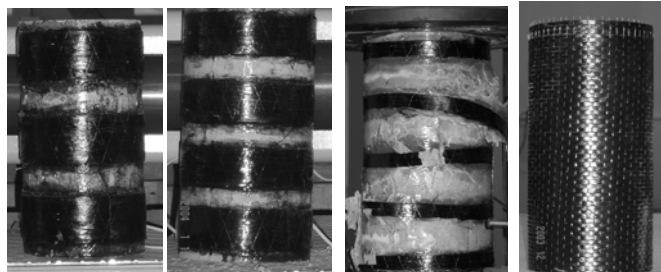
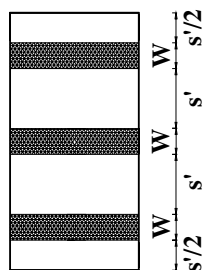
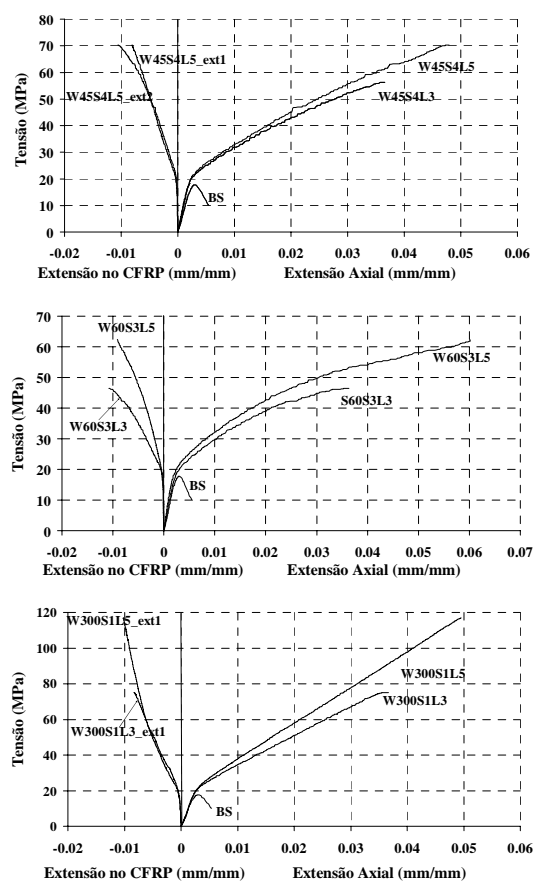
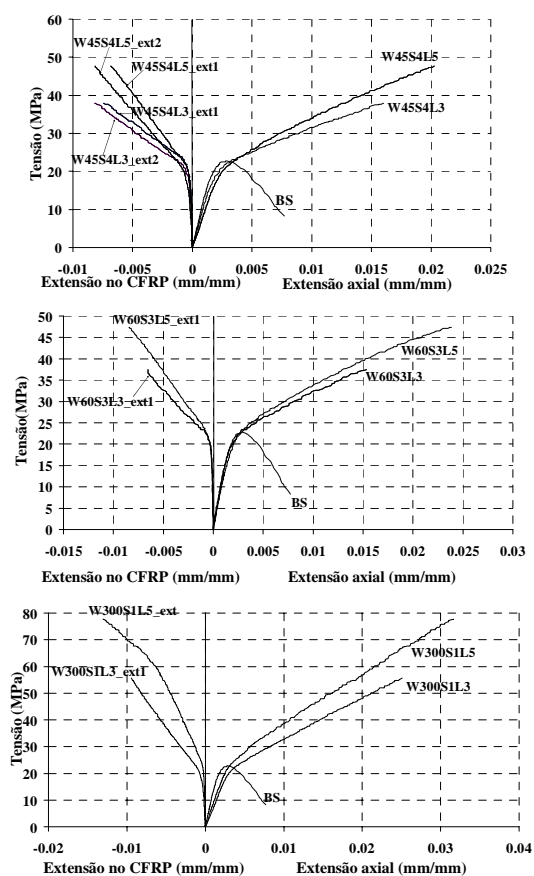


Figura 1 –Esq. de confinamento. Figura 2 – Alguns dos sistemas de confinamento adotados.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas Figuras 3 a 6 apresentam-se as curvas que relacionam a tensão, quer com a extensão axial no provete quer com a extensão na manta de CFRP, para os grupos de ensaio C16S200, C16S300, C23S200 e C23S200, confinados com faixas de 45, 60 e 300mm de altura.



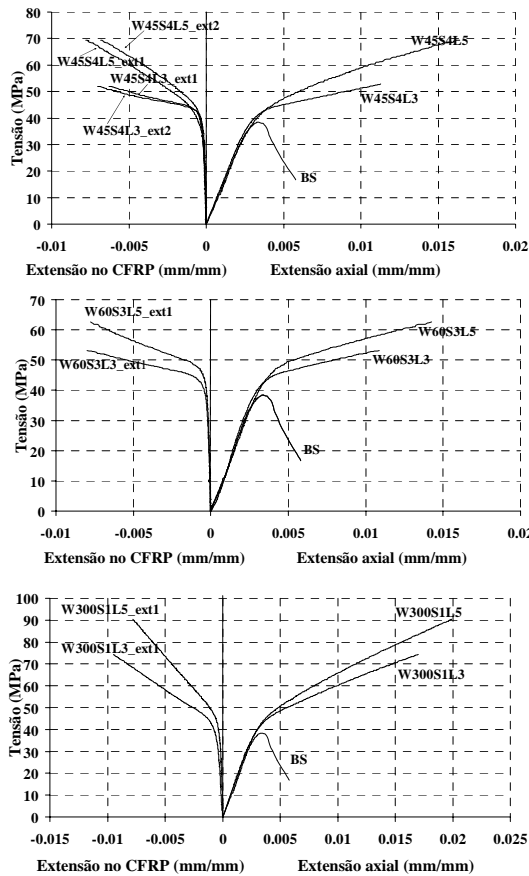


Figura 5 – Grupo de ensaios C23S200

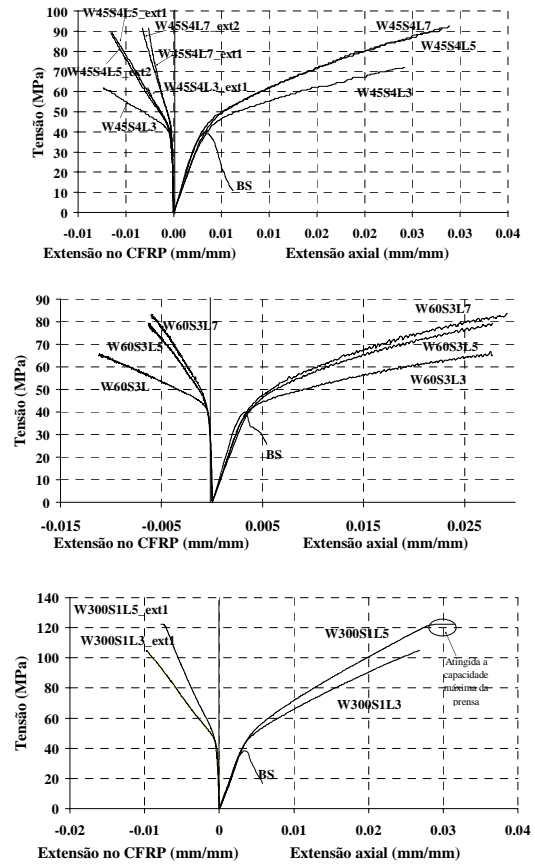


Figura 6 – Grupo de ensaios C23S300

Na designação atribuída aos quatro grupos de ensaios C16 e C23 significa provetes constituídos por um betão com resistência média à compressão de 16 MPa e 23 MP, respectivamente, S200 e S300 significa provetes confinados com mantas de CFRP de 200 g/m<sup>2</sup> e 300 g/m<sup>2</sup>, respectivamente.

Da análise das curvas apresentadas nestas Figuras pode-se verificar que, tendo por base os resultados obtidos nos provetes não confinados, a capacidade resistente e a ductilidade aumentaram com a percentagem de CFRP. O aumento da capacidade de carga foi maior nos provetes reforçados com a manta de rigidez mais elevada (300 gm/m<sup>2</sup>) e o confinamento foi mais efectivo nos provetes de betão de menor resistência (16 MPa).

Nas séries de igual percentagem de confinamento, como é o caso das séries W45S4 e W60S3, o confinamento foi mais efectivo nas séries confinadas com faixas de 45 mm de largura do que nas séries confinadas com faixas de 60 mm de largura, ou seja, verificou-se maiores aumentos da tensão máxima nas séries que dispunham de menor espaço livre entre as faixas.

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 são colocados.

Nas séries de percentagem de CFRP mais elevada, confinados com manta de 300 gm/m<sup>2</sup>, como é o caso da série W300S1L5, do grupo de ensaios C23S300, a capacidade de carga máxima da prensa foi alcançada sem ter ocorrido a rotura dos provetes dessa série.

#### 4. MODELO ANALÍTICO

O modelo analítico de Mander et al. [13] permite obter a relação entre a tensão axial no betão e a correspondente extensão axial em elementos de betão armado confinados com cintas de aço. Segundo este modelo, a tensão no betão confinado ( $f_c$ ) é determinada pela seguinte expressão:

$$f_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

em que

$$f_{cc} = \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad (2)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}; \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}; E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (4)$$

$$f_l = \frac{1}{2} k_e \rho_{st} f_{yh}; k_e = \frac{\left( 1 - 0.5 \frac{s'}{d_s} \right)^2}{(1 - \rho_{sl})}; \rho_{sl} = \frac{A_{sl}}{A_{cc}}; \rho_{st} = \frac{4 A_{st}}{d_s S} \quad (5)$$

Na eq. (2),  $f_{cc}$  é a tensão máxima de compressão do betão confinado,  $f_{co}$  é a resistência à compressão do betão não confinado e  $f_l$  é a tensão exercida pelo confinamento lateral, ver Figuras 7 e 8. Na eq. (3),  $\varepsilon_c$  é extensão axial do betão confinado e  $\varepsilon_{cc}$  é a extensão axial correspondente a  $f_{cc}$ . Em (4)  $E_c$  é o módulo de elasticidade do betão, que segundo Mander et al., pode ser determinado de  $E_c = 15(f_{co})^{(1/2)}$ . No entanto, como no presente trabalho a extensão foi obtida a partir dos deslocamentos medidos entre os pratos da prensa, o valor de  $E_c$  é inferior ao que se obtém pela aplicação da anterior expressão (os transdutores registam deslocamentos parasitas, tais como os devidos à acomodação das faces do provete aos pratos da prensa), pelo que  $E_c$  será considerado como sendo o declive inicial da resposta  $\sigma_c - \varepsilon_c$  registada nos ensaios experimentais. Em (5)  $k_e$  é um coeficiente que atende à configuração do confinamento, sendo  $s'$  a distância entre cintas (considerada igual à distância livre entre faixas - ver Figura 1),  $d_s$  é o diâmetro da secção de betão confinado ( $A_{cc}$ ) que nos sistemas ensaiados no presente trabalho coincide com o diâmetro do provete (150 mm), e  $\rho_{sl}$  é a percentagem de armadura longitudinal, nula no presente dado que  $A_{sl} = 0$ . Finalmente,  $\rho_{st}$  é a percentagem de armadura de confinamento, sendo  $A_{st}$  a área da secção transversal do elemento de confinamento por unidade de volume de betão (no caso do dos sistemas de confinamento do presente trabalho

$A_{st}=W \times e \times L$ , ver Fig. 1), sendo  $e$  a espessura da manta de CFRP e  $f_{yh}$  é a tensão de cedência da armadura de confinamento. Para determinar a pressão máxima exercida pelo CFRP,  $f_l, f_{yh}$  foi substituído pela tensão máxima registada no CFRP,  $f_f$ , tendo esta sido obtida de  $f_f = k_c * E_f * \varepsilon_{fmax}$  em que  $E_f$  é módulo de elasticidade do CFRP que, segundo o fabricante, é igual 240 GPa, e  $\varepsilon_{fmax}$  é a extensão máxima no CFRP registada nos ensaios experimentais. Como a extensão máxima registada no CFRP depende significativamente dos modos de rotura ocorridos e dos locais onde os extensómetros foram aplicados, foram determinados os valores de um parâmetro,  $k_c$ , que converte a extensão máxima,  $\varepsilon_{fmax}$ , em extensão máxima efectiva. Para os provetes confinados com 3 camadas  $k_c=0.6$ , enquanto nos provetes confinados com 5 camadas é  $k_c=0.4$ , isto é,  $k_c$  diminui com o aumento da rigidez do sistema de confinamento, o que está em consonância com as recomendações que o ACI 440 propõe para o reforço à flexão e ao corte [1].

Na figura 9 comparam-se as curvas tensão axial versus extensão axial registados nos ensaios C23S200 com as curvas obtidas por aplicação do modelo modificado de Mander. As curvas obtidas por aplicação do modelo analítico foram designadas por Mander\_modificado. O grau de simulação permitido por este modelo analítico foi idêntico em todos os grupos de ensaios efectuados, pelo que estas curvas são representativas do comportamento dos quatro grupos de ensaios do programa experimental.

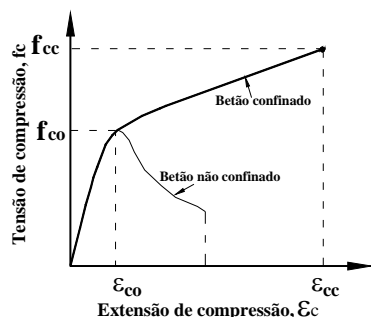


Figura 7 – Diagrama tipo tensão-extensão axial de compressão em provete confinado e não confinado.

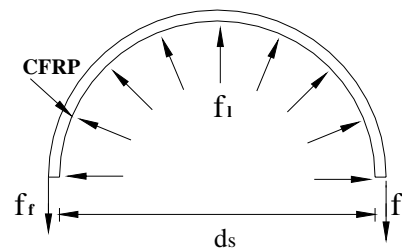


Figura 8 – Pressão exercida pelo sistema de confinamento.

As curvas tensão axial versus extensão axial registadas por aplicação do modelo modificado de Mander aproximam-se das correspondentes curvas experimentais. No entanto, à excepção da série W45S4L5, a tensão máxima prevista por este modelo é superior à alcançada experimentalmente. Esta uma tendência foi observada noutros trabalhos, [7, 8, 12], onde distintos modelos analíticos foram aplicados na simulação do comportamento registado em ensaios de compressão com provetes totalmente confinados. Tal indica ser necessário calcular a extensão máxima efectiva nos FRP com maior rigor, pois esta influência significativamente a capacidade máxima de carga do elemento de betão confinado.

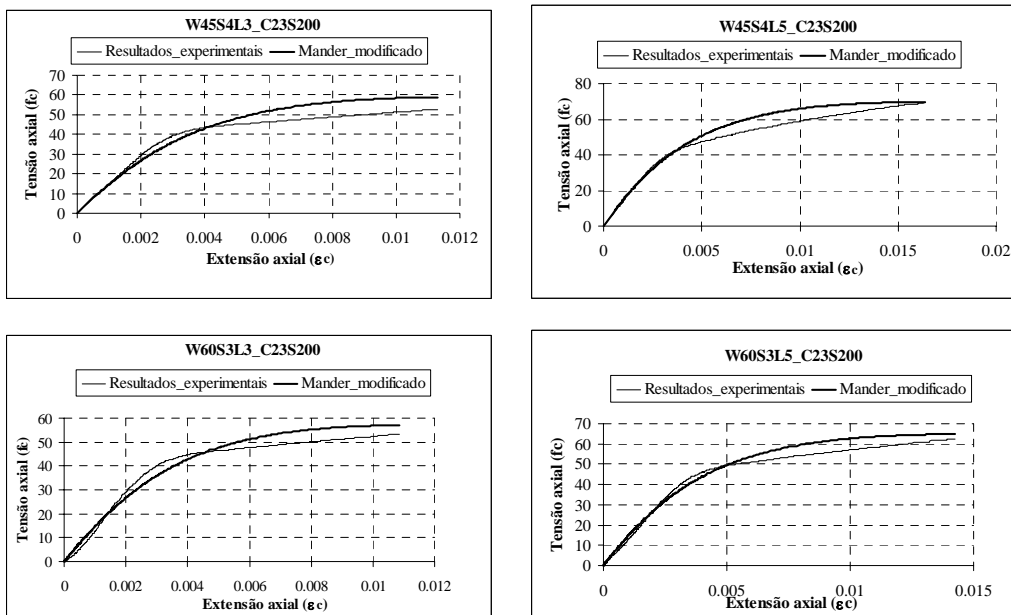


Figura 9 – Curvas tensão axial versus extensão axial.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho investigou-se o comportamento à compressão directa de provetes de betão reforçados total e parcialmente com mantas 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, da rigidez da manta e da classe de resistência do betão, no comportamento em compressão de elementos de betão confinados com distintos sistemas.

A influência da largura e do número de faixas no grau de confinamento alcançado está relacionado com o espaço livre de betão entre faixas. Assim, em séries com a mesma percentagem de confinamento de CFRP verificou-se maiores aumentos de capacidade de carga nas que dispunham de menor espaço livre entre faixas. Este comportamento foi mais acentuado nas séries confinadas com a manta de maior rigidez ( $300 \text{ g/m}^2$ ), dado que, quanto mais rígido for o sistema de confinamento discreto, maior concentração de dano ocorre no betão entre as faixas de confinamento.

O modelo analítico aplicado no presente trabalho de investigação, utilizado para obter a relação entre a tensão axial e a correspondente extensão axial em elementos de betão armado com confinamento parcial, foi adaptado de um modelo desenvolvido para o confinamento do betão com cintas de aço. As curvas registadas pelo modelo, em termos de tensão máxima, aproximam-se do comportamento real obtido nos ensaios experimentais. No entanto, apresentam algum desfasamento, principalmente a partir da extensão correspondente à resistência à compressão dos provetes de betão não confinado,  $\epsilon_{co}$ . Tal deve-se ao facto do

modelo de Mander ter sido desenvolvido para sistemas de confinamento constituídos por cintas de aço com comportamento linear-elástico até à sua cedência, seguido de fase perfeitamente plástica, resultando uma evolução marcadamente não linear entre o acréscimo de tensão e de extensão axial do provete. Por seu lado, o comportamento linear-elástico do CFRP governa a resposta dos provetes após  $\varepsilon_{co}$ , resultando uma evolução praticamente linear entre a tensão e a extensão axial nos provetes reforçados com estes materiais. Na presente fase deste projecto de investigação, novos modelos analíticos estão a ser analisados, no sentido de se obter um que permita simular com elevado rigor o sistema de confinamento constituído por faixas de CFRP.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem a colaboração prestada pela empresa Bettor MBT Portugal e pela S&P Clever Reinforcement. O primeiro autor agradece o financiamento pelo PRODEP acção 5.3/N/199.014/01 da medida 5 de doutoramento.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] CEB, “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”, Technical report, 2001.
- [2] Ferreira, D.R.M; Barros, J.A.O – “Confinamento parcial e total de provetes cilíndricos de betão com CFRP”. Em apreciação para eventual publicação na *Revista APAET – Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*.
- [3] Ferreira, D.R.M; Barros, J.A.O – “Mantas de CFRP no confinamento de elementos de betão submetidos à compressão” em *V Simpósio sobre estruturas de concreto, EPUSP*,. P. 141, 7-10 de Junho de 2003, São Paulo, Brasil, 15 p.
- [4] Bettor-Master Building Technologies (2003)- Prontuário.
- [5] Lam, L., Teng, J. G.,- “Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete”. *Construction and building materials*, Elsevier, vol. 17, 2003, p. 471-489.
- [6] Kanellopoulos, A., "Zum unelastischen Verhalten und Bruch von Stahlbeton (On the inelastic behaviour and failure of structural concrete)," *Institut für Baustatik und Konstruktion*, ETH Zurich, IBK Nr. 153, Birkhauser Verlag, Basel, Nov. 1986, 86pp.
- [7] Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M. “ Model of concrete confined by fiber composites.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(9), 1025-1031, (1998).
- [8] Toutanji, H. A. (1999). “Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composites sheets.” *ACI Material Journal*, 96(3), 397-404.
- [9] Saafi, M., Toutanji, H. A., e Li, Z. “Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes.” *ACI Material Journal*, 96(4), 500-509, (1999).
- [10] Spoelstra, M., R. e Monti, G., “FRP-confined concrete model.” *Journal of composites for construction*, ASCE, 3(3), 143-150, (1999).
- [11] Xiao, Y., Wu, H. “Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets.” *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, 125(3), 255-264, (2000).
- [12] Untiveros, Carlos, “Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión”. *Tesis doctoral*, Universitat Politècnica de Catalunya, (2002).
- [13] Mander, J. B., Priestley, M. J. N. e Park, R. “Theoretical stress-strain model for confined concrete.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 114(8), 1804-1826, (1988).