

## Avaliação do desempenho de uma técnica para aplicação de pós-tensão em mantas de CFRP no confinamento de pilares de betão armado



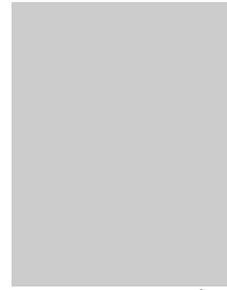
Marta Agante<sup>1</sup>



Eduardo Júlio<sup>2</sup>



Joaquim Barros<sup>3</sup>



João Santos<sup>4</sup>

### RESUMO

Diversos estudos comprovam que o reforço ao confinamento de pilares de betão armado com mantas de CFRP é uma técnica extremamente eficaz no caso de pilares de secção transversal circular, mas muito pouco eficaz no caso de pilares de secção rectangular. Algumas tentativas para ultrapassar esta situação incluíram o pré-esforço do encamisamento de CFRP através da injeção sob pressão de resinas de epóxico. Contudo, os resultados foram marginalmente satisfatórios e esta técnica revelou-se bastante trabalhosa.

Neste artigo, apresenta-se um estudo experimental, desenvolvido na sequência dos estudos anteriormente referidos, tendo por objectivo analisar a viabilidade de utilizar um produto comercial, uma resina expansiva na presença de água, para pré-esforçar o encamisamento de CFRP. Apresentam-se os resultados das diferentes fases do estudo: ajuste da percentagem de água para obter o nível óptimo de expansão; análise da influência da espessura do espaço entre o reforço de CFRP e o elemento de betão a reforçar; avaliação do comportamento diferido do elemento reforçado durante as primeiras horas; e avaliação do comportamento até à rotura dos elementos reforçados submetidos a compressão uniaxial. Apresentam-se igualmente as conclusões relevantes do estudo.

### PALAVRAS-CHAVE

Reabilitação, Reforço, Confinamento, Fibre Reinforced Polymers (FRP).

<sup>1</sup> ISISE, Instituto Politécnico de Leiria, Departamento de Engenharia Civil, 2411-901 Leiria, Portugal. [magante@estg.iplleiria.pt](mailto:magante@estg.iplleiria.pt)

<sup>2</sup> ISISE, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, 2411-901 Leiria, Portugal, [ejulio@dec.uc.pt](mailto:ejulio@dec.uc.pt).

<sup>3</sup> ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [jaob@netvisao.pt](mailto:jaob@netvisao.pt)

<sup>4</sup> Central de Projectos, [jc@centralprojectos.pt](mailto:jc@centralprojectos.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

Estudos experimentais sobre a utilização de mantas de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) para reforço ao confinamento de pilares de betão armado demonstraram que, para pilares de secção transversal circular, consegue-se um aumento muito significativo da capacidade de carga original [1,2,3]. Estes estudos demonstraram igualmente que, para pilares de secção transversal rectangular, há uma perda de eficácia do confinamento, a qual aumenta com a relação altura/largura. Tanto para pilares circulares como para pilares rectangulares, só se obtém um aumento significativo da capacidade de carga para uma deformação axial do pilar superior ao valor limite correspondente ao esmagamento do betão não confinado [2]. Para superar estes inconvenientes, decidiu-se estudar a possibilidade de aplicar um determinado nível de pós-tensão nas mantas de CFRP, com o fim de obter um confinamento activo significativo, para níveis de deformação inferiores ao correspondente ao esmagamento do betão não confinado [4.5]. Neste âmbito, deve atender-se ao facto de o aumento da capacidade de carga axial dos pilares, resultante do confinamento activo, estar directamente relacionado com o nível de pós-tensão aplicado nas mantas de CFRP [5]. Contudo, deve-se limitar o nível de pós-tensão a aplicar devido à ocorrência de à concentração de tensões nos cantos dos pilares, a qual pode conduzir à rotura local das mantas de CFRP.

Neste trabalho experimental, avaliou-se a possibilidade de um método de confinamento activo de pilares rectangulares, recorrendo a uma resina expansiva para pós-tensionar um encamisamento de CFRP prefabricado. Foram usados provetes cúbicos confinados através do método proposto, variando alguns parâmetros. Realizaram-se ensaios de compressão para avaliar a eficácia do método, medindo o incremento da capacidade de carga dos provetes. As extensões no encamisamento de CFRP prefabricado foram igualmente medidas. Descreve-se o programa experimental, discutem-se os resultados e apresentam-se as principais conclusões.

## **2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1 Materiais**

Para produzir os provetes a utilizar neste estudo experimental, adoptou-se um betão com uma resistência média à compressão de 42 MPa aos 28 dias, em provetes cúbicos com 150 mm de aresta.

Foram adoptadas mantas unidireccionais de CFRP. As propriedades deste material foram fornecidas pelo fabricante e estão indicadas no Quadro 1, onde:  $f_{tk}$  é o valor característico da tensão de rotura;  $E_{tk}$  é o valor característico do módulo de elasticidade; e  $\epsilon_{tk}$  é o valor característico da extensão última de cedência.

Quadro1. Propriedades das CFRP.

| Tipo de Fibra | Espessura<br>[mm] | $f_{tk}$<br>[MPa] | $E_{tk}$<br>[MPa] | $\epsilon_{tk}$<br>[mm/m] |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| 300/300       | 0.172             | 3860              | 242               | 15                        |

A resina de poliuretano expansiva adoptada é composta por duas componentes, base (A) e endurecedor (B), sendo rígida, de baixa viscosidade, sofrendo expansão em contacto com a água. No Quadro 2 apresentam-se as características fornecidas pelo fabricante.

Quadro 2. Dados técnicos da resina.

| Características                 | Unidades          | Valores        | Normas           | Comentários                         |
|---------------------------------|-------------------|----------------|------------------|-------------------------------------|
| Densidade                       | g/cm <sup>3</sup> | 1.13           | DIN 53 479       | a 20 °C e 50 % de humidade relativa |
| Viscosidade                     | MPa               | Aprox.200 ± 50 | DIN 53 018       | a 20 °C e 50 % de humidade relativa |
| Relação de mistura              | p.d.v.            | 1:1            | –                | componente A :<br>componente B      |
| Tempo de vida útil              | Seg.              | Aprox. 45      | –                | a 20 °C e 50 % de humidade relativa |
| Temperatura mínima aplicação    | °C                | +3             | –                | temperatura da peça estrutural      |
| Resistência à compressão        | N/mm <sup>2</sup> | Aprox. 40      | DIN EN 196 T1    | a 20 °C e 50 % de humidade relativa |
| Resistência ao corte            | N/mm <sup>2</sup> | Aprox. 13.3    | BS 6319, parte 4 | –                                   |
| Resistência à flexão            | N/mm <sup>2</sup> | Aprox. 3.5     | DIN EN 196 T 1   | –                                   |
| Expansão em contacto com a água | Volume            | 1 – 10 vezes   | –                | Dependendo da pressão contrária     |

## 2.2 Preparação dos provetes

Foram consideradas 11 alternativas diferentes para pós-tensionar o encamisamento de CFRP, ver Quadro 3. Os provetes de betão (cubos com 150 mm de lado) foram reforçados de acordo com o apresentado na Fig. 1. Foram realizados ensaios em provetes de dimensões reduzidas com o objectivo de medir a variação da tensão no sentido de fibras do encamisamento de CFRP, causada pela expansão da resina.

Os provetes foram identificados com o seguinte código: duas letras, representando “NR”, provete não confinado; “RC”, provete confinados com mantas de CFRP coladas; e “RP”, provete confinados com mantas de CFRP pós-tensionadas; os dois algarismos imediatamente a seguir indicam a percentagem de água adoptada para provocar a expansão da resina; e os dois últimos algarismos especificam a distância, em milímetros, entre o encamisamento de CFRP e a face exterior dos provetes de betão.

Quadro 3. Designação dos provetes.

| Designação do provete | % de água de volume de resina | Espaçamento [mm] | Sistema de confinamento |
|-----------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------|
| NR                    | -                             | -                | nenhum                  |
| RC                    | -                             | -                | colado                  |
| RP04.05               | 4                             | 5                | pós-tensionado          |
| RP04.06               | 4                             | 6                | pós-tensionado          |
| RP04.07               | 4                             | 7                | pós-tensionado          |
| RP05.05               | 5                             | 5                | pós-tensionado          |
| RP05.06               | 5                             | 6                | pós-tensionado          |
| RP05.07               | 5                             | 7                | pós-tensionado          |
| RP07.05               | 7                             | 5                | pós-tensionado          |
| RP07.06               | 7                             | 6                | pós-tensionado          |
| RP07.07               | 7                             | 7                | pós-tensionado          |

As arestas verticais dos provetes de betão foram arredondadas com um raio de 20 mm para evitar a localização da rotura do CFRP nas arestas do provete, ver Fig. 1. Para obter um maior confinamento

## Avaliação do desempenho de uma técnica para aplicação de pós-tensão em mantas de CFRP no confinamento de pilares de betão armado

da secção transversal de betão, Thériault e Neale [6] recomendam um raio mínimo com o valor de  $b/6$ , onde  $b$  é a menor dimensão da secção transversal do pilar. No entanto, Rochette e Labossière [7] referem que, para um raio de  $25\text{ mm}$ , consegue-se um aumento significativo da tensão de rotura à compressão em pilares confinados com esta técnica. Masia *et al.* [8] afirmam que a resistência à compressão e a ductilidade dos pilares de betão encamisados com CFRP aumentam com o aumento do raio de arredondamento das arestas do pilar.

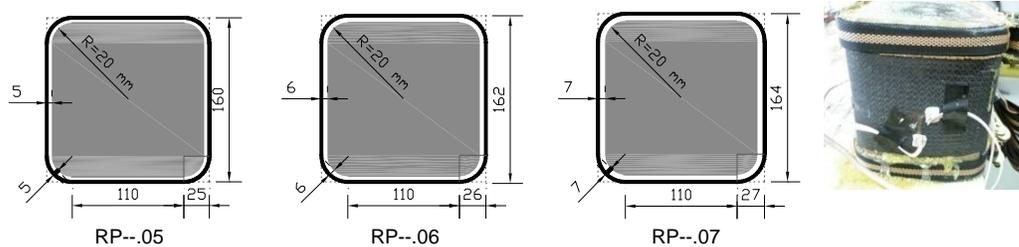


Figura 1. Dimensões do encamisamento prefabricado (mm) com CFRP a pré-esforçar.

O encamisamento de CFRP foi executado envolvendo uma única camada de manta de CFRP, com as fibras dispostas horizontalmente, à volta de um molde com a geometria do pilar de betão acrescida da largura correspondente ao espaço necessário para introduzir a resina. Adoptou-se um comprimento de sobreposição de  $100\text{ mm}$ , reconhecido como suficiente para esta finalidade [7].

Imediatamente antes de colocar o encamisamento prefabricado, é aplicada uma folha de teflon com uma espessura de  $0.1\text{ mm}$  para impedir a fuga da resina durante a expansão. Com o mesmo objectivo é colocado um anel de cortiça na extremidade inferior do provete, Fig. 2 a). A cortiça foi escolhida por permitir acomodar a deformação do encamisamento prefabricado aquando a expansão da resina. Depois de colocar o encamisamento prefabricado sela-se a extremidade inferior do provete com uma fita de nylon e utilizando um sistema de pós-tensão. Introduce-se a resina expansiva no espaço entre o provete de betão e o encamisamento de CFRP prefabricado. Seguidamente, adiciona-se água e sela-se igualmente a extremidade superior do provete, usando o anel móvel de cortiça e a tira de nylon. Atendendo ao curto espaço de tempo em que se dá a expansão da resina, a velocidade de execução deste procedimento é muito importante para o sucesso da operação de reforço. A Fig. 2 ilustra as fases principais do método de aplicação de pós-tensão no encamisamento de CFRP, anteriormente descrito.

Os provetes de betão encamisados com CFRP prefabricado e pós-tensionados foram ensaiados, assim como os provetes não confinados e os provetes reforçados confinados com manta de CFRP colada, considerados para servir de referência.

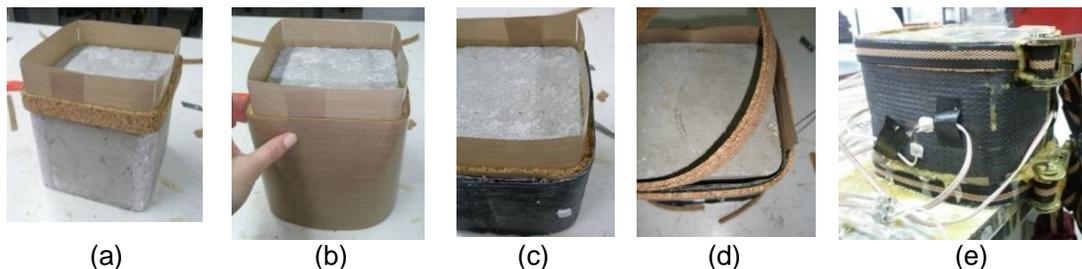


Figura 2. Fases da construção do sistema de pós-tensão do encamisamento de CFRP: (a) anel de cortiça inferior; (b) folha de teflon; (c) encamisamento prefabricado de CFRP; (d) anel de cortiça superior; (e) selagem das extremidades inferior e superior usando fitas de nylon associadas a um sistema de pós-tensão.

### 2.3 Carregamento e aquisição de dados

Aos 40 dias de idade, os provetes foram sujeitos a carregamentos uniaxiais monotónicos com controlo de deslocamento à velocidade de  $15\text{ }\mu\text{m/s}$  até à rotura.

Colaram-se extensómetros na direcção das fibras, a meia altura de lados opostos e em dois cantos opostos do encamisamento de CFRP prefabricado.

### 3. RESULTADOS

O programa experimental foi desenvolvido em três fases distintas. Na primeira fase determinou-se a dosagem óptima de água na expansão da resina; na segunda fase avaliou-se o nível de pós-tensão introduzido com a resina expansiva no encamisamento de CFRP prefabricado e a sua variação nas primeiras horas; e na terceira fase determinou-se a capacidade de carga à compressão dos provetes.

#### 3.1 Controlo da expansão da resina

O volume da resina aumenta até 10 vezes em contacto com a água. Com o objectivo de controlar a expansão da resina realizaram-se diversos testes para diferentes percentagens da água adicionada (em percentagem de volume de resina): 0%, 1.25%, 2%, 3%, 4%, 5% e 7%.

Observou-se que (Figs. 3 e 4) a resina sem adição de água não sofreu qualquer expansão. Com o aumento da percentagem de água adicionada, deu-se um aumento de volume da resina até uma adição de 3% da água. Para percentagens superiores a este valor, o aumento de volume da resina começa a diminuir. Observou-se também que, com o aumento da percentagem de água, a reacção exotérmica se torna mais rápida e o tamanho das bolhas de ar formadas no interior da resina são menores. Associada à expansão volumétrica mais elevada da resina, correspondente a valores entre 2 e 4% da adição de água, regista-se uma diminuição da consistência da resina. Algumas das bolhas criadas no interior da resina, pelo seu tamanho, eram facilmente perfuráveis.

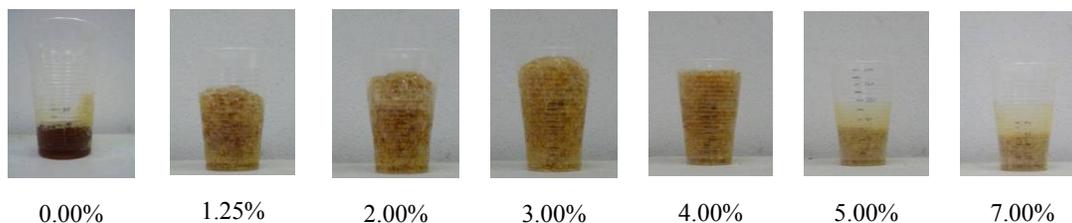


Figura 3. Expansão da resina para as diferentes percentagens de água adicionada.

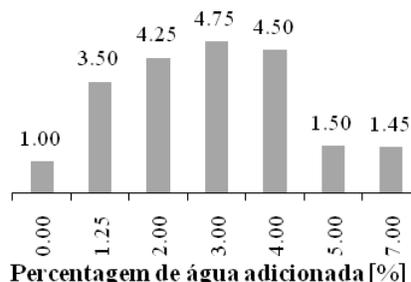


Figura 4. Expansão volumétrica da resina *versus* percentagem de água adicionada na resina.

Observou-se para as misturas com 5% e 7% de água, uma maior consistência da resina e um aumento de volume mais uniforme, aproximadamente 50% e 45%, respectivamente. Por este motivo, decidiu-se adoptar estes valores nos ensaios das fases seguintes, assim como a percentagem de 4% de adição de água.

### 3.2 Medição das extensões no encamisamento de CFRP prefabricado e pós-tensionado

A resina expansiva foi colocada entre o provete de betão e o encamisamento de CFRP prefabricado, com o objectivo de pós-tensionar o encamisamento. Já confinada, a resina aumentou de volume e introduziu pós-tensão no encamisamento de CFRP. Os valores das extensões do encamisamento começaram a estabilizar uma hora após a introdução da resina (Figs. 5 e 6).

As extensões do encamisamento de CFRP foram medidas no centro de duas faces opostas (Fig. 5), e no centro de dois vértices opostos do provete (Fig. 6) no sentido horizontal, e no alinhamento das fibras. As curvas dos gráficos das Figs.5 e 6 representam a média das extensões dadas pelos extensómetros colocados em posições opostas. As extensões registadas por estes extensómetros mostram que, para um valor de 4% de água adicionada à resina, obtém-se uma maior homogeneidade de valores para as extensões, qualquer que seja o espaçamento entre o encamisamento de CFRP e o provete de betão. Como se pode observar nas Figs. 5 e 6, a expansão transversal mais elevada foi obtida para um espaçamento de 7 mm.

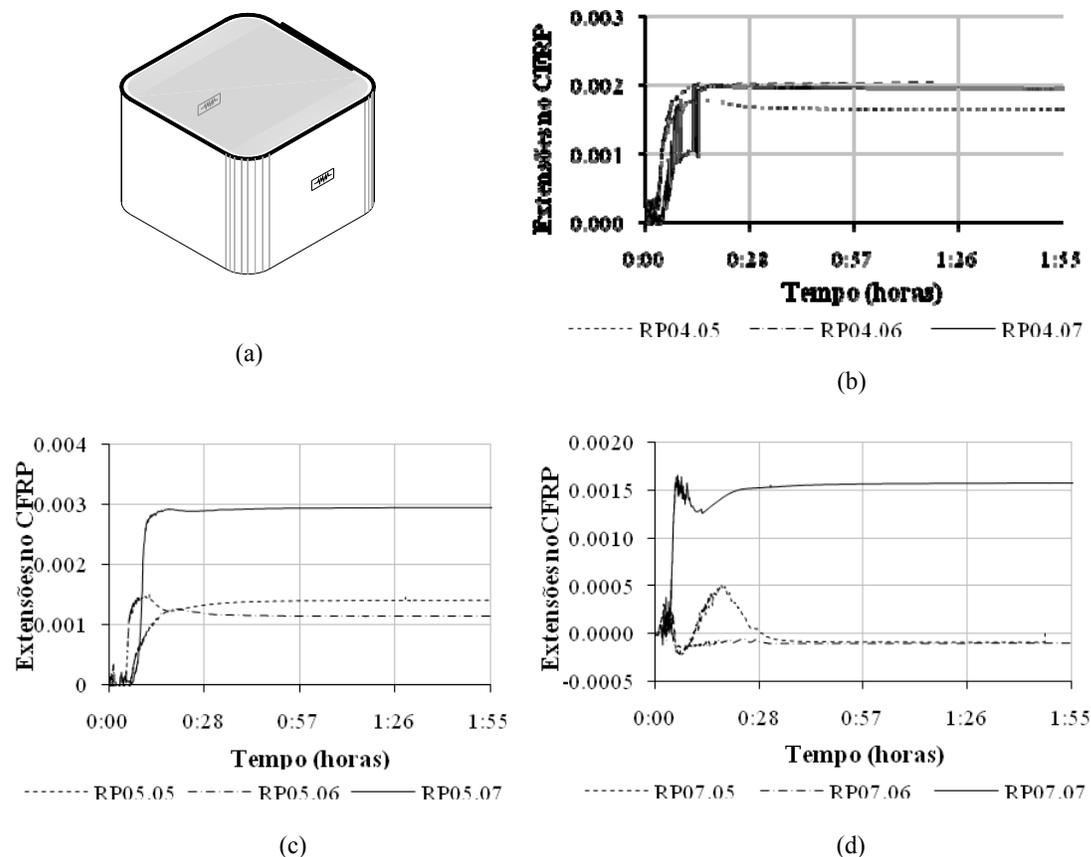


Figura 5. Evolução no tempo das extensões do encamisamento prefabricado de CFRP com a aplicação da resina expansiva, medida no centro de duas faces opostas: (a) posição dos extensómetros horizontais; (b) RP04; (c) RP05; (d) RP07.

Os valores mais elevados de extensão no encamisamento de CFRP prefabricado provocado pela expansão da resina foram de 0.003 e 0.0025, no meio e nos cantos do provete, respectivamente, para o provete RP05.07, onde se usou uma adição de 5% de água, num espaço de 7 mm entre o encamisamento de CFRP e o provete de betão, ver Figs. 5 c) e 6 c). Este nível máximo de extensão corresponde a 20% da extensão elástica final da manta de CFRP adoptada. O nível mínimo da extensão introduzido no encamisamento de CFRP foi observado para os provetes com uma percentagem de 7% de água adicionada à resina.

Os valores negativos das extensões medidos nos cantos do encamisamento prefabricado de CFRP estão relacionados com a curvatura do extensómetro, aquando da sua aplicação, ver Fig. 6. A expansão volumétrica elevada da resina no meio de cada face do encamisamento de CFRP origina um aumento do ângulo de abertura nos cantos do encamisamento prefabricado. A curvatura inicial dos extensómetros aumenta, provocando compressões localizadas, Fig.7.

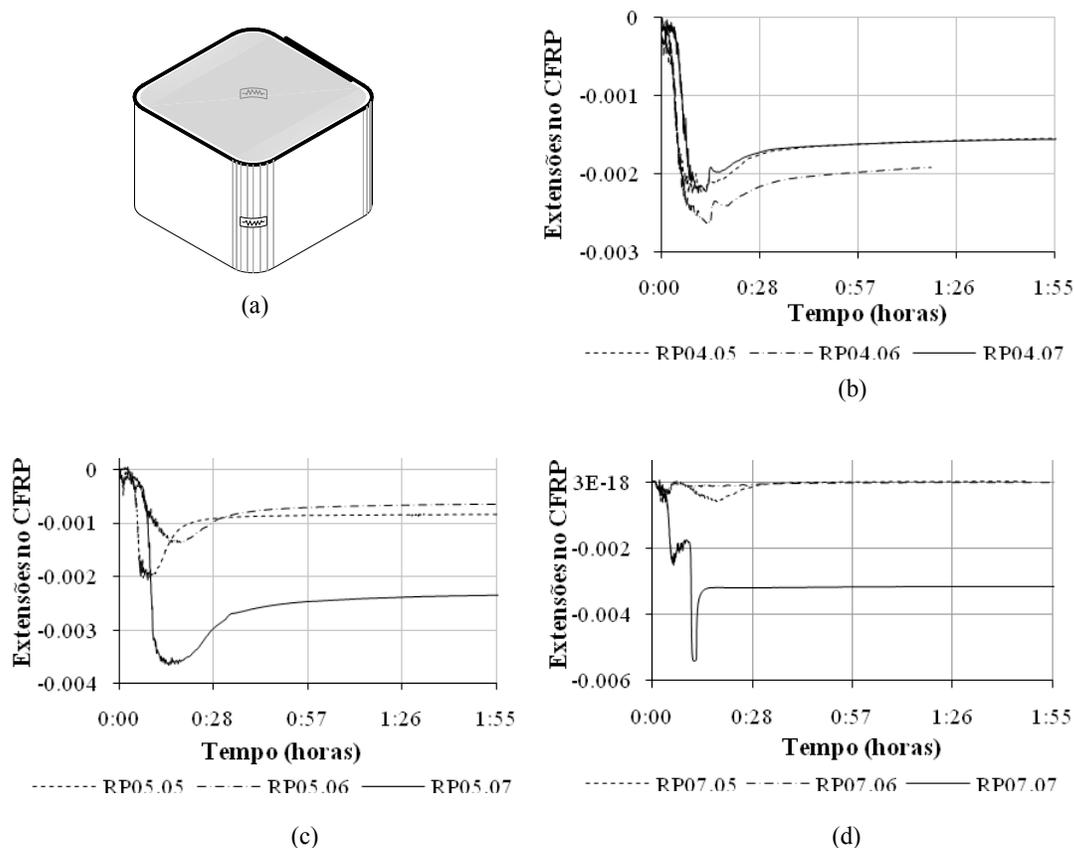


Figura 6. Evolução no tempo das extensões do encamisamento prefabricado de CFRP com a aplicação da resina expansiva, medidas em cantos opostos da secção transversal: (a) posição dos extensómetros horizontais; (b) RP04; (c) RP05; (d) RP07.

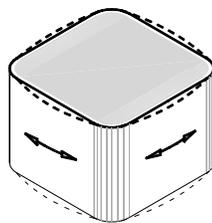


Figura 7: Deformação do encamisamento de CFRP pré-esforçado com a expansão da resina.

### 3.3 Comportamento dos provetes confinados à compressão

A Figura 8 ilustra a força axial de compressão registada em todos provetes testados, 14 dias após a aplicação do sistema de pós-tensão nos provetes confinados. Os diagramas tensão-extensão obtidos nestes testes são exibidos na Fig. 9.

*Avaliação do desempenho de uma técnica para aplicação de pós-tensão em mantas de CFRP no confinamento de pilares de betão armado*

A análise dos resultados apresentados nas Figs. 8 e 9 deve considerar as dimensões dos provetes testados. A resistência e a ductilidade observadas para provetes em escala reduzida não podem ser directamente extrapoladas para pilares de tamanho real [8]. Os pratos da prensa contribuem significativamente para o confinamento dos provetes sendo, por este motivo, obtida uma resistência axial superior ao caso em que este confinamento não se faz sentir.

Observa-se que todos os provetes encamisados com CFRP pós-tensionado apresentam uma resistência axial mais elevada do que o provete de betão não confinado. O melhor resultado foi obtido para a solução tradicional, encamisamento de CFRP colado, com um incremento da resistência à compressão de 26.8%, enquanto o provete confinado com a técnica proposta, RP05.05, exibiu um aumento de 24.6%. Este relativo baixo desempenho da técnica analisada deve-se à baixa rigidez da resina que, ao ser comprimida entre o encamisamento de CFRP prefabricado e o provete, permite uma maior deformação transversal deste, conduzindo ao esmagamento do betão para valores inferiores aos obtidos com a técnica tradicional.

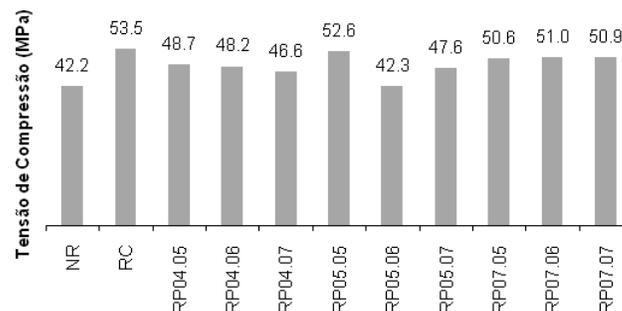
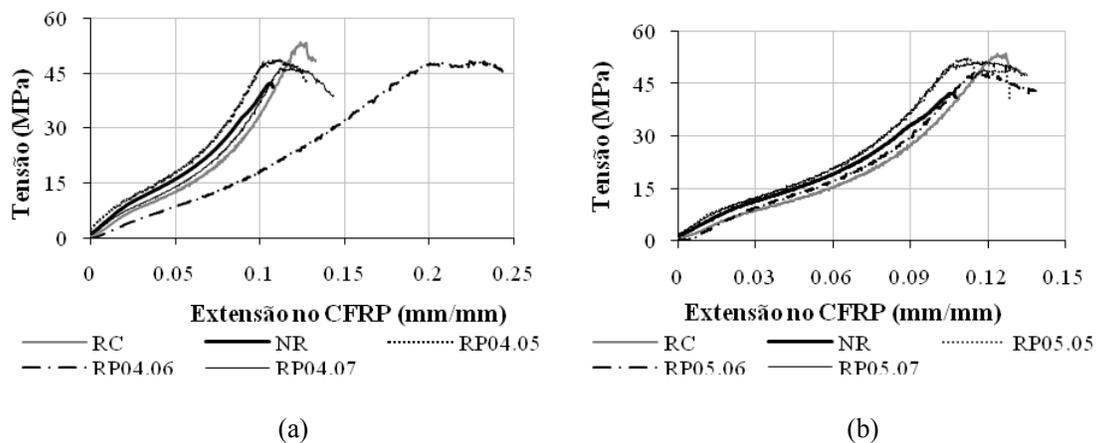
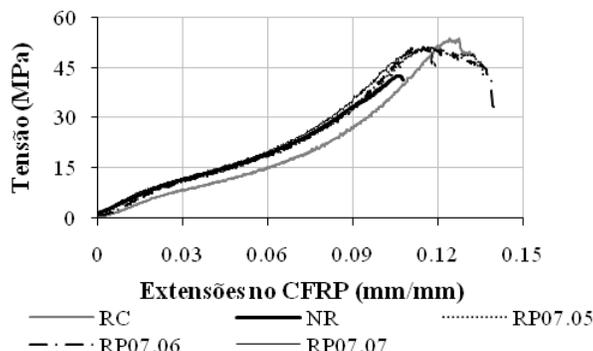


Figure 8. Valor da tensão axial de compressão para todos os provetes (MPa).

Dos provetes encamisados com CFRP pós-tensionado, são os da série RP07 que apresentam valores de resistência à compressão mais equilibrados para os 3 espaçamentos. Este comportamento foi causado pelo aumento da consistência da resina expansiva. Sendo neste caso a expansão de 45% do seu volume original, as bolhas de ar desenvolvidas no interior da resina são menores, quando comparadas ao tamanho das bolhas de ar formadas no interior da resina com outros valores da adição da água (com 4% e 5%).





(c)

Figura 9. As curvas de tensão versus extensão para os provetes reforçados encamisamento do CFRP colado, provetes não reforçados, e provetes reforçados com um encamisamento CFRP pré-esforçado: (a) 4% da água - RP04; (b) 5% da água - RP05; (c) 7% da água RP07.

(Nota: os valores de tensão axial à compressão podem estar sobre estimados uma vez que placa superior da máquina de teste não estava perfeitamente imóvel).

#### 4. CONCLUSÕES

Com o objectivo de produzir um reforço activo ao confinamento de pilares de betão armado de secção transversal rectangular, melhorando o comportamento do conjunto relativamente ao resultado obtido com a técnica de reforço tradicional, foi conduzida uma investigação experimental para estudar a viabilidade da utilização de uma resina expansiva para pós-tensionar o encamisamento de CFRP. Estudou-se a influência da percentagem de adição de água à resina e da dimensão do espaço entre o encamisamento de CFRP e o provete de betão.

Concluiu-se que, com a técnica de reforço estudada é obtido um aumento significativo da capacidade de carga à compressão do pilar original. Contudo, este incremento é menor do que o obtido com a solução tradicional de CFRP colado. Este facto deve-se à baixa rigidez da resina, a qual, embora introduzindo algum nível de pós-tensão no encamisamento de CFRP, não é suficiente para compensar a menor resistência à deformação transversal do pilar relativamente ao encamisamento de CFRP colado. Pretende-se estudar a viabilidade de outras alternativas, como sejam: a utilização de uma resina expansiva de maior rigidez e a utilização de um sistema mecânico de pós-tensão do encamisamento de CFRP.

#### REFERÊNCIAS

- [1] BARROS, J.A.O.; FERREIRA, D.R.S.M. - Assessing the efficiency of CFRP discrete confinement systems for concrete column elements. Accepted to be published in Journal of Composites for Construction, 2007.
- [2] TOUTANJI, H.A.; HAN, M.; MATHYS S. - Axial load behavior of rectangular concrete columns confined with FRP composites. FRPRCS-8, University of Patras, Patras, Greece, July 16-18, 2007.
- [3] DIAS DA SILVA, V.; SANTOS J. M. C. - Strengthening of axially loaded concrete cylinders by surface composites. Composites in Construction, 257-262, 2001.
- [4] MORTAZAVI, A. A.; PILAKOUTAS, K.; SON, K.I - RC column strengthening by lateral pre-tensioning of FRP. Constructions and Building Materials 17, 27: 491-497, 2003.

*Avaliação do desempenho de uma técnica para aplicação de pós-tensão em mantas de CFRP no confinamento de pilares de betão armado*

- [5] YAN, Z.; PANTELIDES, C.P; ASCE, M.; REAVELEY, L. D. - Posttensioned FRP composite shells for concrete confinement. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, January/February 81-90, 2007.
- [6] THÉRIAULT, M.; NEALE, K. W. C. - Design equations for axially loaded reinforced concrete columns strengthened with fibre reinforced polymer wraps. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27: 1011-1020, 2000.
- [7] ROCHETTE, P.; LABOSSIÈRE, P. - Axial testing of rectangular column models confined with composites. *Journal of Composites for Construction*, August 129-136, 2000.
- [8] MASIA, M.J.; GALE, T.N.; SHRIVE, N.G. - Size effects in axially loaded square-section concrete prisms strengthened using carbon fibre reinforced polymer wrapping. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31: 1-13, 2004.