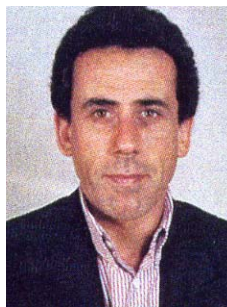


## **Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP pré-esforçados**



**Paulo França<sup>1</sup>**



**António Costa<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

A utilização de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) sob a forma de laminados no reforço de estruturas de betão armado (BA) tornou-se corrente devido à quantidade significativa de investigação realizada neste campo nos últimos anos. Pré-esforçar este material melhora o desempenho desta técnica de reforço pelo que se torna necessário realizar investigação de modo a testar o seu comportamento em estruturas de BA. O principal objectivo deste trabalho é ensaiar e analisar o comportamento de vigas de BA reforçadas à flexão com laminados de CFRP pré-esforçados. Uma técnica de pré-esforçar laminados foi ensaiada em diversos provetes à escala real de vigas de BA simplesmente apoiadas com secção transversal em T. Estabeleceram-se comparações de comportamento entre as vigas de referência e as vigas reforçadas com os laminados de CFRP pré-esforçados e sem pré-esforço. Para simular o comportamento das vigas utilizou-se um modelo numérico não-linear que foi validado pelos resultados experimentais. O modelo numérico foi depois utilizado para analisar a capacidade de redistribuição de momentos de uma viga de BA contínua de 2 vãos reforçada com laminados de CFRP pré-esforçados. Esta técnica de reforço resultou num melhoramento substancial do comportamento da viga em serviço, ao reduzir a sua deformação e a abertura de fendas, e em estado limite último, ao aumentar a sua capacidade resistente, quando comparada com a viga de referência e com a viga reforçada sem pré-esforço. O pré-esforço também aumentou a capacidade de redistribuição de momentos da viga ao atrasar a formação da rótula plástica.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Vigas, reforço, laminados, CFRP, pré-esforço.

<sup>1</sup> Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, 1049-001 Lisboa, Portugal.  
pfranca@civil.ist.utl.pt

<sup>2</sup> Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, 1049-001 Lisboa, Portugal.  
acosta@civil.ist.utl.pt

## **1. INTRODUÇÃO**

A utilização de laminados de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) no reforço de estruturas de betão armado (BA) tornou-se corrente devido à quantidade significativa de investigação efectuada recentemente nessa área. Pré-esforçar este material aumenta o desempenho desta solução de reforço na medida em que se torna possível um melhor aproveitamento da elevada capacidade resistente do material e possibilita a redução de fendas e da deformação dos elementos estruturais. No entanto, é necessário realizar investigação para aferir o seu comportamento em estruturas de BA. Wight [1] e [2], El-Hacha [3] e Piyong [4] são exemplos de outros trabalhos de investigação feitos neste âmbito mas com recurso a mantas de CFRP pré-esforçadas.

Parte de um trabalho mais alargado de França [5] com o principal objectivo de ensaiar, analisar e interpretar o comportamento de vigas reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados é aqui apresentado. Uma tecnologia inicialmente concebida para reforçar lajes deste modo [6] foi ensaiada em seis vigas simplesmente apoiadas de BA à escala real com secção transversal em T. Os diferentes parâmetros entre as vigas foram duas percentagens de armadura ordinária, a existência ou não de um dano inicial na viga antes do seu reforço e a influência da localização das ancoragens antes ou depois dos apoios. A tecnologia de reforço destas vigas e a campanha experimental que serve de base a este artigo podem ser consultados em França [5] e França et al. [7] e [8]. Resultados experimentais de lajes reforçadas com esta técnica [6] podem ser encontrados em Suter [9].

O presente artigo incide nos resultados de uma modelação numérica não-linear que, após ser validada pelos resultados experimentais, é utilizada para simular o comportamento e analisar a capacidade de redistribuição de momentos numa viga contínua de dois vãos reforçada com laminados de CFRP pré-esforçados.

## **2. MODELAÇÃO NUMÉRICA**

Um programa de elementos finitos (EF) não-linear (ATENA [10]), para analisar o comportamento real de estruturas de betão armado, foi utilizado para modelar o comportamento das vigas ensaiadas e de uma viga contínua de dois vãos reforçada com laminados de CFRP.

Neste programa, o comportamento à tracção do betão é modelado através de mecânica da fractura não-linear combinada com o método da banda de fendas [11], no qual o conceito da fenda distribuída é utilizado. Recorreu-se ao modelo de fenda rotativa em detrimento do modelo de fenda fixa porque foram obtidos melhores resultados na comparação entre os ensaios e os modelos numéricos.

Foi criado um modelo plano bi-dimensional para cada viga. A viga em betão foi modelada por elementos macro 2D, os estribos através de armadura distribuída nos elementos macro 2D e as armaduras ordinárias por elementos de barra. Recorreu-se a chapas metálicas, modeladas por elementos macro 2D, nos quatro pontos de carga das vigas para evitar erros numéricos localizados devido a cargas pontuais.

Como não é possível simular correctamente o comportamento da ligação entre os laminados de CFRP e a superfície de betão, considerou-se uma aderência perfeita entre os materiais. Assim, o critério de rotura na análise foi a extensão média máxima obtida nos resultados experimentais de 12.3 %.

### **2.1 Vigas ensaiadas**

Duas malhas de EF diferentes em termos de refinamento foram consideradas para testar a sua influência nos resultados. Como não foram observadas diferenças relevantes, utilizou-se a malha mais grosseira, apresentada na Figura 1.

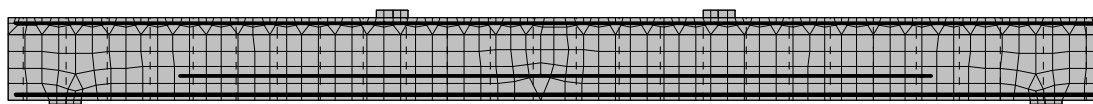


Figura 1. Modelo de EF 2D das vigas de BA reforçadas e ensaiadas.

Os valores das propriedades dos materiais, considerados no modelo numérico, foram os obtidos nos ensaios de caracterização dos mesmos (França [5]). O betão com uma resistência média à compressão de  $f_{cm} = 31.5$  MPa, o aço com uma tensão média de cedência de  $f_{ym} = 515.7$  MPa e o CFRP com um módulo de elasticidade de  $E_f = 170.5$  GPa e uma tensão de rotura de  $f_{tu} = 3016.0$  MPa.

É importante validar o modelo numérico estabelecendo uma comparação entre os seus resultados e os dos ensaios em laboratório. Os gráficos tipo carga-deslocamento das vigas ensaiadas e dos modelos numéricos são comparados na Figura 2. Um sumário dos resultados mais relevantes é apresentado no Quadro 1. Apesar de algumas diferenças, é possível verificar uma boa concordância entre os resultados, o que permite concluir que é possível utilizar este modelo numérico para simular casos não ensaiados.

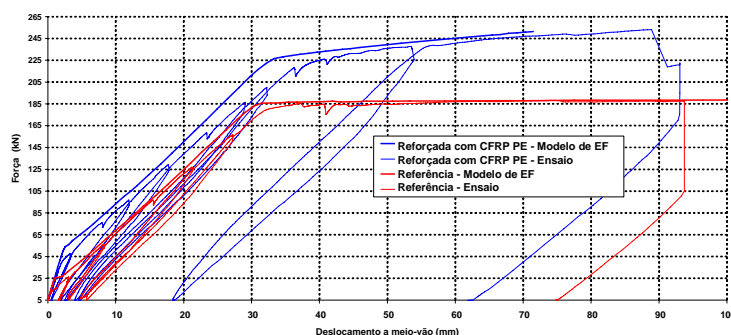


Figura 2. Comparação dos resultados carga-deslocamento a meio vão das vigas ensaiadas e das suas modelações.

Quadro 1. Cargas relevantes das vigas ensaiadas e suas modelações.

Viga	Força de fendilhação [kN]			Força de cedência [kN]			Força de rotura [kN]		
	Ensaio	Modelo	Erro [%]	Ensaio	Modelo	Erro [%]	Ensaio	Modelo	Erro [%]
Referência	12,0	21,3	77,5%	180,0	181,4	0,8%	188,2	188,5	0,1%
Reforçada com CFRP PE	44,3	48	8,4%	218,2	226,6	3,8%	253,1	251,5	-0,6%

Algumas das diferenças entre os resultados dos ensaios e dos modelos podem ser resultantes da elevada heterogeneidade do betão, do possível incorrecto posicionamento das armaduras no interior do betão e de alguma imperfeição na monitorização dos ensaios.

## 2.2 Viga contínua de dois tramos

Este exemplo foi criado com o objectivo de avaliar a influência de pré-esforçar laminados de CFRP em diferentes situações não ensaiadas e avaliar a sua capacidade de redistribuir os momentos aplicados. Os resultados obtidos são comparados com uma solução de reforço semelhante mas sem o recurso ao pré-esforço.

Foi considerada uma viga contínua com dois vãos de 6.0 m simplesmente apoiada sujeita a uma carga uniformemente distribuída. A viga em BA dimensionada para a carga actuante é a viga de referência para a comparação com os resultados obtidos nas vigas reforçadas com CFRP PE e sem PE. Estas vigas são reforçadas unicamente para aumentar o momento resistente positivo e não foi considerado qualquer dano inicial. A viga de referência foi dimensionada com base numa análise elástica e as vigas reforçadas com base numa redistribuição de momentos.

## Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP pré-esforçados

A viga tem uma secção transversal em T com uma alma de 0.5 m x 0.3m e um banzo de compressão de 1.0 m x 0.1 m. O modelo de EF tira partido da simetria do problema e assim só é modelado um dos vãos. O eixo de simetria é tido em conta nas condições de fronteira com a restrição dos deslocamentos horizontais como indicado na Figura 3.

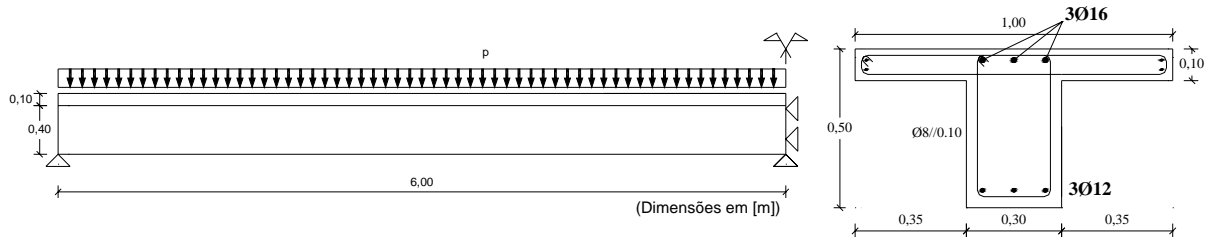


Figura 3. Modelo de dimensionamento da viga de BA contínua com dois vãos de 6.0 m simplesmente apoiada e a pormenorização da secção transversal.

A carga de dimensionamento tem um valor de  $p_{Ed} = 20$  kN/m o que resulta num momento máximo negativo de  $M_{Ed-} = 90$  kNm e um momento máximo positivo de  $M_{Ed+} = 50.6$  kNm.

Os materiais considerados foram o betão C20/25 e o aço para as armaduras com uma tensão de cedência característica de 400 MPa. Os respectivos valores de resistência para dimensionamento são  $f_{cd} = 13.3$  MPa and  $f_{yd} = 348$  MPa de acordo com o EC2 [12].

A pormenorização escolhida para a secção transversal está indicada na Figura 3. As armaduras longitudinais de tração são as necessárias para resistir aos momentos de dimensionamento ao passo que os estribos estão em excesso para evitar um modo de rotura por esforço transversal, mesmo nas vigas reforçadas.

O mesmo laminado utilizado em França [5], com um módulo de elasticidade de  $E_f = 160$  GPa e uma tensão de rotura de  $f_{tu} = 2500$  MPa (propriedades fornecidas pelo fabricante), foi considerado nas duas soluções de reforço deste exemplo. O sistema de pré-esforço é também o mesmo referido em França [5] pelo que a sua aplicação nas vigas é mais viável nas suas faces laterais como indicado na Figura 4. No entanto, no caso sem pré-esforço é possível a sua colocação na face inferior com apresentado na Figura 5.

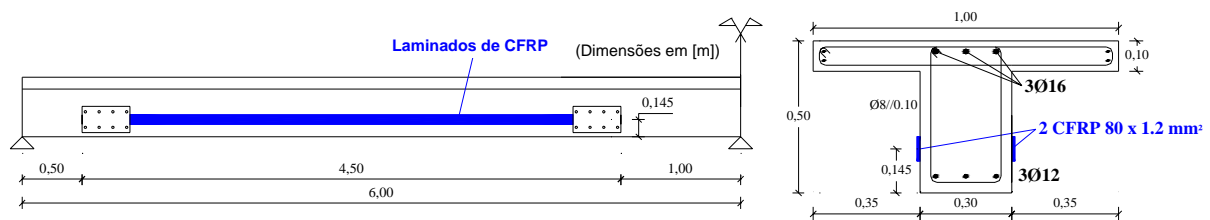


Figura 4. Solução de reforço com CFRP pré-esforçado (PE).

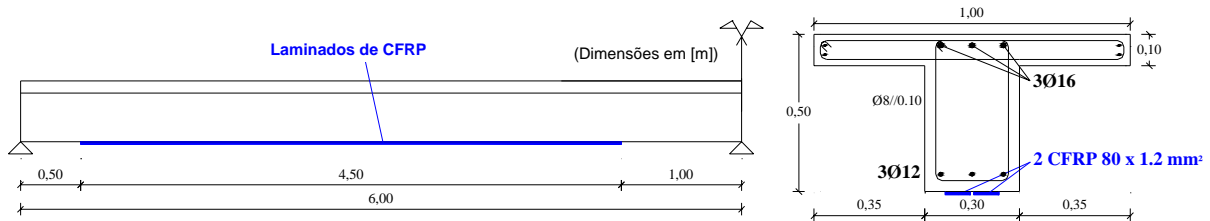


Figura 5. Solução de reforço com CFRP sem pré-esforço (Sem PE).

Do ponto de vista do dimensionamento, as extensões limites consideradas foram 6.5 ‰ para os laminados sem PE de acordo com o Fib-Bulletin 14 [13] e 10.0 ‰ para os laminados com PE, o que

significa já um coeficiente de segurança para o material de 1.2 quando comparado com os resultados obtidos experimentalmente (12.3 ‰).

Os momentos resistentes positivos em ambas as soluções de reforço são semelhantes como apresentado no Quadro 2, o que significa que a menor distância dos CFRP em relação à resultante de compressões no caso com PE é compensada pela sua maior extensão limite. Com estes resultados de resistência, os respectivos aumentos de capacidade de carga são também indicados no Quadro 2.

Quadro 2. Previsão do incremento de carga das vigas reforçadas e a respectiva redistribuição de momentos necessária com base numa análise de secção plana.

Viga	$M_{Rd}^+$ (kNm)	$\exists M_{Ed}^+$ (kNm)	$\exists p_{Ed}$ (kN/m)	$p_{Ed}$ (kN/m)	Redistribuição
PE	153,9	108,9	24,2	<b>44,2</b>	54,8%
Sem PE	148,5	103,5	23,0	<b>43,0</b>	53,5%

Para se esgotar a capacidade resistente em ambos os casos é necessário uma redistribuição de momentos superior a 50% na secção sobre o apoio do meio. Esta previsão é elevada, mas como é suposto utilizar-se neste exemplo o mesmo laminado por questões de comparação, deixou-se a cargo do modelo de EF a confirmação ou não destas previsões.

O modelo de EF foi definido de acordo com os mesmos princípios descritos anteriormente. Os valores máximos de carga actuante em cada caso, as respectivas redistribuições de momentos e os modos de rotura obtidos são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Resultados dos modelos de EF das vigas reforçadas.

Viga	$p_{Ed,max}$ (kN/m)			Redistribuição	Modo de rotura
	Previsão	Obtido	O / P		
PE	44,2	45,0	1,8%	<b>55,6%</b>	Esmagamento do betão no apoio do meio
Sem PE	43,0	36,0	<b>-16,3%</b>	<b>44,4%</b>	Esmagamento do betão no apoio do meio

Em ambos os casos, o modo de rotura foi o esmagamento do betão na secção sobre o apoio do meio mas só a solução com PE é que atingiu os resultados inicialmente previstos, pois o caso sem PE falhou as previsões por 16.3%. Isto significa que a solução com PE revelou uma capacidade de redistribuição de momentos superior (55.6 % contra 44.4 %). Embora nos dois casos tivesse sido prevista a mesma capacidade de carga derivada do mesmo momento resistente positivo, o facto é que a solução com PE suportou uma carga 25% superior.

A explicação para este comportamento é a formação da rótula plástica no apoio do meio ocorrer para cargas superiores no caso com PE. No Quadro 4 são apresentados os resultados relevantes em termos de extensões na secção do apoio do meio e na secção do meio vão nas duas soluções de reforço quando a carga actuante atinge o seu valor máximo. O valor da abertura de fenda também é indicado.

Quadro 4. Valor da abertura de fenda e extensões relevantes nas duas soluções de reforço.

			$p_{Ed} = 36 \text{ kN/m}$	$p_{Ed} = 45 \text{ kN/m}$
Secção do apoio do meio	$\epsilon_s^-$ (e-3)	PE	3,8	58,4
		Sem PE	<b>66,7</b>	-
	$\epsilon_c$ (e-3)	PE	0,9	3,5
		Sem PE	<b>3,3</b>	-
	w (mm)	PE	0,2	3,2
		Sem PE	<b>3,6</b>	-
Secção do meio-vão	$\epsilon_s^+$ (e-3)	PE	6,9	9,4
		Sem PE	<b>3,8</b>	-

Com a carga de 36 kN/m, as extensões nas armaduras à tracção (66.7‰) e no betão à compressão (3.3‰) na secção do apoio do meio são muito superiores no caso sem PE. Estes resultados mostram que o betão encontra-se com uma extensão limite de esmagamento e que as armaduras já foram sujeitas a uma extensão muito superior do que a sua extensão de cedência. Como resultado, o valor da abertura de fendas é muito superior (3.6 mm contra 0.2 mm). É possível concluir que a secção do apoio do meio no caso com PE tem ainda uma grande capacidade de rotação para além deste valor de

## *Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP pré-esforçados*

carga. A fendilhação e deformação de ambos os casos perante a carga referida estão representadas na Figura 6, onde é possível verificar a grande fenda na secção do apoio do meio no caso sem PE.

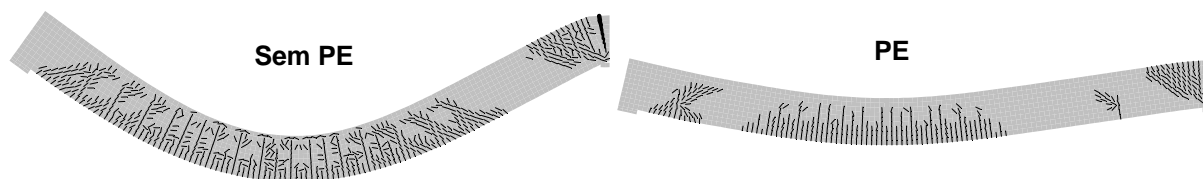


Figura 6. Fendilhação e deformação de ambos os casos de reforço perante uma carga actuante de 36 kN/m.

A extensão no CFRP do caso sem PE foi de 3.8 % perante a carga de rotura de 36 kN/m, o que constitui um valor muito inferior ao seu limite que é de 6.5 %. Por outro lado, a solução com PE atingiu a extensão de 9.4 % perante a sua carga de rotura de 45 kN/m, o que é quase a sua extensão limite de 10 %. Assim a conclusão é que a solução com PE tira melhor partido de elevada capacidade resistente do laminado do que a solução sem PE. O problema desta última solução é necessitar de uma grande e inviável deformação da viga para conseguir mobilizar maiores extensões no laminado.

Outra importante conclusão a retirar desta comparação é que, para a mesma carga actuante, o caso com PE apresenta sempre menor deformação o que é um comportamento típico de soluções pré-esforçadas. Isto é confirmado na Figura 7 onde a máxima deformação de todas as vigas é indicada em função da carga actuante.

A viga de referência apresentou o mesmo modo de rotura depois das armaduras no apoio do meio terem atingido a tensão de cedência.

Neste modelo de EF, o pré-esforço no CFRP só foi considerado depois de aplicado o peso próprio da viga de 5.5 kN/m. A razão deste procedimento foi evitar o levantamento do modelo no apoio do meio da viga. Assim, em ambos os casos de reforço, o laminado de CFRP só entrou no modelo depois de aplicado o peso próprio da viga por questões de comparação de comportamento.

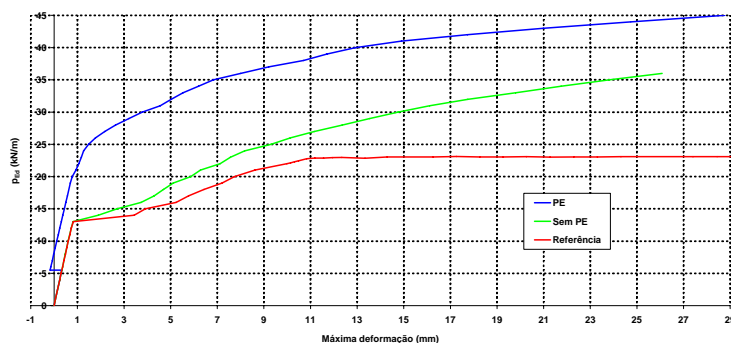


Figura 7. Cargas aplicadas vs máxima deformação das vigas reforçadas e de referência.

### 3. CONCLUSÕES

É possível reforçar vigas de BA com laminados de CFRP pré-esforçados para a obtenção de bons e imediatos resultados num estado de serviço com um sistema de fácil aplicação (24 horas são suficientes para a sua desactivação). A carga de fendilhação é atrasada na viga reforçada ou, em casos já fendilhados, é possível fechar algumas ou mesmo todas as fendas da viga. Este melhoramento na fendilhação da viga, que não pode ser conseguido à custa de uma solução sem pré-esforço, é muito importante na medida em que não só limita a deformação como também melhora a durabilidade da estrutura (a deterioração está também relacionada com a abertura de fendas). É também possível uma redução de deformação numa solução pré-esforçada.

No entanto, as vantagens de pré-esforçar os laminados, em comparação com uma solução sem pré-esforço, não se restringem ao funcionamento em serviço mas também abrangem o estado limite último na medida em que se torna possível mobilizar maiores extensões nos laminados o que resulta no aumento da capacidade resistente da solução. Consegue-se deste modo um melhor aproveitamento da elevada capacidade resistente deste material.

O modelo numérico conseguiu prever com satisfatória precisão o comportamento experimental das vigas de referência e reforçadas. Depois desta validação, o modelo foi utilizado para simular o comportamento de uma viga de BA contínua de 2 vãos simplesmente apoiada reforçada com CFRP. Estabeleceram-se comparações entre os casos com e sem pré-esforço. Este exemplo mostrou que o pré-esforço pode aumentar a capacidade de redistribuição de momentos da viga reforçada ao atrasar a formação da rótula plástica.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores manifestam os seus agradecimentos à empresa S&P por ter disponibilizado o equipamento, vindo da Suíça, e pelo fornecimento dos laminados e da resina. Agradecem ainda às empresas Degussa e Stap pela colaboração e à Secil Pre-Betão pela execução das vigas.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Wight, R. G., Green, M. F. and Erki, M-A., “Prestressed FRP sheets for poststrengthening reinforced concrete beams”, *Journal of composites for construction*, 5, 4, 2001, pp. 214-220.
- [2] Wight, R. G. and Erki, M-A., “Prestressed CFRP sheets for strengthening two-way slabs”, *International Conference Composites in Construction*, Cosenza, Italy, 2003, pp. 433-438.
- [3] El-Hacha, R., Wight, R. G. and Green, M. F., “Innovative System for Prestressing Fiber-Reinforced Polymer Sheets”, *ACI Structural Journal*, 100, 3, 2003, pp. 305-313.
- [4] Piyong, Y., Silva, P. F. and Nanni, A., “Flexural Strengthening of Concrete Slabs by a Three-stage Prestressing FRP System Enhanced with the Presence of GFRP Anchor Spikes”, *International Conference Composites in Construction*, Cosenza, Italy, 2003, pp. 239-244.
- [5] França, P., 2007, “Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Laminates”, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Dezembro.
- [6] S&P Clever Reinforcement Company Prestressing System.
- [7] França, P., Costa, A., Appleton, J, 2007, “Prestressed CFRP laminates for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams”, *Structural Concrete - Journal of the Fib*, V.8, No.4, pp. 175-185.
- [8] França, P., Costa, A., Appleton, J, 2004, “Reforço de estruturas com laminados de CFRP pré-esforçados”, *Encontro Nacional de Betão Estrutural*, FEUP, Porto.
- [9] Suter, R. and Jungo, D., “S&P Prestressing System FRP – Summary of Test Results”, Product Report, Brunnen, 2000.
- [10] ATENA 2D: Computer Program for Non-linear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures. Version 2.1.8.0. Cervenka Consulting, 2002.

- [11] ATENA Program Documentation. Cervenka Consulting, Prague, Czech Republic, 2002.
- [12] Eurocode 2, “Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Building”, December, 2004.
- [13] Fib - Bulletin 14, “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”, 2001.