

## **REFORÇO DE ESTRUTURAS COM LAMINADOS DE CFRP PRÉ-ESFORÇADOS**



**P. FRANÇA**  
Assistente  
IST / ICIST  
Lisboa



**A. COSTA**  
Prof. Auxiliar  
IST / ICIST  
Lisboa



**J. APPLETON**  
Prof. Catedrático  
IST / ICIST  
Lisboa

### **SUMÁRIO**

Apresenta-se uma solução de reforço à flexão com laminados de carbono (CFRP) pré-esforçados aplicados em vigas à escala real e ensaiadas em laboratório. Discutem-se os resultados obtidos e estabelece-se uma comparação com uma solução de reforço com o mesmo material mas sem pré-esforço.

### **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos tem-se assistido a uma evolução muito significativa na utilização e no conhecimento do comportamento da solução de reforço com laminados de CFRP colados em estruturas de betão armado. Trata-se de uma solução com muitas vantagens, embora apresente alguns inconvenientes dos quais se destaca o subaproveitamento das capacidades do material causado pela dificuldade na ligação do mesmo ao betão.

A possibilidade de pré-esforçar o CFRP surge como uma nova técnica de aplicação deste tipo de reforço, existindo já alguns estudos como [1], [2] e [3], que permite explorar de forma mais eficaz as suas capacidades resultando num mais vasto conjunto de vantagens. Para além de proporcionar uma recuperação da deformação e de reduzir a fendilhação da estrutura, possibilita um melhor aproveitamento do CFRP e constitui um reforço activo.

Com o objectivo de testar uma solução de reforço com CFRP pré-esforçado, foi realizada uma campanha de ensaios em vigas de secção T à escala real com diferentes características, tais como: diferentes percentagens de armaduras longitudinais; com e sem dano inicial e ancoragens antes e após os apoios. No entanto, como se trata de um trabalho ainda em curso,

no âmbito do doutoramento do 1º autor, apresentam-se unicamente os resultados de um tipo de viga, comparando-se o seu comportamento como o obtido no mesmo modelo de viga com um reforço de CFRP sem o recurso ao pré-esforço [4].

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Modelos para ensaio

O modelo de viga adoptado para ensaio dispõe de uma secção transversal T, com  $0,2 \times 0,5 \text{ m}^2$  de alma e  $1,0 \times 0,1 \text{ m}^2$  de banzo de compressão, e um vão de 6,0 m, Figura 1. A armadura longitudinal de tracção é composta por  $2\phi 20 + 2\phi 25$  (1,6%) e a de compressão por  $2\phi 10$ . Os estribos  $\phi 8//0,10$  proporcionam à viga uma capacidade resistente ao esforço transverso de forma a não constituir o modo de rotura condicionante.

Neste trabalho, a viga de referência é a viga em betão armado sem reforço que, ao comparar o seu comportamento com o das vigas reforçadas, possibilita a avaliação do benefício do reforço. Para atingir o objectivo proposto ensaiaram-se 4 vigas, duas das quais de referência. Estas, embora teoricamente iguais, como foram construídas em datas distintas, optou-se por comparar os resultados de cada viga reforçada com a respectiva viga de referência. Na Figura 1 representa-se a viga reforçada com CFRP pré-esforçado e na Figura 2 a viga reforçada com CFRP sem pré-esforço.

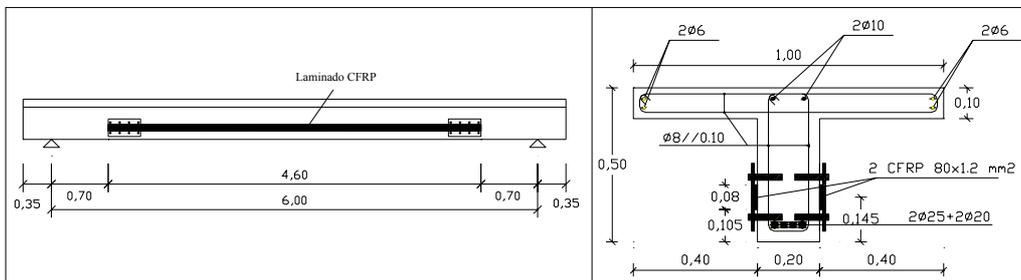


Figura 1: Viga reforçada com CFRP pré-esforçado

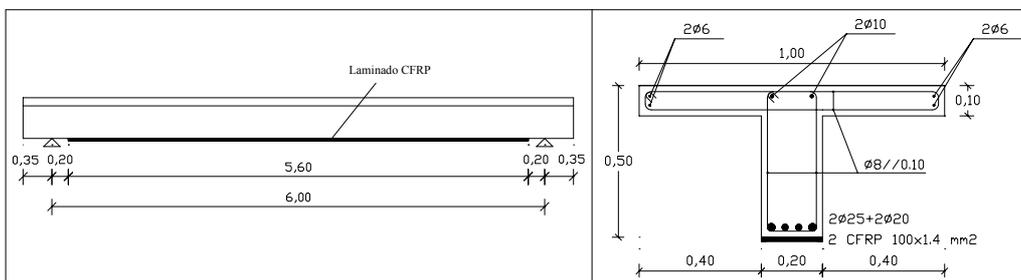


Figura 2: Viga reforçada com CFRP sem pré-esforço

## 2.2 Materiais

As vigas para testarem o comportamento da solução de reforço pré-esforçado foram feitas em betão com uma resistência média à compressão, verificada no dia de ensaio através de 3 provetes cúbicos, de 39,2 MPa. As armaduras registaram, em ensaios à tracção pura, tensões médias de cedência de 534,8 MPa nos varões  $\phi 25$  e de 485,8 MPa nos varões  $\phi 20$ , o que resulta numa tensão média nos varões à tracção de 515,7 MPa. O laminado é da S&P, do tipo CFK 150/2000, com um módulo de elasticidade 170,5 GPa e uma tensão de tracção última de 3 016 MPa o que corresponde a uma extensão última 17,7 %. Estas características foram determinadas a partir de ensaios à tracção pura de 4 amostras de laminado. A resina utilizada é designada por S&P Resin 220 e é caracterizada por um módulo de elasticidade de 8 GPa e uma resistência à tracção de 7 MPa.

As características dos materiais das vigas dos ensaios do reforço com CFRP sem pré-esforço são descritas detalhadamente em [4] pelo que aqui só são apresentadas algumas de forma resumida: betão com resistência à compressão de 33,7 MPa; armaduras com tensão de cedência de 580 MPa; laminados S&P tipo CFK 200/2000 com módulo de elasticidade de 208 GPa.

## 2.3 Instrumentação e procedimento de ensaio

O esquema de carga utilizado foi igual para todas as vigas ensaiadas e está representado na Figura 3. Como a estrutura de carregamento apoia directamente nas vigas de ensaio, por intermédio dos 2 pontos de carga, tornou-se necessário determinar o seu peso total. Após efectuada a pesagem de cada elemento constituinte, obteve-se um total aproximado a 10 kN. Como este valor não é desprezável, considerou-se como carregamento inicial o valor de 5 kN em cada ponto de carga. Os resultados apresentados da força aplicada às vigas durante os ensaios referem-se ao valor médio dos dois pontos de carga.

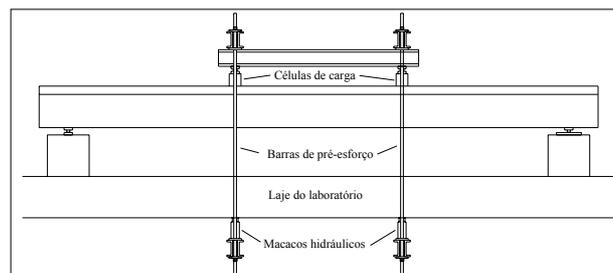


Figura 3: Esquema de carregamento utilizado nos ensaios

A instrumentação utilizada na viga reforçada com laminados pré-esforçados está indicada na Figura 4. Na viga reforçada com CFRP sem pré-esforço recorreu-se à mesma instrumentação descrita anteriormente, com a diferença no material de reforço onde se colaram 10 extensómetros com as seguintes distâncias, em metros, a contar do apoio: 0,5; 1,0; 1,5; 1,9; 2,0; 2,1; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0. As vigas de referência têm a mesma instrumentação à excepção da correspondente ao material de reforço.

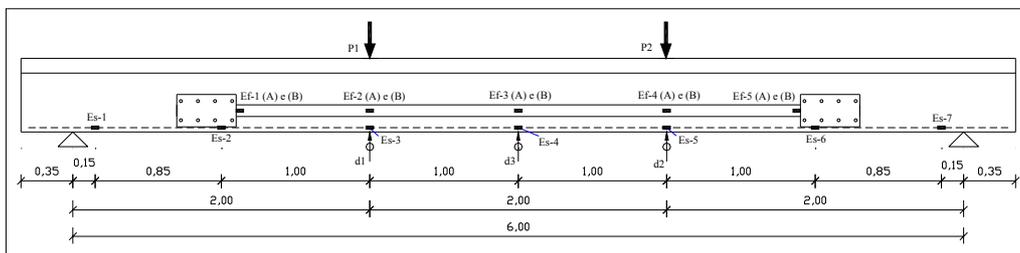


Figura 4: Instrumentação da viga reforçada com CFRP pré-esforçado

### 3. REFORÇO COM CFRP PRÉ-ESFORÇADO

O sistema de reforço com CFRP pré-esforçado utilizado nestas vigas foi originalmente concebido para lajes. Dispõe de duas chapas de ancoragem nas extremidades do laminado, com  $400 \times 220 \times 8 \text{ mm}^3$ , fixadas à estrutura por intermédio de 8 conectores. De modo a evitar que os furos destinados aos conectores intersectem as armaduras longitudinais da viga, não é possível colocar o laminado na face inferior da mesma, onde seria mais eficiente, obrigando à sua colocação nas faces laterais. No entanto, a perda de braço no momento resistente, causado pela colocação dos laminados nas faces laterais das vigas, é compensado pela utilização de dois laminados em contraste com a utilização de um único na face inferior. Com este posicionamento dos laminados surgiu a dúvida se os mesmos seriam capazes de acompanhar as curvaturas das vigas e de atingir extensões satisfatórias sem se descolarem prematuramente.

A forma de prender o CFRP durante a aplicação do pré-esforço constitui uma das principais dificuldades do reforço com laminados pré-esforçados. O presente sistema recorre a duas garras metálicas (Figura 6 e Figura 7) que, por atrito, garantem a fixação do laminado.

#### 3.1 Processo de aplicação

A aplicação deste sistema de reforço com CFRP pré-esforçado começa pelo tratamento da superfície de betão. Para o efeito, recorre-se a uma rectificadora com uma mó diamantada acoplada com o objectivo de remover a camada superficial do betão na zona do laminado e das correspondentes chapas de ancoragem.

Em seguida procede-se à furação para a colocação dos conectores, responsáveis pela fixação das chapas de ancoragem à estrutura de betão. Antes de se passar à fase de aplicação da resina, prepara-se todo o material e equipamento necessário porque, depois de feita a mistura dos dois componentes da resina, estima-se cerca de uma hora para o início da presa. A operação de montagem e aplicação do pré-esforço tem de ser realizada neste espaço de tempo. A resina é aplicada no laminado, nas chapas de ancoragem e na superfície de betão.

Coloca-se o laminado (Figura 5) e fixam-se as chapas de ancoragem sobre o mesmo nas suas extremidades. Em seguida, monta-se a garra metálica passiva (Figura 6) que faz reacção directamente sobre a correspondente chapa de ancoragem.



Figura 5: Colocação do laminado

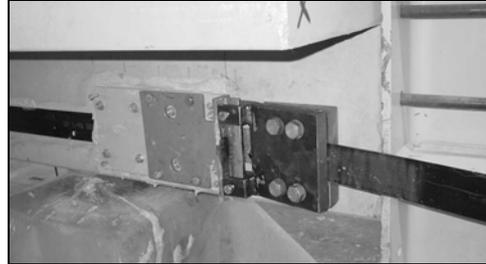


Figura 6: Garra metálica passiva montada

Passa-se à montagem da ancoragem activa onde o macaco hidráulico é fixado sobre a chapa metálica. O êmbolo do macaco hidráulico actua na garra metálica activa (Figura 7) e reage na chapa de ancoragem por intermédio de uma saliência que possui na sua base. Aplica-se o pré-esforço correspondente a uma extensão no laminado de 6‰ e desactiva-se o sistema após 24 horas. Este é o tempo suficiente para que a resina suporte o pré-esforço aplicado. O aspecto final do reforço numa das faces da viga é o apresentado na Figura 8.

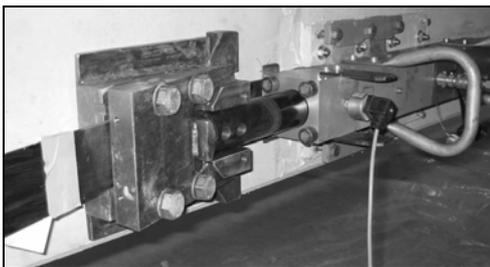


Figura 7: Garra metálica activa montada

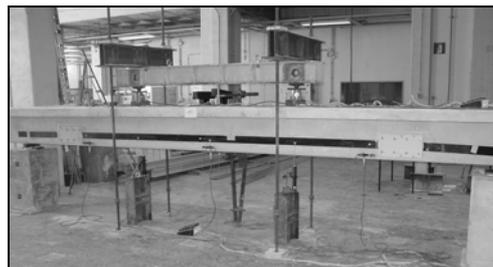


Figura 8: Viga reforçada

## 4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

### 4.1 Reforço com CFRP pré-esforçado

Pretendia-se aplicar um pré-esforço correspondente a uma extensão nos laminados de 6,0 ‰. Para controlar o valor aplicado colaram-se dois extensómetros em cada CFRP. Através das leituras dos mesmos, foi possível constatar que no final da aplicação do pré-esforço existe sempre uma perda de extensão no CFRP durante a fracção de segundo em que se deixa de bombar óleo e a válvula do êmbolo é fechada. Esta perda não é desprezável uma vez que pode atingir valores da ordem de grandeza de 1,0 ‰ tal como aconteceu no laminado B. Após a aplicação do pré-esforço, a extensão média final em cada laminado foi de 6,1 ‰ o que corresponde a uma tensão de 1 040 MPa e a uma força de 99,8 kN.

A viga de referência apresentou uma rotura dúctil, para uma força de 188,2 kN, com a cedência das armaduras longitudinais de tracção, tendo-se registado os seguintes valores máximos nos 3 extensómetros centrais colados nas armaduras:  $\epsilon_{s-3} = 8,1 \text{ ‰}$ ,  $\epsilon_{s-4} = 3,4 \text{ ‰}$  e  $\epsilon_{s-5} = 3,9 \text{ ‰}$ . Devido à elevada deformação plástica das armaduras, começou-se a observar fendas no banzo superior, pelo que se deu por terminado o ensaio de modo a evitar o esmagamento do betão superior.

A máxima força registada na viga reforçada foi de 253,1 kN o que corresponde a um aumento na capacidade resistente de 35 %. As curvas carga – deslocamento da viga reforçada (V1AS) e da viga de referência (V1AR) são apresentadas na Figura 9. É importante salientar que a força máxima na viga reforçada foi atingida no final de um típico patamar de cedência com alguma rigidez. Pode-se considerar que a viga apresentou uma rotura dúctil ao contrário do que é usual nas estruturas reforçadas com laminados. Nos três extensómetros centrais das armaduras registaram-se os seguintes valores máximos:  $\epsilon_{s-3} = 10,2\%$ ,  $\epsilon_{s-4} = 4,7\%$  e  $\epsilon_{s-5} = 12,8\%$ .

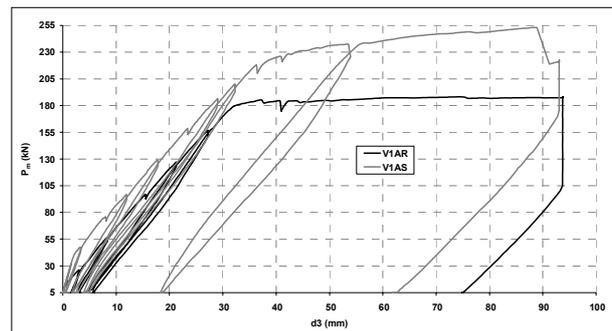


Figura 9: Comparação das curvas força - deslocamento das vigas V1AR e V1AS

O melhor comportamento em relação à fendilhação, não só no seu retardamento mas também no menor valor de abertura de fendas, e a melhor capacidade de recuperação do dano nas estruturas pré-esforçadas é evidente neste caso. Na solução reforçada o início da fendilhação verificou-se para uma carga aproximada de 45 kN, um valor três vezes superior quando comparado com o da viga de referência que foi próximo dos 15 kN. Na tentativa de comparar a espessura de fendas nas duas vigas, fez-se a média dos valores correspondentes a 3 fendas ( $w_m$ ), localizadas sob as vigas e a meio vão, e obtiveram-se os seguintes resultados: registou-se  $w_m = 0,03$  mm para  $P_m = 25$  kN na viga de referência e  $P_m = 47$  kN na reforçada; para  $P_m = 120$  kN registou-se  $w_m = 0,20$  mm na viga de referência e  $w_m = 0,13$  mm na reforçada. Além disso, a recuperação do dano na viga reforçada foi sempre melhor pois a flecha residual obtida, após uma descarga de uma força igual, foi sempre inferior.

No momento da rotura, o laminado A manteve-se em tensão, preso unicamente pelas chapas de ancoragem (Figura 10), enquanto que o B escorregou na chapa de ancoragem do lado do extensómetro 1 (Figura 11). Após a rotura, as extensões eram, no laminado B, negativas e da ordem de grandeza das aplicadas durante o pré-esforço, e positivas no A.

Os extensómetros dos laminados que registaram os maiores valores foram os localizados a meio vão. Na face A obteve-se  $\epsilon_{f-3} = 7,2\%$  e na face B  $\epsilon_{f-3} = 5,9\%$ . Os três extensómetros centrais foram os mais solicitados, como seria de esperar, com uma média de  $\epsilon_f = 6,3\%$  na face A e  $\epsilon_f = 5,3\%$  na face B. Os extensómetros colados junto às chapas de ancoragem só registaram elevadas extensões muito próximo da carga de rotura. Este aspecto é indicador de que as chapas só são solicitadas muito próximo da rotura, ou seja, não têm muita influência no comportamento do laminado em termos de ligação ao betão. De qualquer forma, desempenham um papel positivo no momento da rotura ao impedirem o desprendimento total do laminado.

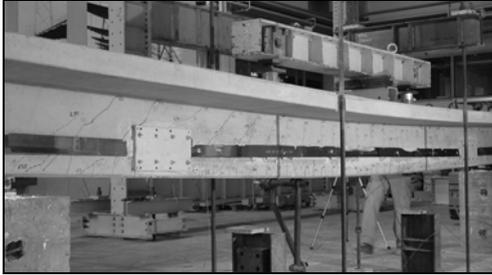


Figura 10: Rotura do laminado A

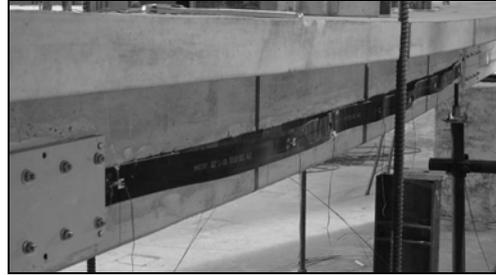


Figura 11: Rotura do laminado B

Somando as extensões máximas obtidas no ensaio com as aplicadas durante a fase do pré-esforço, obtém-se um total de  $\epsilon_{f,3} = 13,3 \text{ ‰}$  na face A e  $\epsilon_{f,3} = 12,0 \text{ ‰}$  na face B que correspondem a tensões de 2 268 MPa e 2 046 MPa respectivamente.

#### 4.2 Reforço com CFRP sem pré-esforço

Os resultados dos ensaios para testarem o comportamento deste reforço estão descritos detalhadamente em [4] pelo que aqui só são apresentados alguns mais relevantes.

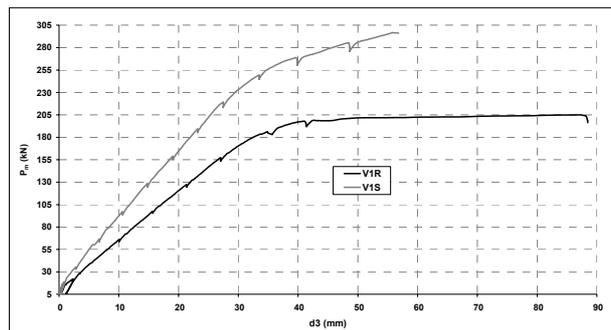


Figura 12: Comparação das curvas força - deslocamento das vigas V1R e V1S

A viga de referência apresentou uma rotura dúctil, para uma força de 205,1 kN, com a cedência das armaduras longitudinais de tracção. A viga reforçada apresentou uma rotura frágil para um valor máximo de carga de 296,7 kN que corresponde a um incremento de 45 % na capacidade resistente. A extensão máxima registada no laminado foi de  $\epsilon_f = 7,4 \text{ ‰}$ . Na Figura 12 são comparadas as curvas carga – deslocamento da viga de referência (V1R) e da viga reforçada (V1S). O início da fendilhação deu-se para um valor de carga aproximado em ambas as vigas.

#### 4.3 Comparação entre as duas soluções de reforço

Na verdade estas duas soluções não podem ser directamente comparadas porque, embora sejam aplicadas em vigas de betão armado teoricamente iguais, têm diferenças importantes no que se refere ao material de reforço e sua localização na estrutura. Mesmo assim é possível estabelecer uma comparação qualitativa em relação ao comportamento das duas soluções.

Na solução de reforço com pré-esforço (PE) mobilizaram-se extensões máximas nos laminados entre 12,0‰ e 13,3 ‰, bastante superiores aos 7,4 ‰ obtidos na solução de reforço sem PE. No entanto, o aumento da capacidade resistente na solução sem PE foi superior ao da solução com PE. Isso só foi possível devido a 3 importantes factores bastante mais favoráveis no material de reforço na solução sem PE: a área é superior em 46 %, o módulo de elasticidade é superior em 22 % e a altura útil é superior em 41 %. Mesmo assim só foi possível uma diferença de 10% no valor da carga máxima entre as duas soluções. Constate-se que, dos factores enumerados, só a altura útil não é possível alterar nesta solução com PE.

## 5. CONCLUSÕES

Em soluções de reforço com laminados pré-esforçados é possível mobilizar extensões nos mesmos de, no mínimo, 12 ‰, tendo-se no presente estudo verificado um caso de 13,3‰. Consegue-se assim um melhor aproveitamento das elevadas capacidades resistentes deste material, além de proporcionar um comportamento mais dúctil à estrutura reforçada. Por outro lado, trata-se de um reforço activo com todas as vantagens conferidas por qualquer solução com recurso a pré-esforço, nomeadamente melhor comportamento na fendilhação e possibilidade de recuperação de flechas / danos da estrutura.

Embora na solução com pré-esforço apresentada se tenha atingido um aumento de 35% na capacidade resistente da viga, refira-se que em vigas com menor armadura longitudinal esse aumento é muito superior.

O receio inicial do CFRP não ser capaz de acompanhar a curvatura da viga não se confirmou, pelo menos antes de se obterem extensões satisfatórias. De qualquer forma, está em desenvolvimento o estudo de uma solução própria para reforçar vigas com CFRP pré-esforçado de modo a ser possível a sua colocação na face inferior onde será mais eficiente.

## 6. 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 PreBetão pela execução das vigas.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Wight, R.G. *et al.* – “Prestressed FRP sheets for poststrengthening reinforced concrete beams”, *Journal of composites for construction*, November, 2001, p. 214-220.
- [2] Wight, G *et al.* – “Prestressed CFRP sheets for strengthening two-way slabs”, *Composites in construction*, 2003, p. 433-438.
- [3] El-Hacha, R. *et al.* – “Innovative systems for prestressing fiber-reinforced polymer sheets”, *ACI Structural Journal*, May-November, 2003, p. 305-313.
- [4] Ripper, T. *et al.* – “Evaluation of the performance of anchoring systems for the external flexural strengthening of RC beams”, *Composites in construction*, 2003, p. 453-458.