

Comportamento à Rotura de Vigas de Betão de Alta Resistência Reforçadas com CFRP

C. Fernandes¹ P. Fernandes² P. Silva³
D. Dias-da-Costa⁴ J. Sena-Cruz³ E. Júlio⁵

RESUMO

O presente artigo encontra-se inserido num projeto que visa caracterizar o comportamento de vigas de Betão de Alta Resistência (HSC) reforçadas com laminados de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Para o efeito, foi definido um programa experimental que compreende o reforço de uma viga fabricada em HSC e o seu ensaio em flexão até à rotura. A realização de um estudo numérico prévio permitiu concluir que a aplicação de pré-esforço aos laminados de CFRP aumentaria de forma considerável a eficiência do reforço. Sendo assim a viga pré-esforçada de grande vão (20 m), fabricada com um betão de resistência à compressão de 120 MPa e de secção transversal em I (com altura de 0.5 m e largura de 0.30 m) foi reforçada com laminados de CFRP pré-esforçados. A operação de reforço das vigas foi precedida do carregamento das mesmas com uma carga correspondente a uma combinação quase permanente de ações, mantida constante durante a operação de reforço, de forma a simular o reforço de elementos estruturais em aplicações correntes de engenharia civil. Após reforço, a viga foi ensaiada até à rotura por flexão. Os resultados deste estudo foram comparados com os obtidos em ensaios à rotura de duas vigas de HSC não reforçadas com as mesmas dimensões e condições de ensaio, apresentando-se as principais conclusões.

Palavras-chave: Betão de alta resistência, CFRP pré-esforçados, Reforço à flexão

1. INTRODUÇÃO

A utilização de compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) para reforço de elementos de betão armado deu os primeiros passos no final dos anos 1980. Desde então, tem vindo a ser realizados diversos trabalhos de investigação com vigas de betão de moderada resistência, com tensões de rotura à compressão que raramente ultrapassam os 50 MPa, reforçadas com estes compósitos. A partir dos resultados obtidos têm sido desenvolvidas *guidelines* de dimensionamento e pormenorização para este tipo de betões. No entanto, com a utilização crescente de HSC afigura-se necessário, a médio prazo, proceder ao eventual reforço de elementos estruturais fabricados com estes betões e, consequentemente, justifica-se a caracterização do comportamento destes elementos após reforço.

¹ ICIST, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal. cfernandes@uc.pt

² ICIST, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria, Portugal. paulo.fernandes@ipleiria.pt

³ ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. patricia.silva@civil.uminho.pt; jsena@civil.uminho.pt

⁴ INESC Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal. dias-da-costa@dec.uc.pt

⁵ ICIST, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. ejulio@civil.ist.utl.pt

Fernandes [1, 2] realizou um estudo para aferir a viabilidade de elementos estruturais (vigas) pré-esforçados de longo vão pré-fabricados em betão de alta resistência. Foram fabricadas quatro vigas, à escala $\frac{1}{2}$, com um vão de 20 m e secção em I (Fig. 1), com 0.5 m de altura e 0.3 m de largura, das quais duas foram ensaiadas à rotura por flexão, enquanto as restantes duas foram carregadas para estudo do comportamento diferido [1, 3, 4]. As propriedades mecânicas do HSC desenvolvido permitiram a pré-fabricação de vigas com uma elevada esbelteza, que exibiram grande capacidade de deformação.

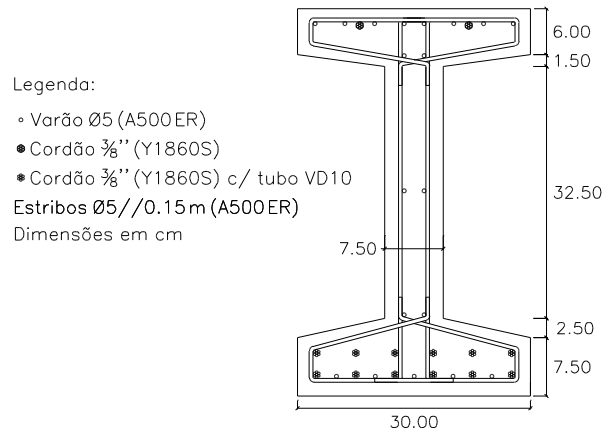


Figura 1 – Secção transversal da viga não-reforçada [1, 2].

A aplicação da técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) no reforço de elementos de betão armado pode não explorar eficazmente as propriedades resistentes do CFRP, devido à ocorrência de fenómenos de rotura prematuros (*debonding* do material de reforço). Em vigas reforçadas com CFRP ensaiadas à flexão, este tipo de fenómeno ocorre essencialmente nas extremidades do CFRP (*end debonding*), devido a elevadas tensões de corte, mas também na zona onde existem fissuras características de flexão (*intermediate crack debonding*). Para evitar a ocorrência do fenómeno de *end debonding*, são habitualmente utilizados mecanismos que permitem ancorar o CFRP nas suas extremidades. De forma a rentabilizar a elevada capacidade resistente dos CFRP, estes podem ser pré-esforçados [5-9], o que tenderá igualmente a minimizar a ocorrência do fenómeno *intermediate crack debonding*, uma vez que dificulta a abertura das fissuras.

O estudo experimental aqui descrito, teve por objetivo a caracterização do comportamento até à rotura por flexão de uma das vigas mencionadas, após ter estado sujeita a ensaio de comportamento diferido [1, 3, 4]. Deste modo, simula-se o reforço estrutural de um elemento após este ter estado sujeito a cargas de utilização.

2. PROJETO DO REFORÇO

Neste capítulo é detalhado: i) o estudo numérico preliminar, realizado com o objetivo de dimensionar o sistema de reforço; e ii) a conceção da solução de reforço da viga com laminados de CFRP.

2.1 Estudo preliminar

Com o objetivo de dimensionar um sistema de reforço eficaz para aumentar a capacidade de carga das vigas, Silva [10] utilizou o *software* DOCROS [11] para executar simulações numéricas ao nível da secção de meio-vão, considerando o comportamento não-linear do material. O intuito das primeiras simulações consistiu em avaliar a influência da área e do módulo de elasticidade do laminado de CFRP, bem como do nível de pré-esforço aplicado ao mesmo, na resposta da secção.

O modelo utilizado para simular o comportamento à compressão do betão tem por base o diagrama tensão-extensão proposto pelo MC90 [12]. O comportamento à tração do betão foi assumido linear elástico até se atingir a tensão de rotura do betão à tração (f_{ctm}), seguido de um ramo de amolecimento (*tension softening*). O comportamento do aço das armaduras ordinárias e de pré-esforço é representado por um diagrama bi-linear, obtido de acordo com os valores experimentais [1]. A lei constitutiva do CFRP é assumida linear elástica, limitando-se a extensão máxima de acordo com o modo de rotura condicionante. Neste caso, assumiu-se o modo de rotura *intermediate debonding*, por estar prevista a colocação de chapas de ancoragem para evitar o *end debonding*. Neste contexto, de acordo com a norma italiana CNR-DT 200/2004 [13], este modo de rotura prematuro é considerado, reduzindo o valor da extensão máxima que se pode verificar no CFRP.

No Quadro 1 são apresentados os resultados das simulações efetuadas para o reforço de vigas com laminados de CFRP não pré-esforçados, onde b_f , t_f e E_f representam a largura, a espessura e o módulo de elasticidade do laminado de CFRP, respetivamente. Analisando o Quadro 1 verifica-se que: i) o aumento do módulo de elasticidade do CFRP implica um ligeiro aumento da capacidade de carga, para as mesmas dimensões; e ii) o aumento da área do laminado é o modo mais eficaz para atingir maior capacidade de carga. Assim, devido à reduzida influência do módulo de elasticidade do laminado, optou-se pelo de 165 GPa para a segunda fase de simulações numéricas, com aplicação de pré-esforço ao CFRP.

Quadro 1. Momento máximo da viga reforçada com laminados não pré-esforçados [10].

Designação da secção	b_f [mm]	t_f [mm]	E_f [GPa]	M_{max} [kN·m]	Aumento da capacidade de carga [%]
Referência	-	-	-	578.5	-
E165_1.4x120	120	1.4	165	672.0	18.1
E210_1.4x120	120	1.4	210	683.2	20.1
E300_1.4x120	120	1.4	300	678.5	19.2
E165_1.2x150	150	1.2	165	684.6	20.3
E165_1.4x200	200	1.4	165	731.0	28.5
E210_1.4x200	200	1.4	210	748.6	31.6
E165_1.4x240	240	1.4	165	764.9	34.4
E210_1.4x240	240	1.4	210	785.2	38.0

No Quadro 2 apresentam-se os resultados na hipótese de aplicação de pré-esforço no CFRP. No entanto, uma vez que o sistema de pré-esforço comercial adotado apenas permite a sua aplicação a laminados com largura máxima de 100 mm, apenas se analisam os laminados compatíveis com esta hipótese. Para estes, é mantida constante a área de CFRP e o módulo de elasticidade do mesmo, de forma a verificar qual a influência de diferentes níveis de pré-esforço, onde ε_f representa a extensão de pré-esforço do laminado de CFRP.

Quadro 2. Momento máximo da viga reforçada com diferentes níveis de pré-esforço nos laminados [10].

Designação da secção	b_f [mm]	t_f [mm]	E_f [GPa]	ε_f [‰]	M_{max} [kN·m]	Aumento da capacidade de carga [%]
Referência	-	-	-	-	578.5	-
E165_1.4x200_PE3	200	1.4	165	3.0	793.0	39.4
E165_1.4x200_PE4	200	1.4	165	4.0	814.1	43.1
E165_1.4x200_PE6	200	1.4	165	6.0	855.9	50.4
E165_1.4x200_PE8	200	1.4	165	8.0	886.6	56.1

Da análise do Quadro 2 pode verificar-se que o aumento da capacidade de carga é, para estas situações, muito superior à situação de laminados não pré-esforçados, para a mesma área e módulo de elasticidade do CFRP. Existe uma vantagem adicional com a utilização de pré-esforço, relacionada

com o facto de se aumentar a carga de fendilhação. Por este motivo, como se dispunha de duas vigas (provenientes de ensaio de caracterização do comportamento diferido [1, 3, 4]) optou-se por se reforçar, numa primeira fase, apenas uma delas (Viga 3), utilizando dois laminados de CFRP com largura de 100 mm de 1.4 mm de espessura, com módulo de elasticidade de 165 GPa, aplicando uma extensão inicial de 4%.

Para garantir uma adequada ancoragem nas extremidades dos laminados de CFRP, bem como a fixação do sistema de aplicação de pré-esforço, tornou-se necessário alargar a secção das vigas nestas zonas (§2.2). Simultaneamente, foi igualmente efetuada uma verificação da resistência ao esforço transversal, de forma a garantir que o aumento de capacidade de carga à flexão não provocava rotura por esforço transversal.

2.2 Conceção do reforço

Como referido em §2.1, houve necessidade de aumentar a secção da viga a reforçar na zona dos apoios (Figs 2 e 3), de modo a fixar, com parafusos embebidos no betão, as chapas de ancoragem definitivas e as peças que compõem o sistema de pré-esforço. Para o efeito foi utilizada uma mistura composta por uma resina epóxida de alta resistência (Sika® Icosit® KC220N). Na Fig. 2 é também apresentado um corte transversal da secção de meio-vão da viga reforçada. Na Fig. 3 encontra-se ilustrada a disposição das ancoragens dos laminados de CFRP.

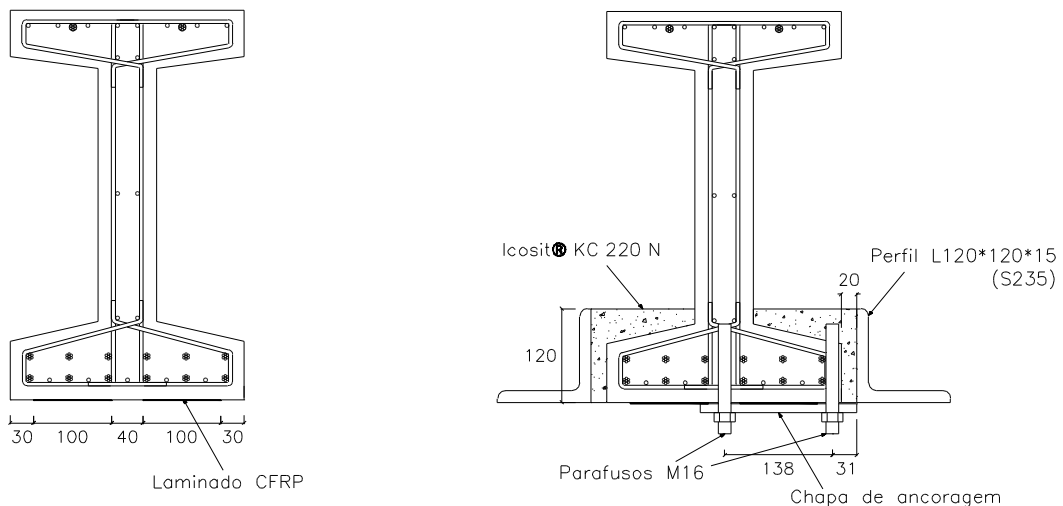


Figura 2 – Secção transversal a meio-vão (esq.) e junto aos apoios (dir.) das vigas reforçadas (dimensões em mm) [14].

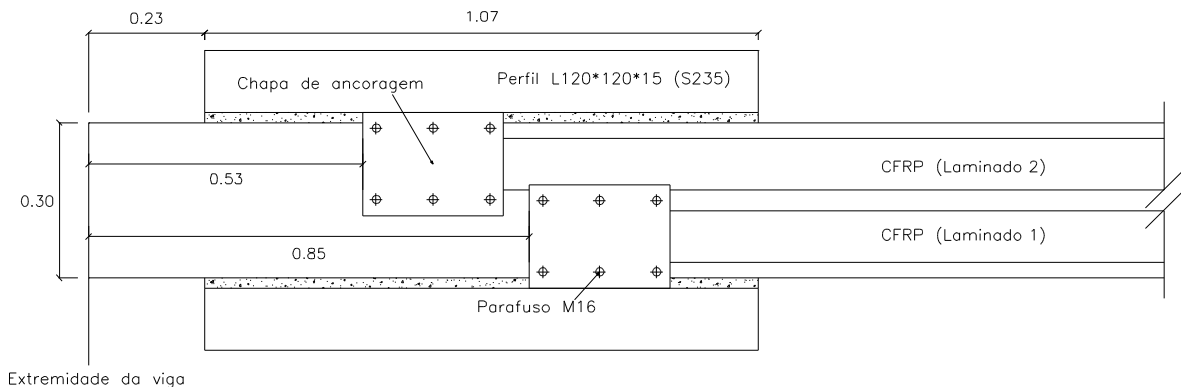


Figura 3 – Vista inferior da zona de ancoragem dos laminados de CFRP (dimensões em m).

Na Fig. 4 está representado o esquema estrutural do ensaio à rotura por flexão da viga reforçada com laminados de CFRP pré-esforçados. O esquema corresponde a uma viga simplesmente apoiada carregada em dois pontos, de forma a criar um troço central com flexão pura. O esquema utilizado para esta viga é exatamente igual ao utilizado em [1, 2].

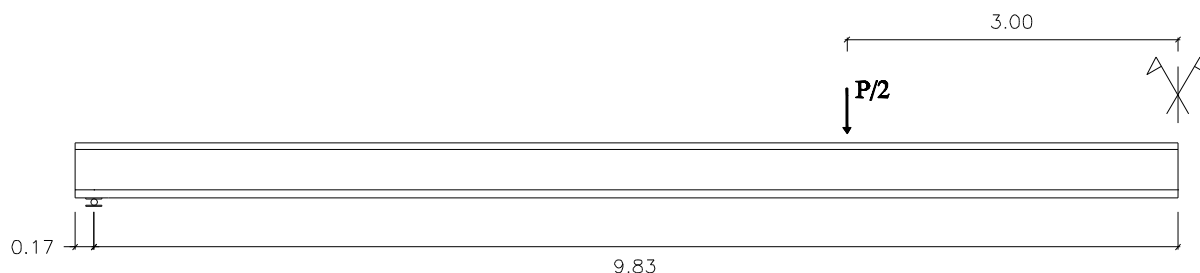


Figura 4 – Esquema estrutural do ensaio à rotura da viga reforçada (dimensões em m).

3. REFORÇO DA VIGA

Nesta secção são apresentadas: i) as principais propriedades mecânicas dos materiais utilizados durante o trabalho; e ii) a aplicação do sistema de reforço dimensionado.

3.1 Caracterização dos materiais

As propriedades mecânicas respetivamente do HSC e das armaduras ordinárias e de pré-esforço encontram-se detalhadas nos Quadros 3 e 4 [1].

Quadro 3. Propriedades do betão de alta resistência utilizado [1].

<i>Material</i>	<i>Peso volúmico</i> [kN/m ³]	<i>Resistência à</i> <i>compressão</i> [MPa]	<i>Módulo de</i> <i>elasticidade</i> [GPa]	<i>Resistência à</i> <i>tração</i> [MPa]
Betão (28 dias)	26.2	124.9	60.1	5.5

Quadro 4. Propriedades dos aço das armaduras ordinárias e de pré-esforço [1].

<i>Material</i>	<i>Tensão de</i> <i>cedência</i> [MPa]	<i>Tensão de</i> <i>rotura</i> [MPa]	<i>Módulo de</i> <i>elasticidade</i> [GPa]	<i>Extensão de</i> <i>rotura</i> [%]
A500ER (ϕ 5)	604	646	200	115
Y1860S ($\frac{3}{8}$ "')	1944	2043	196.9	57.9

Os laminados unidireccionais S&P[®] CFK150/2000, com largura 100 mm e espessura 1.4 mm, utilizados para reforço apresentam as propriedades indicadas no Quadro 5. No Quadro 6 indicam-se as propriedades da resina epóxida S&P[®] Resin 220, usada para colagem do laminado.

Quadro 5. Propriedades do laminado de CFRP utilizado (valores do fabricante).

<i>Material</i>	<i>Módulo de</i> <i>elasticidade</i> [GPa]	<i>Resistência à</i> <i>tração</i> [MPa]
S&P [®] CFK 150/2000	165	>2000

Quadro 6. Propriedades do adesivo epóxi utilizado (valores do fabricante).

<i>Material</i>	<i>Resistência à</i> <i>compressão</i> [MPa]	<i>Resistência à</i> <i>tração</i> [MPa]	<i>Tensão de aderência</i> [MPa]
S&P [®] Resin 220	>90	> 30	> 3.0 (ao S&P [®] CFK)

3.2 Aplicação do sistema de reforço

O tratamento da face inferior da viga a reforçar foi efetuado com esmeril (Fig. 5a), de forma a desgastar a camada superficial, garantindo assim uma boa colagem do adesivo ao betão. Na zona de aumento da secção, a superfície de betão em contacto com o novo material foi tratada com martelo de agulhas para proporcionar boa aderência entre os dois materiais (Fig. 5b). Em ambos os tratamentos limpou-se a superfície resultante com ar comprimido, removendo possíveis partículas soltas.



Figura 5 – Tratamento da secção de betão.

Após a execução do aumento da secção foram efetuados furos, na zona de ancoragem dos laminados de CFRP, na face inferior da viga (Fig. 3). Estes têm como objetivo permitir a ancoragem dos laminados e a fixação das peças que compõem o sistema de aplicação de pré-esforço. A ancoragem dos parafusos ao betão foi conseguida com uma resina epóxida (Hilti® HIT-HY 150 MAX).

Devido ao facto da viga possuir contra-flecha, houve necessidade de a pré-carregar antes da aplicação do material de reforço. Para determinar o valor da carga a aplicar, foi considerada a utilização desta numa ponte (situação para a qual foi projectada). Para uma combinação quase permanente de ações, determinou-se que o valor da carga antes da operação de reforço seria 40 kN. Após a aplicação dessa carga, a viga foi devidamente ancorada para evitar a recuperação da deformação imposta (Fig. 6).



Figura 6 – Pré-carregamento e travamento da viga antes da operação de reforço.

Como a extensão aplicada com o pré-esforço aos laminados de CFRP não é muito elevada, optou-se por usar uma ancoragem ativa e outra passiva. Após a aplicação do adesivo ao laminado de CFRP (Fig. 7b), previamente limpo com acetona (Fig. 7a), foi efetuada a colagem do laminado à superfície de betão (Fig. 7c). De seguida foi montada a ancoragem passiva (Fig. 7d) e a ancoragem ativa (Fig. 7e) e, por fim, foi aplicado o pré-esforço ao CFRP (Fig. 7f), por meio de um cilindro hidráulico montado na ancoragem ativa (Fig. 7e).



Figura 7 – Procedimento de aplicação do sistema de reforço.

4. ENSAIO À ROTURA

Nesta secção é detalhado o sistema de ensaio (esquema estrutural e instrumentação utilizada), bem como os resultados do ensaio e a correspondente discussão.

4.1 Sistema de ensaio

O carregamento da viga foi efetuado utilizando um atuador Servosis[®] de 1000 kN e 300 mm de curso, colocado num pórtico de carregamento e ligado a uma viga de carregamento, de grande inércia, para distribuir a carga em dois pontos (Fig. 6). O ensaio foi realizado com controlo de deslocamento, a uma velocidade constante de 0.25 mm/s.

A monitorização do ensaio foi efetuada de acordo com as secções definidas na Fig. 8. As armaduras ordinárias longitudinais das secções S2, S4, S5, S7 e S8 foram instrumentadas com extensómetros resistivos TML FLK 6-11 (120 Ω). As secções S6, S7 e S8 foram instrumentadas com LVDT's para medição do deslocamento vertical na face superior da viga. A extensão do laminado de CFRP foi monitorizada a partir dos valores registados pelos extensómetros TML FLK 6-11 (120 Ω) colados nas secções S2, S3, S6 e S8.

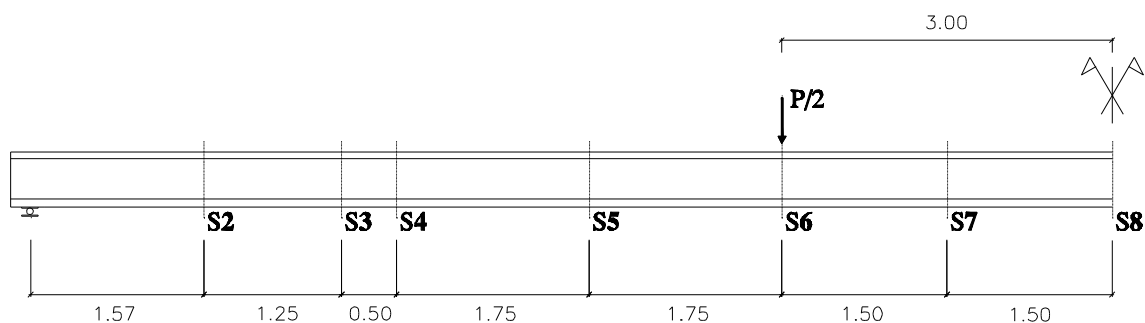


Figura 8 – Secções instrumentadas para monitorização da viga (dimensões em m).

4.2 Resultados e discussão

Nas Figs 9a e 9b são apresentadas as comparações entre as curvas carga/deslocamento e momento/curvatura, respetivamente, obtidas para a secção de meio-vão (S8) nos ensaios à rotura das vigas de referência [1] (Viga 1 e Viga 2) e da viga reforçada com laminados de CFRP pré-esforçados (Viga 3).

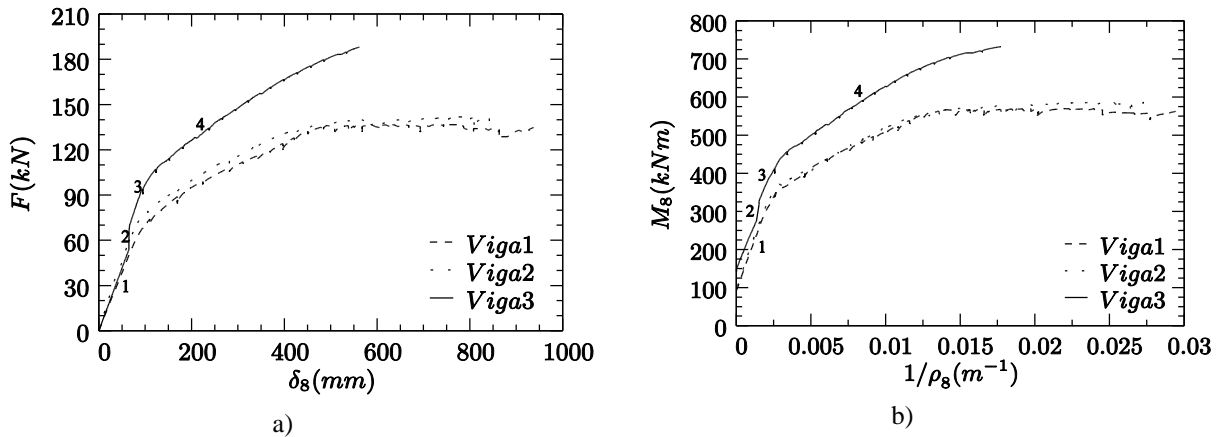


Figura 9 – Comparação das curvas carga/deslocamento (a) e momento/curvatura (b) na secção de meio-vão (S8) das vigas, durante o ensaio à rotura.

As duas curvas ($F-\delta$ e $M-1/\rho$) apresentadas na Fig. 9, correspondentes à viga reforçada, possuem características particulares. O troço 1 das mesmas corresponde à fase de pré-carregamento da Viga 3 antes da operação de reforço, de forma a eliminar a contra-flecha. O troço 2 das curvas da Viga 3 é vertical, uma vez que corresponde à aplicação do pré-esforço aos laminados de CFRP. Nesta fase, há um aumento da carga aplicada, sem variação de deslocamento devido à ancoragem da viga. Os troços 3 e 4 das duas curvas representam o carregamento da viga reforçada até se atingir a rotura.

Deve realçar-se o facto de, no troço 3 (fase elástica do ensaio à rotura), ser observável um aumento de rigidez da viga reforçada, em relação à fase elástica da viga não-reforçada. Este aumento de rigidez pode ser explicado pelo facto da aplicação de pré-esforço aos laminados de CFRP fazer com que eventuais fissuras pré-existent, induzidas pelo ensaio de comportamento diferido, fechem.

Como pode ser observado na Fig. 9a, a carga de rotura da Viga 3 é bastante superior à obtida para as vigas não-reforçadas, devendo constatar-se também uma redução clara do deslocamento vertical da secção de meio-vão da viga reforçada. A carga de rotura ($F_{rot}=188$ kN) aumentou cerca de 32%, enquanto o deslocamento da secção de meio-vão ($\delta_8=560$ mm) reduziu aproximadamente 37%, em relação aos valores de referência para as vigas não-reforçadas [1, 2]. Deve referir-se que, segundo os resultados das simulações numéricas apresentados em §2., seria expectável registar um aumento da carga de rotura superior ao verificado no ensaio realizado. Concluiu-se que estas diferenças se devem ao facto de no modelo numérico se ter verificado uma rotura prematura, *intermediate crack debonding*, enquanto no ensaio experimental se observou uma rotura por esmagamento do betão.

Durante a fase elástica, a rigidez da viga reforçada foi ligeiramente aumentada, tendo igualmente aumentado a carga de fendilhação ($F_{fend}=105$ kN), cerca de 50% em relação às vigas não-reforçadas. Na Fig. 9b pode também denotar-se uma redução significativa da curvatura máxima da viga reforçada, cerca de 37%. Esta redução de curvatura é devida à presença do material de reforço, nomeadamente do pré-esforço aplicado.

Tal como verificado para as vigas de referência, a rotura das vigas reforçadas deveu-se à ocorrência de esmagamento do betão nas fibras superiores da secção. Deve referir-se que o modo de rotura da viga

ensaiada não permitiu usufruir totalmente das propriedades resistentes do CFRP, visto que se atingiu uma extensão máxima da ordem dos 9%. No final do ensaio foi observada uma fissura significativa na ligação entre o banzo superior e a alma (Fig. 10), bem como diversas fissuras no banzo superior devidas à descompressão da secção.



Figura 10 – Aspeto da zona de rotura no final do ensaio.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento do reforço com laminados de CFRP pré-esforçados de uma viga de longo vão (20 m) pré-fabricada em betão de alta resistência pré-esforçado submetida a ensaio à rotura por flexão. Deste estudo podem ser tiradas as seguintes conclusões principais:

- a viga reforçada com laminados de CFRP pré-esforçados atingiu um aumento significativo da carga de rotura (32%), comparativamente às vigas não-reforçadas, bem como um ligeiro aumento de rigidez devido ao fecho de eventuais fissuras pré-existentes;
- o reforço da viga fez com que a sua capacidade de deformação e a curvatura das secções fosse inferior ao observado nas vigas não-reforçadas;
- a aplicação do pré-esforço aos laminados de CFRP conduziu a um aumento significativo da carga de fendilhação (50%);
- o aproveitamento do CFRP foi considerável, quando comparado com as simulações passivas (sem pré-esforço), uma vez que se atingiu, na rotura, uma extensão de cerca de 9%;
- foi verificado um desajuste dos resultados das simulações numéricas em relação aos ensaios experimentais, o qual se deve ao facto do modo de rotura considerado nas modelações não corresponder ao verificado durante o ensaio.

De forma a dar continuidade a este trabalho será ainda reforçada, sem pré-esforço aplicado aos laminados de CFRP, uma segunda viga, com iguais características, para posterior ensaio à rotura por flexão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), no âmbito do projeto PTDC/ECM/098497/2008 “Intelligent Super Skin – Enhanced Durability for Concrete Members”. e às empresas S&P Clever Reinforcement Ibérica, pelo fornecimento dos materiais de reforço, VSL pelo sistema de aplicação de pré-esforço, Hilti, pelo fornecimento de buchas químicas e SIKA, pelo fornecimento da resina epóxida de alta resistência.

REFERÊNCIAS

- [1] Fernandes, P. (2007). Vigas de Grande Vão Prefabricadas em Betão de Alta Resistência Pré-Esforçado - Viabilidade, Dimensionamento, Fabrico e Comportamento. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Tese de Doutoramento.
- [2] Fernandes, P.; Júlio, E. e Tiago, P. (2006). Comportamento Estrutural de Vigas de Grande Vão em Betão de Alta Resistência Pré-Esforçado. *IV Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Lisboa.
- [3] Fernandes, C. (2009). Caracterização experimental da recuperação de fluência de vigas de grande vão pré-fabricadas em betão de alta resistência pré-esforçado. ISISE.
- [4] Fernandes, P.; Júlio, E. e Tiago, P. (2010). Comportamento Diferido de Vigas de Grande Vão Prefabricadas em Betão de Alta Resistência Pré-Esforçado. *BE2010 – Encontro Nacional de Betão Estrutural 2010*, Lisboa.
- [5] Woo, S.K.; Nam, J.W.; Kim, J.H.J.; Han, S.H. e Byun, K.J. (2008). Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design. *Engineering Structures*, Vol. 30, N. 12, pp. 3751-3763.
- [6] Czaderski, C. e Motavalli, M. (2007). 40-Year-old full-scale concrete bridge girder strengthened with prestressed CFRP plates anchored using gradient method. *Composites: Part B*, Vol. 38, N. 7-8, pp. 878-886.
- [7] Garden, H. e Hollaway, L. (1998). An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. *Composites: Part B*, Vol. 29, N. 4, pp. 411-424.
- [8] Quantrill, R.J. e Hollaway, L.C. (1998). The flexural rehabilitation of reinforced concrete beams by the use of prestressed advanced composite plates. *Composites Science and Technology*, Vol. 58, N. 8, pp. 1259-1275.
- [9] França, P.; Costa, A. e Appleton, J. (2007). Prestressed CFRP Laminates for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams. *Structural Concrete – Journal of FIB*, Vol. 8, N. 4, pp. 175-185.
- [10] Silva, P. (2011). Estudo numérico e experimental de vigas de grande vão pré-fabricadas com betão de alta resistência pré-esforçado e reforçadas com FRP's. Universidade do Minho, Tese de Mestrado.
- [11] Barros, J.A.O. e Fortes, A.S. (2005). Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, N. 4, pp. 471-480.
- [12] CEB/FIP (1990). Model Code 90. Comité Euro-International du Béton.
- [13] CNR (2004). Instructions for design, execution and control of strengthening interventions by means of fibre-reinforced composites. Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).
- [14] Fernandes, C. (2011). Comportamento de Vigas de Longo Vão Pré-Fabricadas em Betão de Alta Resistência Pré-Esforçado Reforçadas com Laminados de CFRP. Universidade de Coimbra, Tese de Mestrado.