

DESEMPENHO DE TRÊS TÉCNICAS DE REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM CFRP



Adriano S. Fortes
Aluno de Doutoramento
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do Minho
Guimarães



Joaquim A. O. Barros
Prof. Auxiliar
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do Minho
Guimarães

SUMÁRIO

No reforço de estruturas com materiais compósitos (CFRP) as técnicas mais correntes recorrem à colagem dos CFRP (laminados e mantas) nas faces externas dos elementos a reforçar. Nos últimos anos tem vindo a ser estudada uma técnica de reforço baseada na inserção de faixas de laminado de CFRP no betão de recobrimento das peças a reforçar. Neste trabalho procede-se à análise comparativa da eficácia de reforço destas técnicas.

1. INTRODUÇÃO

Durante a última década têm sido publicados vários trabalhos no âmbito da aplicação de laminados e mantas de fibras de carbono (CFRP) no reforço à flexão de vigas de betão armado [1]. As técnicas mais utilizadas recorrem à colagem de CFRP na(s) superfície(s) exterior(es) dos elementos a reforçar, utilizando-se para tal adesivos epoxídicos. Dos resultados apresentados nesses trabalhos sobressai o facto de ser apenas possível mobilizar 40% a 70% da capacidade resistente do CFRP, dado estes se destacarem ou arrancarem uma camada de betão do elemento reforçado. Mais recentemente foi proposta uma técnica de reforço que consiste na inserção de faixas de laminado de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento das peças a reforçar [2-5]. Em trabalhos anteriores esta última técnica apresentou níveis de eficácia de reforço

bastante elevados [5]. No entanto, não foi ainda efectuado nenhum estudo que permita comparar e interpretar os níveis de eficácia de reforço entre as técnicas que recorrem à colagem exterior de mantas e laminados de CFRP e as que se baseiam na “colagem interior” de laminados de CFRP.

Com o objectivo de efectuar esse estudo, foi realizada uma campanha de ensaios constituída por três séries de ensaios com vigas de betão armado. Todas as vigas foram dimensionadas para apresentarem rotura por flexão. As séries distinguem-se por terem diferente percentagem de armadura convencional e de CFRP. Cada série é composta por quatro sub-séries: vigas de referência (sem CFRP), vigas reforçadas com laminados inseridos, vigas reforçadas com laminados colados exteriormente, vigas reforçadas por colagem externa de manta. A percentagem de CFRP utilizada em cada técnica de reforço foi constante em cada uma das três séries, de forma a ser possível comparar a eficácia do reforço das referidas técnicas. Neste trabalho os ensaios efectuados são descritos, os resultados obtidos são apresentados e analisados e os mecanismos de rotura ocorridos são interpretados.

2. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

2.1 Betão

Para encher as vigas foi solicitado um betão da classe C30/37 a uma Central de Betão Pronto. Este betão teve a seguinte composição: 145 kg/m³ de areia fina (1.31-2.65mm), 576 kg/m³ de areia média (2.70-5.29mm), 667 kg/m³ de brita 1 (14.84-16.83mm), 366 kg/m³ de brita 2 (22.62-25.00mm), 325 kg/m³ de Cimento 42.5 R e 190 l de água, e adição de 60 kg/m³ de cinzas volantes e 2,71 l de superplastificante. Durante a betonagem das vigas foram moldados 15 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura que depois de ensaiados à compressão uniaxial apresentaram aos 28 dias a resistência média à compressão de 44.2 MPa, com um desvio padrão de 0.40 MPa e um coeficiente de variação de 0.16 % (resultado de 3 provetes). As vigas sem reforço, designadas de vigas de referência, foram ensaiadas aos 28 dias de idade. À data de ensaio das vigas reforçadas (64 a 70 dias) a resistência média à compressão do betão foi de 52.2 MPa, com um desvio padrão de 1.37 MPa e um coeficiente de variação de 1.89 % (resultado de 12 provetes).

2.2 Armaduras convencionais

A armadura convencional longitudinal das vigas era constituída por varões de 5mm e 6.5mm de diâmetro, sendo de 6mm o diâmetro dos estribos (ver Fig. 1). Dos ensaios de tracção uniaxial constatou-se que os varões de 5mm e 6.5mm apresentaram um comportamento linear-elástico até aproximadamente 620MPa ($\phi 5$) e 480MPa ($\phi 6.5$), respectivamente, seguido de comportamento com grandes deformações plásticas (ver Fig. 2). O diagrama σ_s - ϵ_s dos varões $\phi 6$ encontra-se representado em outro trabalho [6].

2.3 Laminado e manta de CFRP

Segundo Cruz e Barros [7] as faixas de laminado utilizadas no presente trabalho têm secção transversal de 9.59 ± 0.09 mm de largura por 1.45 ± 0.005 mm de espessura, 158.8 ± 2.6 GPa (c.v. 1.6 %) de valor médio de módulo de Young, 2739.5 ± 85.7 MPa (c.v. 3.1 %) de valor médio de resistência à tracção e 17.0 ± 0.4 % (2.4 %) de extensão última. Segundo o fabricante, o módulo

de Young, a resistência à tracção e a extensão última da manta de CFRP é de 240 GPa, 3700 MPa e 15,4 %, respectivamente, sendo de 0.111 mm a sua espessura. Na Fig. 2 a relação σ_f - ϵ_f destes compósitos é representada.

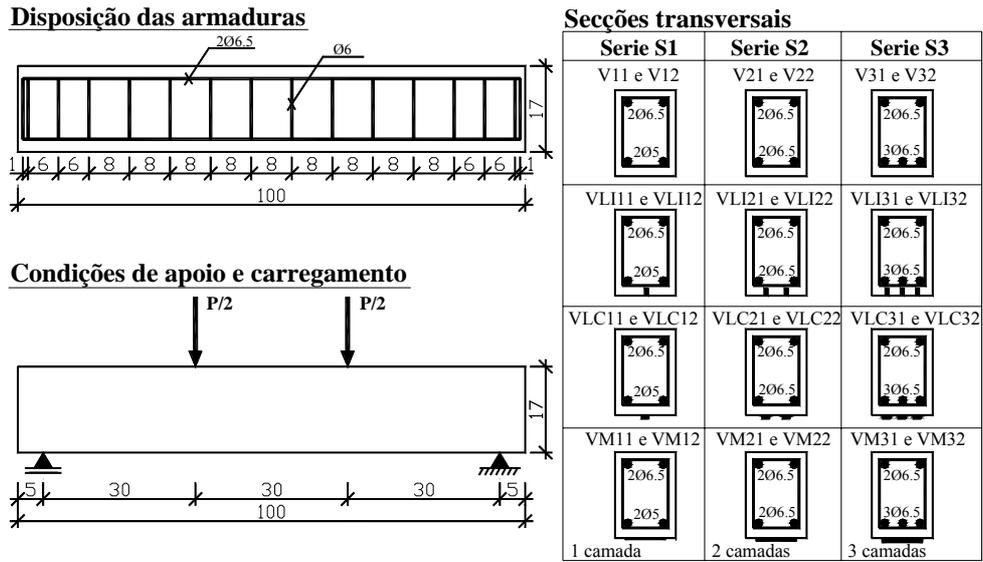


Fig. 1: Geometria, armaduras e reforço das vigas.

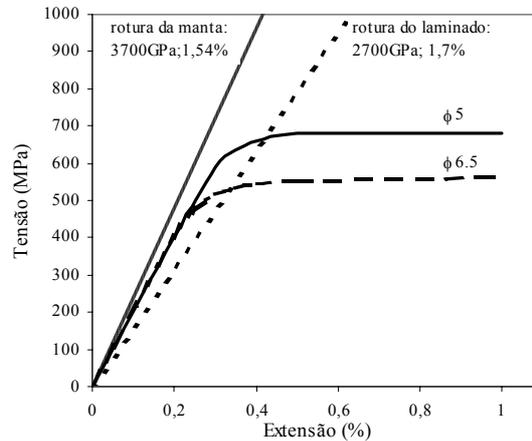


Fig. 2: Diagramas σ - ϵ dos materiais de reforço utilizados.

2.4 Adesivo epoxídico

Ensaio de tracção uniaxial sobre provetes do adesivo epoxídico utilizado para fixar os laminados de CFRP ao betão revelaram que este material tem um comportamento marcadamente não linear, com uma tensão de rotura que varia entre os 16 e os 22 MPa, sendo de aproximadamente 5 GPa o seu módulo de elasticidade [8].

3. GEOMETRIA E DISPOSIÇÃO DOS SISTEMAS DE REFORÇO

As vigas foram distribuídas em três séries de oito exemplares, tendo cada série diferente percentagem de armadura longitudinal, ver Fig. 1. A área de CFRP utilizada em cada técnica de reforço foi dimensionada de forma a ser constante o factor $(A_f E_f)/(A_s E_s)$, em que A_f e A_s são as áreas da secção transversal dos CFRP e da armadura convencional, e E_f e E_s são o módulo de Young dos CFRP e das armaduras convencionais. Neste dimensionamento não foi considerado o diferente braço interno dos CFRP das três técnicas de reforço, dado se ter admitido que a sua influência não seria significativa para o objectivo do trabalho. Na Tabela 1 indicam-se os valores de A_f/A_s de forma a que, em secções seguintes, seja possível avaliar o seu efeito nos resultados obtidos nos ensaios das vigas. Os estribos foram dimensionados para evitar a rotura por corte das vigas. Em cada série foram utilizados os três sistemas de reforço em análise: laminados e mantas de CFRP colados exteriormente, laminados de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento. Cada sistema de reforço foi aplicado em duas vigas. As duas restantes vigas de cada série, designadas de vigas de referência, apenas dispunham de percentagem de armadura convencional igual à das vigas reforçadas com CFRP das correspondentes séries. As vigas de referência são referenciadas pela sigla VWZ em que W designa o número da série (1, 2 ou 3) e Z o número da viga em cada sub-série (1 ou 2). As vigas reforçadas com CFRP são referenciadas pela sigla VXYWZ em que X assumirá as letras L ou M para designar vigas reforçadas com Laminados ou Manta, respectivamente, e Y a letra I ou C para indicar que se trata de laminado Inserido ou Colado exteriormente. W e Z têm o significado anteriormente descrito.

Tab. 1: Designação das vigas e correspondente quantidade relativa de reforço utilizado.

Vigas da Série S1	$\frac{A_f}{A_s}$ (%) ⁽¹⁾	Vigas da Série S2	$\frac{A_f}{A_s}$ (%) ⁽¹⁾	Vigas da Série S3	$\frac{A_f}{A_s}$ (%) ⁽¹⁾
V11	-	V21	-	V31	-
V12	-	V22	-	V32	-
VLI11	35.4	VLI21	41.9	VLI31	41.9
VLI12	35.4	VLI22	41.9	VLI32	41.9
VLC11	35.4	VLC21	41.9	VLC31	41.9
VLC12	35.4	VLC22	41.9	VLC32	41.9
VM11	22.6	VM21	31.4	VM31	31.4
VM12	22.6	VM22	31.4	VM32	31.4

⁽¹⁾ A_f – área da secção transversal de CFRP, A_s – área da secção transversal da armadura longitudinal

4. PROCEDIMENTOS DE REFORÇO

Em [4] são descritos os procedimentos adoptados na técnica de reforço por inserção de laminados em entalhes efectuados no betão de recobrimento das vigas. Nas técnicas de reforço por aplicação de laminado e manta de CFRP colados exteriormente à superfície do betão seguiram-se os procedimentos já devidamente documentados [9, 10].

5. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamento à velocidade de 0.02 milímetros por segundo até ser alcançada a rotura da viga. A deformação da viga foi medida por intermédio dos deslocamentos lidos em cinco *LVDTs*, conforme mostra a Fig. 3. As características dos

transdutores de deslocamentos, da célula de carga e do sistema de reacção são descritas em outro trabalho [5].

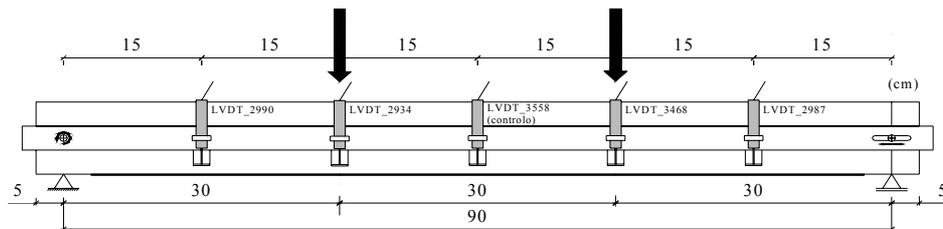


Fig. 3: Disposição dos LVDTs e do carregamento.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Modos e mecanismos de rotura

Vigas de referência: Estas vigas (V11, V12, V21, V22, V31, V32) apresentaram rotura dúctil com cedência da armadura longitudinal. Para elevado nível de deformação plástica do aço o betão do banzo comprimido entrou em rotura por esmagamento, sem ter ocorrido rotura da viga por corte. Na Fig. 4 inclui-se uma foto que ilustra o típico modo de rotura ocorrido neste tipo de vigas.

Vigas reforçadas por inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento: A ruína de todas as vigas reforçadas segundo esta técnica (VLI11, VLI12, VLI21, VLI22, VLI31, VLI32) deu-se por rompimento do betão do banzo traccionado, ao longo de aproximadamente metade da viga, tendo-se sempre iniciado pela extremidade do reforço (ver Fig. 5). A camada de betão destacada chegou a alcançar 60mm de espessura (cerca de 35% da altura da viga), tendo a armadura longitudinal ficado exposta. Na viga VLI11 foi observada a rotura inter-laminar do laminado (ver Fig. 6).

Vigas reforçadas por colagem externa de laminados de CFRP: A rotura destas vigas (VLC11, VLC12, VLC21, VLC22, VLC31, VLC32) deu-se por descolamento do laminado de CFRP a partir das suas extremidades, sem ter ocorrido destacamento de camada de betão de recobrimento. Apenas a viga VLC32 apresentou rotura da região de recobrimento das armaduras, com cerca de 25 mm de espessura. Na Fig. 7 incluem-se fotos relativas aos típicos modos de rotura ocorrido neste tipo de vigas.

Vigas reforçadas por colagem externa de manta de CFRP: Estas vigas (VM11, VM12, VM21, VM22, VM31, VM32) apresentaram dois modos de rotura. Nas vigas com uma e duas camadas de manta (ver Fig. 1) a rotura deu-se por rompimento da manta, na região central, nas proximidades da aplicação da carga. Nas vigas com três camadas de manta a rotura deu-se por destacamento de uma camada de betão de recobrimento com cerca de 25mm de espessura, tendo-se a rotura iniciado pela extremidade do reforço. Na Fig. 8 incluem-se fotos que ilustram os típicos modos de rotura ocorridos nesta série de vigas.

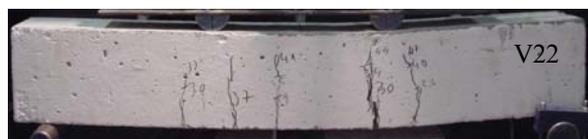


Fig. 4: Rotura típica das vigas de referência.



Fig. 5: Rotura típica das vigas VLI.



Fig. 6: Delaminação do laminado da viga VLI11.



(a)

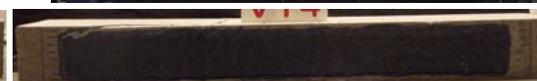


(b)

Fig. 7: Modos de rotura típicos das vigas VLC: descolamento (a), descolamento de camada de recobrimento de betão (b).



(a)

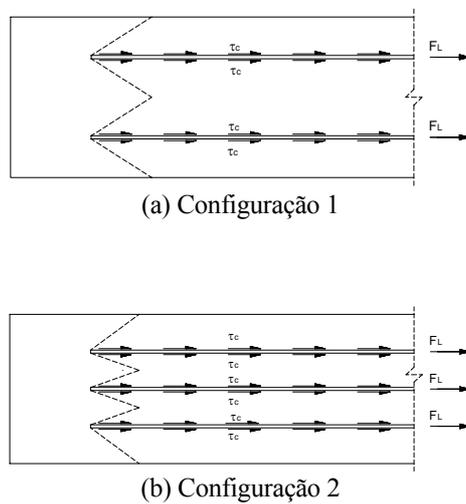
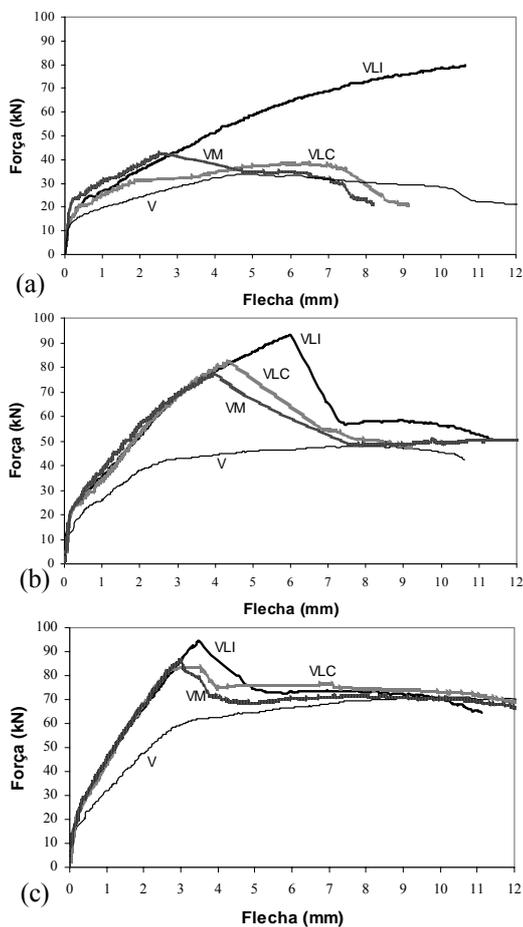


(b)

Fig. 8: Modos de rotura típicos das vigas VM: rotura da manta (a), descolamento de camada de recobrimento de betão (b).

6.2 Relações força-flecha e cargas de rotura e de serviço

Na Fig. 9 representam-se as relações força-flecha registadas nas três séries de vigas ensaiadas. Consta-se que em todas as séries a eficácia de reforço foi mais elevada nas vigas reforçadas com laminados inseridos. Porém, esta eficácia diminuiu da série S1 para a série S3, i.e., decresce com o aumento da percentagem de armadura convencional (ver Fig. 1).



Legenda:

Superfície de ruptura no betão de

Fig. 10 – Transferência de tensões dos laminados para o betão nas vigas reforçadas com 2 (a) e 3 (b) laminados.

As cargas médias de rotura (\bar{P}_u) registadas nas vigas ensaiadas estão indicados na Tabela 1. Nesta Tabela $\bar{P}_u(VR)$ e $\bar{P}_u(V)$ representam o valor médio da carga de rotura da viga reforçada e da correspondente viga de referência, respectivamente.

Tabela 2: Cargas de rotura obtidas experimentalmente nas vigas ensaiadas.

Série S1			Série S2			Série S3		
Ref. viga	\bar{P}_u [kN]	$\frac{\bar{P}_u(VR) - \bar{P}_u(V)}{\bar{P}_u(V)}$ [%]	Ref. viga	\bar{P}_u [kN]	$\frac{\bar{P}_u(VR) - \bar{P}_u(V)}{\bar{P}_u(V)}$ [%]	Ref. viga	\bar{P}_u [kN]	$\frac{\bar{P}_u(VR) - \bar{P}_u(V)}{\bar{P}_u(V)}$ [%]
V	36.6	-	V	48.5	-	V	71.8	-
VLI	79.9	124	VLI	93.3	92	VLI	96.6	35
VLC	38.6	8	VLC	83.5	72	VLC	86.5	20
VM	43.0	21	VM	79.5	64	VM	87.3	22

Da análise dos resultados verifica-se que em todas as séries a técnica de reforço baseada na inserção de laminados conduziu a cargas de rotura mais elevadas. Na série S1 os laminados inseridos mais do que duplicaram a carga de rotura das vigas de referência, enquanto o laminado e a manta colada conseguiram apenas aumentar esta carga em 8 e 21%, respectivamente. Na série S2 os laminados inseridos quase que duplicaram a carga última das vigas de referência, enquanto os laminados e a manta colada (duas camadas) incrementaram a carga de rotura em 72 e 64%. Finalmente, na série S3 as três técnicas de reforço permitiram um aumento de carga de rotura de 35, 20 e 22% (ver Tab. 2). Assim, a eficácia de reforço diminuiu com o aumento da percentagem de armadura convencional. Da análise comparativa dos resultados obtidos nas séries S2 e S3 constata-se que a eficácia também diminuiu com o aumento do número de laminados inseridos. A justificação está esquematicamente representada na Fig. 9. Admitindo tensões de corte na interface adesivo-betão (τ_c) idênticas nas duas configurações, a resistência oferecida pelos “blocos” de betão de recobrimento entre laminados é menor na segunda configuração dado ser menor a superfície de resistência nesta configuração.

Na Tabela 3 apresenta-se o valor médio da carga de serviço (\bar{P}_s) para cada série de vigas, tendo-se admitido para carga de serviço a força correspondente a $L/400$, em correspondência com as recomendações do REBAPE, sendo L o vão da viga. Nesta tabela também se inclui o acréscimo de carga de serviço proporcionado por cada técnica de reforço. Constata-se que em termos gerais a técnica de reforço constituída por colagem externa de manta é a que induziu maiores acréscimos de carga de serviço, devido ao maior módulo de elasticidade deste compósito, quando comparado com o dos laminados de CFRP. Contudo, esse incremento diminuiu com o aumento da percentagem de armadura convencional. Nos laminados colados o incremento foi praticamente insensível à percentagem de armadura convencional, enquanto na técnica que recorre à inserção dos laminados, exceptuando o caso da série S1, nas restantes séries esta técnica conduziu ao menor incremento de carga de serviço, devido ao menor braço interno. Em termos de incremento de carga de serviço esta técnica é bastante sensível à percentagem de armadura convencional, dado que foi de 70% para $A_f/A_s=35.4$ (1ª série) e igual a 29% para $A_f/A_s=41.9$ (2ª e 3ª séries).

Tabela 3: Cargas de serviço obtidas experimentalmente nas vigas ensaiadas.

Série S1			Série S2			Série S3		
Ref. viga	\bar{P}_s [kN]	$\frac{\bar{P}_s(VR) - \bar{P}_s(V)}{\bar{P}_s(V)}$ [%]	Ref. viga	\bar{P}_s [kN]	$\frac{\bar{P}_s(VR) - \bar{P}_s(V)}{\bar{P}_s(V)}$ [%]	Ref. viga	\bar{P}_s [kN]	$\frac{\bar{P}_s(VR) - \bar{P}_s(V)}{\bar{P}_s(V)}$ [%]
V	22.1	-	V	40.5	-	V	51.5	-
VLI	37.5	70	VLI	56.3	39	VLI	71.5	39
VLC	31.9	44	VLC	57.6	42	VLC	74.1	44
VM	40.3	82	VM	59.5	47	VM	73.4	43

7. CONCLUSÕES

As vigas de referência (não reforçadas com CFRP) apresentaram rotura dúctil por cedência da armadura convencional. Nas vigas reforçadas com laminados inseridos no betão de recobrimento ocorreu a rotura de uma camada de betão, enquanto em quase todas as vigas reforçadas por colagem externa de laminados de CFRP ocorreu o destacamento destes. Nas vigas reforçadas por colagem externa com uma e duas camadas de manta de CFRP ocorreu a rotura destas, enquanto

nas vigas reforçadas com três camadas surgiu o destacamento de uma camada de recobrimento (mas de menor espessura que nas vigas reforçadas com laminados inseridos).

Em todas as séries ensaiadas a eficácia de reforço foi mais elevada nas vigas reforçadas com laminados inseridos, mas essa eficácia diminui com o aumento da percentagem de armadura convencional e com o aumento do número de laminados inseridos.

Em termos de carga de serviço verificou-se que a técnica de reforço constituída por colagem externa de manta foi a que conduziu a maiores aumentos, mas esse aumento diminui com o incremento da percentagem de armadura convencional.

8. AGRADECIMENTOS

O 1º Autor agradece o acolhimento prestado pelo Departamento Engenharia Civil da Universidade do Minho e a colaboração dos técnicos do Laboratório de Estruturas da UM, assim como a bolsa concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, Brasil. Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais usados nesta campanha experimental, nomeadamente Unibetão (Central de Braga), à Bettor MBT Portugal e à Secil.

9. REFERÊNCIAS

- [1] - CEB-FIP - *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures, prepared by a working party of the Task Group 9.3 FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, 2001, 130 p.
- [2] - Blaschko M., Zilch K., - *Rehabilitation of Concrete Structures with CFRP Strips Glued into Slits* 12ª International Conference on Composite Materials, Paris, 1999.
- [3] - Barros, J.A.O., Ferreira, D.R.S.M., Lourenço, P.J.B. – “Comportamento de pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono”, *Encontro Nacional de Betão Estrutural 2000*, Porto, 22-24 Novembro 2000, pp. 393-402.
- [4] - Fortes, A.S., Barros, J.A.O., “Reforço à flexão de vigas de betão armado por intermédio da inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento”, Congresso Nacional da Engenharia de Estruturas, a realizar-se no LNEC, Lisboa, pp. 401-410, de 10 a 13 de Julho de 2002.
- [5] – Fortes, A.S., Barros, J.A.O., Padaratz, I.J. - *Vigas de Betão Armado Reforçadas com Laminados de CFRP Inseridos no Betão*. Relatório 02-DEC/E-13, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 2002, 32 p.
- [6] – Barros, J.A.O., Fortes, A.S. - “Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits”, 5º *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Madrid, 3-6 Junio 2002.
- [7] – Cruz, J.M.S., Barros, J.A.O. - Caracterização experimental da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento. Relatório 02-DEC/E-15, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 2002.
- [8] Cruz, J.M.S., Barros, J.A.O., Faria, R.M.C.M. - “Assessing the embedded length of epoxy-bonded carbon laminates by pull-out bending tests”, *International Conference Composites in Construction CCC2001*, 10-12 October 2001, pp. 217-222.
- [9] Juvandes, L.F.P. - Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado usando Materiais Compósitos de “CFRP”. Tese de Doutoramento, Dep. Engª Civil, FEUP, 1999.
- [10] Dias, S.J.E. - Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão. Tese de Mestrado, Dep. Engª Civil, FEUP, 2001.