

Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos



Salvador Dias¹



Joaquim Barros²



Cristiana Azevedo³

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um programa experimental que foi realizado para avaliar o comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão usando a técnica da inserção de laminados de CFRP em entalhes efetuados no betão de recobrimento. Foram testadas três percentagens de reforço de CFRP (reforço com um laminado, com dois laminados e com três laminados) em vigas de betão armado com 2600 mm de comprimento e secção transversal de 150×300 mm². As vigas continham uma percentagem de armadura longitudinal de 0.38%. O comportamento experimental das vigas reforçadas com CFRP foi comparado com o de uma viga de referência que foi ensaiada sem reforço de CFRP. Os resultados obtidos são apresentados e analisados em termos do comportamento estrutural das vigas ensaiadas, modos de rotura e desempenho do CFRP.

Palavras-chave: Reforço à flexão; Laminados de CFRP inseridos; Percentagem de CFRP.

1. INTRODUÇÃO

O reforço à flexão de estruturas de betão armado com compósitos de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) pode ser feito recorrendo à técnica que consiste na inserção de laminados de CFRP em finos entalhes efetuados no betão de recobrimento. O elemento de ligação do CFRP ao betão é um adesivo epoxídico. Esta técnica é designada na literatura internacional por *Near Surface Mounted* (NSM). Estudos já realizados [1-3] permitem concluir que esta técnica de reforço proporciona um melhor aproveitamento das elevadas potencialidades dos CFRP quando comparada com a técnica que consiste na colagem externa do CFRP (técnica EBR - *Externally Bonded Reinforcement*). Com efeito, a maior área de colagem do CFRP ao betão, proporcionada pela técnica NSM, conduz a um maior grau de fixação do reforço ao betão, podendo assim retardar ou mesmo evitar a ocorrência do modo de rotura típico verificado em estruturas de betão reforçadas à flexão com CFRP colado externamente, que consiste no destacamento prematuro do CFRP.

¹ ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. sdias@civil.uminho.pt

² ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

³ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. a48759@civil.uminho.pt

Neste trabalho apresenta-se um programa experimental que foi realizado para avaliar o grau de eficácia da técnica da inserção de laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado. Concretamente, pretendeu-se avaliar o efeito da percentagem de CFRP na eficácia da técnica de reforço em estudo. Os resultados obtidos são apresentados e analisados em termos do comportamento estrutural das vigas ensaiadas, modos de rotura e desempenho do CFRP.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Conceção dos modelos e tipo de ensaio

O programa experimental realizado contemplou quatro vigas de betão armado de secção transversal retangular com $150 \times 300 \text{ mm}^2$ e com 2600 mm de comprimento (Fig. 1). Em todas as vigas foram utilizados dois varões de aço nervurado com 8 mm de diâmetro ($2\phi 8$) para a armadura longitudinal de compressão e dois varões de aço nervurado com 10 mm de diâmetro ($2\phi 10$) para a armadura longitudinal de tração. Por forma a evitar a ocorrência da rotura por corte, em todas as vigas foram colocados estribos de aço verticais (2 ramos) com varões de aço nervurado de 6 mm de diâmetro espaçados de 75 mm ($\phi 6//75$).

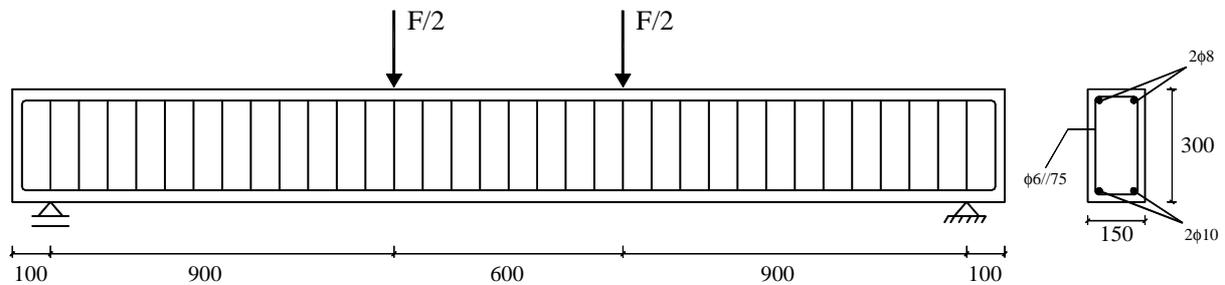


Figura 1. Geometria, tipo de ensaio e armaduras de aço comuns a todas as vigas ensaiadas (dimensões em mm).

Das quatro vigas que foram testadas, uma era de referência sem reforço de CFRP (viga REF-M) e três foram reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento de acordo com as soluções representadas na Fig. 2. Assim, as vigas S1-M, S2-M e S3-M foram reforçadas com, respetivamente, um, dois e três laminados de CFRP. Os laminados que foram colocados nas três vigas anteriormente referidas tinham uma secção transversal com dimensões $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$ e um comprimento de 2300 mm. De acordo com o representado na Fig. 2, as secções de interrupção dos laminados nas vigas ensaiadas estavam localizadas a 50 mm dos apoios.

No Quadro 1 é apresentada a informação relativa aos parâmetros que caracterizam, de uma forma geral, cada uma das vigas que foram ensaiadas: o valor da percentagem de armadura longitudinal (ρ_{st}), a solução de reforço de CFRP adotada, a percentagem de reforço de CFRP (ρ_f) e o valor médio da resistência à compressão do betão das vigas (f_{cm}).

As vigas foram submetidas a ensaios à flexão em quatro pontos de carga, tal como está representado na Fig. 1. Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamentos com uma velocidade de 0.02 mm/s. Em todas as vigas reforçadas com CFRP, um laminado foi instrumentado com cinco extensómetros elétricos (ext.1, ext.2, ext.3, ext.4 e ext.5) por forma a avaliar a variação do campo de extensões do reforço ao longo do carregamento das vigas. Na Fig. 3 estão identificadas as secções do laminado onde foram colados os extensómetros.

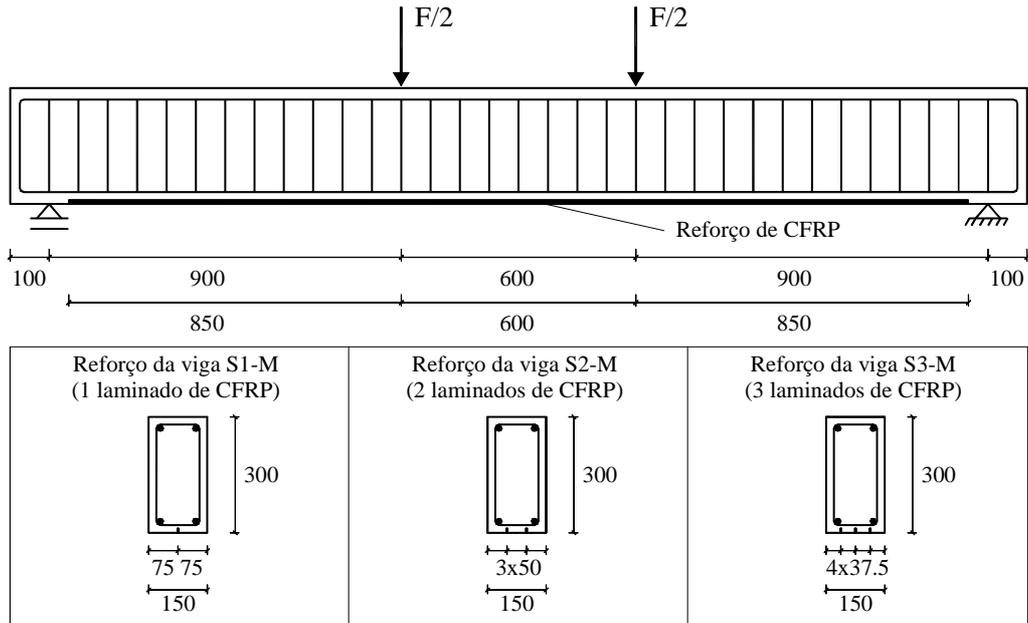


Figura 2. Soluções de reforço de CFRP testadas (dimensões em mm).

Quadro 1. Parâmetros que caracterizam as vigas ensaiadas.

Vigas	ρ_{sl} (%) ^a	Reforço de CFRP	ρ_f (%) ^b	f_{cm} (MPa)
REF-M		-	-	
S1-M	0.38	1 laminado de CFRP ($1 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$)	0.03	50.2
S2-M		2 laminados de CFRP ($2 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$)	0.06	
S3-M		3 laminados de CFRP ($3 \times 1.4 \times 10 \text{ mm}^2$)	0.09	

^a A percentagem de armadura longitudinal foi obtida por $\rho_{sl} = (A_{sl} / (b_w \times d)) \times 100$ em que A_{sl} é a área de aço correspondente às armaduras longitudinais de tração (ver Fig. 1), $b_w = 150 \text{ mm}$ é a largura da secção transversal da viga e d é a distância da fibra de betão mais comprimida ao baricentro dos varões de aço da armadura longitudinal de tração; ^b A percentagem de CFRP foi obtida a partir de $\rho_f = (A_f / A_c) \times 100$ em que A_f é a área de reforço de CFRP e A_c é a área da secção transversal das vigas.

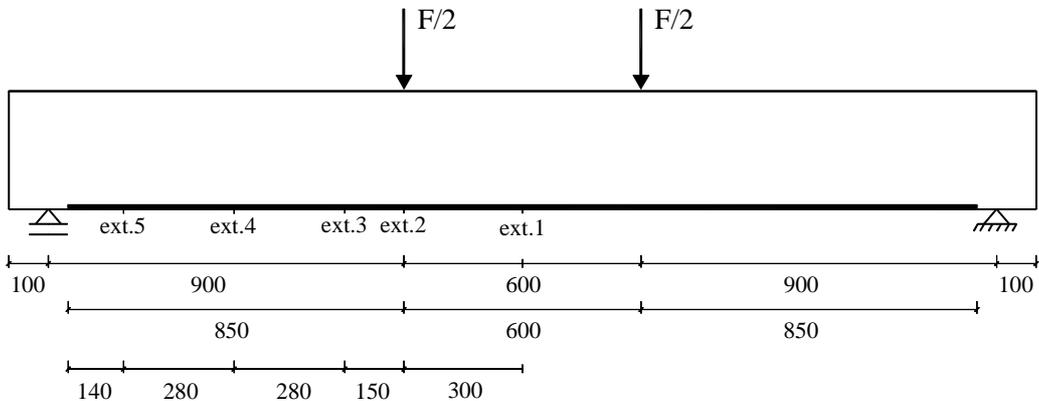


Figura 3. Posição dos extensómetros nos laminados de CFRP instrumentados.

2.2 Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão das vigas foi efetuada experimentalmente à data da realização dos ensaios das vigas. Para tal, ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura foram efetuados segundo as recomendações da norma EN 206-1 [4]. O valor médio da resistência à compressão obtido foi de 50.2 MPa ($f_{cm} = 50.2$ MPa). Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm, 8 mm e 10 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tração uniaxial efetuados segundo o estipulado na norma EN 10002-1 [5]. A caracterização dos laminados de CFRP utilizados (S&P Laminates CFK 150/2000) foi efetuada por intermédio da realização de ensaios de tração uniaxial, segundo a ISO 527-5 [6]. No Quadro 2 estão registados os valores médios, obtidos experimentalmente, das propriedades mecânicas mais significativas do aço e dos laminados de CFRP.

Quadro 2. Valores das propriedades do aço e dos laminados de CFRP.

	Diâmetro (mm)	φ6	φ8	φ32
Aço	Tensão de cedência [f_{sym}] (MPa)	564.1	534.5	566.7
	Tensão máxima [f_{sum}] (MPa)	682.6	618.5	661.3
Laminado de CFRP	Tensão de rotura	Módulo de elasticidade		Extensão máxima
	$f_{fum} = 3165$ MPa	$E_{fm} = 175$ GPa		$\epsilon_{fum} = 18$ ‰

2.3 Aplicação do reforço de CFRP

Os laminados de CFRP foram inseridos em entalhes, com cerca de 5 mm de largura e 15 mm de profundidade, efetuados no betão de recobrimento da face tracionada das vigas (Fig. 4a). Após a abertura dos entalhes, procedeu-se à sua limpeza por intermédio da aplicação de jatos de ar (Fig. 4b). Os estribos de aço foram colocados de forma a terem um betão de recobrimento com espessura de 20 mm, tendo-se assegurado que nenhum estribo foi danificado pela abertura dos entalhes. Os laminados, fornecidos em rolos de 150 m com a secção transversal de 1.4×10 mm², foram cortados com o comprimento desejado e, posteriormente, foram limpos com um desengordurante (Fig. 4c). A fixação dos laminados foi efetuada por intermédio de um adesivo epoxídico (S&P Resin 220 [7]). Primeiro, o entalhe foi preenchido com adesivo e, depois, o laminado, também com adesivo aplicado nas superfícies laterais, foi inserido no entalhe (Fig. 4d). A operação de reforço terminou com a remoção do adesivo em excesso e a execução do acabamento final. Na Fig. 4e) apresenta-se um pormenor de uma viga reforçada com dois laminados de CFRP imediatamente antes de se dar início ao ensaio da viga.

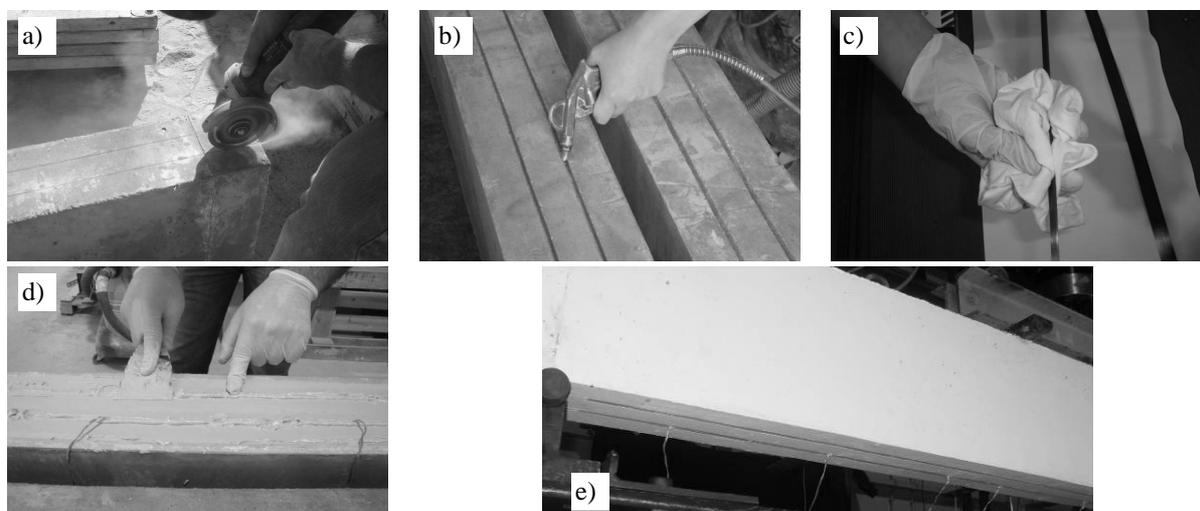


Figura 4. Aplicação do reforço de CFRP.

3. RESULTADOS

3.1 Capacidade de carga das vigas até à rotura

Na Fig. 5 apresenta-se a resposta força vs flecha a meio vão das quatro vigas que foram ensaiadas com um carregamento monotónico até à rotura. Estas curvas representam o comportamento das referidas vigas até ao instante em que começaram a perder capacidade de carga após terem atingido a sua capacidade de carga máxima. A análise das curvas de comportamento da Fig. 5 permite verificar que, tendo como base o comportamento da viga de referência (REF-M) e independentemente da percentagem de reforço de CFRP das vigas S1-M, S2-M e S3-M, a presença dos laminados proporcionou, após o início da fendilhação do betão, aumentos de rigidez e de capacidade de carga na rotura. As vigas reforçadas com os laminados de CFRP inseridos registam três estados principais de comportamento: 1) betão não fendilhado; 2) betão fendilhado com o aço não plastificado; 3) betão fendilhado após cedência do aço das armaduras longitudinais. Após a cedência das armaduras verifica-se que apenas o compósito contribui para o aumento da capacidade resistente da viga. Isto justifica o aparecimento do troço reto nas curvas das vigas reforçadas após a cedência das armaduras, em consequência do comportamento linear dos laminados de CFRP.

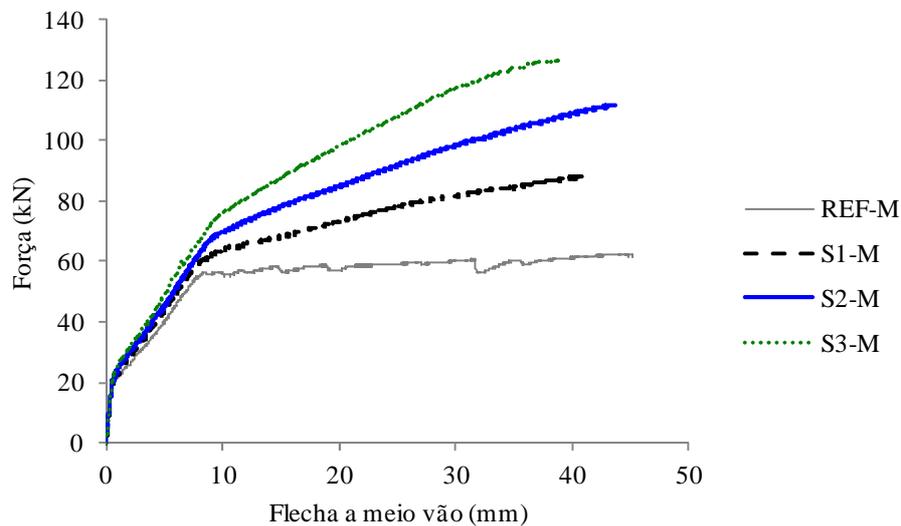


Figura 5. Relação força vs flecha a meio vão das vigas ensaiadas.

O Quadro 3 apresenta os principais resultados obtidos nas vigas REF-M, S1-M, S2-M e S3-M. Assim, para cada uma destas vigas, são apresentados os valores da carga de início de fendilhação do betão (F_{cr}), a carga correspondente à cedência das armaduras de aço (F_{sy}) e a carga máxima (F_{max}). A flecha a meio vão correspondente à força F_{max} (u_{Fmax}) e os acréscimos da carga proporcionados pelos reforços de CFRP, quer em termos da carga de cedência das armaduras quer em termos da carga máxima, também se encontram registados no Quadro 3.

Quadro 3. Principais resultados obtidos nas vigas ensaiadas.

Vigas	F_{cr} (kN)	F_{sy} (kN)	Acréscimo de carga de cedência das armaduras (%)	F_{max} (kN)	Acréscimo de carga máxima (%)	u_{Fmax} (mm)
REF-M	20.1	56.6	-	62.3	-	45.1
S1-M	21.0	62.4	10	88.4	42	41.2
S2-M	22.2	69.5	23	111.9	80	43.6
S3-M	24.0	76.0	34	126.6	103	38.9

De acordo com os dados apresentados no Quadro 3 verifica-se que as soluções de reforço adotadas provocaram acréscimos da carga de início de fendilhação do betão que variaram entre os 4% (viga S1-M) e os 19% (viga S3-M). Em termos do valor da carga correspondente à cedência das armaduras, os reforços de CFRP provocaram aumentos que variaram entre os 10% (viga S1-M) e os 34 % (viga S3-M). No que respeita à carga máxima verificaram-se aumentos que variaram entre os 42% (viga S1-M) e os 103 % (viga S3-M). Assim sendo, verifica-se que a solução de reforço correspondente à colocação de três laminados de CFRP permitiu a duplicação da capacidade de carga máxima da viga de referência REF-M.

Em termos da flecha a meio vão associada à carga máxima das vigas (u_{Fmax}) verificou-se que os valores alcançados pelas vigas reforçadas com CFRP foram ligeiramente inferiores ao obtido pela viga de referência REF-M. Com efeito, os valores de u_{Fmax} para as vigas reforçadas com CFRP variaram entre os 86% (viga S3-M) e os 97% (viga S2-M) do valor de u_{Fmax} da viga REF-M.

Os dados apresentados no Quadro 3 também permitem verificar que o aumento da percentagem de laminados de CFRP foi acompanhado por um aumento dos benefícios do CFRP na capacidade de carga das vigas. Na Fig. 6 apresenta-se a relação entre a percentagem de reforço de CFRP e os acréscimos de carga verificados quer em termos da carga de cedência das armaduras como da carga máxima.

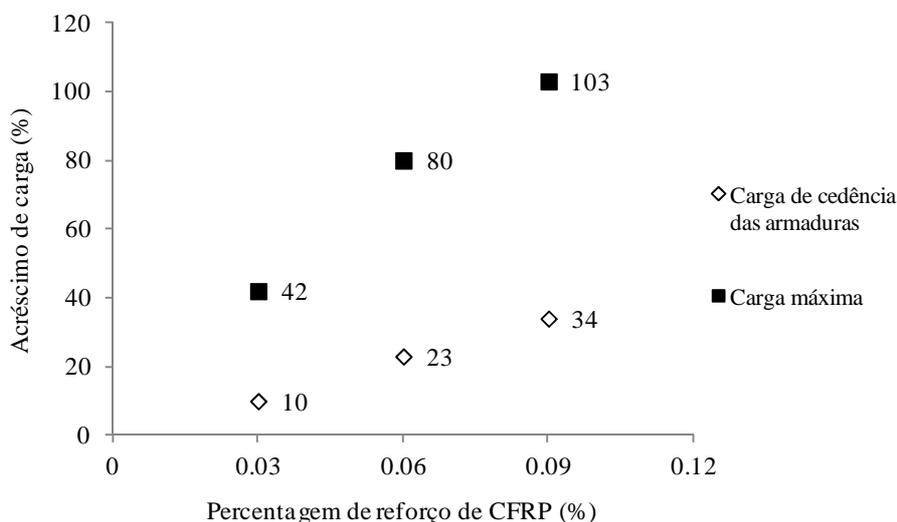


Figura 6. Efeito da percentagem de CFRP na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP aplicada no reforço à flexão de vigas de betão armado.

3.2 Modos de rotura

As primeiras fendas que surgiram nas vigas ensaiadas foram de flexão e apareceram na zona de flexão pura entre pontos de carga. Com o aumento do carregamento foram também aparecendo fendas nos vãos de corte das vigas. Na Fig. 7 apresenta-se o padrão de fendilhação final registado nas vigas REF-M, S1-M, S2-M e S3-M após a realização dos ensaios.

O modo de rotura da viga REF-M, tal como ilustrado na Fig. 8a), ocorreu pelo esmagamento do betão na zona comprimida após a cedência das armaduras longitudinais. De acordo com a Fig. 8b) o modo de rotura da viga S1-M esteve associado ao esgotamento da capacidade resistente à tração do CFRP (rotura do CFRP). Quer na viga S2-M (Fig. 8c) como na viga S3-M (Fig. 8d) verificou-se a ocorrência do destacamento do CFRP.

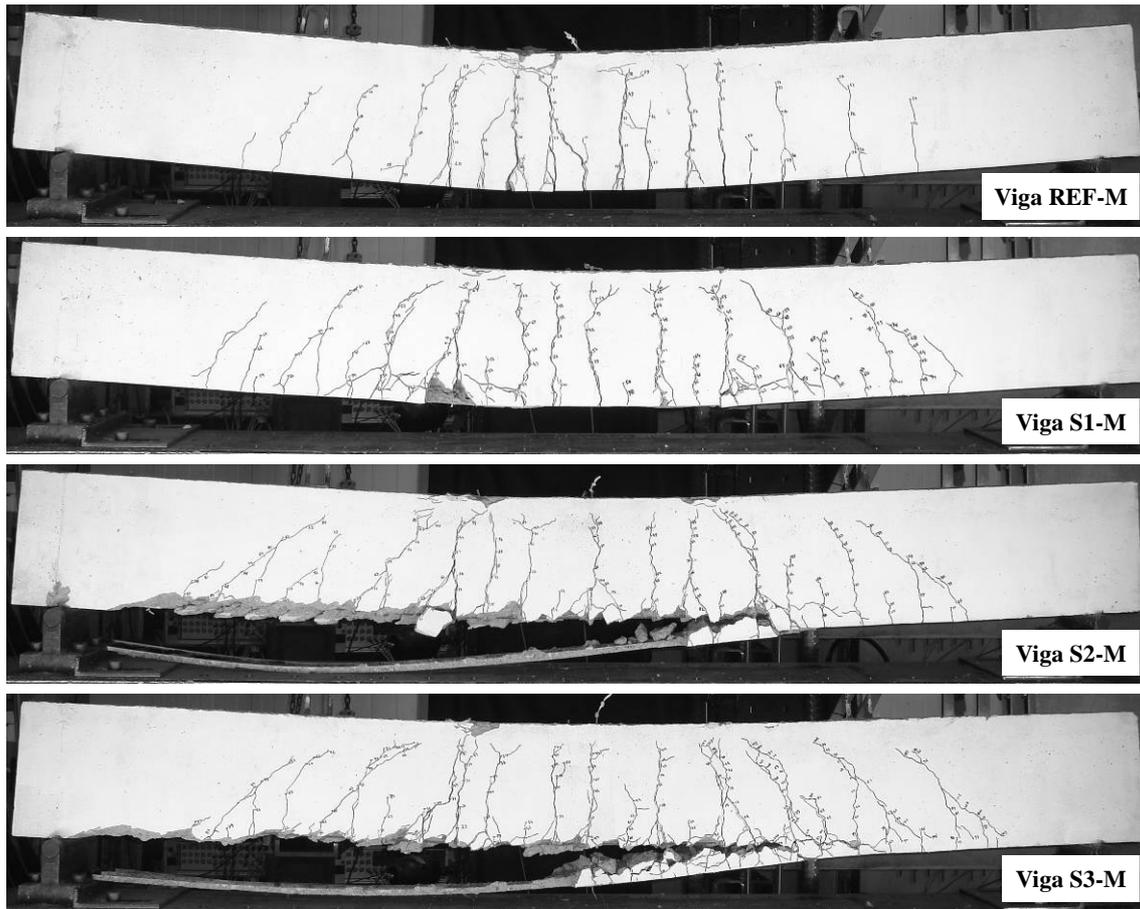


Figura 7. Padrão de fendilhação final das vigas ensaiadas.

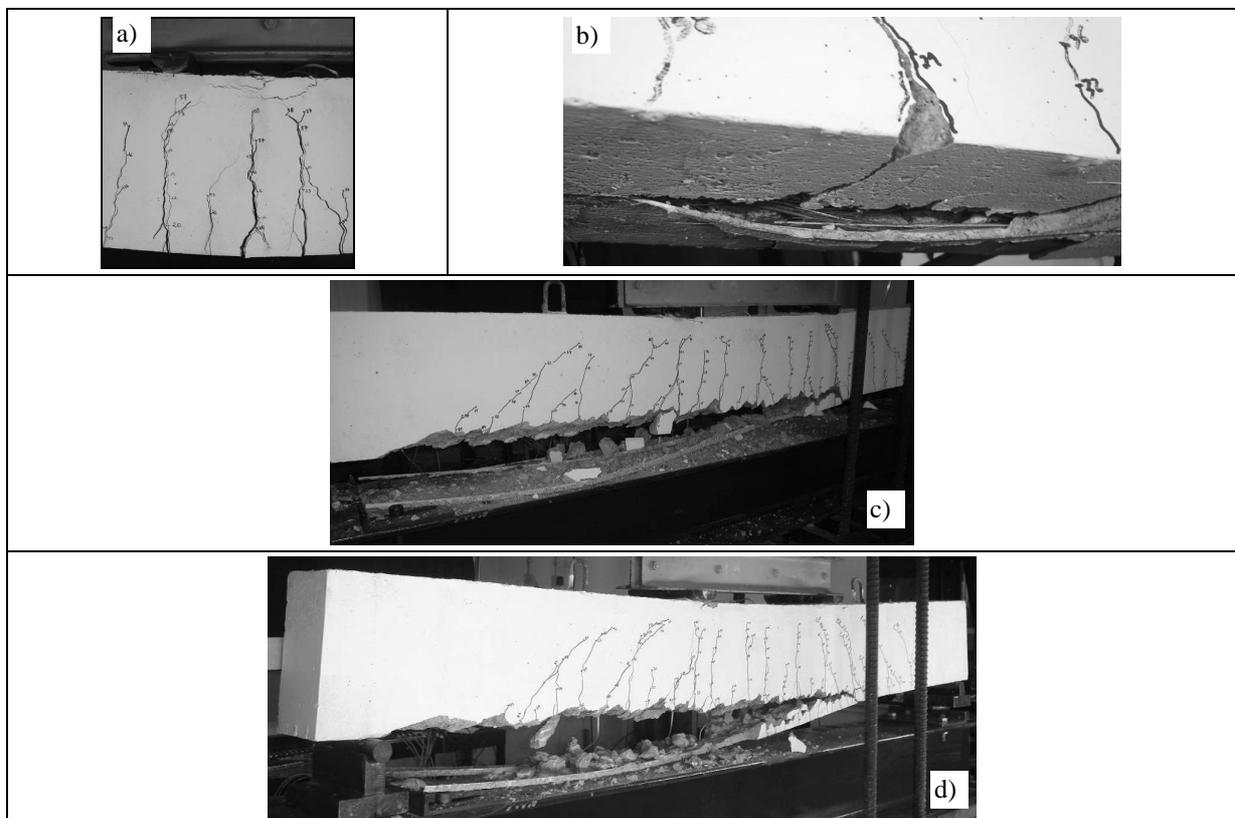


Figura 8. Modos de rotura observados nas vigas ensaiadas.

3.3 Extensões no CFRP

No Quadro 4 apresenta-se, para cada viga reforçada, o valor da extensão máxima registada no laminado instrumentado até ao momento em que se atingiu a capacidade de carga máxima da viga (ε_{CFRP}^{max}), assim como o grau de mobilização do reforço de CFRP. De acordo com os dados apresentados no Quadro 4 é possível verificar que o valor de ε_{CFRP}^{max} variou entre 14.9‰ (viga S3-M) e 17.9‰ (viga S1-M). Estes valores, tendo em conta o valor médio da extensão máxima registada nos ensaios de tração uniaxial dos laminados (18.0‰ - ver Quadro 2), correspondem a elevados níveis de aproveitamento do reforço de CFRP. Com efeito, verifica-se que o grau de mobilização do CFRP variou entre os 83% e os 100% (valor que foi alcançado na viga S1-M onde o modo de rotura foi a rotura do CFRP).

Quadro 4. Extensões máximas registadas no CFRP e grau de mobilização do reforço.

Vigas	ε_{CFRP}^{max} (‰)	Grau de mobilização do CFRP (%) ^a	Modo de rotura
S1-M	17.9	100	Rotura do CFRP
S2-M	17.4	97	Destacamento do CFRP
S3-M	14.9	83	Destacamento do CFRP

^a Grau de mobilização do CFRP = $\left(\varepsilon_{CFRP}^{max} / \varepsilon_{f,um}\right) \times 100$, em que $\varepsilon_{f,um} = 18\%$ (ver Quadro 2).

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no programa experimental apresentado neste trabalho permitiram extrair as seguintes conclusões:

- A aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado, independentemente da percentagem de CFRP, permitiu aumentar a capacidade de carga das vigas. Tendo como base o comportamento da viga de referência sem CFRP, as soluções de reforço de CFRP testadas proporcionaram acréscimos de carga correspondente à cedência das armaduras que variaram entre os 10% e os 34%. Tendo ainda como base de comparação a viga de referência sem CFRP, as soluções de reforço de CFRP testadas proporcionaram acréscimos de carga máxima que variaram entre os 42% e os 103%. Neste contexto, refira-se que a solução com três laminados de CFRP duplicou a capacidade de carga máxima da viga de referência sem CFRP.
- No âmbito da avaliação do efeito da percentagem de CFRP na eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP, quando aplicada no reforço à flexão de vigas de betão armado, foram testadas três percentagens de CFRP (0.03%, 0.06% e 0.09%). Os ganhos de resistência obtidos foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, maiores valores de ρ_f garantiram maiores aumentos da capacidade resistente.
- O valor da extensão máxima registada nos laminados instrumentados das vigas ensaiadas variou entre os 14.9‰ (viga reforçada com a maior percentagem de CFRP testada) e os 17.9‰ (viga reforçada com a menor percentagem de CFRP testada). Em termos médios o valor da referida extensão foi de 16.7‰, o que correspondeu a um grau de mobilização médio do reforço de 93%. Estes valores demonstram o elevado nível de aproveitamento do reforço de CFRP que foi possível alcançar ao aplicar os laminados de CFRP usando a técnica NSM.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à empresa Casais pela colaboração prestada na construção das vigas e na aplicação dos reforços de CFRP. Os agradecimentos são estendidos à S&P Reinforcement pelo fornecimento dos laminados de CFRP e do adesivo epoxídico, e à Unibetão

(Braga) pelo fornecimento do betão. A investigação desenvolvida neste trabalho faz parte do projeto PTDC/ECM/114945/2009.

REFERÊNCIAS

- [1] Blaschko, M. e Zilch, K., 1999, “*Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits*”, Proceedings of the Twelfth International Conference of Composite Materials, ICCM 12, Paris, France (CD-ROM).
- [2] Fortes, A.S. e Barros, J.A.O., 2002, “*Desempenho de três técnicas de reforço à flexão de vigas de betão armado com CFRP*”, Encontro Nacional Betão Estrutural 2002, Lisboa, pp. 233-242.
- [3] El-Hacha, R. e Riskalla, S.H., 2004, “*Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures*”, ACI Structural Journal, vol. 101, nº5, September-October, pp. 717-726.
- [4] EN 206-1, 2000, *Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*, European standard, CEN, 69 pp.
- [5] EN 10002-1, 1990, *Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)*, European standard, CEN, 35 pp.
- [6] ISO 527-5, 1997, *Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp.
- [7] S&P, “*Reinforcement International AG*”, S&P Clever Reinforcement Company, CH-6440, Brunnen, Switzerland, <http://www.sp-reinforcement.eu>.