

REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO POR INTERMÉDIO DA INSERÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP NO BETÃO DE RECOBRIMENTO



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

Nos últimos anos tem vindo a ser caracterizada uma técnica de reforço baseada na inserção de faixas de laminado de fibras de carbono em entalhes realizados no betão de recobrimento das peças a reforçar. Esta técnica foi aplicada no reforço de vigas de betão armado, com o objectivo de duplicar a capacidade de carga das vigas de referência, armadas com quatro distintas percentagens de armadura convencional. Este objectivo foi conseguido, tendo as vigas reforçadas apresentado ductilidade elevada. Neste trabalho os procedimentos associados à técnica de reforço são transcritos, os ensaios efectuados são descritos, os resultados obtidos são apresentados e analisados e os mecanismos de rotura ocorridos são interpretados.

INTRODUÇÃO

Desde o início dos anos 90 bastante investigação tem sido efectuada no âmbito do reforço à flexão de peças de betão armado, com utilização de materiais compósitos de fibras de carbono (CFRP) [1]. A maior parte das técnicas de reforço baseadas em sistemas de CFRP recorrem à colagem de laminados ou de mantas na face dos elementos a reforçar [2,3]. A investigação desenvolvida com estas técnicas tem revelado que a reduzida resistência à tracção e ao corte do betão do substracto estão na base de não ser possível mobilizar as elevadas resistências à tracção dos CFRP, ocorrendo, geralmente, o destacamento de uma camada do substracto (geralmente a camada de recobrimento das armaduras) ou o descolamento do CFRP. O CFRP disposto nas

faces dos elementos a reforçar tem ainda como inconveniente a necessidade de os proteger da acção do fogo, dada a sua elevada toxicidade e reduzida resistência ao fogo.

No intuito de aumentar a mobilização da capacidade resistente do CFRP, Blaschko et al.[4] e Barros et al. [5] propuseram uma nova técnica de reforço constituída pela inserção de faixas de laminados de CFRP em entalhes executados no betão de recobrimento das armaduras de elementos estruturais. Estes investigadores obtiveram resultados encorajadores em viga e laje [4], e em pilares [5]. Apesar desta técnica nova ter-se revelado promissora, a última publicação do grupo de trabalho 9.3 do CEB-FIB [1] apenas chama a atenção para a sua existência. No entanto, esta técnica apresenta algumas vantagens em relação à tradicional colagem de CFRP à superfície dos elementos estruturais, nomeadamente:

Maior resistência à ocorrência do fenómeno de peeling, dada a existência de dupla área de colagem do laminado e de este se encontrar confinado dentro do entalhe;

Maior protecção ao fogo e aos actos de vandalismo;

Redução da quantidade de CFRP a aplicar;

Redução da superfície de betão a tratar, com conseqüente redução do tempo de execução do sistema de reforço;

Neste trabalho apresenta-se um estudo experimental efectuado com vigas de betão armado, reforçadas segundo esta nova técnica. Os resultados demonstram a viabilidade e a eficácia da técnica proposta.

1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

1.1. Betão

As vigas e os provetes foram realizados com um betão com a seguinte composição [6]: 627 kg/m³ de areia (0-5mm), 1049 kg/m³ de brita (5-15mm), 400 kg/m³ de Cimento 42.5 R e 200 l de água. Este betão apresentou um slump de 40 mm e uma resistência média à compressão a idade superiores aos 28 dias, de 46.1 MPa, com um desvio padrão de 2.6 MPa e um coeficiente de variação de 5.7% [6].

1.2. Armaduras convencionais

A armadura convencional longitudinal das vigas era constituída por varões de 6 mm e 8 mm de diâmetro, sendo de 6 mm e de 3 mm o diâmetro dos estribos (ver Figura 1). Dos ensaios de tracção uniaxial constatou-se que os varões de 6 mm e 8 mm apresentaram um comportamento linear-elástico até aproximadamente 750MPa ($\phi 6$) e 500 MPa ($\phi 8$), respectivamente, seguido de comportamento com grandes deformações plásticas [7].

1.3. Laminado de CFRP

Dos ensaios de tracção uniaxial realizados por Cruz et al. [8] com provetes de laminado de CFRP de secção transversal igual a 9.59 ± 0.09 mm de largura e 1.45 ± 0.005 mm de espessura (os mesmos utilizados nas vigas da presente campanha de ensaios) verificou-se que o valor médio do módulo de Young, da resistência à tracção e da extensão última destes laminados era de 158 GPa, 2700 MPa e 17,0 %, respectivamente.

1.4. 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 (o valor da tensão de rotura é bastante influenciado pela presença de vazios na secção de fractura), sendo de aproximadamente 5 GPa o seu módulo de elasticidade [8].

2. VIGAS

As vigas foram distribuídas em quatro séries de dois exemplares, tendo cada série diferente percentagem de armadura longitudinal, ver Quadro 1 e Figura 1. Neste Quadro também se indica o cociente entre a área da secção transversal de laminado (A_L) e a área da secção transversal da armadura longitudinal convencional (A_s). Os estribos foram dimensionados para evitar a rotura por corte (Figura 1). O reforço foi dimensionado de forma a que a capacidade de carga das vigas reforçadas fosse aproximadamente dupla da correspondente viga não reforçada, resultando três sistemas de reforço compostos por um, dois ou três laminados, dependendo da percentagem de armadura longitudinal de cada série.

3. PROCEDIMENTOS DE REFORÇO

A técnica utilizada no reforço das vigas consistiu basicamente nas seguintes etapas [6]:

1. Execução de entalhes no betão de recobrimento com 3 a 4 mm de espessura por 12 mm de profundidade;
2. Limpeza dos entalhes por intermédio de jacto de ar comprimido;
3. Limpeza dos laminados de CFRP com pano humedecido com acetona;
4. Mistura do adesivo epoxídico segundo as recomendações do fabricante;
5. Aplicação do adesivo ao longo de todo o entalhe, preenchendo-o por completo, logo após a mistura do adesivo;
6. Aplicação do adesivo em toda a superfície do laminado, por intermédio de uma espátula;
7. Inserção do laminado no entalhe. Com ajuda de uma espátula procurou-se preencher todo o entalhe, evitando-se a formação de vazios e retirando-se o adesivo excedente.

Quadro 1: Características geométricas das vigas

Série	Viga	Idade (dias)	Dimensões (mm)			$\frac{A_L}{A_s}$ (%) ⁽¹⁾
			Base	Altura	Comprimento	
S1	V1	92	100	178	1592	25,2
	V1R1		100	170	1600	
S2	V2	96	100	173	1600	33,6
	V2R2		100	177	1600	
S3	V3	92	100	175	1600	26,7
	V3R2		100	175	1600	
S4	V4	103	100	175	1600	28,3

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

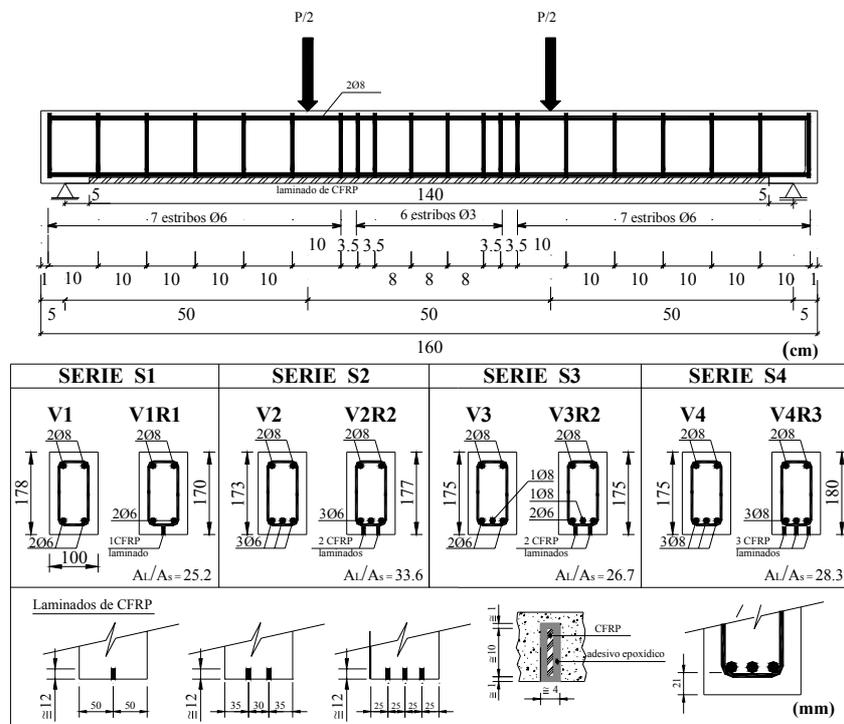


Figura 1: Geometria, armaduras e reforço das vigas

4. EQUIPAMENTO E 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*. As extensões longitudinais no *CFRP* foram registadas em três extensómetros eléctricos (Ext.1, Ext.2 e Ext.3), ver Figura 2.

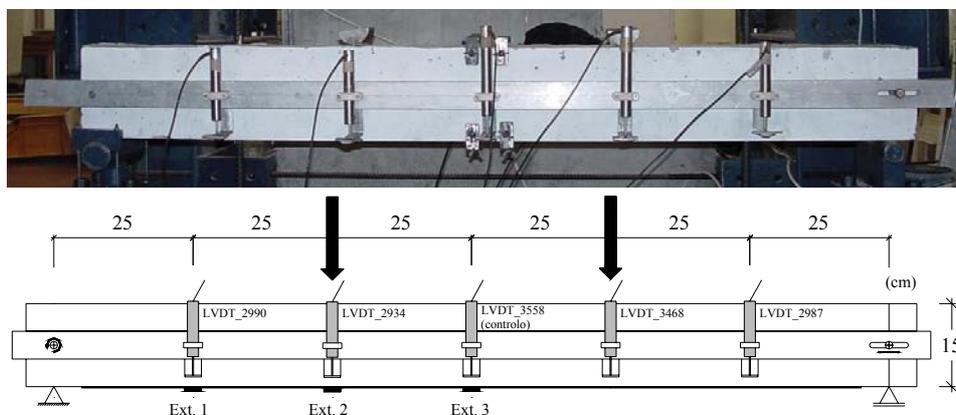


Figura 2: Disposição dos LVDTs e dos extensómetros eléctricos (Ext.1, Ext.2 e Ext.3)

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. Modos e mecanismos de rotura

Vigas de referência: Estas vigas (V1, V2, V3 e V4) apresentaram rotura dúctil com cedência da armadura longitudinal, sem ocorrência de esmagamento do betão comprimido, nem rotura por corte (ver Figura 3).

Vigas reforçadas: A ruína de todas as vigas reforçadas deu-se por rompimento do betão do banzo traccionado, ao longo de, praticamente, toda a extensão do laminado (ver Figura 3b), excepto na viga V1R1, em que se optou por interromper o ensaio quando a viga apresentava flecha elevada. Nas vigas V2R2 e V4R3 a camada de betão destacada chegou a 50 mm de espessura, e na viga V3R2 a 60 mm, tendo a armadura longitudinal ficado exposta.

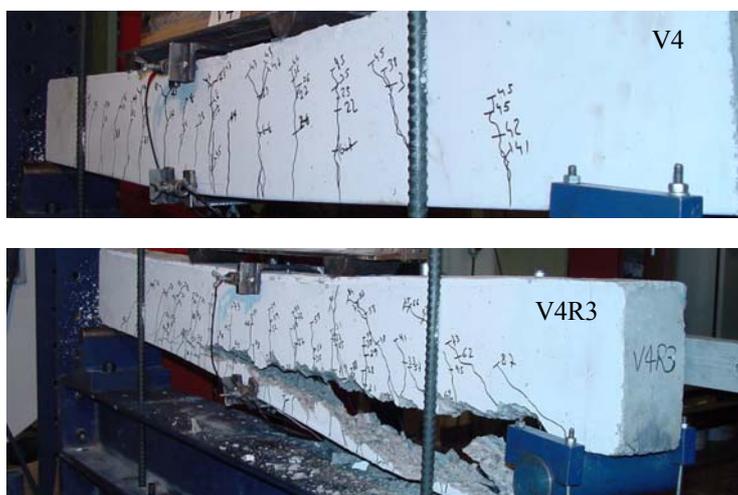


Figura 3: Modos típicos de rotura: viga de referência, V4, e correspondente viga reforçada, V4R3

Observou-se que nos vãos de corte, na face inferior das vigas reforçadas, as fendas inclinaram-se para o centro da viga (ver Figura 4).

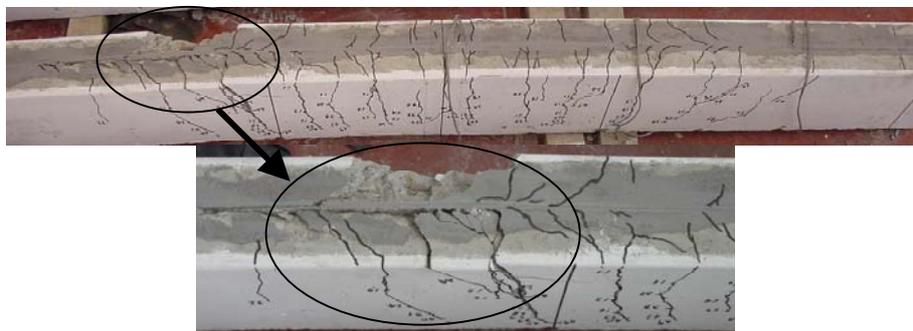


Figura 4: Face inferior da viga V1R1

Na Figura 5 representa-se um esquema que pretende justificar a inclinação das referidas fendas. Entre duas quaisquer secções, S1 e S2, do vão de corte da viga desenvolve-se um diferencial de esforço de tracção ΔF no laminado (ver Figura 5) que é equilibrado pelas tensões tangenciais τ_L que se desenvolvem na interface laminado-adesivo, aproximadamente iguais às tensões τ_c na interface adesivo-betão (ver Figura 5d). As tensões τ_c impõem deformações de corte originando micro-bielas de compressão (F_c) e de tracção (F_t). Dado que ΔF diminui da extremidade do laminado para a zona de flexão pura na viga ($\Delta F \cong 0$ na zona de flexão pura), o ângulo entre a direcção das micro-bielas de tracção e o eixo da viga diminui justificando o padrão de fendilhação observado na face inferior da viga.

O modo de rotura ocorrido indicia que as cargas de rotura das vigas reforçadas não estão relacionadas com o destacamento do reforço (peeling), mas sim com a rotura por tracção-corte do betão de uma zona próximo das armaduras convencionais de tracção. Nas vigas reforçadas, após a cedência da armadura longitudinal, o acréscimo de carga é absorvido pelos laminados de CFRP. As tensões de tracção no laminado de CFRP são transferidas para o betão do substrato por meio de tensões de corte. A resultante destas tensões de corte (ΔF - ver Figura 6) está aplicada próxima do centro geométrico da secção do laminado de CFRP, excêntrica em relação à superfície de “fraqueza” do betão, localizada junto à face inferior das armaduras longitudinais, onde há maior concentração de vazios (superfície mais frágil), pelo que a resistência do betão nesta superfície é inferior. A força ΔF introduz tensões de corte e de tracção nesta superfície (devido ao binário), que por apresentar menor resistência, a rotura, geralmente, ocorre nesta região. No entanto, a excentricidade entre o ponto de aplicação de ΔF e esta superfície é menor do que no caso da técnica tradicional de laminados colados sobre a superfície do betão, sendo este um dos motivos que torna mais eficiente a presente técnica de reforço.

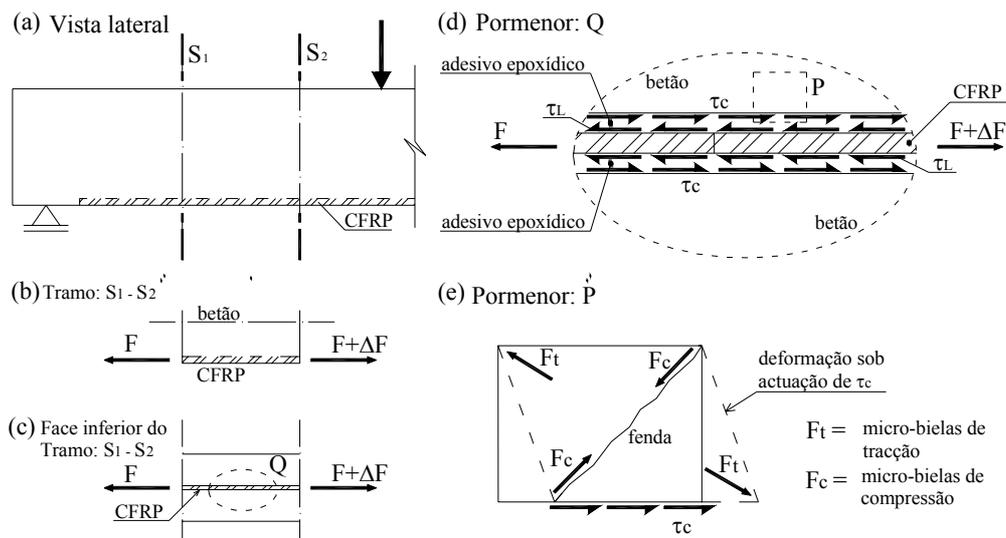


Figura 5: Mecanismo justificativo da orientação das fendas do vão de corte, na face inferior das vigas reforçadas.

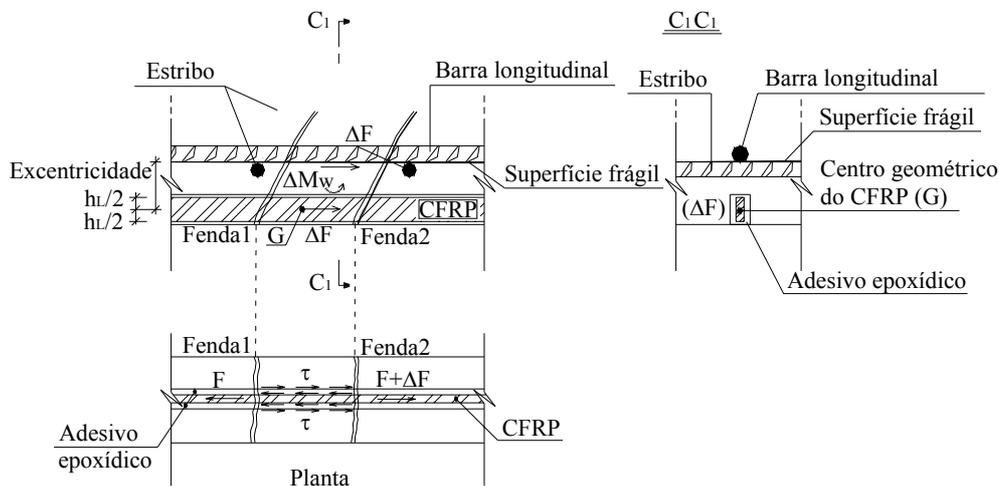


Figura 6: Mecanismo de transferência de esforços

5.2. Cargas de rotura e de serviço

Adoptando-se para carga de serviço o valor correspondente ao deslocamento de 3,75 mm - vão/400 - conforme recomenda o REBAPE, verificou-se que o acréscimo de carga para Estados Limites de Serviço, ELS, das vigas reforçadas não foi tão significativo quanto o obtido na rotura, tendo-se alcançado o valor máximo de 45% da respectiva viga de referência (ver Quadro 2 e Figura 7). Comparando com resultados obtidos por outros autores [2, 9] verifica-se que a técnica descrita no presente trabalho permite um acréscimo ligeiramente superior de carga em serviço. A carga de rotura foi aproximadamente dupla da correspondente viga de referência, pelo que o sistema de reforço funcionou como o assumido no dimensionamento.

Quadro 2: Valores das cargas de rotura e de serviço, obtidos experimentalmente, nas vigas ensaiadas

Série	Viga	P_u (exp.) (kN)	$\frac{P_u(VR)^{(1)}}{P_u(V)}$	$P_{serv.}$ (exp.) (kN)	$\frac{P_{serv.}(VR)^{(1)}}{P_{serv.}(V)}$
S1	V1	28.2	1.78	18.6	1.22
	V1R1	50.3 ⁽²⁾		22.7	
S2	V2	41.0	1.91	21.7	1.45
	V2R2	78.5		31.4	
S3	V3	41.3	1.98	23.8	1.38
	V3R2	81.9		32.8	
S4	V4	48.5	1.96	32.3	1.25
	V4R3	94.9		40.4	

⁽¹⁾ VR - viga reforçada; V - viga sem reforço, utilizada como referência.

⁽²⁾ Ensaio interrompido aos 50,3 kN, devido à elevada deformação da viga.

5.3. Extensões nos laminados

As extensões máximas alcançadas estão apresentadas no Quadro 3, enquanto que a Figura 7 mostra o nível de extensões nos laminados durante o carregamento, verificando-se que a extensão máxima varia de 62% a 91% da extensão de rotura do laminado.

Quadro 3: Extensões máximas nos laminados obtidas experimentalmente

SÉRIE	VIGA	ϵ_L (‰) (Ext.3)
S1	V1R1	15,5
S2	V2R2	12,8
S3	V3R2	12,8
S4	V4R3	10,6

Ao longo do carregamento os extensómetros Ext.2 e Ext. 3 apresentam valores próximos (zona de flexão pura), os valores menores foram registados no extensómetro Ext.1, posicionado a meio do vão de corte, e as extensões mais elevadas foram registadas no extensómetro Ext.3, posicionado a meio vão da viga. Nas Figuras 7 e 8 estão assinalados pontos representativos do início da fendilhação, da cedência das armaduras convencionais e do escorregamento dos laminados. Estes pontos localizam-se em momentos de variação acentuada da evolução das extensões nos laminados, delimitando três tramos aproximadamente rectilíneos, representativos das três fases em que a viga apresenta diferença significativa de rigidez (1ª fase - não fendilhada; 2ª fase - fendilhada com armadura em regime elástico; 3ª fase - fendilhada com armadura em regime quase plástico). Como seria de esperar, o acréscimo de extensão aumenta desde o 1º até ao 3º tramo, dada a diminuição de rigidez da viga com o evoluir do carregamento. A partir do momento em que na viga se regista flecha significativa sob marginal incremento de carga, observa-se um aumento considerável de extensão no Ext.1, consequência do deslizamento do laminado.

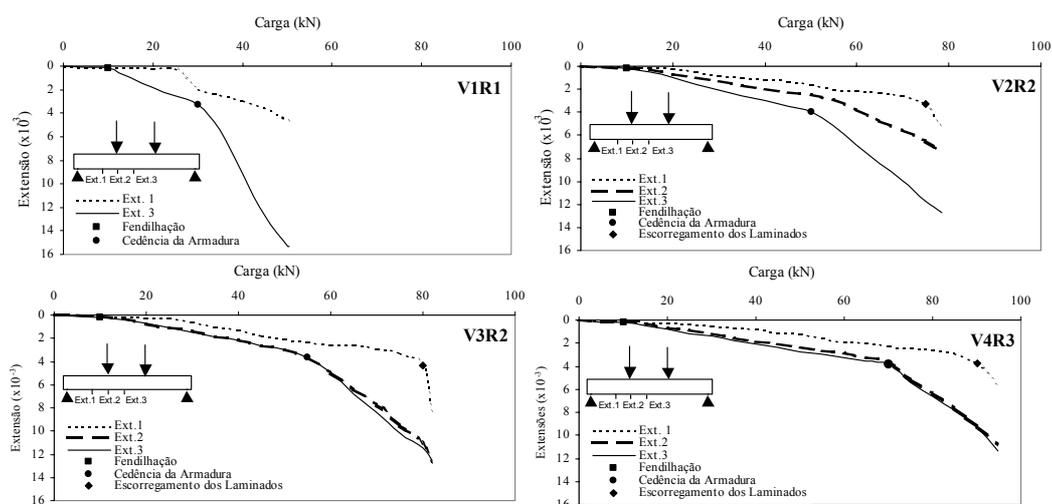


Figura 7: Evolução das extensões nos laminados

5.4.Deslocamentos verticais

Os diagramas de carga vs. deslocamento a meio vão estão representados na Figura 7.

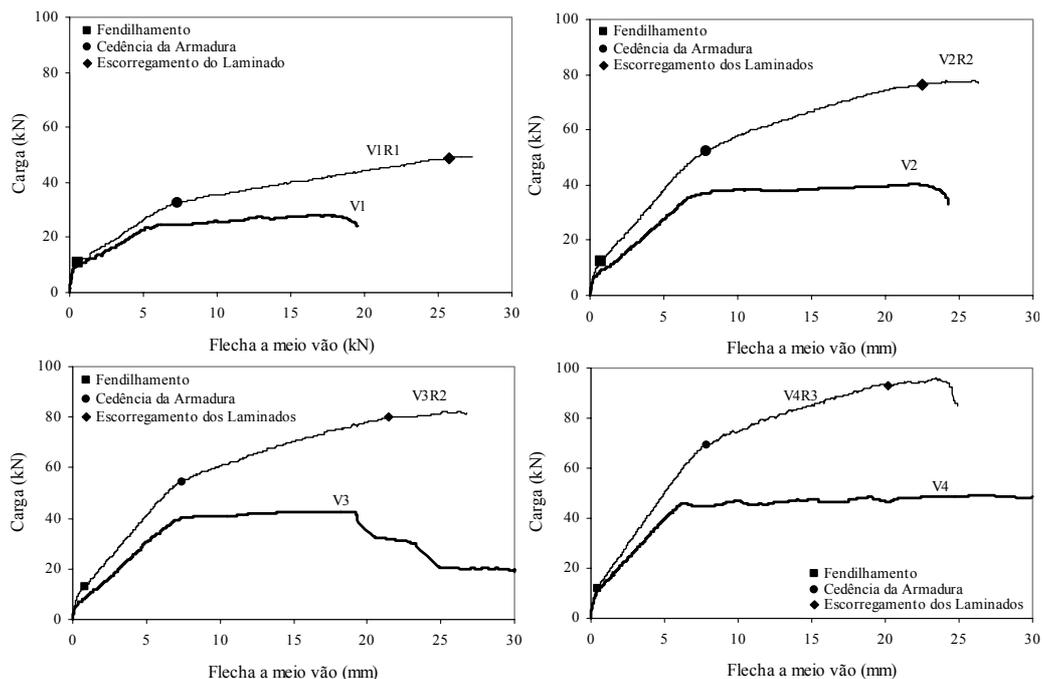


Figura 8: Diagramas carga vs. flecha das vigas

Através da comparação entre as deformadas das vigas de referência e reforçadas, obtidas experimentalmente, avaliou-se o acréscimo de rigidez para os dois níveis de carga seguintes [6]:

- 90 % do valor da carga de rotura da viga de referência;
- Carga de serviço da viga reforçada (flecha/400).

O acréscimo médio de rigidez para o nível de carga correspondente à carga de serviço da viga reforçada foi de aproximadamente 39%. Esse acréscimo foi de 47% para um nível de carga correspondente a 90% da carga última da viga de referência. Desta forma verifica-se que o sistema de reforço proposto no presente trabalho, não somente é eficaz em termos de aumento da capacidade de carga última, como também em termos de rigidez para acções correspondentes a estados limites de serviço.

7. CONCLUSÕES

A técnica de reforço utilizada apresenta algumas vantagens em relação às técnicas tradicionais, entre elas: maior resistência à ocorrência do fenómeno de peeling, maior protecção ao fogo e aos actos de vandalismo, redução da quantidade de CFRP a aplicar, redução da superfície de betão a tratar e redução do tempo de execução do sistema de reforço.

As vigas reforçadas romperam pelo betão do banzo traccionado, quando nos laminados se registavam extensões próximas da correspondente à rotura do laminado, revelador da elevada mobilização da capacidade de reforço destes materiais compósitos. A carga de rotura das vigas foi de aproximadamente o dobro das correspondentes vigas de referência, pelo que a técnica de reforço assegurou os objectivos estabelecidos no dimensionamento do reforço. A rotura foi alcançada para níveis de deformação elevados, pelo que a ductilidade foi assegurada. A presente técnica permitiu um acréscimo de carga de serviço ligeiramente superior à registada em outras técnicas de reforço, e um acréscimo significativo de rigidez para níveis de carga correspondente à carga de serviço da viga reforçada e para 90% da carga última da viga de referência.

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 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] 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.
- [3] Dias, S.J.E. - *Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*. Tese de Mestrado, Dep. Engª Civil, FEUP, 2001.
- [4] Blaschko M., Zilch K., - *Rehabilitation of Concrete Structures with CFRP Strips Glued into Slits* 12ª International Conference on Composite Materials, Paris, 1999.
- [5] 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.
- [6] – 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.
- [7] – 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.
- [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] Fortes, A. S. - *Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Fibras de Carbono*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2000.