

Laminados de CFRP pré-tensionados para o reforço à flexão de vigas de betão armado



Joaquim Barros¹



Alexandre Gomes²

RESUMO

No presente trabalho explora-se o desempenho de uma nova estratégia de reforço à flexão com laminados de fibras de carbono aplicados sob determinada pré-tensão e segundo a técnica NSM (“Near Surface Mounted”). Para tal foi necessário encontrar e caracterizar as propriedades de um adesivo de cura rápida que permitisse transferir a pré-tensão do laminado para o betão envolvente no mais curto período de tempo possível. O programa experimental que se apresenta neste trabalho é exploratório, pretendendo evidenciar as vantagens e potencialidades desta técnica. O programa é descrito e os resultados são apresentados e analisados.

PALAVRAS-CHAVE

Reforço à flexão, Laminados, CFRP, pré-tensão

¹ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

² Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. alexandre@civil.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

Desde finais do século passado que a técnica, designada na bibliografia Inglesa por “Near Surface Mounted”, e conhecida pela sigla NSM, tem vindo a ser investigada no reforço à flexão de vigas [1-3], lajes [4, 5] e pilares [6, 7], no reforço ao corte de vigas [8-10], e utilizada no reforço de estruturas de betão armado [11, 12]. A NSM baseia-se na instalação de laminados ou varões de matriz polimérica reforçada com fibras (FRP – *Fiber reinforced polymers*) no interior de ranhuras abertas no betão de recobrimento das peças a reforçar. Estes elementos de reforço são fixos ao betão por intermédio de um adesivo, geralmente de base epoxi.

Apesar de se revelar mais eficiente e mais rápida de executar que a técnica baseada na colagem exterior de FRPs [9, 13], a investigação experimental com vigas com rotura por flexão tem evidenciado que o acréscimo em termos de capacidade de carga proporcionado pela aplicação de laminados passivos (sem qualquer nível de pré-tensão) de fibra de carbono (CFRP) até ao início da cedência das armaduras longitudinais de tracção não é muito significativo, principalmente quando a percentagem de armadura longitudinal é superior à mínima. Isto significa que, em geral, o nível de tensão no FRP no momento de início de cedência da armadura longitudinal é bastante inferior à resistência à tracção destes materiais, pelo que o potencial de reforço que os FRP têm não é devidamente mobilizado.

Uma das possíveis formas de aumentar o nível de mobilização dos FRP é recorrer a uma estratégia que passa pela aplicação de um certo nível de pré-tensão nos laminados. Diferentes sistemas têm sido propostos mas, em geral, o tempo que requerem para a sua execução é relativamente elevado, e exigem o recurso a equipamentos muito sofisticados e de custo elevado de operacionalidade [14-17].

No presente trabalho uma técnica de reforço para o NSM, de mais simples e rápida execução é proposta, sendo a sua eficácia avaliada por intermédio de um programa experimental constituído pela execução de ensaios em três vigas.

2. CONCEITO DE PRÉ-TENSÃO EM LAMINADOS DE FRP

Na Figura 1 é descrito, de forma esquemática, o conceito subjacente à técnica de aplicação de laminados de CFRP pré-tensionados para o reforço à flexão de vigas de betão armado. Nas zonas de ancoragem do laminado, o betão de recobrimento é removido (Fig. 1a) para instalação da peça de alojamento do par de cunhas para fixação das extremidades dos laminados (Fig. 1c e 1d). É sobre esta peça que actuará o sistema de aplicação de pré-tensão no laminado (Figs. 1f e 1g). No betão de recobrimento são efectuadas as ranhuras longitudinais para instalação dos laminados (Fig. 1b). De forma a evitar a ocorrência de um gradiente de tensões nas extremidades das ranhuras, aquando da libertação dos laminados pré-tensionados, a ranhura deverá ter largura variável, dado que, devido ao relativo baixo módulo de deformabilidade do adesivo, a deformabilidade elástica deste assegurará uma suave transferência de tensões do laminado para o betão envolvente. Um par de escoras é utilizado temporariamente para manter o sistema de ancoragem no devido lugar (Fig. 1e). O sistema de aplicação de pré-tensão no laminado de CFRP é constituído por um actuador e uma estrutura tubular (Figs. 1f e 1g). O actuador é apoiado num elemento (perfil metálico, p.ex.), transferindo, por intermédio de dois perfis tubulares, a carga pretendida para a peça de fixação das extremidades do laminado. Devido ao princípio de acção-reacção, o elemento de suporte do actuador transfere a carga para o pavimento inferior. Dado que o laminado de CFRP incorpora um sensor de fibra óptica, o nível de tensão aplicado ao laminado pode ser devidamente controlado. Após a aplicação do nível de pré-tensão desejado, as ranhuras são preenchidas por um adesivo de cura rápida. Após o período de cura do adesivo, a força aplicada pelo actuador deve ser diminuída gradualmente, de forma a evitar a ocorrência de elevados gradientes de tensão no processo de transferência de tensões do laminado para o meio envolvente.

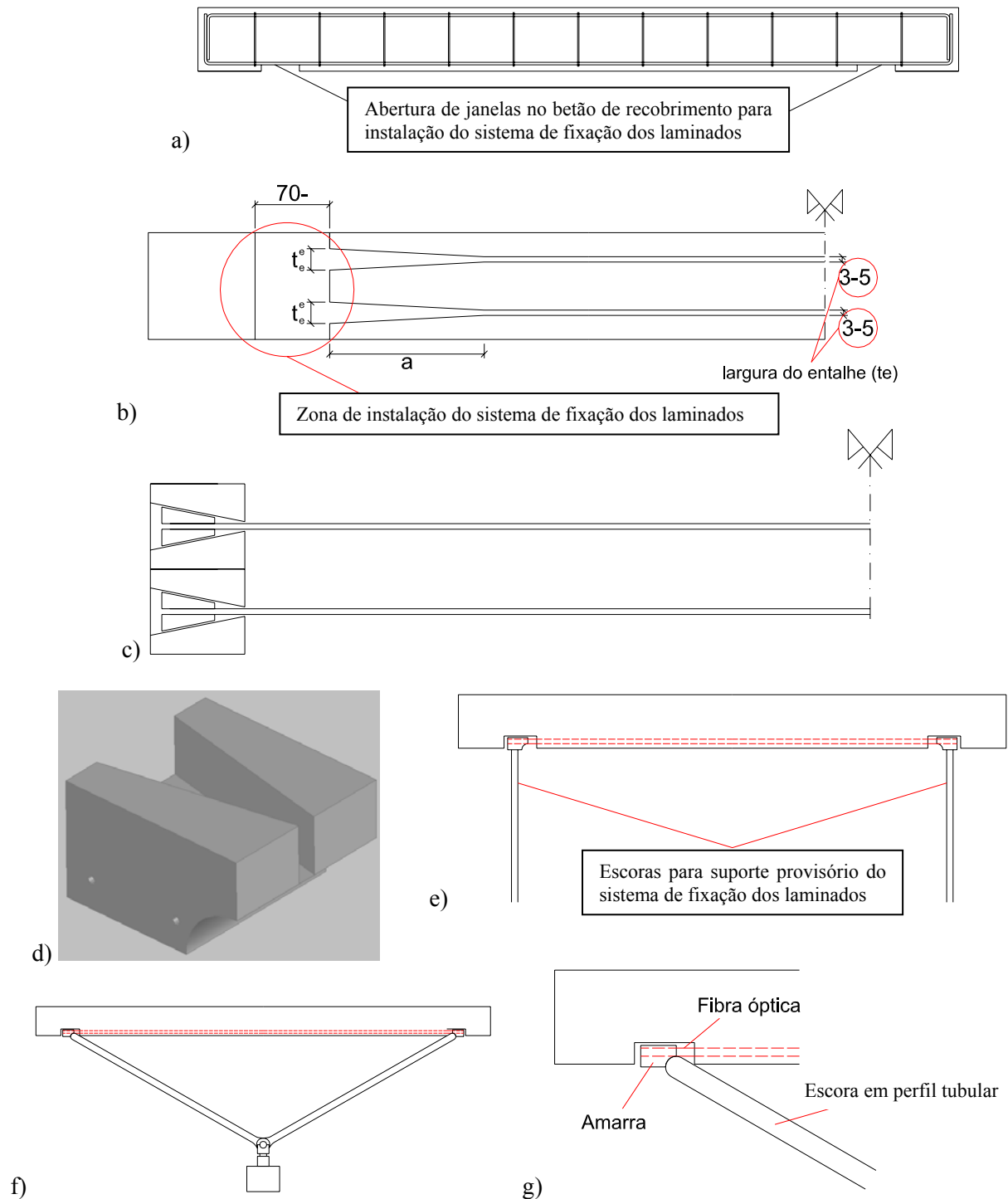


Figura 1. Técnica de aplicação de pré-tensão em laminados de CFRP

3. SÉRIE DE VIGAS

O programa experimental preliminar foi constituído pelas três vigas de betão armado, cujas principais características se encontram descritas no Quadro 1. A secção transversal das vigas tinha 120 mm de largura e 200 mm de altura, tendo a armadura longitudinal inferior um recobrimento de 25 mm. A viga V00 é de referência, pelo que apenas se encontra armada com $2\Phi 12$ na face inferior (de tracção) e $2\Phi 12$ na face superior, com estribos $\Phi 8$ afastados a 100 mm. As vigas VLP e VRC20, para além destas armaduras, dispõem de um laminado de CFRP com $10 \times 1.2 \text{ mm}^2$ de área de secção transversal. Na VLP o laminado é aplicado sem qualquer nível de pré-tensão, enquanto na VRC20 o laminado foi aplicado com um nível de pré-tensão próximo dos 20% da resistência à tracção do laminado.

Quadro 1. Resumo das características das vigas em estudo

Viga	Reforço	CFRP	Pré-Tensão
V00	4Φ12 + Φ8//100	-	-
VLP	4Φ12 + Φ8//100	10×1.2 mm ²	0 %
VRC20	4Φ12 + Φ8//100	10×1.2 mm ²	20 %

4. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

1. 4.1 BETÃO E ARMADURAS

Para avaliar a resistência do betão utilizado no fabrico das vigas, oito cubos de 150 mm de aresta foram ensaiados aos 28 dias de idade, tendo-se obtido uma resistência média de 37.5 MPa com um desvio padrão de 7.2 MPa.

O aço dos varões das armaduras é da classe A500 NR.

2. 4.2 ADESIVO E LAMINADOS DE CFRP

Após procura exaustiva no mercado de um adesivo de cura rápida, seleccionou-se o “concrecive 4000” da BASF pois, segundo a documentação técnica disponível, era o que exigia menor tempo de cura e, aparentemente, com propriedades materiais apropriadas para ligar materiais compósitos a materiais de matriz cimentícia. Este adesivo é correntemente utilizado para ancorar elementos metálicos, tais como chumbadouros na ligação pilar-fundação.

Para avaliar a resistência à tracção, f_{fa} , e o módulo de elasticidade (secante), E_a , deste adesivo foram preparados cinco provetes com a geometria indicada na Figura 2. A espessura dos provetes era de 4 mm, similar à espessura que a camada de adesivo terá quando aplicado na ranhura da viga (a ranhura ficou com uma largura de aproximadamente 10 mm, tendo o laminado de CFRP uma espessura de 1.4 mm).

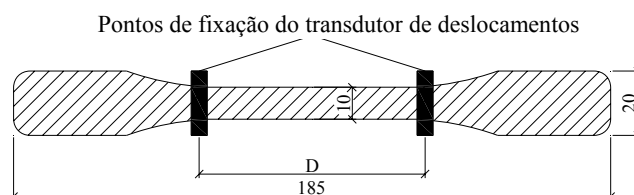


Figura 2 – Geometria dos provetes de adesivo (dimensões em mm)

Para avaliar a influência do tempo de cura do adesivo na evolução de f_{fa} e E_a foram efectuados ensaios com tempos de cura (T_c) de 2, 4, 5, 6 e 24 horas. Para medir a deformabilidade do provete foi instalado um transdutor de deslocamento (ver Figura 2), cujo valor médio do campo de medida, D , foi 77.2 mm. Os resultados obtidos estão resumidos no Quadro 2, de onde se constata que às 4 horas o adesivo apresentava uma resistência à tracção e um módulo de elasticidade cerca de 95% e 87% dos valores registados às 24 horas, cujo período de cura parece ser suficiente para alcançar a quase plenitude das propriedades em estudo do adesivo.

Segundo o fabricante (S&P), os laminados de CFRP, com secção transversal de 10×1.4 mm², têm um módulo de elasticidade cerca de 160 GPa e uma resistência à tracção superior a 2500 MPa. Estes ensaios, bem como os dos varões de aço ainda se encontram em execução.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios de tracção uniaxial com provetes de adesivo

Proвете	Tempo de cura, T_c (horas)	f_{ja} (MPa)	E_a (GPa)
PR2	2	18.407	1.708
PR4	4	21.330	2.422
PR5	5	20.921	2.987
PR6	6	21.420	2.407
PR24	24	22.400	2.776

5. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO

As vigas, com 2 m de vão e 1.8 m de distância entre apoios, foram ensaiadas à flexão sob quatro pontos de carga, sendo a distância entre os dois pontos de carga centrais de 0.6 m (Figura 3). O vão de corte (a/d , em que d é a altura útil da secção transversal da viga e a a distância entre o ponto de reacção e o ponto de aplicação de carga mais próximo) é de 3.7, pelo que o modo de rotura expectável para as vigas era de flexão. Na Figura 4 é mostrado o sistema de ensaio utilizado.

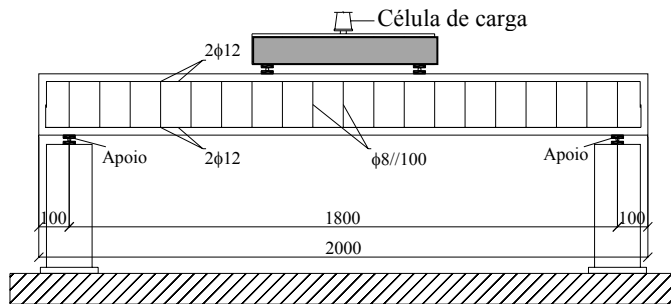


Figura 3. Esquema do dispositivo de ensaio (mm)



Figura 4. Dispositivo de ensaio

Para registar as extensões no laminado e a deformabilidade da viga foram instalados extensómetros eléctricos e colocados transdutores de deslocamentos (LVDTs) segundo o arranjo indicado na Figura 5. Foram também colocados sensores de fibra óptica nos laminados. No entanto, durante as operações de aplicação da pré-tensão nos laminados, o fio de extremidade dos sensores rompeu, pelo que se perderam os registos destes sensores.

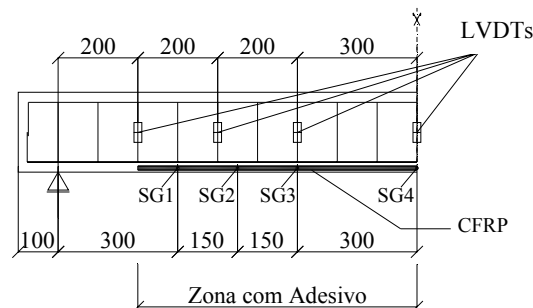


Figura 5. Posição dos transdutores de deslocamentos (LVDTs) e dos extensómetros (dimensões em mm).

6. RESULTADOS E ANÁLISE

6.1 Viga V00

A resposta força-flecha da viga de referência V00 encontra-se na Figura 6, tendo a viga apresentado modo de rotura por flexão (Figura 7). Próximo dos 10 kN inicia-se a fendilhação do betão e por volta dos 45 kN as armaduras longitudinais de tracção entram em cedência, tendo a viga acabado por romper com esmagamento do betão, acompanhado da rotura de um dos varões longitudinais que atravessam a fenda de flexão que apresentou maior abertura.

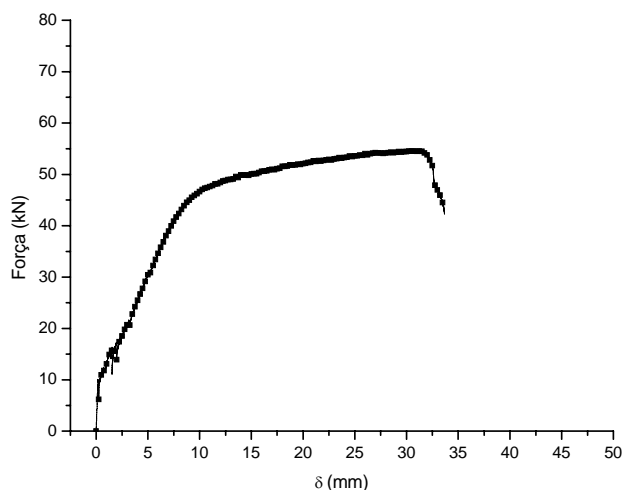


Figura 6. Relação força-flecha da viga V00



Figura 7. Modo de rotura da viga V00

6.2 Viga VLP

A relação força-flecha e a relação força-extensões no laminado passivo da viga VLP encontram-se nas figuras 8 e 9. Nesta viga o laminado de CFRP foi aplicado sem ter sido introduzido qualquer nível de pré-tensão. O entalhe de alojamento do laminado tinha 15 mm de profundidade e 10 mm de largura. Tal como na viga V00, na viga VLP o início da fendilhação do betão ocorreu por volta dos 10 kN, mas a carga de início da cedência da armadura longitudinal aumentou para cerca de 65 kN, tendo a viga atingido uma carga máxima cerca de 77 kN. Na Figura 9 constata-se que as extensões na zona de “flexão pura” da viga variaram entre 7.5‰ e 9‰, que é cerca de 43% a 51% da extensão última prevista para este laminado [4]. Na Figura 10 verifica-se que a viga VLP rompeu por flexão, com esmagamento do betão na zona entre pontos de carga. No momento em que o ensaio foi interrompido, devido a se ter alcançado o limite do campo de medida do LVDT, verificou-se não ter ocorrido qualquer dos modos de rotura prematuros (destacamento do betão de recobrimento; destacamento do laminado) reportados em trabalhos de investigação experimental relacionados com o reforço à flexão de vigas com laminados de CFRP aplicados segundo a técnica NSM [1, 2, 9].

6.3 Viga VRC20

A viga VRC20 foi reforçada com um laminado inserido numa ranhura de secção transversal igual à efectuada na viga VLP. Utilizando um actuador hidráulico foi aplicado um nível de pré-tensão no laminado correspondente, em termos médios, a cerca de 20% da tensão de rotura do laminado. De facto, tal como indicado no Quadro 3, as extensões lidas nos extensómetros eléctricos no momento de aplicação da pré-tensão variaram entre 3.2‰ e 3.6‰, a que corresponde o valor médio de 3.4‰. A carga aplicada pelo actuador foi mantida durante 4 horas (tempo de cura admitido suficiente para o adesivo), período após o qual o laminado foi libertado, sendo transferida a força para o meio envolvente ao laminado. O ensaio da viga VRC20 foi executado 7 dias após a aplicação da pré-tensão. Os valores da última linha do Quadro 3 correspondem às leituras dos extensómetros no instante

anterior ao início do ensaio, de onde se pode concluir que as perdas de pré-tensão foram, em média, de aproximadamente 10%.

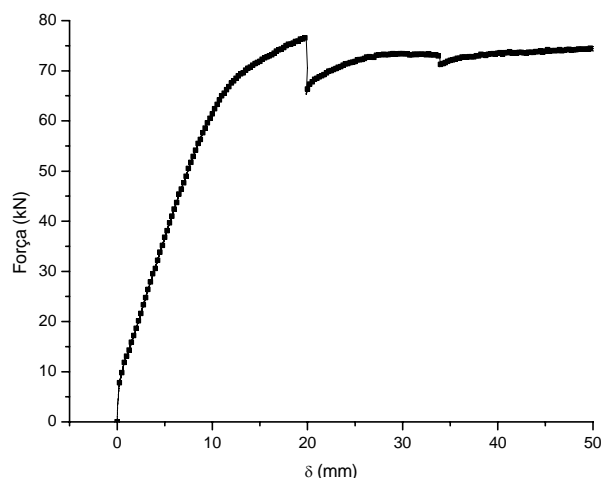


Figura 8. Relação força-flecha da viga VLP

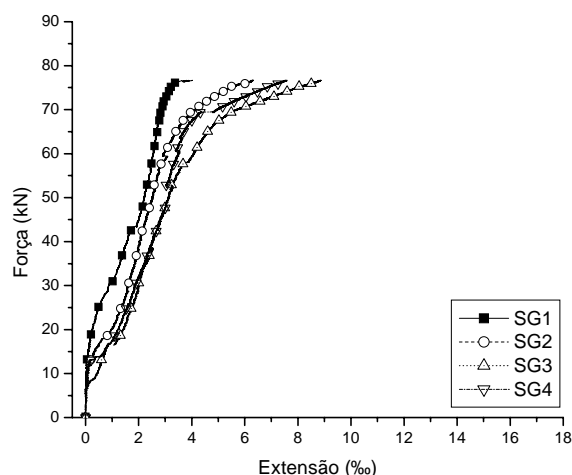


Figura 9. Curvas força-extensões no laminado da viga VLP

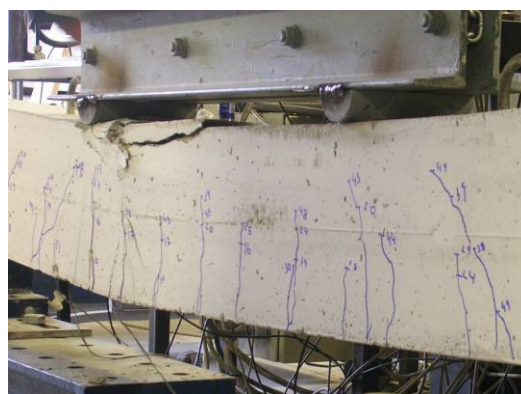


Figura 10. Modo de rotura da viga VLP.

Quadro 3. Extensões registadas no laminado na aplicação da pré-tensão e antes da execução do ensaio

Ocorrência	SG1 (‰)	SG2 (‰)	SG3 (‰)	SG4 (‰)	Média (‰)
Aplicação da pré-tensão	3.552	3.227	3.372	3.507	3.414
Início do ensaio	3.384	3.160	2.757	2.935	3.060

A relação força-flecha e a relação força-extensões no laminado pré-tensionado da viga VRC20 encontram-se nas figuras 11 e 12. Constatou-se que a aplicação da pré-tensão aumentou a carga de início da fendilhação do betão, a carga de início da cedência das armaduras longitudinais, bem como a capacidade de carga da viga. Em termos de extensões constata-se que os extensómetros colocados na zona de “flexão pura” registaram um acréscimo médio de cerca de 4.0‰ durante o carregamento da viga, valor inferior ao expectável (próximo de 8.0‰), muito provavelmente devido à introdução de dano durante a libertação do laminado, a qual se processou de forma instantâneo, devido às características técnicas do actuador utilizado.

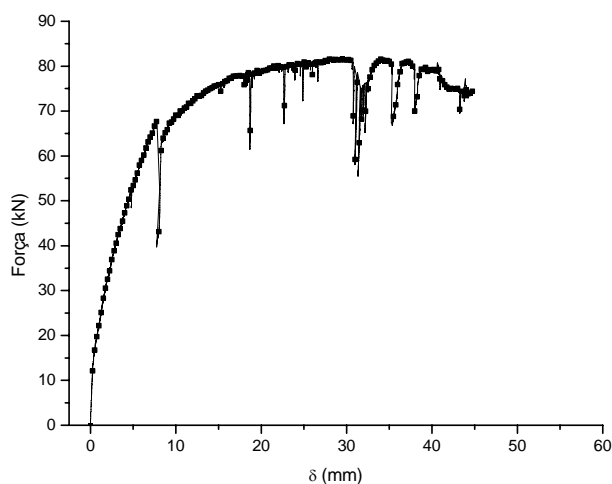


Figura 11. Relação força-flecha da viga VRC20

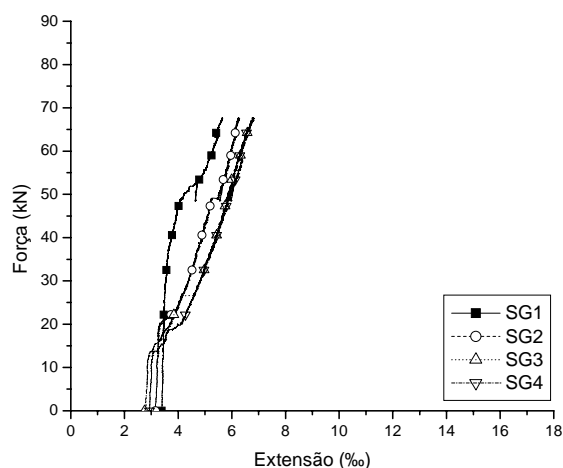


Figura 12. Curvas força-extensões no laminado da viga VRC20

Na Figura 13 verifica-se que a viga VRC20 rompeu por flexão, com esmagamento do betão num dos pontos de aplicação de carga. Tal como na viga VLP, até ao limite do campo de medida do LVDT (50 mm), não ocorreu qualquer modo de rotura prematuro associado à técnica NSM, demonstrando que, para o reforço à flexão e para vigas (ou lajes) com percentagens de armadura longitudinal iguais ou inferior a 1%, a presente técnica assegura a não ocorrência de roturas prematuras até níveis avançados da plastificação da armadura longitudinal.

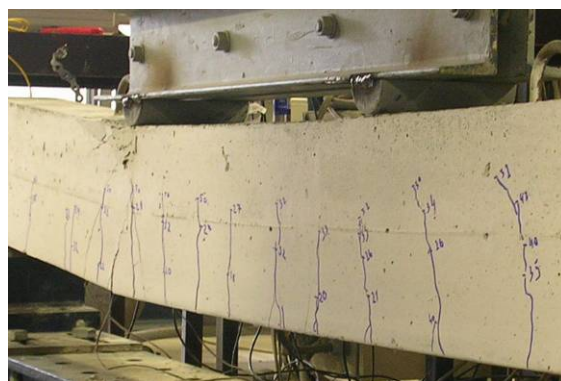
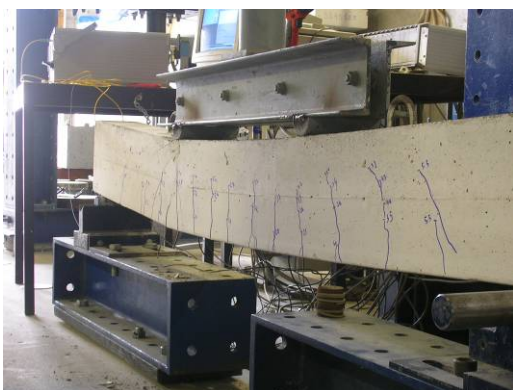


Figura 13. Modo de rotura da viga VRC20.

No Quadro 4 comparam-se os principais resultados registados nas três vigas ensaiadas. Verifica-se que a aplicação de um nível de pré-tensão de 20% no laminado permitiu aumentar a carga de início de fendilhação e a carga máxima em cerca de 36% e 50%, respectivamente (tendo por base os correspondentes valores obtidos na viga de referência V00). Se a base de comparação for a carga máxima registada na viga reforçada com um laminado passivo, viga VLP, verifica-se que o aumento proporcionado pela técnica de pré-tensão foi apenas de cerca de 10%. No entanto, as Figuras 14 e 15 revelam que o aumento relativo de capacidade de carga até à flecha correspondente às verificações para estado limite de utilização ($L/400 = 4.5$ mm) ultrapassou os 100% na viga VRC20, enquanto na viga VLP não excedeu os 25%. É notável que para uma flecha próxima do dobro da correspondente à verificação de estados limites de utilização, o aumento de capacidade de carga proporcionado pela pré-tensão tenha sido próximo de 60%, enquanto na viga VLP esse aumento tenha sido de 25%.

No que respeita à flecha correspondente à carga máxima constata-se que a aplicação de um laminado passivo diminui essa flecha em cerca de 35%, enquanto a aplicação da pré-tensão conduziu a uma

diminuição de apenas 5.5%. No entanto, é de relembrar que todas as vigas apresentarem modo de rotura dúctil por flexão.

Quadro 4. Resumo dos resultados obtidos

Viga	F_{cr} (kN)	$\frac{F_{cr}^{Ref} - F_{cr}^{V00}}{F_{cr}^{V00}} \times 100$ ⁽¹⁾	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$\frac{F_{m\acute{a}x}^{Ref} - F_{m\acute{a}x}^{V00}}{F_{m\acute{a}x}^{V00}} \times 100$ ⁽²⁾	$\delta_{F_{m\acute{a}x}}$ (mm)	$\frac{\delta_{F_{m\acute{a}x}}^{Ref} - \delta_{F_{m\acute{a}x}}^{V00}}{\delta_{F_{m\acute{a}x}}^{V00}} \times 100$ ⁽³⁾
V00	10.07	-	54.72	-	30.475	-
VLP	11.50	14.2	76.72	40.2	19.859	-34.8
VRC20	13.72	36.2	81.80	49.5	28.804	-5.5

⁽¹⁾ F_{cr}^{Ref} : carga de início da fendilhação das vigas reforçadas;

⁽²⁾ $F_{m\acute{a}x}^{Ref}$: carga máxima das vigas reforçadas;

⁽³⁾ $\delta_{F_{m\acute{a}x}}^{Ref}$: flecha correspondente à carga máxima das vigas reforçadas;

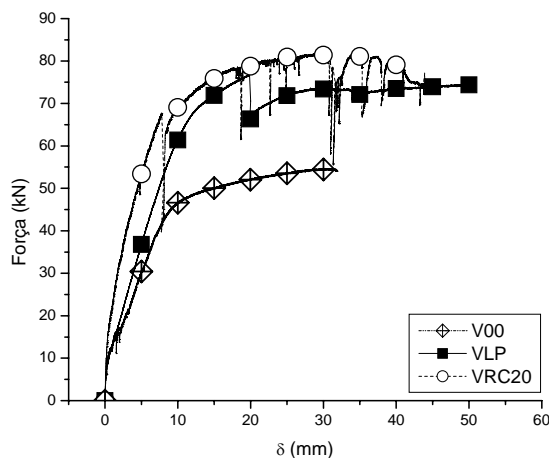


Figura 14. Curvas força-flecha das vigas ensaiadas.

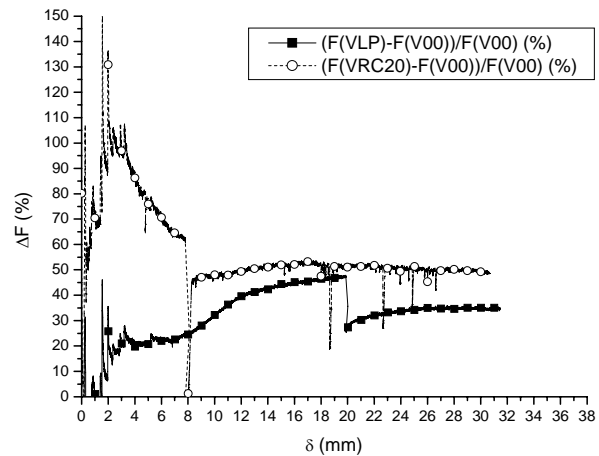


Figura 15. Curvas relacionando o incremento de carga e a flecha, tendo por base de comparação a capacidade de carga da viga V00.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma nova estratégia para aplicação de laminados de CFRP sob determinado nível de pré-tensão, segundo a técnica NSM. O potencial de reforço desta técnica foi avaliado por intermédio da execução de um programa preliminar de ensaios constituído por três vigas, uma de referência, outra reforçada com laminado passivo e a terceira reforçada com laminado pré-tensionado a 20% da sua tensão de rotura. Em simultâneo, foram determinadas as propriedades relevantes de um adesivo de cura rápida que permite a transferência da força do actuador para o laminado ao final de 4 horas. No entanto, a transferência desta força deve ser suave e gradual, o que não aconteceu na viga pré-tensionada do presente trabalho, o que introduziu algum dano no adesivo, em virtude da brusca transferência de carga, tendo penalizado o aumento de capacidade de carga expectável para esta viga. Mesmo assim, tendo por base os resultados da viga de referência, a aplicação de 20% de pré-tensão no laminado permitiu um aumento de 36% na carga de início de fendilhação, um aumento de 50% na capacidade de carga da viga e, mais relevante, um aumento superior a 80% na capacidade de carga da viga até à flecha de $L/400=4.5$ mm. É também notável o facto da flecha correspondente à carga máxima ter apenas diminuído em cerca de 5% pela acção da pré-tensão.

AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem o apoio concedido ao abrigo do projecto “SmartReinforcement – Carbon fibre laminates for the strengthening and monitoring of reinforced concrete structures”, ADI-IDEIA, projecto nº 13-05-04-FDR-00031, bem como os materiais fornecidos pela S&P, BASF e Quimidois, bem como a valiosa colaboração da Maprel no fabrico das vigas e na aplicação da pré-tensão nos laminados. O segundo Autor agradece a bolsa concedida ao abrigo deste projecto.

REFERENCIAS

- [1] Kotynia, R. - Analysis of reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted FRP reinforcement. *Archives of Civil Engineering*, LII 2, 305-317, 2006.
- [2] Barros, J.A.O., Fortes, A.S. - Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Journal Cement and Concrete Composites*, 27(4) p. 471-480, 2005.
- [3] El-Hacha, R., and Rizkalla, S.H. - Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. *ACI Structural Journal*, 101(5), 717-726, 2004.
- [4] Bonaldo, E.; Barros, J.A.O., Lourenço, P.J.B. - Efficient strengthening technique to increase the flexural resistance of existing RC slabs. *Journal of Composites for Construction* 12(2), 149-159, March/April 2008.
- [5] Liu, I. S. T., Oehlers, D. J., and Seracino, R. - Tests on the ductility of reinforced concrete beams retrofitted with FRP and steel near-surface mounted plates, *Journal of Composites for Construction*, 10(2), 2006.
- [6] Barros, J.A.O.; Perrone, M.; Aprile, A. - Confinement of RC columns submitted to axial and cyclic lateral loading. *Challenges for Civil Construction International Conference (CCC2008)*, Porto, Portugal, 16-18 April 2008.
- [7] Barros, J.A.O.; Ferreira, D.R.S.M.; Fortes, A.S., Dias, S.J.E. - Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening. *Construction and Building Materials Journal*, Vol. 20, pp. 478-491, 2006.
- [8] Dias, S.J.E.; Barros, J.A.O. - Shear strengthening of T cross section reinforced concrete beams by near surface mounted technique. *Journal Composites for Construction*, 12(3), 300-311, Maio/Junho, 2008.
- [9] Barros, J.A.O.; Dias, S.J.E.; Lima, J.L.T. - Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. *Journal Cement and Concrete Composites*, 29(3), 203-217, March 2007.
- [10] Barros, J.A.O.; Dias, S.J.E. - Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams. *Journal Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, N. 3, pp. 276-292, March 2006.
- [11] Nanni, A., Di Ludovico, M., and Parretti, R. - Shear strengthening of a PC bridge girder with NSM CFRP rectangular bars. *Advances in Structural Engineering*, 7(4), 97-109, 2004.
- [12] Blaschko, M., and Zilch, K. - Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits. *Proc. of ICCM 12 conference*, 1-7, Paris, France, 1999.
- [13] Dias, S.J.E.; Barros, J.A.O. - Behaviour of RC beams shear strengthening with NSM CFRP laminates. *Challenges for Civil Construction International Conference (CCC2008)*, Porto, Portugal, 16-18 April 2008.
- [14] Nordin, H., Carolin, A., and Täljsten, B. - Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted reinforcement (NSMR). *Proc. of CICE 2001 Conference*, 1067-1075, Hong Kong, 2001.
- [15] A. Gaafar, M. and El-Hacha, R. - Prestressing Concrete Beams using NSM FRP Technique. *FRPRCS-8 University of Patras, Patras, Greece, July 16-18, 2007*
- [16] Jung, Woo-Tai and Park, Jong-Sup and Park, Young-Hwan - A study on the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with NSM prestressed CFRP reinforcements. *FRPRCS-8 University of Patras, Patras, Greece, July 16-18, 2007*.
- [17] Meier, U. - Is there a future for automated application of FRP strips for post-strengthening? *Proc. of FRPRCS-8 conference*, ID K-1, Patras, Greece, 2007.