

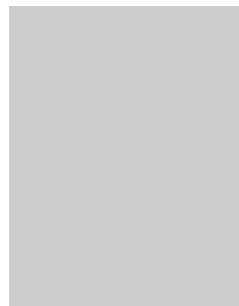
Análise do desempenho de uma nova técnica de reforço ao corte para elementos estruturais de betão armado



Gláucia Dalfré¹



Joaquim Barros²



Elisa Trombini³

RESUMO

A formação de fendas de corte em elementos estruturais reforçados à flexão com materiais compósitos (FRP) deve ser evitada, uma vez que antecipa a ruína do elemento, impossibilitando o total aproveitamento das propriedades oferecidas pelo reforço. Neste trabalho estudou-se o comportamento de provetes de betão armado, reforçados ao corte com varões embebidos em adesivo segundo a técnica de reforço designada por “Core Drilled Mounted” (CDM). Catorze provetes foram divididos em seis grupos, de maneira a estudar influência de alguns parâmetros no desempenho da técnica proposta, designadamente: classe de resistência do betão; tipo de varões; tipo de adesivo; diâmetro dos varões, percentagem de reforço ao corte e existência de pré-fissuração. Os resultados mais significativos obtidos na investigação efectuada são apresentados no presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE

Reforço, corte, GFRP, aço, epoxi

¹ ISISE, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. gmdalfré@civil.uminho.pt

² ISISE, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

³ Universidade de Ferrara, Depart. de Engenharia Civil, Via Saragat 1, 44100, Ferrara, Itália. elisa.trombini@hotmail.it

1. INTRODUÇÃO

A técnica de reforço de elementos de betão armado (BA) baseada na inserção de laminados de fibras de carbono (CFRP) em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento, designada na literatura inglesa por “Near Surface Mounted” (NSM), tem sido amplamente investigada e utilizada, principalmente para aumentar o momento resistente positivo da secção de elementos de betão armado submetidos a flexão [1,2]. Entretanto, a NSM possui também potencial para constituir uma técnica bastante eficaz no reforço aos momentos negativos de elementos contínuos de betão armado, tais como vigas e lajes, dada a facilidade e rapidez de aplicação [3]. No entanto, a eficácia desta técnica pode ser comprometida pela formação de fendas de corte junto aos apoios centrais dos elementos estruturais reforçados. Além disso, refira-se ainda os casos de elementos estruturais que, posteriormente a uma operação de reforço à flexão, o seu modo de rotura passa a ser por corte. Esta ocorrência deve ser evitada dado que a rotura por corte é frágil e quase instantânea. Assim, o reforço à flexão pode exigir uma intervenção de reforço ao esforço transversal.

Para evitar a formação deste tipo de dano propõe-se, no presente trabalho, uma nova técnica de reforço ao corte, designada por CDM (“Core Drilled Mounted”, em língua inglesa), baseada na instalação de varões em furos abertos na espessura do elemento a reforçar, sendo fixos ao betão por meio de adesivos.

De forma a validar a técnica proposta, foi realizado um programa experimental preliminar em que o comportamento de provetes reforçados ao corte com varões de CFRP, embebido por um adesivo epoxi, foi analisado [4]. Os resultados destes ensaios permitiram concluir que a utilização de compósitos de CFRP como elementos resistentes ao corte possibilitou incrementos significativos da capacidade máxima de carga dos provetes de betão armado com rotura por corte. Para além disso, este sistema de reforço está mais protegido das condições de agressividade ambiental e de actos de vandalismo, pois os elementos de reforço encontram-se embebidos no betão.

Assim, os resultados obtidos no referido programa de ensaios preliminares motivaram a realização de um novo programa experimental, no qual se pretende avaliar a influência de alguns parâmetros no desempenho da CDM, nomeadamente: classe de resistência do betão; tipo de varões (aço, GFRP e CFRP); tipo de adesivo (epoxi e grout); diâmetro dos varões (8 mm ou 12 mm) e percentagem de reforço ao corte. Nas séries do presente trabalho apenas foram utilizadas uma classe de betão, varões de aço de 8 mm de diâmetro, varões de GFRP de 10 e 12 mm de diâmetro, adesivo epoxi.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Concepção dos provetes

Os provetes utilizados neste trabalho foram concebidos de modo a simular, da forma mais próxima possível e sem aumentar em demasia a complexidade da configuração do ensaio, o comportamento da zona de rotura por corte de um elemento de BA, reforçado segundo a técnica CDM (Figura 1). O programa experimental realizado neste trabalho envolveu a concepção de seis séries de provetes de betão armado, com as dimensões apresentadas na Figura 1c. Com o objectivo de localizar a fractura do betão no plano de carga, entalhes verticais de 5 mm de largura por 15 mm de profundidade foram efectuadas no betão de recobrimento das faces laterais do provete, resultando uma secção transversal de $170 \times 250 \text{ mm}^2$ (A_c).

O programa experimental apresentado neste trabalho englobou dois tipos de provetes, diferenciados pela forma como foi garantida a resistência ao esforço de corte e pela aplicação de pré-fissuração ao provete. Assim, além de provetes desprovidos de reforço ao corte, foram ensaiados provetes reforçados com varões de aço ou GFRP, embebidos em resina epoxi, submetidos, ou não, a uma pré-fissuração anterior ao reforço.

O Quadro 1 descreve, de maneira sucinta, os provetes ensaiados neste trabalho. O programa contemplou séries com provetes pré-fendilhados no sentido de se avaliar a influência da pré-fendilhação na eficácia da técnica que se propõe. No entanto, dada a dificuldade de se introduzir, de forma estável, fendas com abertura superior a 0.05 mm, este foi o valor adoptado.

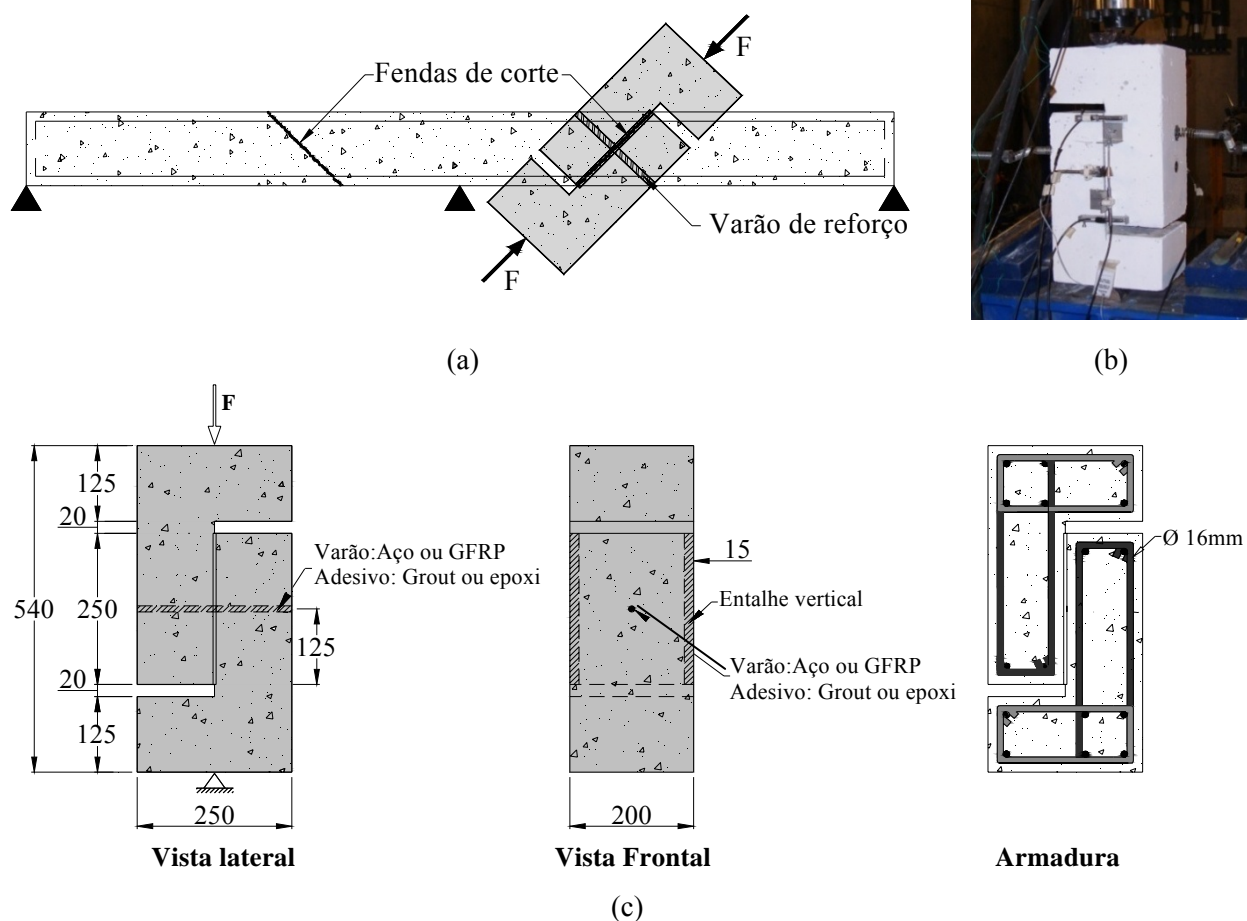


Figura 1. (a) Conceito, (b) foto do ensaio e (c) geometria e armaduras comuns a todos os provetes. (dimensões em mm)

Quadro 1. Descrição dos provetes ensaiados.

Referência	Idade à data do ensaio [dias]	Reforço à flexão	Idade do reforço à data do ensaio [dias]	Pré-Fissuração	Sistema de reforço ao corte		
					Material	Diâmetro do varão [mm]	Diâmetro do furo [mm]
SR_1	56	Não	-----	Não	-----	-----	-----
SR_2	56		-----		-----	-----	-----
1_GFRP_E_8	70	Sim	7	Não	GFRP	8	14
2_GFRP_E_8	70		7				
3_GFRP_E_8	84		8				
1_GFRP_E_8_PC	86	Sim	9	Sim	GFRP	8	14
2_GFRP_E_8_PC	85		9				
1_GFRP_E_12	69	Sim	7	Não	GFRP	12	18
2_GFRP_E_12	69		7				
3_GFRP_E_12	84		8				
1_GFRP_E_12_PC	85	Sim	9	Sim	GFRP	12	18
2_GFRP_E_12_PC	85		9				
1_Steel_E_8	77	Sim	7	Não	Aço	8	14
2_Steel_E_8	77		7				

2.2 Instrumentação

Na Figura 2 apresenta-se a instrumentação aplicada nos ensaios. Inicialmente, utilizaram-se três LVDTs para medir a abertura de fissura e um LVDT para medir o deslizamento entre os bordos da secção de fractura, segundo a configuração ilustrada na Figura 2a. Entretanto, após a análise dos resultados observou-se uma grande disparidade nas medidas de deslizamento entre os provetes ensaiados, em resultado da ocorrência de rotação da secção de fractura para fora do plano do provete, o que introduz leituras de sinal oposto nos LVDTs colocados em faces opostas (ver Figura 2b). O comportamento assimétrico dos deslizamentos registados pode ser devido à dificuldade em assegurar simetria perfeita no carregamento e na disposição das armaduras. Imperfeições geométricas do provete e heterogeneidades no betão também contribuem para este efeito. Tendo em conta estes resultados, optou-se pela monitorização de ambas as faces dos provetes. Para tal, quatro LVDTs foram instalados para medir a abertura de fissura (três numa face e o outro na face oposta), enquanto dois LVDTs foram colocados para medir os deslizamentos, um em cada face (Figura 3a).

Cada ensaio foi controlado pelo transdutor colocado junto ao actuador, tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 20 $\mu\text{m/s}$ até se registar um deslocamento de 10 mm. A força total aplicada foi medida com recurso a uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kN e 0.5% de precisão. Para registar as extensões nos varões de reforço utilizaram-se extensómetros eléctricos dispostos segundo as configurações ilustradas nas Figura 3b.

O carregamento foi composto por uma carga concentrada, aplicada monotonicamente na face superior do provete, até se registar o máximo deslocamento requerido ou a ocorrência de rotura do provete.

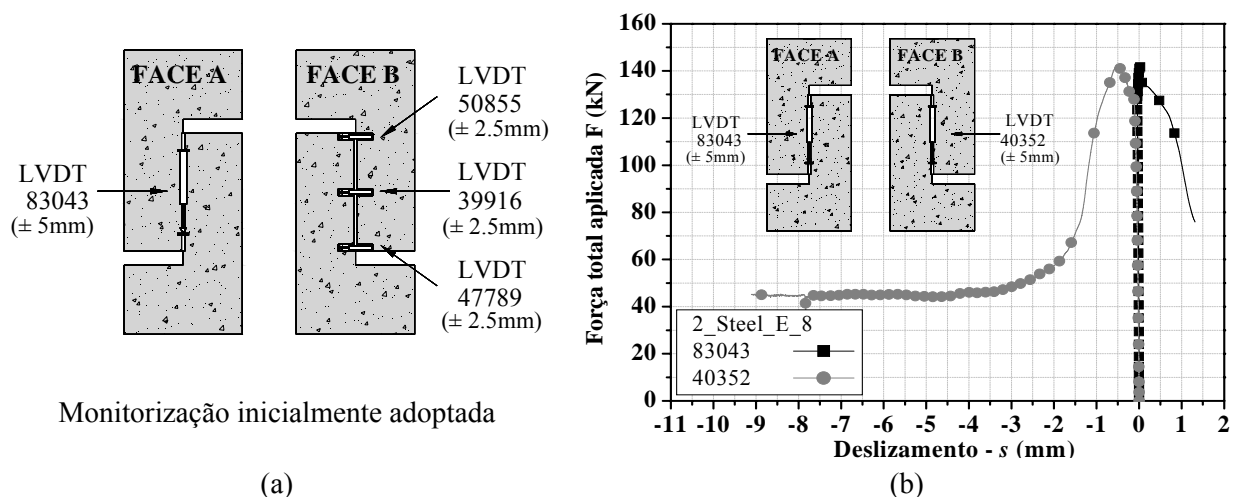


Figura 2. Monitorização inicialmente adoptada: (a) posicionamento dos LVDTs, (b) curva força versus deslizamento registado em ambas as faces do provete.

2.3 Propriedades dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão dos provetes foi efectuada, experimentalmente, aos 28 dias de idade. Para tal, efectuaram-se ensaios de compressão directa em cubos de 150mm de aresta. O módulo de elasticidade do betão foi avaliado em carotes de 75 mm de diâmetro por 150 mm de altura, extraídos de cubos de 150 mm de aresta, tendo-se adoptado as recomendações de ensaio da norma LNEC E397-1993 [5].

Os provetes foram armados com varões de aço nervurado de 16 mm de diâmetro. Para o reforço ao corte utilizaram-se varões de aço nervurado de 8 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial.

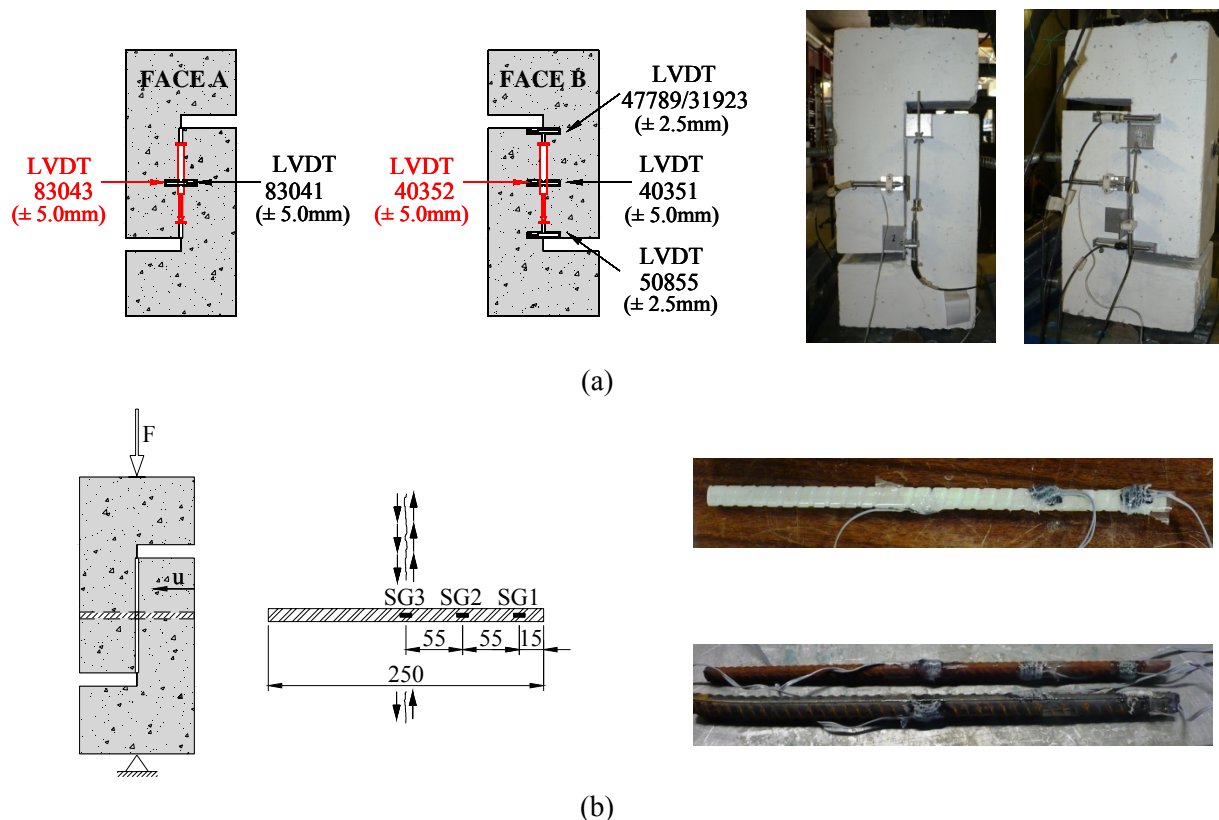


Figura 3. Monitorização final adoptada: (a) localização dos LVDTs; (b) extensómetros (dimensões em mm).

O adesivo utilizado na ligação dos varões ao betão é uma cola epoxi S&P – Resin 50. Segundo o catálogo técnico do fabricante [6], este material desenvolve uma resistência à tracção próxima dos 35MPa após 7 dias de cura e endurecimento. Os valores das propriedades do material fornecido foram determinados por intermédio de ensaios de tracção uniaxial em sete provetes, em conformidade com a Norma ou 527-5 [7], efectuados em prensa servo-controlada da marca Lloyd, série LR30K, com célula de carga com capacidade máxima de carga de 10 kN. O módulo de elasticidade foi determinado por intermédio de um clip-gauge fixado na parte central do provete, com um campo de leitura de 80 mm. O ensaio foi efectuado com uma velocidade de 5 mm por minuto.

No Quadro 2 estão registados os valores médios obtidos nos ensaios efectuados para caracterizar as propriedades mais representativas dos materiais intervenientes no presente programa experimental. Constatase que a resistência à tracção do adesivo epoxi é ligeiramente inferior ao valor indicado pelo fabricante.

Quadro 2. Propriedades dos materiais (valores médios experimentais).

Betão		Aço		Adesivo	
[28 dias]		[$\phi 8\text{mm}$]	[$\phi 16\text{mm}$]	[9 dias]	
f_{cm} (MPa)	16.90 (0.58%)	σ_{sy} (MPa)	484.04 (10.47%)	σ_{sy} (MPa)	483.37 (8.29%)
E_{cm} (GPa)	18.84 (1.43%)	σ_{su} (MPa)	591.50 (2.75%)	σ_{su} (MPa)	626.35 (1.17%)
		E_s (GPa)	206.38 (17.02%)	E_s (GPa)	225.31 (17.62%)
				σ_{su} (MPa)	31.04 (2.75%)
				E (GPa)	1.87 (0.10%)
				ε_{su} (‰)	41.69 (6.12%)

(valor) Desvio-padrão

Os varões de fibra de vidro utilizados nos ensaios efectuados têm a designação comercial de Schöck ComBAR® [8], sendo constituídos por fibras orientadas unidireccionalmente, aglutinadas por uma epoxi. Segundo o fabricante, os varões têm resistência à tracção superior a 1500 MPa, módulo de elasticidade próximo de 60 GPa segundo a direcção das fibras e extensão última próxima de 7.25%.

2.4 Aplicação do reforço segundo à técnica CDM

Os procedimentos utilizados para aplicação do reforço ao substrato de betão dos provetes podem ser agrupados nas seguintes etapas:

Abertura dos furos de reforço e preparação do substrato de betão

Foram efectuados furos através dos provetes, com diâmetros nominais de 14 mm ou 18 mm, onde foram introduzidos varões de reforço 8 mm ou 12 mm de diâmetros, respectivamente, de modo a obter uma camada de adesivo com espessura média de 3mm.

Aplicação do reforço

Inicialmente, procedeu-se a limpeza dos varões com acetona. Posteriormente, procedeu-se à inserção do varão e ao preenchimento do furo com adesivo, cuja preparação foi efectuada em conformidade com as recomendações do fabricante. A operação de reforço termina com remoção do adesivo em excesso e a execução do acabamento final. Na Figura 4 ilustram-se algumas das fases da aplicação do reforço.



Figura 4. Aplicação do reforço segundo à técnica CDM.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Figura 5 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total aplicada e a abertura média e o deslizamento médio da fenda de rotura dos provetes ensaiados. Atribuindo as designações $\bar{F}_{max,SR}$, $\bar{F}_{max,GFRP}$ e $\bar{F}_{max,aço}$ ao valor médio da força máxima aplicada ao provete sem reforço ao corte e nos provetes reforçados com varões de fibra de vidro e aço, respectivamente, determinaram-se os factores $\bar{F}_{max,GFRP}/\bar{F}_{max,SR}$ e $\bar{F}_{max,aço}/\bar{F}_{max,SR}$, indicados no Quadro 3. Nesta tabela também se apresentam os valores de abertura de fissura (w) e de deslizamento (s) para cada provete ensaiado, registados para a carga total máxima (F_{max}).

Tendo em consideração os valores obtidos nos ensaios de caracterização do betão e utilizando as recomendações do Eurocode 2 [9], foi obtido um valor estimado da resistência à compressão do betão para uma idade de 56 dias de idade ($f_{cm(56)} = 18.18 \text{ MPa}$) e resistência ao corte do betão igual a $\tau_c(56) = 0.15 f_{ck(56)} = 1.53 \text{ MPa}$, o que resulta numa capacidade de carga de $F_c = \tau_c \times A_c = 64.90 \text{ kN}$, significativamente inferior aos valores obtidos experimentalmente para os provetes sem reforço. Tendo por base os resultados obtidos nos provetes da série SR (sem reforço), constata-se que o reforço com varões de fibras de vidro e de aço de $\phi 8\text{mm}$, o que corresponde a uma taxa de reforço ($A_{varão}/A_{betão}$) igual a 0.12%, permitiu um aumento da força F_{max} de 12% e 26%, respectivamente, enquanto o reforço com varões de fibra de vidro de $\phi 12 \text{ mm}$, com taxa de reforço igual a 0.27%, permitiu um aumento de F_{max} entre 25% e 28%.

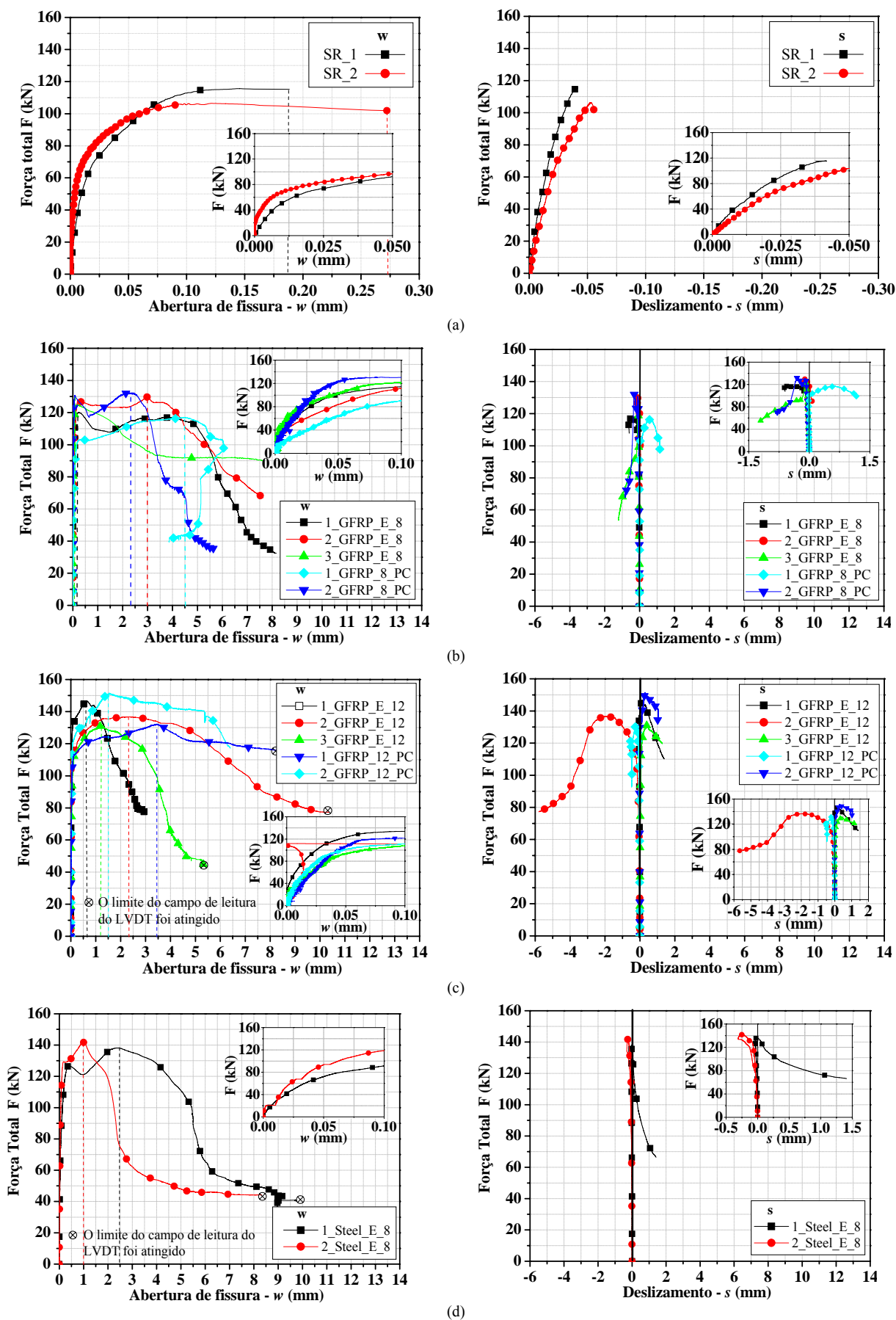


Figura 5. Curvas força versus abertura e deslizamento de fissura para provetes (a) sem reforço, reforçados com varões de fibra de vidro de (b) ϕ 8mm, e (c) ϕ 12mm e (d) varões de aço.

Análise do desempenho de uma nova técnica de reforço ao corte para elementos estruturais de betão armado

Apesar deste aumento poder ser considerado não muito elevado, a manutenção de elevada capacidade de carga até abertura de fissura superior a 10 vezes a abertura de fissura correspondente à rotura dos provetes SR é, de facto, a grande vantagem da técnica de reforço que se propõe, dado permitir aumentar, muito significativamente, a ductilidade do comportamento de estruturas reforçadas segundo esta técnica. Relativamente aos provetes submetidos a pré-carregamento e pré-fissuração, anterior à aplicação do reforço, verifica-se que a capacidade de carga dos provetes não foi afectada pela execução da pré-fissuração. Deste modo, conclui-se que a existência de uma pré-fissuração de 0.05mm não afecta, de maneira significativa, a resistência final da peça reabilitada.

Quadro 3. Principais resultados registados para a carga total máxima aplicada (F_{max}).

Proвете	F_{max} [kN]	\bar{F}_{max} [kN]	$\frac{F_{max,GFRP/Ac2}}{F_{max,SR}}$	W_{Fmax} [mm]	S_{Fmax} [mm]	$\epsilon_{GFRP,Fmax}$ [μm/m]	$\epsilon_{SG3,max}$ [μm/m]
SR_1	115.72	111.11		0.14 ^a	-0.04 ^a	-----	-----
SR_2	106.49	(6.52%)	-----	0.12 ^a	-0.05 ^a	-----	-----
1_GFRP_E_8	120.08	124.89		0.24 ^b	-0.10 ^b	728.00	3229.00
2_GFRP_E_8	129.77	(4.84%)	1.12	3.01 ^{b/c}	-0.11 ^b	2711.00	2718.00
3_GFRP_E_8	124.82			0.19 ^b	-0.10 ^b	209.90	1093.70
1_GFRP_E_8_PC	117.14	124.83		4.53 ^{b/c}	0.64 ^b	3248.00	3314.30
2_GFRP_E_8_PC	132.52	(10.87%)	1.12	2.40 ^b	-0.31 ^b	475.05	2750.80
1_GFRP_E_12	146.65	138.41		0.63 ^a	0.11 ^a	1348.00	1841.00
2_GFRP_E_12	136.73	(7.54%)	1.25	2.34 ^{a/c}	-1.95 ^a	2643.00	2861.00
3_GFRP_E_12	131.85			1.23 ^b	0.42 ^b	1944.30	2342.10
1_GFRP_E_12_PC	151.62	142.04		1.54 ^b	0.29 ^b	1005.30	1115.80
2_GFRP_E_12_PC	132.46	(13.55%)	1.28	3.44 ^b	-0.23 ^b	1889.10	1911.20
1_Steel_E_8	138.21	139.98		2.39 ^a	-0.02 ^a	14363.00	26125.00
2_Steel_E_8	141.74	(2.50%)	1.26	0.99 ^b	-0.25 ^b	3432.00	25816.00

^a Deslocamentos registados numa única face do provete

^b Valores médios das leituras registadas pelos LVDTs em ambas as faces do provete

^c Abertura de fissura paralela à monitorizada

Na Figura 6 apresenta-se a relação entre a abertura de fissura e o deslizamento entre as faces da fenda de rotura. Da análise desta figura verifica-se que na fase inicial do carregamento dos provetes não reforçados (SR) o deslizamento é superior à abertura de fissura. No entanto, devido ao embricamento proporcionado pelos inertes da superfície de fractura, esta tendência inverte-se após ter sido alcançado um deslizamento de aproximadamente 0.015 mm, sendo na rotura a abertura de fissura 4 a 5 vezes superior o valor do deslizamento. No caso dos provetes reforçados, devido à resistência oferecida pelos varões ao deslizamento da fenda, este é sempre inferior à abertura de fenda, principalmente nos provetes reforçados com varões de aço. No entanto, nestes últimos provetes, a partir de determinada abertura de fissura ocorre um acréscimo brusco de deslizamento, que corresponde ao momento de entrada em cedência da armadura, tal como pode ser visualizado na Figura 7, onde estão representadas a relação entre a força aplicada e a extensão no extensómetro SG3 (ver também Figura 3b). Os valores máximos da extensão neste extensómetro, $\epsilon_{SG3,max}$, e os correspondentes à carga máxima, $\epsilon_{SG3,Fmax}$, encontram-se no Quadro 3. Constata-se que as extensões nos varões de GFRP são bastantes inferiores às registadas nos varões de aço (não ultrapassaram os 20% a extensão última do GFRP), indicando ter ocorrido rotura precoce pela interface varão-adesivo, o que se veio a observar em inspecção dos provetes após o seu ensaio. Em consequência deste facto, a abertura máxima nos provetes reforçados com varões de GFRP foi superior à registada nos provetes reforçados com varões de aço.

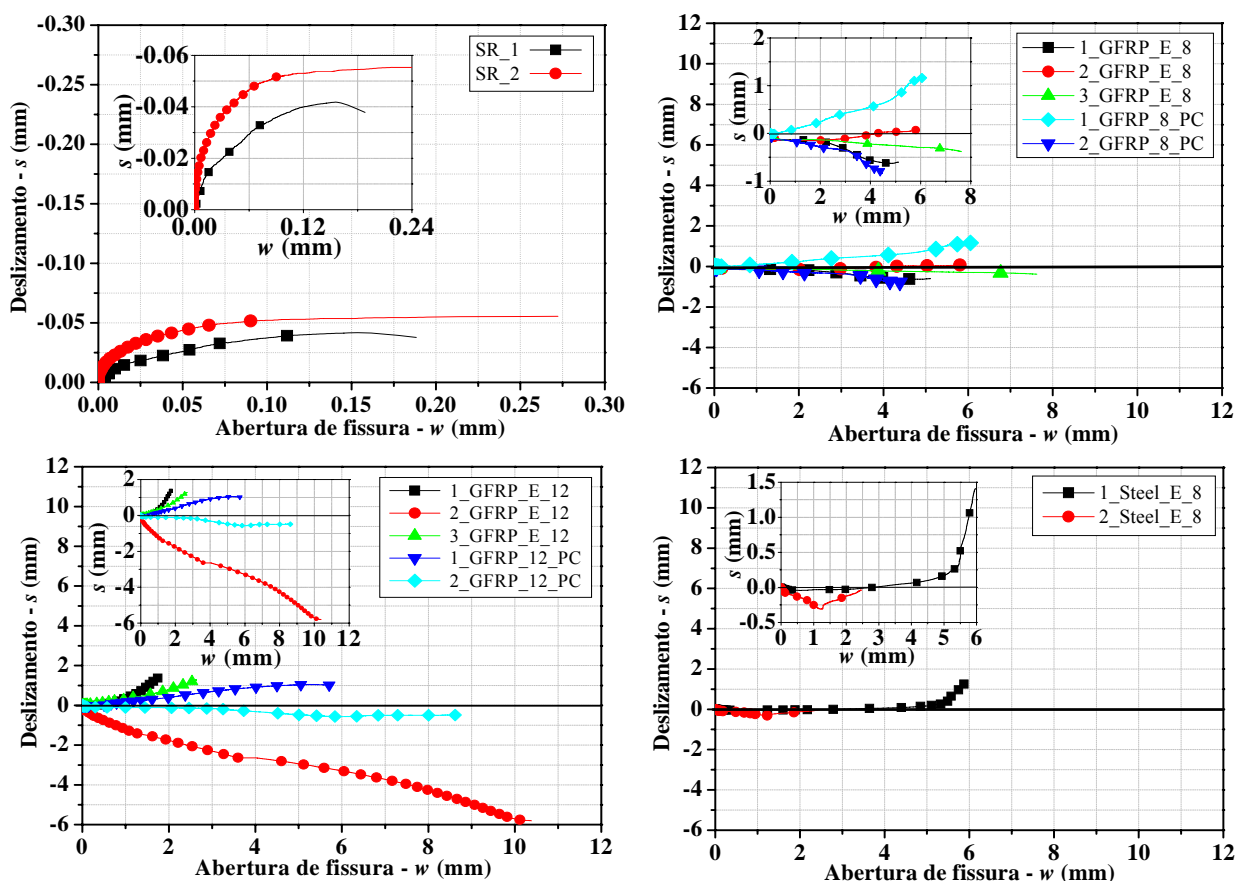


Figura 6. Abertura de fissura versus deslocamento.

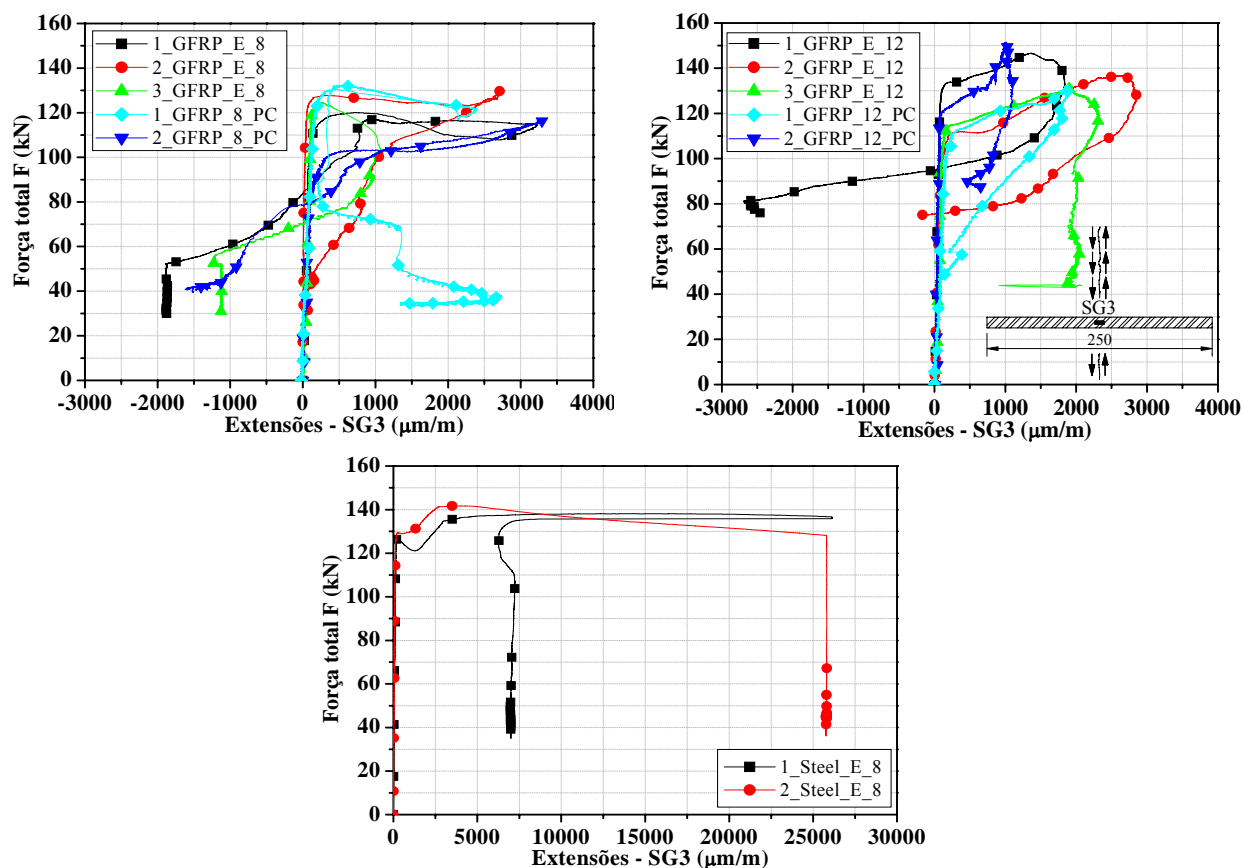


Figura 7. Curvas força versus extensão no SG3 (central).

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho uma nova técnica de reforço foi utilizada para aumentar a capacidade de carga de elementos com rotura por corte. Esta técnica baseia-se na inserção de varões em furos efectuados nas peças de betão armado a reforçar. Os varões são fixos ao betão por intermédio de adesivo epoxi. Tendo por base os resultados obtidos no programa experimental, conclui-se que:

- (i) A monitorização de ambas as faces do provete é indispensável dada ser impossível garantir um comportamento perfeitamente simétrico do provete.
- (ii) Com o uso de varões de aço e de fibra de vidro de $\phi 8\text{mm}$ (para uma taxa de reforço ($A_{\text{varão}}/A_{\text{betão}}$) da ordem de 0.12%), verificou-se um aumento da força F_{max} de 26% e 12%, respectivamente, enquanto o reforço com varões de GFRP de $\phi 12\text{ mm}$, (com taxa de reforço igual a 0.27%), permitiu um aumento da força F_{max} entre 25% e 28%.
- (iii) A abertura de fissuras registada para os provetes reforçados com varões de aço é expressivamente inferior à obtida com varões de fibra de vidro. Para além disso, deve ser registado o aumento da força F_{max} de 26% para o diâmetro de 8mm.
- (iv) O pré-carregamento e a pré-fissuração, anterior à aplicação do reforço, não afectaram a capacidade resistente dos provetes.
- (v) De acordo com os resultados obtidos, verificou-se a viabilidade de utilização da técnica proposta no reforço ao corte, dado que a rotura frágil dos provetes submetidos a esforços de corte é evitada, obtendo um comportamento dúctil após o pico do carregamento e aumentos significativos na capacidade de carga dos elementos reforçados.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos ao apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no projecto “CUTINEMO - Laminados de fibras de carbono inseridos no betão de recobrimento para o reforço aos momentos negativos de estruturas contínuas de betão armado” (PTDC/ECM/73099/2006). O primeiro autor agradece o apoio financeiro concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil), ao abrigo da Bolsa de Doutoramento GDE nº 200953/2007-9. Às empresas S&P® Reinforcement e Schöck ComBAR® os autores agradecem os materiais gentilmente oferecidos. Agradece-se, em especial, a colaboração da empresa Casais na confecção dos provetes, bem como o apoio prestado pelos técnicos do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho.

REFERÊNCIAS

- [1] 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), 471-480, (2005).
- [2] EL-HACHA, R.; RIZKALLA, S.H. - Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. *ACI Structural Journal*, 101(5), 717-726, (2004).
- [3] BONALDO, E. - NSM technique for the flexural strengthening of RC slab structures (Provisory Title). Guimarães: Universidade do Minho (Em preparo). Tese de Doutoramento.
- [4] BARROS, J.A.O., [et al.] - Exploring the possibilities of a new technique for the shear strengthening of RC elements. *Proceedings of the International Conference Challenges for Civil Construction*.
- [5] Especificação do LNEC E397-1993, “BETOES – Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão”, LNEC, Portugal; Maio 1993.
- [6] S&P REINFORCEMENT. “S&P Resin Epoxy 55/S&P Resin Epoxy 50”. [Consult. 15 Julho 2008]. Available on the WWW:<URL: http://www.reinforcement.ch/pdf_daten/en_produk/resin-55-50_en.pdf>
- [7] ISO 527-5. *Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp., (1993).
- [8] Schöck Combar - Technical information Schöck Combar. [On line]. Schöck, 2007. [Consult. 25 Julho 2008]. Available on the WWW:<URL: <http://www.schoeck-combar.com>>
- [9] EUROCODE 2: Design of concrete structures - part 1: General rules and rules for buildings EN 1992-1-1:2004:E. Brussels: European Committee for Standardization, December (2004).
- [10] EL-ARISS, B. - Behavior of beams with dowel action. *Engineering Structures*, 29, 899–903 (2007).