

REFORÇO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO COM ARMADURAS PÓS-INSTALADAS DE AÇO INOX OU DE COMPÓSITOS DE FRP

STRENGTHENING OF RC BEAMS WITH POST-INSTALLED STAINLESS STEEL BARS OR FRP COMPOSITES

Carlos Chastre¹, Hugo Biscaia², Noel Franco³

¹Professor Auxiliar, DEC - FCT – Univer. NOVA de Lisboa, Investigador, CERIS – ICIIST – Univer. de Lisboa

²Bolseiro de Pós-Doutoramento, Investigador, FSE – UNIDEMI – FCT – Universidade de Lisboa - Portugal.

³Aluno de doutoramento, DEC - FCT - Universidade NOVA de Lisboa - Portugal.



RESUMO

Neste artigo apresentam-se e analisam-se um conjunto de ensaios realizados em vigas de betão armado reforçadas com armaduras pós-instaladas de aço ou de FRP, incluindo os referentes a uma nova técnica (CREatE) desenvolvida na FCT NOVA. Os resultados experimentais permitiram concluir que a técnica CREatE possibilita aumentos de resistência e ductilidade consideráveis face às técnicas tradicionais.

ABSTRACT

This paper presents and analyses some tests on reinforced concrete beams, which had been previously strengthened with post-installed steel bars or FRP composites, and also a new technique (CREatE) developed in the FCT NOVA. The experimental results led to the conclusion that CREatE enables considerable increases in strength and ductility when compared with traditional techniques.

1. INTRODUÇÃO

O reforço de vigas de betão armado pode ser realizado através de diversas técnicas, de que se destacam o reforço com: i) adição de betão e armaduras (Fig. 1a); ii) chapas ou perfis de aço (Fig. 1d); iii) compósitos de FRP (Figs. 1b e 1c); iv) têxteis compósitos sobre base cimentícia (TRM) (Fig. 1e); ou v) pré-esforço exterior (Fig. 1f).

A procura de soluções de reforço mais duráveis e de fácil aplicação tem levado à utilização crescente dos materiais compósitos no reforço de estruturas, dada a sua resistência à corrosão, o baixo quociente peso/resistência mecânica, a sua

moldabilidade, a facilidade de aplicação e a eliminação de estruturas de suporte (Rodrigues 2005, Chastre, 2014). De igual forma, o reforço à flexão de vigas de betão armado tem apresentado uma evolução com tendência para soluções onde são utilizadas armaduras à base de materiais compósitos de fibras de Carbono, Vidro, Basalto ou Aramida, aplicadas com a técnica Externally Bonded Reinforcement (EBR) em que as armaduras são normalmente colados com resina epoxídica na superfície (Fig. 1b) ou com a técnica Near Surface Mounted (NSM) em que é necessário realizar um rasgo na superfície do betão,

onde posteriormente serão inseridos as armaduras (Figs. 1c). No entanto, as técnicas utilizadas, o comportamento elástico-linear destes materiais e as roturas tendencialmente frágeis das soluções condicionam a sua utilização em estruturas onde se pretende alguma ductilidade.

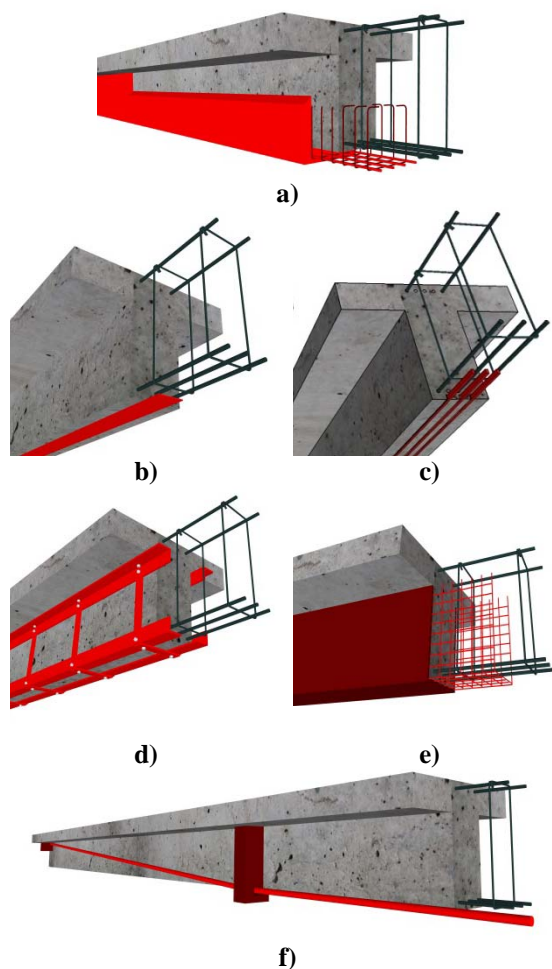


Fig. 1 - Pormenores do reforço de vigas de betão armado com diversas técnicas: a) adição de betão e armaduras; b) chapas ou perfis de aço; c) compósitos de FRP, técnica EBR; d) compósitos de FRP, técnica NSM; e) têxteis compósitos sobre base cimentícia (TRM) e f) pré-esforço exterior (adaptado de Chastre, 2014).

A técnica de reforço NSM (Fig. 1c) apresenta algumas vantagens em relação à técnica EBR (Fig. 1b), nomeadamente ao nível da proteção das armaduras (Chastre 2016a). Além disso, o desempenho em termos de ductilidade do sistema e resistência final excede a técnica EBR. No entanto, os ensaios experimentais (Carvalho et al. 2010, Monteiro 2014, Franco et al. 2014, Franco et al. 2016) têm mostrado que roturas prematuras (Oehlers 2006, Biscaia

et al. 2013) da ligação na interface ou o destacamento do betão na zona do recobrimento entre a face inferior das armaduras ordinárias e as armaduras de reforço podem limitar significativamente a eficiência do sistema, originando modos de rotura frágeis e desperdício de material por falta de otimização da quantidade de material aplicada (Chastre et al. 2016b).

No presente artigo vão-se descrever em pormenor as técnicas existentes com armaduras pós-instaladas de aço ou de FRP e uma nova técnica (CREatE) desenvolvida na FCT NOVA. Na técnica CREatE as armaduras pós-instaladas (de aço ou de FRP) são ancoradas internamente por aderência na extremidade do elemento estrutural tendo por objetivo minimizar o risco de roturas prematuras existentes nas técnicas tradicionais e ao mesmo tempo aumentar a ductilidade dos elementos reforçados.

2. A TÉCNICA DE REFORÇO CREatE

O sistema de reforço CREatE (Continuous Reinforcement Embedded at Ends) foi concebido na FCT NOVA (Rodrigues et al. 2016) e foi idealizado para ser utilizado com diversos materiais (Chastre et al. 2016a, Biscaia et al. 2016b, Franco et al. 2016) e para ser utilizado em diferentes elementos estruturais, tais como vigas (Monteiro 2014, Chastre et al. 2016), pilares (Faustino e Chastre 2016), pavimentos (Biscaia et al. 2016a), lajes ou paredes, em que é necessário aumentar a sua capacidade resistente através de armaduras pós-instaladas, as quais podem ser metálicas ou não. Com esta solução (Fig. 2) pretende-se ancorar as armaduras de reforço nas extremidades do elemento estrutural sem o uso de dispositivos mecânicos para as fixar. O processo construtivo encontra-se descrito detalhadamente em (Rodrigues et al. 2016).

Nesta técnica após o escoramento da estrutura, é necessário realizar os furos no elemento estrutural a ser reforçado (Fig. 2 a). Estes furos (Fig. 2 b)) têm de ter um diâmetro, um comprimento e um

alinhamento específico, por forma a permitirem a incorporação das extremidades das armaduras de reforço no interior do elemento estrutural, utilizando um agente de aderência para a efetivação da ancoragem. Antes de se proceder à ancoragem da armadura no interior do elemento estrutural é necessário que as armaduras de reforço tenham uma curva de transição suave por forma a evitar concentração de tensões na zona de transição para o interior do elemento estrutural. Esta transição pode ser efetuada através da preparação e moldagem de uma curva no substrato ou a instalação de um dispositivo pré-fabricado que permita fazer a curva como desejado. Após a preparação inicial e a subsequente limpeza das superfícies é então, possível aplicar o agente de ligação no furo e na zona de contacto da armadura de reforço com a superfície do elemento estrutural bem como a aplicação das próprias armaduras de reforço (Fig. 2 c) (Chastre et al. 2016).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Modelos experimentais

Com o objetivo de validar a técnica CREatE desenvolveu-se um programa experimental em que foram ensaiadas mais

de 30 vigas de betão armado e em que foi analisada a influência de diversos parâmetros: técnica de reforço, tipo de carregamento, tipo e quantidade de reforço, forma da zona de ancoragem, pós-tensão da armadura de reforço, entre outros. Para este artigo foram selecionadas para além da viga de referência (V1), uma viga representativa da técnica de reforço EBR (V2), uma viga representativa da técnica de reforço NSM (V4) e duas vigas representativas da técnica (CREatE).

A Tabela 1 mostra a designação das vigas selecionadas, indicando as armaduras, o tipo de reforço e respetiva área da secção transversal das armaduras. As vigas com uma secção em T tinham um comprimento total de 3,30 m e um vão livre entre apoios de 3,00 m. Na Fig. 3 mostra-se o alçado de uma viga reforçada com a técnica CREatE e as secções transversais das vigas de referência (V1 e V11) e das vigas reforçadas com as técnicas EBR (V2 e V12), NSM (V4 e V13) e CREatE (V8 e V15).

3.2. Caracterização dos materiais

As vigas foram betonadas em dois lotes diferentes. Os aços foram caracterizados através de ensaios à tração segundo a EN ISO 6892-1 (CEN 2009). Na Tabela 2 apresenta-se a classificação dos aços utili-



Fig. 2 - Processo construtivo da técnica CREatE (Chastre et al. 2016)

Tabela 1 - Configuração das vigas de betão armado

Designação das vigas	Lote	Sistema	Armaduras longitudinais		Estribos	Armadura de reforço	
			Topo	Base		Tipo	Área transversal
V1	1	Referência				--	--
V2	1	EBR				Laminados CFRP	1x50x1,2 mm ²
V4	1	NSM				Laminados CFRP	4x10x1,4 mm ²
V8	1	CREatE				Laminados CFRP	4x10x1,4 mm ²
V11	2	Referência	6 Ø8	3 Ø12	Ø6 // 0.15	--	--
V12	2	EBR				Barra de Aço Inox	2x20x5 mm ²
V13	2	NSM				Varão de Aço Inox	4 Ø8
V15	2	CREatE				Barra de Aço Inox	2x20x5 mm ²



Fig. 3 - Pormenores com o tipo de reforço utilizado nas vigas: V2 e V12 (técnica EBR); V4 e V13 (técnica NSM); V8 e V15 (técnica CREatE) e respetiva seção transversal

zados e as respetivas características mecânicas determinadas nos ensaios, nomeadamente os valores médios da tensão ($f_{y,m}$) e extensão ($\epsilon_{y,m}$) na cedência, os

valores médios da tensão ($f_{u,m}$) e extensão ($\epsilon_{u,m}$) na rotura e os valores médios do módulo de elasticidade (E_m), para as armaduras ordinárias referentes aos dois lotes e para as armaduras de reforço em aço inoxidável (Carvalho et al. 2010, Franco et al. 2014).

O betão foi caracterizado através de ensaios à compressão aos 28 dias de cubos com 150 mm de aresta, segundo a norma NP EN 12390 3, dos quais se obteve um valor médio da resistência à compressão de 23,1 MPa no Lote 1 e de 24,1 MPa no Lote 2.

Os valores médios obtidos dos ensaios de caracterização dos laminados de CFRP foram os seguintes: para o laminado S&P 150/2000 (10x1,4mm²), um módulo de elasticidade de 159GPa, uma extensão na rotura de 1,03% e uma tensão de rotura de 1565 MPa; para o laminado S&P 150/2000 (50x1,2mm²), um módulo de elasticidade de 170GPa, uma extensão na rotura de 1,05% e uma tensão de rotura de 1691 MPa (Carvalho et al. 2010).

A resina epoxídica utilizada para colagem das armaduras de reforço foi a S&P 220, tendo-se obtido os dados relativos ao comportamento à tração através de ensaios à flexão em 3 pontos utilizando o procedimento referido em (Rodrigues e Silva 2007). Os valores médios obtidos foram de 0,79 GPa para o módulo de elasticidade; 3,65% para a extensão na rotura à tração por flexão e 29,0 MPa para a tensão de rotura à tração por flexão (Carvalho et al. 2010).

Tabela 2 - Características mecânicas das armaduras ordinárias dos dois lotes e das armaduras de reforço em aço inoxidável.

Material	Secção	$f_{y,m}$ (MPa)	$f_{u,m}$ (MPa)	$\epsilon_{u,m}$ (%)	E_m (GPa)
A500 NR (Lote 1)	$\phi 6$	568 ⁽¹⁾	721	11,0	200 ⁽²⁾
	$\phi 8$	566	680	12,0	200 ⁽²⁾
	$\phi 12$	546	649	14,3	200 ⁽²⁾
A500 NR SD (Lote 2)	$\phi 6$	538 ⁽¹⁾	634	7,5	199
	$\phi 8$	573	675	6,5	212
	$\phi 12$	530	637	11,4	211
EN 1.4404	20×5	260	618	27,2	192
EN 1.4301	$\phi 8$	472	1008	3,3	195

Notas: (1) tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%; (2) Valor adotado.

3.3. Sistema de ensaio, instrumentação e história de carregamento

O sistema de ensaio das vigas encontra-se representado na Fig. 4. As vigas foram testadas à flexão em 4 pontos no laboratório de estruturas da FCT NOVA. As cargas foram aplicadas a 1/3 e 2/3 de vão através de um perfil metálico e foram garantidas através da utilização de dois cilindros hidráulicos Enerpac RRH 307, apoiados simetricamente numa viga metálica disposta perpendicularmente às vigas, conforme apresentado na Fig. 4. As reações às cargas atuantes foram aplicadas na laje do laboratório e foram medidas através de duas células de carga (TML CLC-200K NA).

As armaduras ordinárias foram instrumentadas com três extensómetros eléctricos de resistência (TML-FLA-5-11). Todas as vigas ensaiadas foram igualmente instrumentadas com extensómetros eléctricos de resistência colocados nas armaduras de reforço de aço inox (TML-FLA-5-11) ou nas armaduras de reforço de CFRP (TML-BFLA-5-8). Para quantificar os deslocamentos verticais ao longo da viga foram utilizados diversos transdutores de deslocamento (sete TML-CDP100 e um TML-DP-500E). Foram igualmente utilizados diversos transdutores de deslocamento horizontal para medir a curvatura média das secções transversais ao longo do comprimento da viga. A aquisição de dados foi realizada com os dataloggers Centipede 100 e Spider 8 da HBM utilizando o software Catman 6.0 também da HBM. As vigas seguiram uma história de carregamento monotónica.



Fig. 4 – Sistema de ensaio

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 apresentam-se um resumo dos principais indicadores obtidos dos ensaios experimentais realizados nas vigas reforçadas com as diferentes técnicas (EBR, NSM e CREAtE) utilizando como armaduras de reforço o aço inox ou os compósitos de FRP. Os indicadores representados na Tabela 3 são a relação entre o valor das cargas de rotura (F_r/F_{ref}) das vigas reforçadas com laminados de CFRP (V2, V4 e V8) e da viga de referência (V1) e das vigas reforçadas com aço inox (V12, V13 e V15) e da viga de referência (V11).

De igual forma também se apresenta a relação entre o deslocamento das diferentes vigas a meio vão no instante da rotura (δ_r/δ_{ref}) e a respetiva viga de referência. Outro indicador apresentado é o da extensão máxima na armadura de reforço no instante da rotura ($\epsilon_{máx}$).

Tabela 3 – Resumo dos resultados dos ensaios com as diferentes técnicas de reforço

Material	Técnica de Reforço	$F_r/F_{r_{ref}}$	$\bar{\delta}_r/\bar{\delta}_{r_{ref}}$	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (%)	Modo de rotura
CFRP	EBR (V2)	1.4	1,3	0,55	Descolamento do CFRP (a)
	NSM (V4)	1.6	2,3	0,96	Destacamento do recobrimento (c)
	CREatE (V8)	1.8	3,3	1,14	Rotura do CFRP (e)
Aço Inox	EBR (V12)	1,0	0,6	0,22	Descolamento do Aço inoxidável (b)
	NSM (V13)	1,3	0,8	--	Destacamento do recobrimento (d)
	CREatE (V15)	1,5	3,7	1,44	Esmagamento do betão (f)

Notas: (a) a (e) modos de rotura observáveis na Fig. 6.

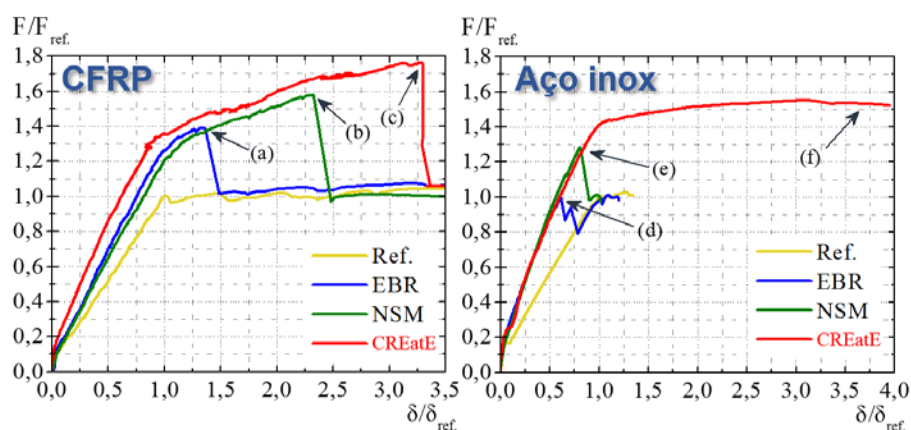


Fig. 5 – Diagramas normalizados força – deslocamento para as diferentes soluções de reforço testadas: EBR (a, d); NSM (b, e); CREatE (c, f)

Da análise da Tabela 3 e da Fig. 5 constata-se que nas vigas reforçadas com laminados de CFRP ocorreu um incremento da capacidade resistente das mesmas, em relação à viga de referência, de 40% na técnica EBR, de 60% na técnica NSM e de 80% na técnica CREatE. Por sua vez, em termos de deslocamento na rotura, constata-se que as técnicas EBR e NSM apresentam respetivamente um incremento de 30% e de 130% em relação à viga de referência, mostrando-se a técnica CREatE como a mais dúctil das soluções de reforço com um incremento de 230% do deslocamento na rotura. Por sua vez no reforço com barras de aço inox também se constata que a técnica CREatE é a que apresenta um maior incremento da capacidade resistente (50%), bem como uma maior ductilidade, com um incremento de 270% do deslocamento na rotura, evitando também as roturas prematuras que ocorrem nas técnicas EBR e NSM.

Na Fig. 6 mostram-se os modos de rotura observados nos ensaios das vigas reforçadas com as diversas técnicas (EBR, NSM e CREatE), com as armaduras de CFRP ou de Aço Inox. Nos modelos de vigas reforçados com as técnicas tradicionais (EBR e NSM) observaram-se roturas prematuras por descolamento da armadura de reforço (Figs. 6a) e 6d) e destacamento do recobrimento (Figs. 6b) e 6e). As vigas reforçados com a técnica CREatE, quer com Aço Inox quer com CFRP, não apresentaram roturas prematuras, tendo-se obtido roturas por rotura da armadura de CFRP ou esmagamento do betão ao nível do banzo superior da viga (Figs. 6c) e 6f).

Na Fig. 7 pode observar-se ao longo do vão das vigas e antes da sua rotura a distribuição das extensões longitudinais nos laminados de CFRP para cada solução de reforço estudada (EBR, NSM e CREatE). Verificando-se que a técnica CREatE per-

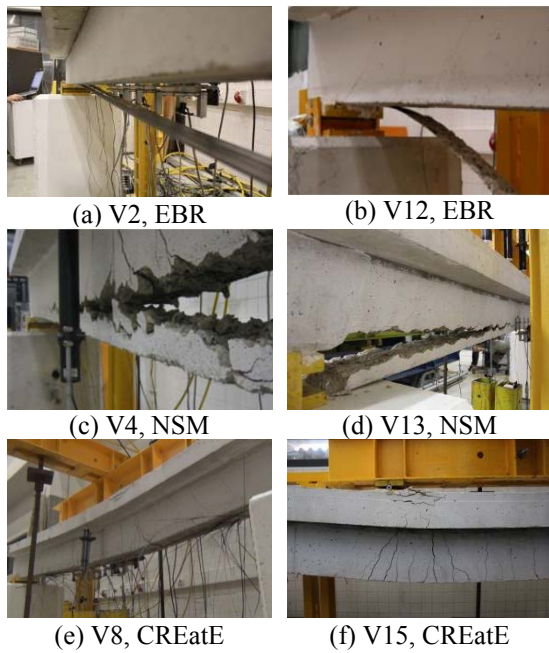


Fig. 6 - Modos de rotura obtidos (a-e) para as diferentes soluções de reforço testadas: EBR (V2, V12); NSM (V4, V13) e CREAtE (V8, V15).

mite mobilizar totalmente o laminado de CFRP e evitar roturas prematuras como as que ocorreram nas outras técnicas (descolamento do CFRP ou destacamento da camada de recobrimento). Observando a Fig. 8 pode constatar-se que o sistema CREAtE é bastante eficaz, pois permite grandes deformações da viga, com abertura de fendas significativa sem que se verifique o descolamento do CFRP na zona de ancoragem e evitando desta forma as roturas prematuras observadas nas técnicas tradicionais.

5. CONCLUSÕES

Da análise dos ensaios realizados constata-se que a técnica de reforço CREAtE proporcio-

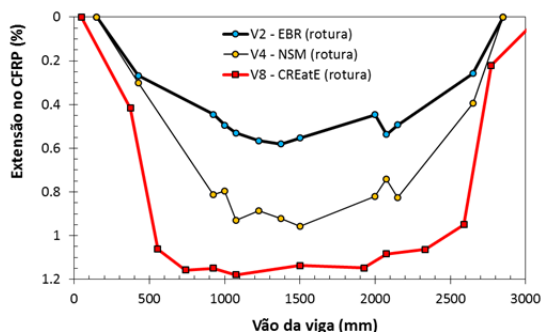


Fig. 7 - Extensão longitudinal ao longo dos laminados de CFRP próximo da rotura, para cada solução de reforço estudada (técnicas EBR, NSM e CREAtE)



Fig. 8 – Pormenor próximo da zona de ancoragem dos laminados de CFRP da viga V8 (CREAtE), em que se detetam aberturas de fendas significativa sem que se verifique qualquer rotura prematura do sistema

nou modos de rotura expectáveis pela armadura (c) ou pelo betão (f), melhorou o comportamento à flexão e ao esforço transversal e permitiu um aumento significativo da carga na cedência e na rotura, tendo melhorado significativamente a ductilidade em deslocamento das vigas reforçadas com esta técnica. A versatilidade de aplicação desta nova técnica (CREAtE) permite aplicar as armaduras de reforço coladas pelo exterior (EBR) ou inseridas no recobrimento (NSM), tirando assim partido das vantagens associadas a cada um destes métodos de reforço. O trabalho desenvolvido permitiu obter as seguintes conclusões principais:

- As técnicas NSM e EBR, nas condições em que foram executadas, tendem a apresentar roturas prematuras e, por isso, não permitem tirar o total desempenho das soluções de reforço com armadura de aço inox ou de laminados de CFRP. Em ambos os casos as roturas foram frágeis;
- A técnica CREAtE permite mobilizar totalmente a armadura de reforço. Apesar das grandes deformações a que as vigas reforçadas com este sistema estiveram sujeitas e da abertura de fendas significativa daí resultante, constatou-se que o sistema de ancoragem era totalmente eficaz evitando roturas prematuras;
- A técnica de reforço CREAtE utilizando dois tipos diferentes de armadura de reforço (aço inox ou laminados de CFRP), apresentou globalmente um desempenho bastante superior ao das técnicas EBR e NSM pois, ao contrário destas, apresentou roturas clássicas, aumentou a rigidez elástica de flexão, permitiu aumentar a

capacidade de carga na cedência e na rotura e demonstrou elevada ductilidade pós-cedência; Face às vigas de referência não reforçadas, as vigas reforçadas com a técnica CREatE permitiram aumentar a carga na rotura em cerca de 50% quando se utilizaram armaduras de Aço Inox e em 80% quando se utilizaram como armaduras de reforço os laminados de CFRP. Em termos de ductilidade em deslocamento o aumento também foi significativo, para valores superiores a 270% no caso do reforço com Aço Inox e 230% no reforço com laminados de CFRP.

REFERÊNCIAS

- Biscaia, H., et al. (2013). A smeared crack analysis of reinforced concrete T-beams strengthened with GFRP composites. *Engineering Structures*. 56(November): p. 1346-1361.
- Biscaia, H., C. Chastre, D. Cruz e N. Franco (2016a). "Flexural Strengthening of Old Timber Floors with Laminated Carbon Fiber Reinforced Polymers." *J. of Comp. for Construction*: 04016073.
- Biscaia, H., N. Franco, R. Nunes, e C. Chastre (2016b). Old suspended timber floors flexurally-strengthened with different structural materials. *Key Engineering Materials*, 713, 78-81.
- Carvalho, T., et al. (2010). Flexural Behaviour of RC T-Beams Strengthened with Different FRP Materials, in *The Third International fib Congress and Exhibition "Think Globally, Build Locally"*, fib: Washington DC. 12p
- Chastre, C. (2014). Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão - potencialidade e limitações. *REHABEND 2014 - Congresso Latinoamericano "Patología de la construcción, Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio"*. Santander.
- Chastre, C., H. Biscaia, A. Monteiro e N. Franco (2016a). Análise experimental de vigas de betão armado reforçadas à flexão com compósitos de FRP. *TEST&E 2016 - 1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Eng. Civil*. IST, Lisboa.
- Chastre, C., H. Biscaia, N. Franco e A. Monteiro (2016b). *Experimental Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Innovative Techniques*. 41th IAHS World Congress of Housing. Sustainability and Innovation for the Future. Albufeira, Portugal: 10p.
- Faustino, P. e C. Chastre (2016). "Flexural strengthening of columns with CFRP composites and stainless steel: Cyclic behavior." *Journal of Structural Engineering* 142(2): 04015136.
- Franco, N., C. Chastre e H. Biscaia (2014). Análise do desempenho à flexão de vigas de betão armado reforçadas com armaduras de aço inoxidável. *JPEE2014 – 5ª J.P.E.E., Betão Estrutural 2014*. LNEC, Lisboa, Portugal: 15p.
- Franco, N., C. Chastre e H. Biscaia (2016). Análise experimental do comportamento à flexão de vigas de betão armado reforçadas com armaduras pós-instaladas de aço inoxidável. *TEST&E 2016 - 1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil*. IST, Lisboa, Portugal: 8p.
- Monteiro, A. (2014). *Reforço de vigas de betão armado com armaduras exteriores de FRP*. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.
- Oehlers, DJ (2006). FRP plates adhesively bonded to reinforced concrete beams: generic debonding mechanisms. *Adv Struct Eng*:737–50.
- Rodrigues, C. C. (2005). *Comportamento às acções cíclicas de pilares de betão armado reforçados com materiais compósitos*. Tese de doutoramento, Universidade NOVA de Lisboa.
- Rodrigues, C. C. e M.A.G. Silva (2007). Cyclic compression behaviour of polymer concrete. *Journal of Polymer Eng.* 27(6-7): p. 525-545.
- Rodrigues, C. C., H. Biscaia, N. Franco and A. Monteiro (2016). *Structural Strengthening System with Internally Anchored Reinforcement by Adherence*. WIPO | PCT. WO 2016005941 A1: 37p.