

Avaliação do desempenho de ensaios de caracterização da ligação FRP-betão



Joaquim Barros¹



Inês Costa²

RESUMO

Os ensaios de arrancamento são realizados, em geral, para determinar o comprimento óptimo de amarração (L_e) entre FRP (Fibre Reinforced Polymers na nomenclatura inglesa) e o Betão (B). Usando os resultados destes ensaios, o L_e e a lei que define o comportamento local da ligação têm sido obtidos através de análise inversa com recurso a ferramentas numéricas de análise por elementos finitos e a modelos analíticos. O parâmetro L_e e a lei local tensão-deslizamento fazem parte de algumas recomendações de dimensionamento no contexto do reforço estrutural com FRP e, portanto, a sua avaliação rigorosa é um objectivo de elevada importância. Em termos de avaliação do L_e por intermédio de ensaios de arranque, algumas configurações de ensaio foram analisadas no presente trabalho: i) Ensaio de Arranque Simples; ii) Ensaio de Arranque Duplo e iii) Ensaio de Arranque em flexão. Tendo em conta os dados registados nos sensores colocados nestes ensaios e os modos de rotura ocorridos, uma análise crítica é feita de modo a aferir a fiabilidade destes testes para reproduzir os fenómenos que ocorrem nas estruturas reais de betão armado reforçadas com FRP. Esta análise crítica é baseada num recente *Round Robin Test* realizado com diversos sistemas NSM (Near Surface Mounted na nomenclatura inglesa), no qual a Universidade do Minho participou, e tendo também em conta os resultados obtidos em ensaios de arranque executados em programas experimentais anteriores. O objectivo final do presente trabalho é avançar com recomendações sobre a configuração de ensaio mais adequada para a caracterização da aderência entre betão e FRP, no contexto do reforço de estruturas de betão armado (BA) segundo a técnica NSM.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaios de arrancamento, NSM, FRP, Modelo Numérico.

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. ines.costa@civil.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

A eficácia da técnica NSM no reforço à flexão e ao corte de elementos de BA está já bem comprovada [1-2] e demonstra ser uma alternativa competitiva em comparação com a técnica EBR (Externally Bonded Reinforcement na nomenclatura inglesa) na reabilitação estrutural. De acordo com a técnica NSM, laminados ou varões de FRP são instalados em entalhes abertos no recobrimento dos elementos de BA. À semelhança das armaduras convencionais, um comprimento de ancoragem suficiente deve ser garantido, de modo a permitir a total mobilização FRP. Este comprimento de ancoragem mínimo, aqui referido como o comprimento de amarração óptimo (L_e), é geralmente determinado através da realização de ensaios de arranque.

Alguns dos tipos mais comuns ensaios de arranque disponíveis foram anteriormente agrupados por Chen et al. [3] no âmbito do reforço EBR, nas seguintes categorias: Arranque Simples/Duplo tipo *push*, Arranque Simples/Duplo tipo *pull* e Arranque em flexão.

Normalmente, em todos estes ensaios, o deslizamento da extremidade solicitada do FRP (s_l) e a força correspondente (F) são medidos. Em alguns ensaios o deslizamento extremidade livre do FRP (s_f) é também registado, bem como as extensões em alguns trechos seleccionados do FRP. A partir dos dados obtidos em termos de F , s_l e s_f , e com recurso a análise inversa baseada em modelos numéricos [4] ou analíticos [5] a lei que define o comportamento local da ligação, τ - s , pode ser obtida. No entanto, esta lei só pode representar o comportamento da interface FRP-B se os ensaios simularem correctamente as condições de aderência encontradas em aplicações reais de reforço. Com base em programas experimentais recentemente efectuados com três diferentes tipos de configuração de ensaio, uma análise crítica é realizada no presente trabalho, a fim de recomendar qual a configuração mais adequada, no contexto do reforço à flexão e ao corte. As seguintes configurações de ensaio são analisadas: Ensaio de Arranque Simples, realizado por Macedo et al. [6], Ensaio de Arranque Duplo, realizado no âmbito de um *Round Robin Test* Internacional [7] e Ensaio de Arranque em flexão executado por Sena-Cruz et al. [8].

2. CONFIGURAÇÕES DE ENSAIO E SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

2.1 Ensaio de Arranque Simples (EAS)

Os Ensaio de Arranque Simples tipo *push* foram executados por Macedo et al. [6], usando a configuração representada na Fig. 1a. Esta configuração é designada como tipo *push* pois a carga aplicada no FRP é equilibrada por uma reacção de compressão no topo do bloco de betão armado. O objectivo original deste programa experimental foi avaliar a influência da profundidade de instalação dos laminados de CFRP (y na Fig. 1a). A partir destes testes, a relação força-deslizamento para vários valores de comprimento de aderência foram obtidas ($L_b = 40, 70, 90, 120$ e 150 mm), bem como para três diferentes profundidades de instalação ($y = 0, 6$ e 12 mm), Fig. 1a.

O deslizamento da extremidade solicitada (LVDT₁) foi medido, bem como o deslizamento da extremidade livre (LVDT₂). Uma peça de aço (SP1) foi aparafusada em torno do CFRP no topo do provete ($z = 0$ mm) e o LVDT1 foi acoplado a um acessório metálico (SP2) colado na superfície do betão, 75 mm abaixo da face superior do provete, onde a deformabilidade do betão é assumida como nula (Fig. 1b). Desta forma, o LVDT₁ mede o deslocamento relativo entre a zona superior (FRP), e o bloco de betão, ao nível do início de L_b . O deslizamento da extremidade livre foi medido através de um LVDT fixo num acessório metálico colado numa zona de deformação também insignificante (cerca de 50 mm abaixo do final do comprimento de aderência), que regista o deslocamento de uma peça metálica aparafusada em volta do laminado de FRP, alguns milímetros abaixo da extremidade inferior do comprimento de aderência (Fig. 1b). De modo a determinar com precisão o deslizamento da extremidade solicitada, as deformações do laminado no comprimento L_0 (Fig. 1a) devem ser subtraídas das leituras registadas no LVDT₁.

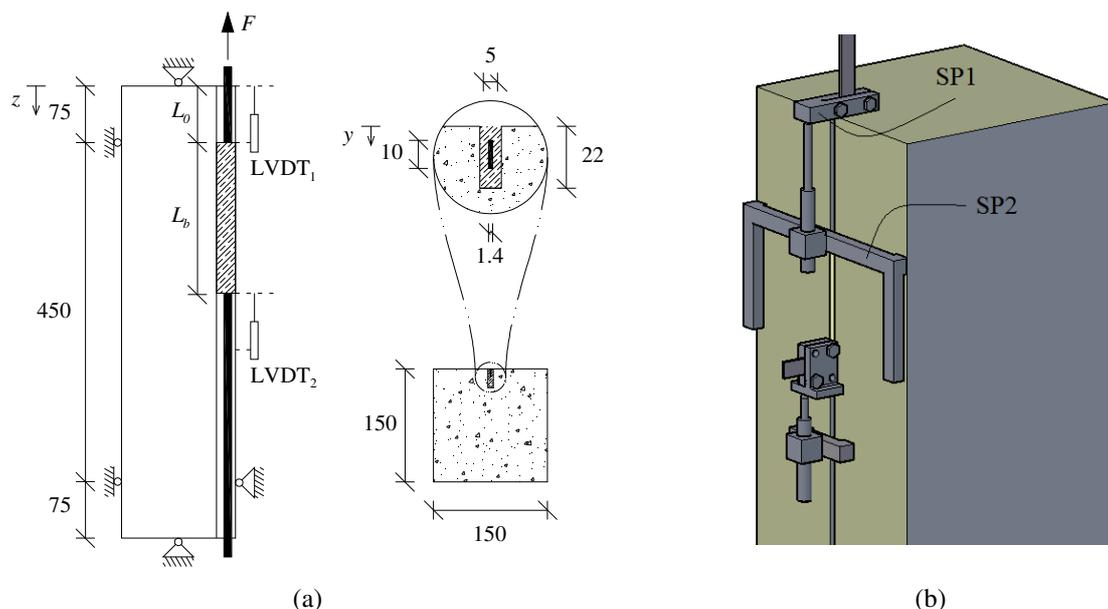


Figura 1. Ensaio de Arranque Simples: (a) Configuração e dimensões do provete, (b) Detalhe da medição do deslizamento da extremidade solicitada e da extremidade livre. (Dimensões em mm)

2.2 Ensaio de Arranque Duplo (EAD)

Os Ensaio de Arranque Duplo foram realizados no âmbito de um *Round Robin Test* [7], e são habitualmente designados como tipo *pull* pois os dois blocos de betão que formam o provete, representado na Fig. 2, são afastados um do outro, de modo a traccionar o FRP. Usando a configuração representada esquematicamente na Fig. 2a, só é possível medir o deslizamento na zona solicitada (LVDTs 2 e 3), uma vez que o espaço disponível na zona da extremidade livre é demasiado curto para a instalação de um LVDT. Neste programa experimental as extensões foram registadas ao longo do menor comprimento de aderência ($L_b = 300$ mm) através de extensómetros colocados a 10, 80 e 220 mm, medido a partir da extremidade solicitada (Fig. 2a). Esperava-se que os dois laminados de FRP fossem tensionados simultaneamente e que a rotura ocorresse no menor comprimento de aderência.

Pequenas pontas de FRP foram coladas na zona solicitada, fazendo um ângulo de 90° com o FRP, e criando uma extensão para fora do entalhe. Uma peça de aço foi aparafusada nessa ponta de FRP estabelecendo as condições necessárias para a medição do deslizamento daquela extremidade pelos LVDTs 2 e 3 suportados perto do bordo do bloco de betão (ver Fig. 2b).

Esta configuração é certamente a mais adequada para simular a contribuição de um elemento de FRP aplicado segundo a técnica NSM, quando aplicado no reforço ao corte. Na verdade, a configuração do reforço ao corte com NSM consiste na instalação de elementos de FRP em entalhes abertos nas faces laterais de uma viga. De Lorenzis et al. [9] descreveu este tipo de testes duplos como menos exactos para a determinação da relação tensão-deslizamento, pois qualquer excentricidade pode provocar efeitos indesejados de flexão e, portanto, interferir com os resultados. Na realidade, os ensaios experimentais realizados mostraram que as excentricidades indesejadas são difíceis de contornar fazendo com que a análise dos resultados seja menos intuitiva.

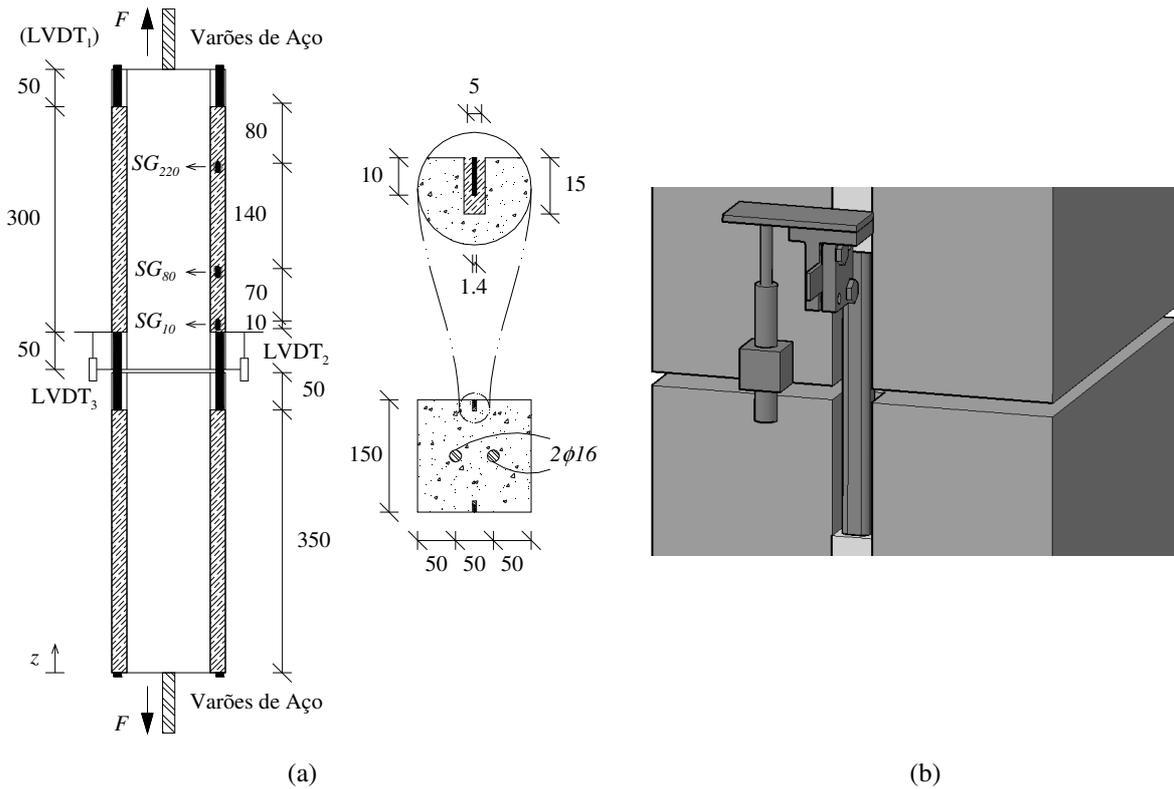


Figura 2. Ensaio de Arranque Duplo: (a) Configuração e dimensões do provete, (b) Detalhe da medição do deslizamento da extremidade solicitada. (Dimensões em mm)

2.3 Ensaio de Arranque em Flexão (EAF)

À semelhança do EAS, o Ensaio de Arranque em flexão, EAF, (Fig. 3) também possibilita a medição do deslizamento da extremidade solicitada e da extremidade livre (LVDT₂ e LVDT₁ respectivamente). Embora este tipo de testes implique cuidados adicionais durante o manuseamento e colocação dos provetes, pois existe o risco de danificar o FRP, na ausência de uma rótula permanente a ligar os blocos, não são, todavia, necessários apoios complexos nem amarras especiais. Além disso, a influência do número de FRPs aplicado e o seu espaçamento no comportamento da ligação pode também ser estudado, usando a mesma configuração de ensaio e os mesmos recursos laboratoriais.

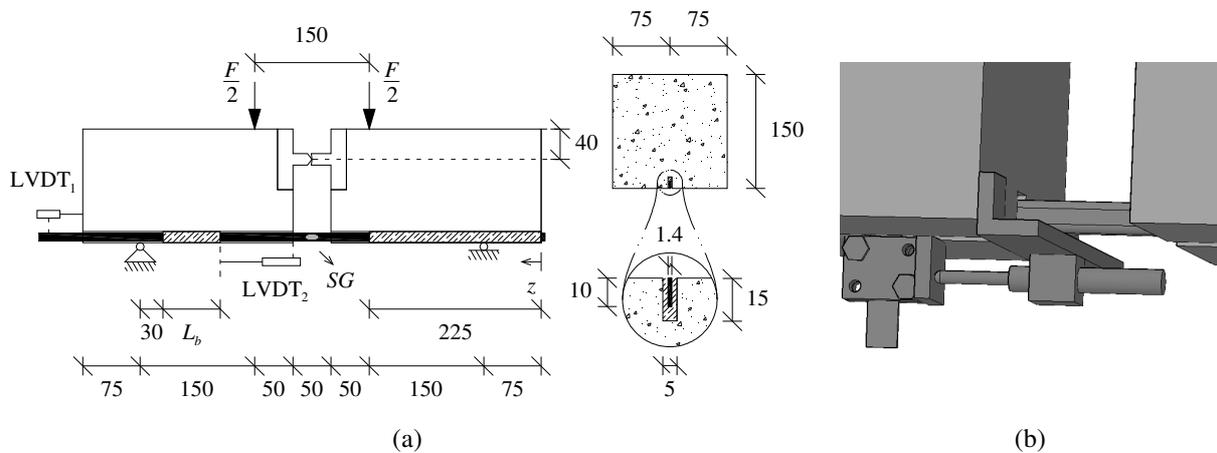


Figura 3. Ensaio de Arranque em Flexão: (a) Configuração e dimensões do provete, (b) Detalhe da medição do deslizamento da extremidade solicitada. (Dimensões em mm)

Os blocos de betão estão ligados por intermédio de uma rótula de aço a meio do vão, na parte superior, e pelo laminado FRP colado na face inferior. O sistema de monitorização nesses ensaios é semelhante ao descrito para os EAS. Um dispositivo similar ao descrito para o EAD é usado para medir o deslizamento na extremidade solicitada (Fig. 3b). Para avaliar directamente a tensão instalada no FRP, um extensómetro (SG) foi posicionado na zona central do FRP.

2.4 Comparação entre as configurações usando a análise por elementos finitos

Como o próprio nome indica, o ensaio de arranque em flexão é mais adequado para determinar a lei local de aderência e o comprimento óptimo de amarração em flexão, enquanto os restantes Ensaios de Arranque são mais adequados para a avaliação do comprimento óptimo de amarração em aplicações de reforço ao corte. Efectuando análise por elementos finitos, as configurações anteriormente apresentadas foram modeladas, e as deformadas incluídas na Fig. 4 foram obtidas.

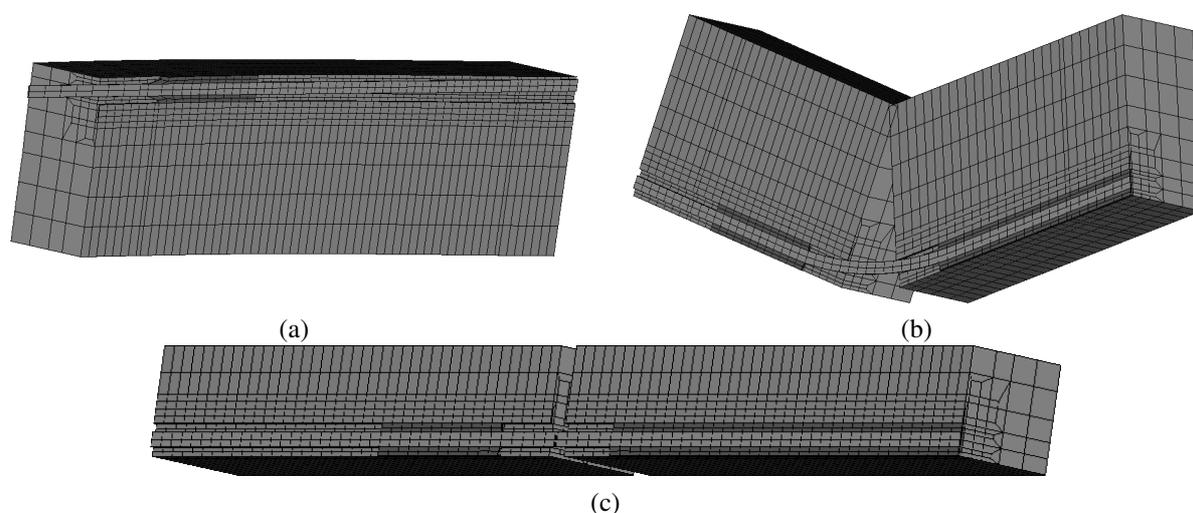


Figura 4. Malhas deformadas: (a) EAS, (b) EAF, (c) EAD.

Todos os modelos apresentam o mesmo L_b (120 mm), a mesma secção transversal de FRP ($1.4 \times 10\text{mm}^2$), e a mesma geometria de entalhe ($5 \times 22\text{mm}^2$). Os materiais foram considerados em todos os modelos como lineares e isotrópicos.

A secção transversal de FRP foi discretizada com dois elementos sólidos ao longo da altura. Para simplificar a análise dos resultados obtidos, o elemento finito mais próximo da superfície do provete é designado como 'Out', enquanto o elemento mais profundo no entalhe é referido como 'In'. Como se pode verificar na Fig. 4, a deformação do FRP é substancialmente diferente nas configurações de ensaio analisadas, especialmente quando os ensaios à flexão são comparados com os restantes (EAS e EAD). Note-se a rotação no plano do laminado de FRP no EAS (Fig. 4a), provocando um movimento descendente da extremidade solicitada e o movimento ascendente da extremidade livre, fenómeno que foi também registado nos ensaios experimentais. Este efeito, porém, não ocorreu no EAD devido à restrição oferecida pelo maior comprimento da ligação de ancoragem do FRP (Fig. 4c).

No EAF, o FRP flecte em torno do seu eixo de maior inércia, e um gradiente de extensões e tensões é introduzido ao longo da profundidade da secção transversal. Isto é visível na Fig 5, onde a tensão longitudinal no FRP é representada ao longo do comprimento de ligação ($x_b = 0$ corresponde à extremidade solicitada e $x_b = L_b$ corresponde à extremidade livre). Na verdade, quando a extensão máxima registada no FRP é 10‰ (note-se que no EAS e no EAD o perfil de extensões ao longo da altura é aproximadamente constante), a extensão máxima na superfície interior do FRP no EAF é 1.5‰ inferior. Esta diferença é demasiado elevada para ser ignorada. Além disso, o laminado de FRP considerado neste estudo tem uma altura de secção transversal de 10 mm, o que significa que esta disparidade de valores vai aumentar ainda mais quando a técnica NSM for aplicada com elementos de

FRP de maior secção transversal. Este gradiente de extensões ϵ , consequentemente, a variação significativa de tensões ao longo da profundidade da secção transversal de FRP é representativo do que acontece quando se utiliza laminados NSM-FRP para o reforço à flexão, mas não replica o gradiente de tensões quando os laminados NSM-FRP são utilizados para o reforço ao corte de vigas de BA. A Figura 5b representa a variação do deslizamento da extremidade solicitada ao longo da profundidade da secção transversal de FRP, quando a extensão máxima registada nos modelos é de 10‰, e a partir da qual é visível a curvatura existente no FRP durante o EAF.

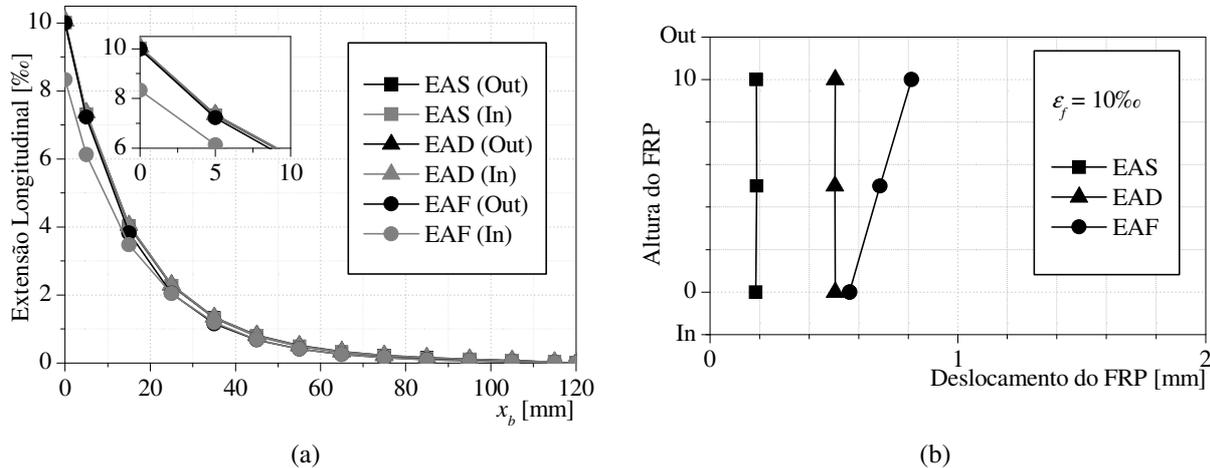


Figura 5. Resultados da análise linear: (a) extensão longitudinal ao longo do comprimento de amarração, (b) deslocamento do FRP ao longo da profundidade da secção transversal de FRP.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Propriedades dos materiais

As principais propriedades dos materiais intervenientes estão incluídas no Quadro 1. Os adesivos utilizados nestes ensaios foram os recomendados pelo fornecedor de FRP e possuíam propriedades mecânicas similares.

Quadro 1. Propriedades dos materiais.

Tipo de ensaio	Betão				FRP			Adesivo
	f_c [MPa]	E_c [GPa]	f_{fu} [MPa]	$E_{f,ISO}$ [GPa]	ϵ_f [‰]	w_f [mm]	d_f [mm]	
EAS	25.0 (ND)	ND	2879 (2.2%)	156 (1.6%)	18.5 (3.5%)	1.45 (ND)	9.6 (ND)	S&P Resin 220
EAD	35.0 (3.7%)	26 (1.8%)	3023 (2.3%)	162 (4.2%)	19.2 (4.4%)	1.4 (0.4%)	9.7 (0.1%)	S&P Resin 220
EAF	41.0 (2.3%)	ND	2833 (5.7%)	171 (0.9%)	15.5 (6.2%)	1.4 (0.5%)	10 (0.1%)	MBrace Epoxikleber 220

Nota: Os valores entre parenteses são os coeficiente de variação; ND: Não disponível.

3.2 Resultados

Os resultados de cada tipo de configuração de ensaio são indicados nos Quadros 2 a 4. Todos os deslizamentos (s) e extensões (ϵ) correspondem à carga máxima (F_{max}). Em todos os ensaios, os seguintes modos rotura (MR) foram reportados: rotura na interface FRP-adesivo (ADH), rotura do betão (RB) e rotura do FRP (Fu). Nestes Quadros, a percentagem da força de tracção mobilizada no

FRP ($\%f_{fu}$), i.e. a relação entre a tensão máxima de tracção e a resistência à tracção, ($f_{fmax} / f_{fu} \times 100$) é também indicada a fim de apresentar uma comparação equitativa entre todos os ensaios.

Analisando o Quadro 2, é notável que quanto maior é a profundidade de instalação do FRP (Fig. 1a), maior é a carga máxima de arranque e a $\%f_{fu}$.

Quadro 2. Resultados dos EAS.

L_b [mm]	s_{LVDT1} [mm]	y = 0 mm			y = 6 mm				y = 12 mm			
		F_{max} [kN]	$\%f_{fu}$ [%]	FM	s_{LVDT1} [mm]	F_{max} [kN]	$\%f_{fu}$ [%]	FM	s_{LVDT1} [mm]	F_{max} [kN]	$\%f_{fu}$ [%]	MR
40	-	-	-	-	0.60	18.72	46	Adh	0.41	19.90	49	Adh
70	-	-	-	-	0.54	27.69	69	Adh	0.64	31.43	78	Adh
90	0.82	27.87	69	Adh	0.92	33.90	84	Fu	0.82	35.63	88	Fu
120	1.27	35.36	88	Fu	0.72	34.46	85	Fu	0.79	37.92	94	Fu
150	1.89	37.29	93	Fu	1.03	36.43	90	Fu	0.85	38.35	95	-

Quadro 3. Resultados dos EAD ($L_b = 300$ mm).

Specimen	F_{max} [kN]	ϵ_{SG10} [%o]	ϵ_{SG80} [%o]	ϵ_{SG220} [%o]	s_{LVDT2} [mm]	s_{LVDT3} [mm]	$s_{Average}$ [mm]	$\%f_{fu}$ [mm]	MR
EAD1	36.7	13.1	12.5	12.2	0.44	0.64	0.53	87	RB
EAD2	39.4	15.2	5.4	0.1	4.40	0.65	2.63	93	RB
EAD3	41.7	14.9	6.3	0.8	0.96	1.31	1.13	97	RB
Média	39.3 (6%)	14.4 (7.8%)	8.1 (47%)	4.4 (153%)	1.93 (110%)	0.87 (43%)	1.43 (78%)	92 (6%)	-

Nota: Os valores entre parentises são os coeficiente de variação.

Quadro 4. Resultados dos EAF.

L_b [mm]	s_{LVDT2} [mm]	F_{max} [kN]	$\%f_{fu}$ [%]	MR
60	0.43 (11.3%)	18.7 (5.1%)	47	Adh
90	0.79 (9.0%)	23.9 (4.1%)	60	Adh
120	2.65 (8.1%)	27.7 (2.8%)	70	Adh

Nota: Os valores entre parentises são os coeficiente de variação.

A relação $\%f_{fu} - s_l$ dos três tipos de ensaios está representada na Fig. 6a, sendo visível que $\%f_{fu} - s_l$ no EAF é bastante diferente da relação obtida nos outros dois tipos de ensaios. Isso reforça a ideia de que os resultados dos EAF não podem ser directamente relacionados com os resultados dos EAS e os EAD. Esta Figura mostra também que para os EAS e EAD a $\%f_{fu}$ aumenta quase linearmente com s_l até $s_l = 1$ mm, na qual $\%f_{fu} \approx 95\%$. Acima de $s_l = 1$ mm a $\%f_{fu}$ permanece quase constante e igual a 95%. A Figura 6b representa a relação $f_f / f_{fu} \times 100 - s_l$ nos EAS e EAD. Para um s_l genérico, quanto maior a profundidade de instalação do FRP no entalhe, maior a tensão instalada no FRP, revelando o efeito favorável de confinamento fornecido pelo betão envolvente.

As Figuras 7a e 7b mostram a complexidade do modo de rotura ocorrido em alguns provetes do EAD. Durante o processo de transferência de tensão do FRP para o betão envolvente, o betão fractura, resultando na diminuição do comprimento de aderência e, finalmente, ocorre o deslizamento do laminado. Este tipo de rotura mista é bem descrito por Bianco et al. [10] e foi observado em vários programas experimentais em vigas reforçadas ao corte com FRP segundo a técnica NSM [10]

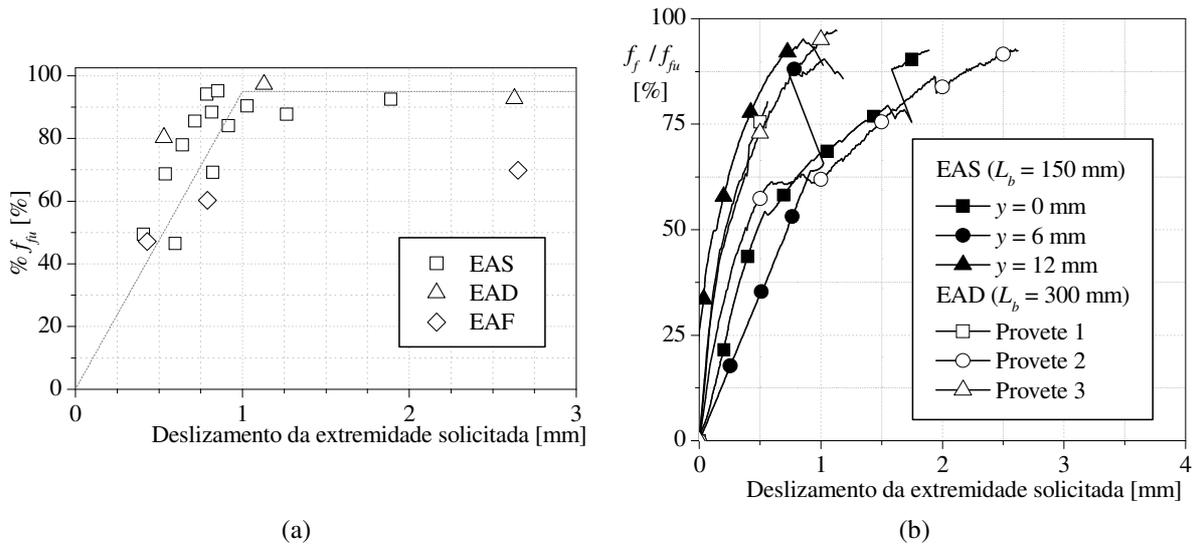


Figura 6. Comparação entre os resultados recolhidos.

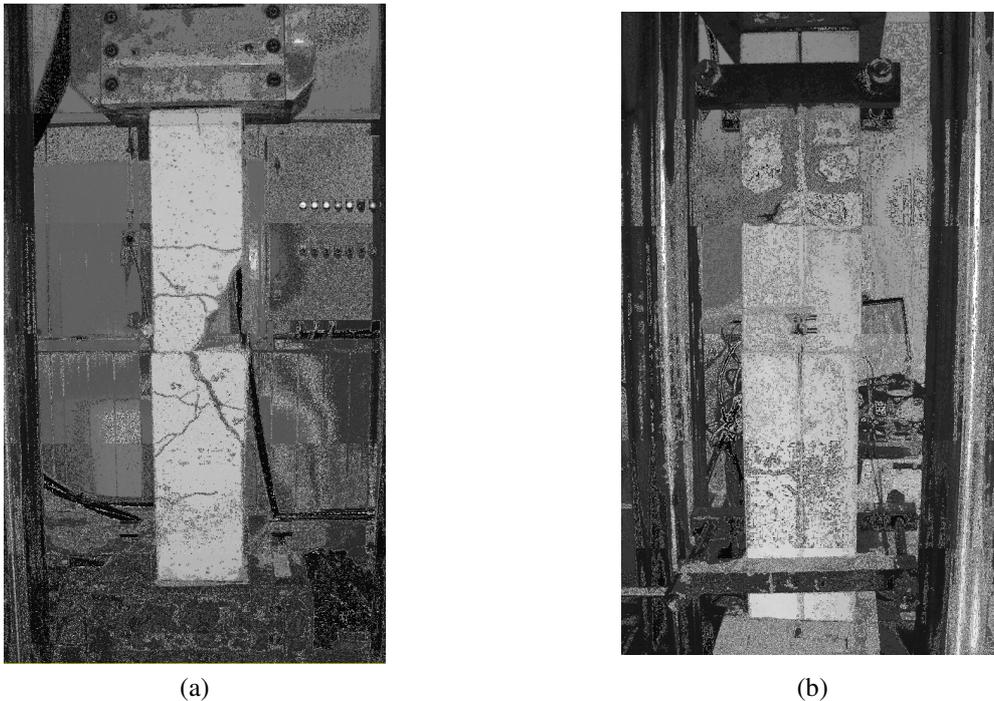


Figura 7. Ensaio de Arranque Duplo: aspecto da rotura do (a) EAD1 e do (b) EAD3.

As tensões registadas ao longo do comprimento de ligação são representadas na Figura 8 para os três provetes do EAD para três níveis distintos de tensão: 25%, 50% e 75% da resistência à tracção última do FRP. Os resultados obtidos por simulação numérica são também indicados, onde os materiais foram considerados como tendo comportamento linear e elástico. Dos resultados obtidos pode concluir-se que até uma tensão máxima de tracção do FRP de 50% da sua resistência à tracção, esta abordagem numérica prevê com razoável precisão as extensões ao longo do comprimento de aderência.

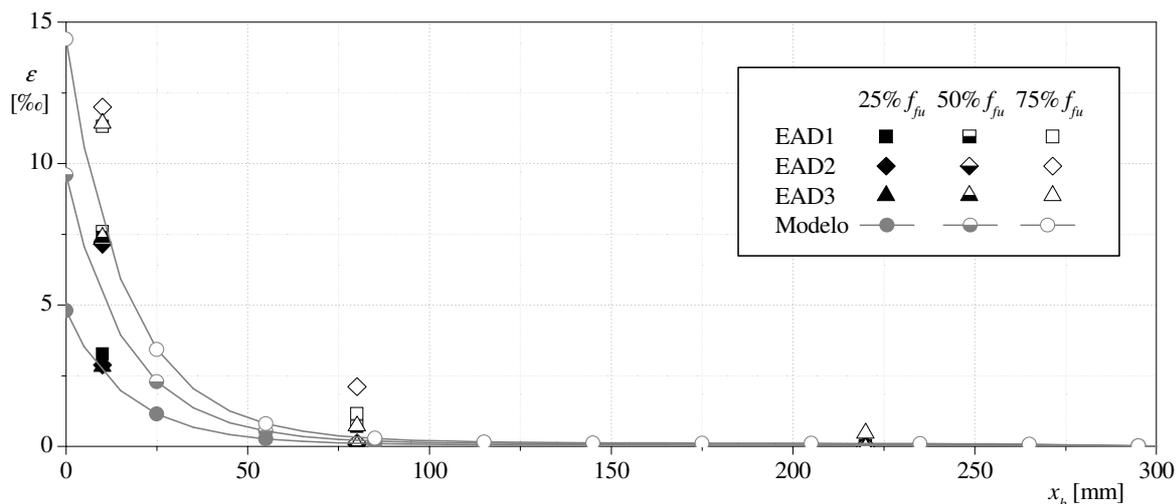


Figura 8. Ensaio de Arranque Duplo: extensões ao longo de L_b .

4. CONCLUSÕES

No âmbito da caracterização do comportamento da ligação entre laminados aplicados segundo a técnica NSM e substratos de betão, o desempenho do Ensaio de Arranque Simples (EAS), dos Ensaios de Arranque Duplo (EAD) e do Ensaio de Arranque em Flexão (EAF) foram analisados de forma crítica, tendo em conta os resultados obtidos em programas experimentais e em simulações numéricas. Dos estudos realizados pode concluir-se que o EAS e o EAD são adequados para caracterizar os mais relevantes dados necessários para as formulações dedicadas à previsão da contribuição de laminados NSM-FRP para o reforço ao corte de vigas. O EAS é, no entanto, aconselhado uma vez que se baseia num provete mais simples e mais fácil de produzir, bem como apresenta um esquema de montagem de ensaio menos complexo. Por outro lado, o EAF é recomendado para a determinação do comportamento da ligação entre laminados de NSM-FRP, no contexto do reforço à flexão de vigas/lajes. A partir da comparação entre os resultados obtidos experimental e numericamente, parece adequado assumir um comportamento linear e elástico para os materiais intervenientes, se o objectivo for a determinação do perfil de tensões no FRP ao longo do comprimento de ligação até uma tensão máxima no FRP que não exceda um nível de tensão de cerca de 50% da sua resistência à tracção.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho pertence ao programa de investigação "CUTINEMO", financiado pela FCT, PTDC/ECM/73099/2006. Os autores expressam o seu agradecimento às empresas S&P, Empreiteiros Casais e Artecancer. O segundo autor manifesta o seu agradecimento ao apoio financeiro da FCT bolsa SFRH/BD/61756/2009.

REFERÊNCIAS

- [1] Barros, J.A.O. e Fortes, A.S. (2005). Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement and Concrete Composites*, 27: 471-480.
- [2] Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O. (2010). Performance of reinforced concrete T beams strengthened in shear with NSM CFRP laminates. *Engineering and Structures*, 32: 373-384.

- [3] Chen, J.F., Yang, Z.J. e Holt, G.D. (2001). FRP or steel plate-to-concrete bonded joints: Effect of test methods on experimental bond strength. *Steel and Composite Structures*, 1: 213-244.
- [4] Sena-Cruz, J.M. e Barros, J.A.O. (2004). Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete. *Computers and Structures Journal*, 82: 1513-1521.
- [5] Sena-Cruz, J.M. e Barros, J.A.O. (2004). Bond Between Near-Surface Mounted Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminate Strips and Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 8: 519-527.
- [6] Macedo, L.S.L.S. Costa, I.G. e Barros, J.A.O. (2008). Assessment of the influence of the adhesive properties and geometry of CFRP laminates in the bond behavior. *Betão Estrutural 2008*, Guimarães, Portugal, 5-7 November, 10pp.
- [7] Barros, J.A.O. e Costa, I.G. (2010). Bond Tests on Near Surface Reinforcement Strengthening for Concrete Structures. *Report of the Round Robin Tests 2.2 carried out by EN-CORE Project at University of Minho*, Guimarães, Portugal, 53pp.
- [8] Sena-Cruz, J.M., Barros, J.A.O., Gettu, R. e Azevedo, A.F.M. (2006). Embedding NSM FRP Plates for Improved IC Debonding Resistance. *Journal of Composites for Construction*, 4: 295-303.
- [9] De Lorenzis, L., Rizzo, A. e La Tegola, A. (2002). A modified pullout test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites: Part B*, 33: 589-603.
- [10] Bianco, V., Barros, J.A.O. e Monti, G. (2009). Three dimensional mechanical model for simulating the NSM FRP strips shear strength contribution to RC beams. *Engineering and Structures*, 31: 815-826.