

Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2016  
FCTUC – 2 a 4 de novembro de 2016

## Comportamento da aderência de sistema de reforço NSM-CFRP na presença de diferentes tipos de adesivos



José Cruz<sup>1</sup>

Anja Borojevic<sup>2</sup>

José Sena-Cruz<sup>3</sup>

Eduardo Pereira<sup>4</sup>

Pedro Fernandes<sup>5</sup>

Patrícia Silva<sup>6</sup>

Arkadiusz Kwiecien<sup>7</sup>

### Resumo

No contexto atual, o reforço de estruturas de betão armado assume uma importância cada vez maior devido a diversos fatores. A técnica de reforço de estruturas de betão armado que utiliza laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento (designada por NSM – *Near Surface Mounted* na literatura inglesa) tem vindo a ser alvo de vários estudos dadas as suas potencialidades. No entanto, o estudo da influência do tipo de adesivo na aplicação desta técnica apresenta conhecimento limitado. É sobretudo neste aspeto que o presente estudo incide. Foi desenvolvido um programa experimental constituído por ensaios de arranque direto com o objetivo de estudar o comportamento da ligação entre os laminados de CFRP e o betão de sistemas NSM-CFRP, utilizando três variáveis de estudo: (i) tipo de adesivo; (ii) comprimento de ancoragem; e, (iii) secção transversal do laminado de CFRP. Durante a realização dos ensaios, sob controlo de deslocamento, foi monitorizada a força de arranque bem como o deslizamento no final da zona carregada. Foi também utilizada a Correlação Digital de Imagem (DIC) como complemento para avaliação do comportamento da ligação. De uma forma geral, dois dos adesivos proporcionaram padrões de comportamento da ligação semelhantes, dada a semelhança das suas propriedades mecânicas. Um terceiro adesivo, de propriedades mecânicas bastante inferiores originou resultados menos promissores. A ligação tende a ser tanto mais resistente quanto maior for o seu comprimento. Em termos da influência da secção transversal do laminado, é notória a maior capacidade resistente da ligação para laminados com área de secção transversal superior. A utilização da metodologia DIC permitiu concluir que os mecanismos resistentes da ligação são fortemente dependentes das propriedades resistentes do adesivo.

**Palavras-chave:** NSM, CFRP, adesivo, aderência, DPT.

---

<sup>1</sup> ISISE, Univ. do Minho, Depart. Eng. Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: a51314@alumni.uminho.pt

<sup>2</sup> ISISE, Univ. do Minho, Depart. Eng. Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: borojevic.anja@gmail.com

<sup>3</sup> ISISE, Univ. do Minho, Depart. Eng. Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: jsena@civil.uminho.pt

<sup>4</sup> ISISE, Univ. do Minho, Depart. Eng. Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: eduardo.pereira@civil.uminho.pt

<sup>5</sup> ISISE, Univ. do Minho, Depart. Eng. Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: pfernandes@civil.uminho.pt

<sup>6</sup> ISISE, Univ. do Minho, Depart. Eng. Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: patricia.silva@civil.uminho.pt

<sup>7</sup> Cracow University of Technology, Depart. of Civil Engineering, Poland; e-mail: akwiecie@pk.edu.pl

## 1. INTRODUÇÃO

Os polímeros reforçados com fibras (FRP) têm vindo a ser alvo de investigação em utilizações de reparação/reforço de estruturas existentes. Para a sua aplicação, uma das possibilidades é a técnica NSM (*Near Surface Mounted* na literatura inglesa) em que estes materiais são introduzidos no betão de recobrimento das estruturas de BA. Para fixação dos laminados de CFRP ao betão é normalmente utilizado um adesivo epoxídico, o qual tem um papel preponderante no desempenho do sistema de reforço. Diversos estudos têm sido realizados de forma a caracterizar a aderência destes sistemas de reforço na presença de polímeros reforçados com fibras de carbono (sistema NSM-CFRP). De acordo com [1], o desempenho do sistema NSM-CFRP depende sobretudo: (i) da geometria do entalhe e do FRP; (ii) das propriedades mecânicas do betão; (iii) das propriedades mecânicas do adesivo; (iv) da secção transversal do CFRP e da rugosidade da sua superfície externa; e, (v) da rugosidade da superfície do entalhe.

A Correlação Digital de Imagem (DIC – *Digital Image Correlation* na literatura inglesa) é um método que permite avaliar o campo de deformações da superfície de um elemento estrutural durante um ensaio. De uma forma geral o método baseia-se na comparação de duas imagens consecutivas da superfície do elemento estrutural, antes e depois da sua deformação, através da aplicação de uma técnica de correlação apropriada [2]. Mais informação sobre este assunto pode ser encontrada em publicações existentes (e.g. [3, 4]).

Na literatura existente são escassos os estudos dedicados à avaliação da influência do tipo de adesivo e da secção transversal do laminado de CFRP no comportamento da aderência do sistema NSM-CFRP (e.g. [5]). Assim, no presente estudo é abordada a influência da utilização de três diferentes adesivos (dois adesivos com elevado módulo de elasticidade e um com muito baixo módulo de elasticidade) para a fixação de laminados de CFRP ao substrato de betão de acordo com a técnica NSM, através da realização de ensaios de arranque direto (DPT – *Direct Pullout Test* na literatura inglesa). A principal motivação deste trabalho reside nas vantagens demonstradas na utilização de adesivos com deformabilidade elevada (flexíveis) na colagem externa de laminados de CFRP em vigas de BA [6]. Neste trabalho é também analisada a influência da secção transversal do laminado de CFRP, bem como do comprimento de ancoragem para o desempenho do sistema. Nas secções seguintes, o programa experimental é detalhado e os principais resultados obtidos são apresentados e analisados.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Programa de ensaios, geometria dos provetes e configuração de ensaio

O programa experimental incluiu 51 ensaios de arranque direto (DPT) onde a influência do tipo de adesivo, geometria da secção transversal do laminado de CFRP e comprimento de ancoragem na aderência do sistema NSM-CFRP foram analisadas. O Quadro 1 apresenta o programa experimental realizado, o qual inclui: (i) três tipos de adesivos – Adesivo 1 (ADH1), 2 (ADH2) e 3 (ADH3); (ii) duas secções transversais para o laminado de CFRP –  $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$  (L10) e  $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$  (L20); e, (iii) seis comprimentos de ancoragem ( $L_b$ ) – 50, 60, 80, 100, 200 e 300 mm. Os adesivos ADH1 e ADH2 são resinas epoxídicas enquanto o adesivo ADH3 é um polímero de poliuretano. Provetes cúbicos de betão foram utilizados para valores de  $L_b$  até 100 mm enquanto os provetes prismáticos foram usados para  $L_b$  de 200 e 300 mm. Cada série foi composta por 3 provetes, sendo designada com a sigla genérica de ADHX\_LYY\_LbZZ, em que X representa o tipo de adesivo (1, 2 ou 3), YY é a largura do laminado de CFRP em milímetros (10 ou 20) e ZZ indica o comprimento de ancoragem em milímetros.

A Fig. 1 apresenta a geometria dos provetes bem como a configuração de ensaio adotada para ambos os tipos de elementos de betão. Nos provetes cúbicos, com 200 mm de aresta, foram abertos entalhes nas suas faces laterais, paralelas à direção da betonagem, com secção transversal de  $5 \times 15 \text{ mm}^2$  ou  $5 \times 25 \text{ mm}^2$  para colocação dos laminados L10 ou L20, respetivamente. De forma a evitar rotura prematura do provete por formação de um cone de betão entre a extremidade carregada e o topo do provete, a zona

de ancoragem do laminado de CFRP ao betão inicia-se a 100 mm do topo do provete (no caso da série ADH3\_L10 a distância foi de 50 mm). Para fixação do provete ao pórtico de ensaio foi colocada uma chapa metálica de 20 mm de espessura sobre o provete ligada ao pórtico através de 4 varões roscados M10. No caso dos provetes prismáticos, os quais têm dimensões de 150×150×600 mm<sup>3</sup>, apenas foram abertos entalhes com secção transversal de 5×25 mm<sup>2</sup> para inserção do laminado L20. A distância livre adotada entre o início do comprimento de amarração e o topo do provete foi igual ao caso dos provetes cúbicos. O provete foi fixo ao pórtico através de uma chapa metálica, varões roscados, barras de aço e um macaco hidráulico na sua base. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento na extremidade carregada com duas velocidades: (i) para os adesivos rígidos ADH1 e ADH2 - 2 µm/s; (ii) para o adesivo flexível ADH3 - 5 µm/s. Para medição da força de arranque,  $F$ , foi utilizada uma célula de carga colocada entre a garra de fixação do laminado e o atuador, tendo sido utilizado um transdutor de deslocamentos – LVDT1 (*linear variable differential transducer* na literatura inglesa) para medição do deslizamento na extremidade carregada, i.e., o deslocamento relativo entre o laminado de CFRP e o betão na extremidade carregada.

Quadro 1. Programa experimental.

Tipo de adesivo	Geometria do provete de betão	Secção transversal do laminado, $w_f \times t_f$ [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento de ancoragem, $L_b$ [mm]	Designação da série
Adesivo 1 (ADH1)	Cúbica	10×1.4 (L10)	60	ADH1_L10_Lb60
			80	ADH1_L10_Lb80
			100	ADH1_L10_Lb100
Adesivo 2 (ADH2)	Cúbica	20×1.4 (L20)	80	ADH2_L20_Lb80
			100	ADH2_L20_Lb100
			200	ADH2_L20_Lb200
Adesivo 3 (ADH3)	Cúbica	10×1.4 (L10)	300	ADH3_L10_Lb300
			80	ADH3_L20_Lb80
			100	ADH3_L20_Lb100
Adesivo 1 (ADH1)	Prismática	20×1.4 (L20)	150	ADH3_L10_Lb150
			80	ADH3_L20_Lb80
			100	ADH3_L20_Lb100
Adesivo 2 (ADH2)	Prismática	20×1.4 (L20)	300	ADH3_L20_Lb300
			80	ADH3_L20_Lb80
			100	ADH3_L20_Lb100
Adesivo 3 (ADH3)	Prismática	20×1.4 (L20)	150	ADH3_L10_Lb150
			80	ADH3_L20_Lb80
			100	ADH3_L20_Lb100

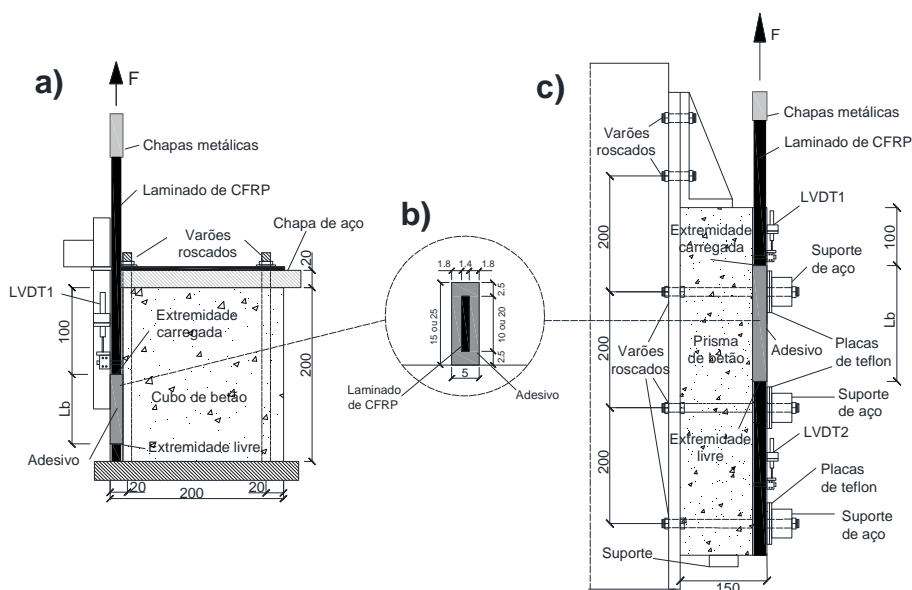


Figura 1. Geometria dos provetes e configuração de ensaio: (a) provetes cúbicos (secção transversal); (b) detalhe do entalhe; (c) provete prismático (secção transversal).

## 2.2. Caracterização dos materiais

A resistência à compressão do betão foi avaliada através de ensaios à compressão em cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura aos 28 e 110 dias da sua cura. O módulo de elasticidade e a resistência à compressão foram avaliados de acordo com as recomendações LNEC E-397-1993:1993 e NP EN 12390-3:2009, respetivamente. Aos 28 dias, foi obtido um módulo de elasticidade ( $E_{cm}$ ) de 27.0 GPa, com um coeficiente de variação, CoV, de 0.5% e uma resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ) de 35.4 MPa (CoV = 4.8 %). Aos 110 dias foram obtidos os seguintes valores:  $E_{cm} = 28.3$  GPa (CoV = 2.5%) e  $f_{cm} = 38.5$  MPa (CoV = 2.1%). Em ambas as idades, a relação entre  $f_{cm}$  e  $E_{cm}$  não se enquadra na proposta pelo EC2. As propriedades mecânicas do adesivo foram avaliadas de acordo com a norma ISO 527-2:2012, sendo obtidos os seguintes valores médios para o módulo de elasticidade ( $E_a$ ) e resistência à tração ( $f_a$ ): (i) ADH1 -  $E_a=11.67$  GPa (CoV = 0.51%) e  $f_a=25.59$  MPa (CoV = 7.40%); (ii) ADH2 -  $E_a=7.57$  GPa (CoV = 6.15%) and  $f_a=17.19$  MPa (CoV = 5.43%); (iii) ADH3 -  $E_a=0.012$  GPa (CoV = 9.09%) e  $f_a=2.67$  MPa (CoV = 12.49%). As propriedades mecânicas do laminado de CFRP foram determinadas por via experimental, tendo sido apresentados os resultados destas em [7] para L10 e em [8] para L20. Assim, para o laminado L10 obteve-se, respetivamente, um módulo de elasticidade e tensão de rotura de 169.5 GPa (CoV = 2.5%) e 2648.3 MPa (CoV = 1.8%); no caso do laminado L20 os valores obtidos foram de 161.8 GPa (0.9%) e 2784 MPa (CoV = 3.9%), respetivamente.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Principais resultados obtidos

O Quadro 2 apresenta os principais resultados obtidos dos ensaios de arranque direto, incluindo os resultados médios de cada série bem como os modos de rotura:  $F_{lmax}$  é a máxima força de arranque alcançada durante o ensaio;  $\tau_{max,avg}$  é a tensão de corte média na interface laminado-adesivo para  $F_{lmax}$ , obtida pela divisão de  $F_{lmax}$  pela área de contacto entre o laminado de CFRP e o adesivo, i.e.  $F_{lmax}/(2(w_f + t_f)L_b)$  (ver Fig. 1(b), em que  $w_f$  e  $t_f$  representam respetivamente a largura e espessura do laminado de CFRP e  $L_b$  representa o comprimento de ancoragem);  $s_{lmax}$  é o deslizamento na extremidade carregada para  $F_{lmax}$ .

Quadro 2. Principais resultados obtidos dos ensaios de arranque direto (valores médios).

Tipo de adesivo	Tipo de laminado	Série	$F_{lmax}$ [kN]	$\tau_{max,avg}$ [MPa]	$s_{lmax}$ [mm]	$F_{lmax}/f_{tu}$ [%]	MR
ADH1	L10	ADH1_L10_Lb60	22.49 (1.5%)	16.44 (1.5%)	0.50 (13.8%)	60.77 (1.5%)	I-FA(3)
		ADH1_L10_Lb80	25.97 (2.1%)	14.24 (2.1%)	0.68 (3.3%)	70.20 (2.1%)	I-FA(3)
		ADH1_L10_Lb100	29.57 (3.4%)	12.97 (3.4%)	0.93 (7.1%)	79.92 (3.4%)	I-FA(3)
	L20	ADH1_L20_Lb80	46.69 (4.5%)	13.63 (4.5%)	0.50 (7.0%)	58.36 (4.5%)	I-FA(2)
		ADH1_L20_Lb100	48.91 (4.1%)	11.43 (4.1%)	0.64 (7.1%)	61.14 (4.1%)	I-FA(3)
		ADH1_L20_Lb200	59.53 (3.0%)	6.95 (3.0%)	1.10 (22.7%)	74.41 (3.0%)	I-FA(1);F(1)
		ADH1_L20_Lb300	61.03 (2.6%)	4.75 (2.6%)	1.27 (17.2%)	76.28 (2.6%)	F(2)
ADH2	L10	ADH2_L10_Lb60 <sup>1</sup>	24.25 (1.59%)	17.73 (1.59%)	0.55 (11.35%)	65.55 (1.59%)	I-FA(3)
		ADH2_L10_Lb80 <sup>1</sup>	36.52 (2.09%)	20.02 (2.09%)	0.88 (2.15%)	98.71 (2.09%)	F(3)
		ADH2_L10_Lb100 <sup>1</sup>	35.60 (2.98%)	15.61 (2.98%)	0.81 (10.98%)	96.22 (2.98%)	F(3)
	L20	ADH2_L20_Lb80	48.40 (4.6%)	14.13 (4.6%)	0.48 (29.0%)	60.50 (4.6%)	I-FA(3)
		ADH2_L20_Lb100	54.06 (4.4%)	12.63 (4.4%)	0.75 (11.9%)	67.57 (4.4%)	I-FA(3)
		ADH2_L20_Lb200	55.19 (6.4%)	6.45 (6.4%)	0.88 (10.0%)	68.98 (6.4%)	I-FA(1);F(1)
		ADH2_L20_Lb300	60.36 (3.4%)	4.70 (3.4%)	2.01 (17.7%)	75.45 (3.4%)	I-FA(2);F(1)
ADH3	L10	ADH3_L10_Lb50	2.35 (6.0%)	2.06 (6.0%)	1.12 (11.2%)	6.34 (6.0%)	I-FA+C-A(3)
		ADH3_L10_Lb100	5.03 (6.9%)	2.21 (6.9%)	1.33 (14.7%)	13.59 (6.9%)	I-FA+C-A(3)
		ADH3_L10_Lb150	8.12 (6.3%)	2.38 (6.3%)	1.71 (2.9%)	21.95 (6.3%)	I-FA+C-A(3)
	L20	ADH3_L20_Lb80	5.71 (11.8%)	1.67 (11.8%)	1.88 (7.4%)	7.14 (11.8%)	I-FA+C-A(3)
		ADH3_L20_Lb100	9.89 (0.5%)	2.31 (0.5%)	2.11 (4.0%)	12.36 (0.5%)	I-FA+C-A(2)
		ADH3_L20_Lb300	28.57 (10.4%)	2.22 (10.4%)	2.71 (20.6%)	35.71 (10.4%)	I-FA+C-A(3)

Notas: os valores entre parênteses são os coeficientes de variação (CoV); MR (Modos de rotura): I-FA = Rotura por deslizamento na interface laminado-adesivo; C-A = Rotura coesiva do adesivo junto à interface laminado-adesivo; F = Rotura do laminado de CFRP; os valores entre parênteses representam o número de provetes onde o modo de rotura ocorreu. <sup>1</sup>Resultados extraídos de [9].

A Fig. 2 apresenta curvas típicas da força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada (curvas médias) para os ensaios de arranque direto realizados, sendo que, as curvas apresentadas correspondem aos ensaios realizados com  $L_b$  de 100 mm (comum a todas as séries) com ambas as secções transversais de laminado em estudo. As respostas são similares às obtidas por [7] e [10], sendo o comportamento sobretudo não-linear devido ao comportamento não linear do adesivo bem como ao processo de deslizamento do laminado de CFRP. Nas séries ADH1 e ADH2 são observados pequenos ramos pós-pico relacionados com o modo de rotura observado, deslizamento na interface laminado-adesivo rígido. Por outro lado, as respostas obtidas na série ADH3 são caracterizadas por ramos pós-pico alongados relacionados com a rotura coesiva no adesivo flexível. Comparando a resposta obtida nas séries ADH1 e ADH2 com a resposta da série ADH3,  $F_{1max}$  tende a ser significativamente maior com os adesivos rígidos enquanto os deslizamentos,  $s_1$ , são bastante maiores com o adesivo flexível. De referir também que com o adesivo ADH3 a rigidez do sistema NSM-CFRP é bastante inferior à proporcionada com os adesivos ADH1 e ADH2, no entanto, a ductilidade é bastante superior.

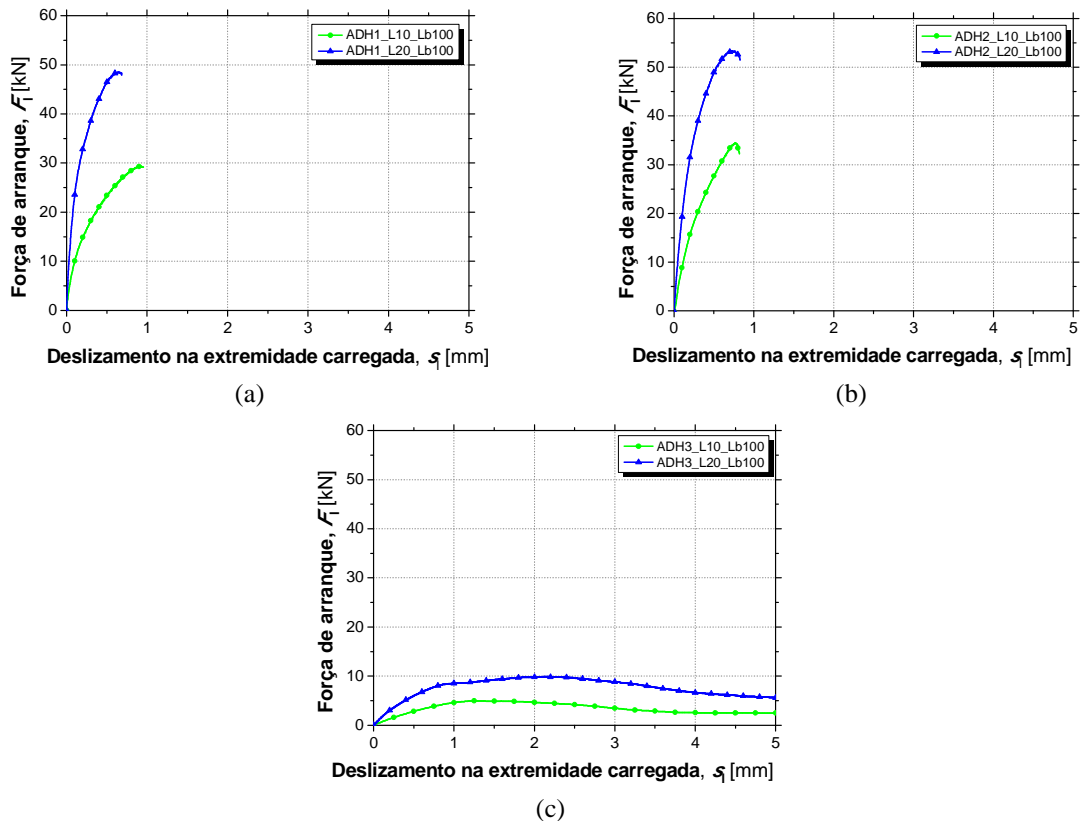


Figura 2. Curvas típicas força de arranque vs. deslizamento na extremidade carregada.

### 3.2. Modos de rotura

Os modos de rotura obtidos nas séries ADH1 e ADH2 incluem o deslizamento na interface laminado-adesivo (ver Fig. 3(a)) e a rotura do laminado de CFRP (ver Fig. 3(b)). Na série ADH3 foi obtido um modo de rotura misto, i.e., rotura por deslizamento/descolamento na interface laminado-adesivo em algumas zonas do comprimento de ancoragem, acompanhada de rotura coesiva do adesivo próximo à interface laminado-adesivo noutras partes (ver Fig.3(c)).

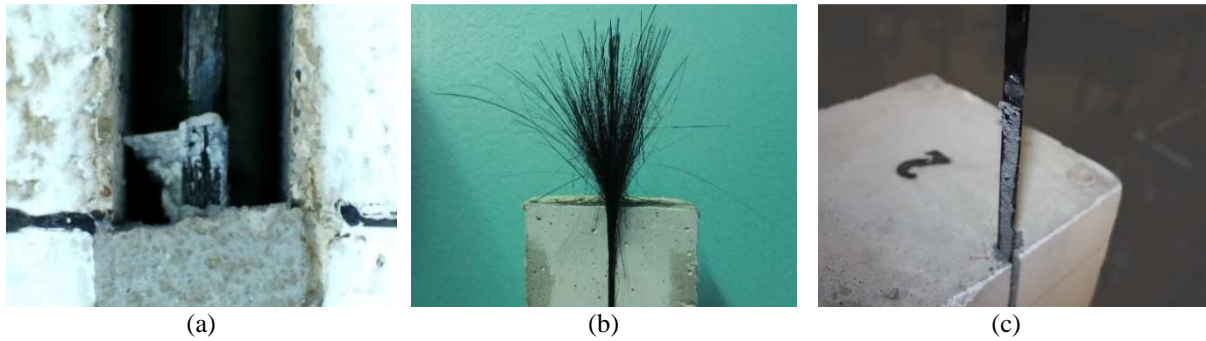


Figura 3. Modos de rotura observados: (a) e (b) ADH1 e ADH2; (c) ADH3.

### 3.3. Influência das variáveis de estudo no comportamento da aderência do sistema

A influência do tipo de adesivo e da secção transversal do laminado foi estudada para diferentes comprimentos de ancoragem, sendo o resumo dos resultados apresentado na Fig. 4. Tal como já era expectável e de acordo com a literatura (e.g. [1, 10, 11]),  $F_{lmax}$  tende a crescer com o aumento de  $L_b$ , até ao valor limite associado à rotura do laminado do CFRP (e.g. séries ADH2\_L10 com  $L_b$  de 80 e 100 mm).  $F_{lmax}$  é superior nas séries L20 em comparação com as séries L10, devido à maior área de contacto deste com o adesivo e conseqüente maior capacidade de transferência de tensões do laminado ao betão. De uma forma geral, o adesivo ADH2 é mais eficiente do que o ADH1, enquanto o ADH3 proporciona valores de  $F_{lmax}$  bastante inferiores aos proporcionados pelos dois primeiros. Por exemplo, nas séries L20\_Lb80,  $F_{lmax}$  obtida com o ADH3 é apenas 12% do valor médio obtido com ADH1 e ADH2. Contudo, o desempenho do ADH3 tende a aproximar-se do obtido com ADH1 e ADH2 com o aumento de  $L_b$  (ver séries L20\_Lb300).

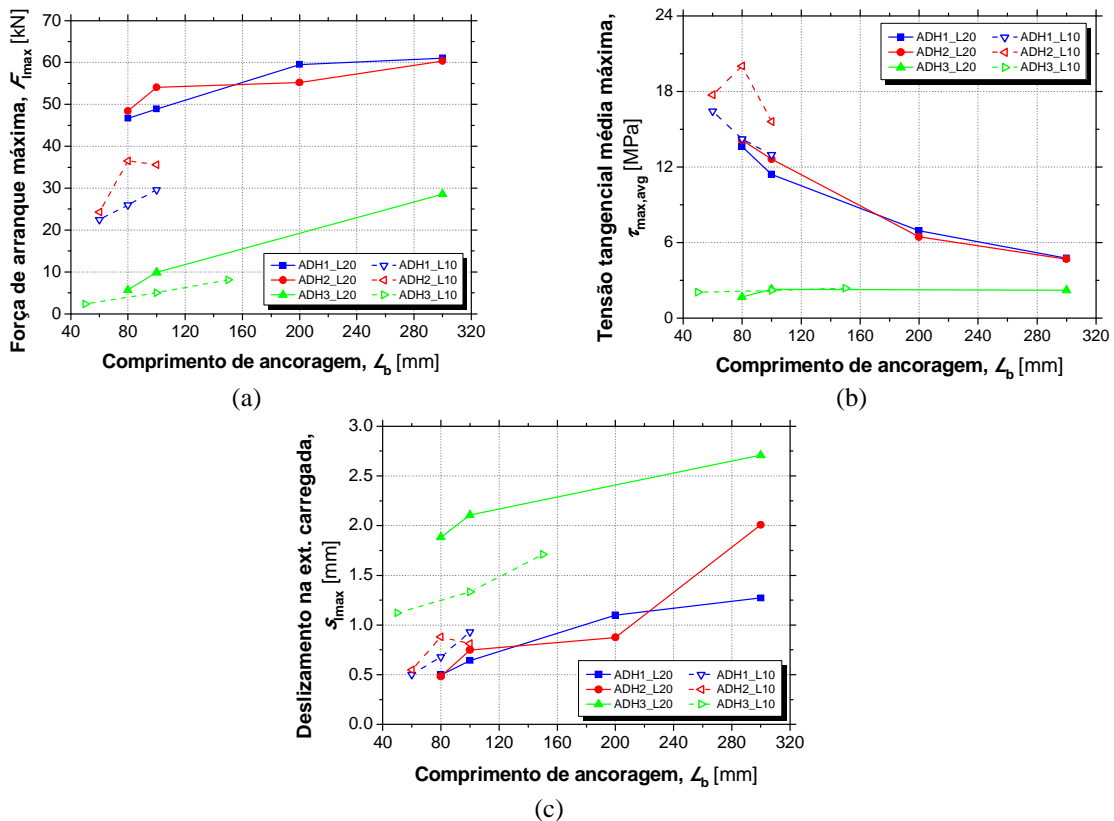


Figura 4. Influência das variáveis de estudo: (a) na força de arranque máxima, (b) na tensão tangencial média máxima e (c) no deslizamento na extremidade carregada para a força máxima.

$\tau_{\max,avg}$  tende a diminuir com o aumento de  $L_b$  no caso de ADH1 e ADH2 (adesivos rígidos) devido à distribuição não uniforme das tensões de corte ao longo de  $L_b$ , tal como referido e justificado em [1]. Na presença do adesivo ADH3 (adesivo flexível),  $\tau_{\max,avg}$  tende a ser similar para todos os comprimentos de ancoragem testados, o que pode dever-se a uma melhor e mais uniforme distribuição das tensões de corte ao longo de  $L_b$  devido à menor rigidez do adesivo ADH3. Constatou-se que a secção transversal do laminado de CFRP não influencia significativamente  $\tau_{\max,avg}$ , tendendo a tomar valores próximos para L10 e L20 nos vários  $L_b$  testados (exceto nas séries ADH2\_L10). Este facto, provavelmente, demonstra que o desenvolvimento das tensões de corte na interface laminado-adesivo é independente da secção transversal do laminado. Por fim, é notório que o tipo de adesivo tem uma influência significativa para  $\tau_{\max,avg}$ . Nas séries ADH2\_L10 os valores de  $\tau_{\max,avg}$  foram significativamente superiores aos das séries ADH1\_L10, enquanto que nas séries ADH1\_L20 e ADH2\_L20 os valores obtidos foram similares em ambos os casos. No caso das séries ADH3, os valores de  $\tau_{\max,avg}$  foram significativamente inferiores aos obtidos nas séries ADH1 e ADH2.

$s_{lmax}$  tende também a crescer com o aumento de  $L_b$  (exceto ente as séries ADH2\_L10\_Lb80 e ADH2\_L10\_Lb100, provavelmente devido à existência de rotura pelo laminado de para  $L_b$  igual ou superior a 80 mm).  $s_{lmax}$  é também influenciado pela secção transversal do laminado de CFRP. Por exemplo, nos casos dos adesivos ADH1 e ADH2 com  $L_b$  de 80 e 100 mm,  $s_{lmax}$  tende a ser superior nas séries L10, ao contrário do que acontece com o adesivo ADH3 onde  $s_{lmax}$  foi superior com o laminado L20, nomeadamente para  $L_b$  de 100 mm. Finalmente,  $s_{lmax}$  é maior nas séries ADH3\_L20\_Lb300 do que nas séries ADH1\_L20\_Lb300 e ADH2\_L20\_Lb300.

### 3.4. Correlação digital de imagem (DIC)

A Fig. 5 apresenta dois casos típicos onde a metodologia DIC foi aplicada de forma a comparar o campo de extensões da superfície com o uso de adesivos flexíveis e rígidos. As Fig. 5(a) e Fig. 5(b) apresentam os resultados obtidos para os provetes ADH1\_L20\_Lb100\_1 (“\_1” simboliza o primeiro provete da série) e ADH3\_L20\_Lb100\_1, respetivamente, na força de arranque máxima. No primeiro caso, existe o aparecimento das fendas diagonais no betão resultantes das forças diagonais de compressão (escoras) devido à transferência de tensões do laminado para o betão. Gera-se assim, um padrão de fendilhação típico em “espinha de peixe” devido aos mecanismos resistentes desenvolvidos pelo sistema [10]. Assim, com base nos resultados, o uso de adesivos rígidos leva a concentração dos danos no betão circundante à região onde o reforço está presente bem como na interface adesivo-betão, permanecendo o adesivo aparentemente intacto. Pelo contrário, o uso de adesivos flexíveis leva à concentração dos danos no adesivo, permanecendo os restantes materiais aparentemente intactos.

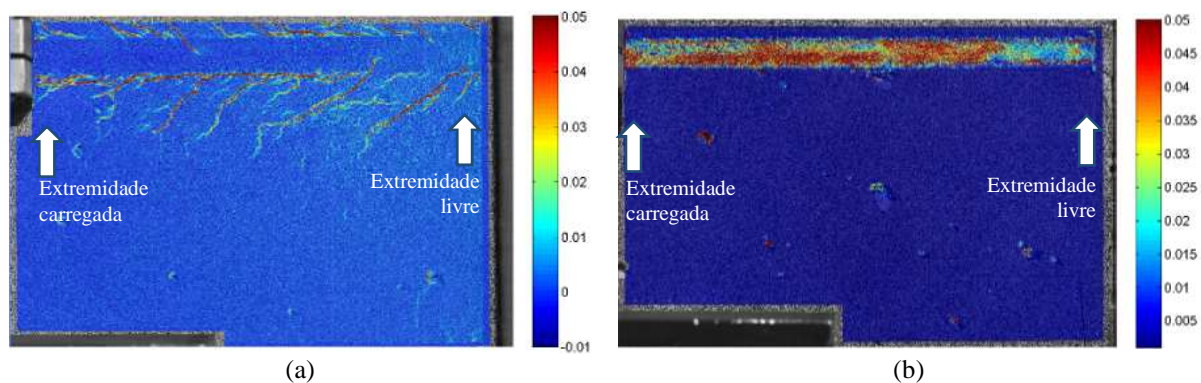


Figura 5. Resultados DIC (extensões principais de tração para a força de arranque máxima) obtidos para os provetes: (a) ADH1\_L20\_Lb100\_1 e (b) ADH3\_L20\_Lb100\_1.

#### 4. CONCLUSÕES

Foi realizado um programa experimental sobre o comportamento da aderência do sistema NSM-CFRP, tendo-se avaliado a influência dos seguintes parâmetros: (i) adesivos com diferentes propriedades mecânicas; (ii) geometria da secção transversal do laminado de CFRP; e, (iii) comprimento de ancoragem. O estudo foi realizado por intermédio de ensaios de arranque direto (DPT).

A rotura dos provetes deu-se por deslizamento na interface laminado-adesivo ou por rotura do laminado de CFRP na presença dos adesivos rígidos dependendo do comprimento de ancoragem. Nos provetes reforçados com o adesivo flexível, a rotura ocorreu por deslizamento na interface laminado-adesivo em algumas zonas do comprimento de ancoragem, em conjunto com a rotura coesiva do adesivo próximo da superfície do laminado nas restantes zonas.

De uma forma geral, com o aumento do comprimento de ancoragem, existiu também o aumento da força máxima de arranque. De notar também uma melhor eficiência na transferência de tensões entre o laminado de CFRP e o betão na presença de adesivos rígidos. Como já era expectável, a força de arranque é superior com o uso do laminado de maior secção transversal. Em termos dos comprimentos efetivos de ancoragem, no caso dos adesivos rígidos e com o laminado L10, para o adesivo ADH1 não foi possível encontrar um valor, enquanto no caso do adesivo ADH2 esse valor é da ordem dos 80 mm. Quanto ao laminado L20, para ambos os adesivos rígidos, o comprimento efetivo de ancoragem situar-se-á entre os 200 e os 300 mm. Por sua vez, no caso do adesivo ADH3, para nenhum dos laminados foi possível estabelecer o comprimento efetivo de ancoragem com base nos comprimentos de ancoragem testados. As deformações no adesivo, para o mesmo nível de carga, são bastante superiores com o uso do adesivo flexível, comparativamente com os adesivos rígidos. Em geral, a máxima tensão de corte média ao longo do comprimento de ancoragem tende a diminuir com o aumento do comprimento de ancoragem no caso do uso dos adesivos rígidos, enquanto que com o adesivo flexível é praticamente igual para todos os comprimentos de ancoragem. A secção transversal do laminado de CFRP não tem influência significativa sobre os valores da máxima tensão de corte média, sendo os valores obtidos superiores com o uso de adesivos rígidos comparativamente com os obtidos na presença do adesivo flexível. A metodologia DIC permitiu identificar os mecanismos de aderência desenvolvidos por ambos os tipos de adesivo durante o processo de carregamento. Na presença de adesivos rígidos, os danos tendem a concentrar-se no betão e na interface laminado-adesivo, enquanto que com o uso do adesivo flexível, os danos tendem a concentrar-se no adesivo.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado por fundos nacionais através da FCT e cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Fatores de Competitividade e internacionalização (POCI) e do Programa Regional de Lisboa no âmbito dos projetos FRPLongDur POCI-01-0145-FEDER-016900 (PTDC/ECM-EST/1282/2014) e POCI-01-0145-FEDER-007633. Os autores ainda agradecem também o apoio e a contribuição das seguintes empresas: S&P Clever Reinforcement (oferta do laminado de CFK e adesivo *S&P Resin 220*) e Sika (oferta do adesivo *SikaDur 30*).

#### REFERÊNCIAS

- [1] Coelho, M.R.F.; Sena-Cruz, J.M.; Neves, L.A.C. (2015) A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. *Construction and Building Materials* 93, pp. 1157-1169.
- [2] Chu, T.C.; Ranson, W.F; Sutton, M.A. (1985) Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics* 25(3), pp. 232-244.



- [3] Pereira, E.B.; Fischer, G.; Barros, J.A.O. (2012) Direct assessment of tensile stress-crack opening behavior of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC). *Cement and Concrete Research* 42(6) pp. 834-846.
- [4] Carloni, C.; Subramaniam, K.V. (2013) Investigation of sub-critical fatigue crack growth in FRP/concrete cohesive interface using digital image analysis. *Composites Part B: Engineering* 51, pp. 35-43.
- [5] Macedo, L.; Costa, I.; Barros, J. (2008) Assessment of the influence of the adhesive properties and geometry of CFRP laminates in the bond behaviour. *BE2008 – Betão Estrutural 2008*, Guimarães, Portugal, pp. 10.
- [6] Derkowski, W.; Kwiecień, A.; Zając, B. (2013) CFRP strengthening of bent RC elements using stiff and flexible adhesives. *Technical Transactions 1-B/2013*, pp. 37-52.
- [7] Fernandes, P.M.G.; Silva, P.M.; Sena-Cruz, J. (2015) Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading. *Engineering Structures* 84, pp. 350-361.
- [8] Sena-Cruz, J.; Jorge, M.; Branco, J.M.; Cunha, V.M.C.F. (2013) Bond between glulam and NSM CFRP laminates. *Construction and Building Materials* 40, pp.260-269.
- [9] Sena-Cruz, J.; Fernandes, P.; Silva, P.; Benedetti, A.; Granja, J.; Azenha, M. (2015) Bond Durability and Quality Control of NSM-Concrete Systems. *COST Action TU1207, Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction*, Lecce, Italy.
- [10] Sena-Cruz, J.M. (2005) Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips. *PhD Thesis*, University of Minho.
- [11] Peng, H.; Hao, H.; Zhang, J.; Liu, Y.; Cai, C.S. (2015) Experimental investigation of the bond behavior of the interface between near-surface-mounted CFRP strips and concrete. *Construction and Building Materials* 96, pp. 11-19.