

## Influência do tipo de adesivo no comportamento à flexão de faixas de laje reforçadas com sistemas NSM-CFRP



José Cruz<sup>1</sup>



Anja Borojevic<sup>2</sup>



José Sena-Cruz<sup>3</sup>



Patrícia Silva<sup>4</sup>



Pedro Fernandes<sup>5</sup>



Arkadiusz Kwiecien<sup>6</sup>

### Resumo

Atualmente verifica-se que muitas das estruturas de betão armado existentes apresentam necessidade de reparação/reforço estrutural devido a diferentes fatores, tais como a degradação dos seus materiais constituintes e a necessidade de uma capacidade resistente superior.

O recurso à técnica NSM (*Near Surface Mounted* na literatura inglesa), baseada na introdução dos laminados de CFRP no betão de recobrimento, é uma possibilidade para o reforço de estruturas de betão armado. Nos últimos anos esta técnica tem sido alvo de vários estudos; no entanto, o conhecimento na temática da influência do tipo de adesivo no comportamento de elementos de betão reforçados na presença de sistemas NSM-CFRP é algo limitado. Assim, o principal objetivo deste estudo consiste em avaliar o comportamento estrutural de faixas de laje sujeitas a esforços de flexão e reforçadas com laminados de CFRP fixos com recurso a adesivos de propriedades mecânicas distintas.

O programa experimental desenvolvido é constituído por ensaios à flexão em faixas de laje em que as variáveis alvo de estudo foram: (i) tipo de adesivo utilizado na ligação dos laminados de CFRP ao betão; e, (ii) existência ou não de pré-fendilhação do betão constituinte das lajes. Ao longo dos ensaios foram monitorizadas a força aplicada, o deslocamento a meio vão, a largura de fendas e extensões.

Em termos gerais, o comportamento observado revela uma correlação entre as propriedades mecânicas dos adesivos e a capacidade resistente das faixas de laje. Contudo, não existe proporcionalidade entre estas duas variáveis. A pré-fendilhação não provoca alterações significativas na capacidade de carga das faixas de laje.

**Palavras-chave:** NSM, CFRP, adesivo, flexão.

---

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

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

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

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

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

<sup>6</sup> Cracow University of Technology, Depart. of Civil Engineering, Poland; e-mail: akwiecie@pk.edu.pl

## 1. INTRODUÇÃO

Os polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fibre Reinforced Polymers* na literatura inglesa) têm vindo a ser utilizados na reparação e/ou reforço de estruturas de betão armado. A técnica NSM (*Near Surface Mounted* da literatura inglesa), baseada na inserção de FRP no betão de recobrimento é uma das possibilidades para a aplicação deste tipo de materiais. Tipicamente é utilizado um adesivo epoxídico para ligação do FRP ao betão, o qual tem um papel decisivo no desempenho do sistema de reforço. Os estudos que abordem a influência do tipo de adesivo para o comportamento à flexão de faixas de laje reforçadas com sistemas NSM-CFRP são escassos. No entanto em [1] realizaram um estudo em vigas de BA à flexão reforçadas com laminados colados externamente com adesivos de elevada deformabilidade, no qual ficaram demonstradas vantagens na utilização deste tipo de adesivos. Existem alguns estudos do comportamento à flexão de faixas de laje abordando outros aspetos, nomeadamente os efeitos da pré-fendilhação (e.g. [2]), da aplicação de laminados pré-esforçados (e.g. [3]) e do desempenho sob condições de fadiga (e.g. [4]). No presente estudo é avaliada a influência da utilização de três distintos adesivos na resposta estrutural à flexão de faixas de laje reforçadas com sistemas NSM-CFRP, bem como da existência ou não de pré-fendilhação do betão. Nas secções seguintes, o programa experimental é detalhado e os principais resultados obtidos são descritos e analisados.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Programa de ensaios

O programa experimental foi constituído por sete faixas de laje com as quais foram avaliados três tipos de adesivos: (i) adesivo 1; (ii) adesivo 2; e, (iii) adesivo 3. Para cada tipo de adesivo, foi estudado o efeito da existência ou não de fendilhação prévia à aplicação do reforço no comportamento à flexão do sistema NSM-CFRP. Para tal, usaram-se duas lajes para cada tipo de adesivo, sendo uma pré-fendilhada e a outra sem qualquer tipo de fendilhação prévia. Será ainda de referir que no âmbito deste programa de ensaios experimentais foi ainda incluída uma faixa de laje sem qualquer tipo de reforço à base de laminados de CFRP, designada por laje de referência. O Quadro 1 apresenta o programa de ensaios experimentais realizado. A designação adotada para cada faixa de laje apresenta a sigla genérica de SL\_ADHX\_U ou SL\_ADHX\_C, onde X representa o número do adesivo usado no reforço da faixa de laje, U simboliza ausência de pré-fendilhação (U - *uncracked*) e C representa a presença de pré-fendilhação (C - *cracked*). A laje de referência é designada por SL\_REF.

Quadro 1. Designação das faixas de laje usadas no presente programa experimental.

<i>Designação do adesivo</i>	<i>Secção transversal do laminado</i> <sup>(1)</sup> [mm <sup>2</sup> ]	<i>Pré-fendilhação</i> <sup>(2)</sup>	<i>Designação</i>
-	-	-	SL_REF
Adesivo 1 (ADH1)		N S	SL_ADH1_U SL_ADH1_C
Adesivo 2 (ADH2)	20×1.4 (L20)	N S	SL_ADH2_U SL_ADH2_C
Adesivo 3 (ADH3)		N S	SL_ADH3_U SL_ADH3_C

### 2.2. Geometria e configuração de ensaio

Na Fig.1 é apresentada a geometria das faixas de laje, os detalhes do sistema de reforço em estudo e a configuração do ensaio utilizada. Estas faixas de laje têm comprimento de 2600 mm, 600 mm de largura e 120 mm de espessura. O aço utilizado no fabrico das armaduras é da classe A400 NR. A armadura longitudinal inferior é composta por quatro varões com 8 mm de diâmetro (4Ø8) enquanto a armadura longitudinal superior é constituída por 3 varões com 6 mm de diâmetro (3Ø6). Por sua vez, a armadura

de distribuição é materializada por estribos de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm ( $\text{Ø}6@0.30$ ). Adotou-se 20 mm para a espessura da camada de recobrimento. A solução de reforço adotada para as faixas de laje é constituída por dois laminados de CFRP de secção transversal de  $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$  aplicados no betão de recobrimento segundo a técnica NSM em entalhes com secção transversal constante de com 5 mm de largura e 25 mm de profundidade. O laminado apenas foi aplicado num comprimento de 2200 mm, existindo em cada extremidade da laje 200 mm onde este não está presente.

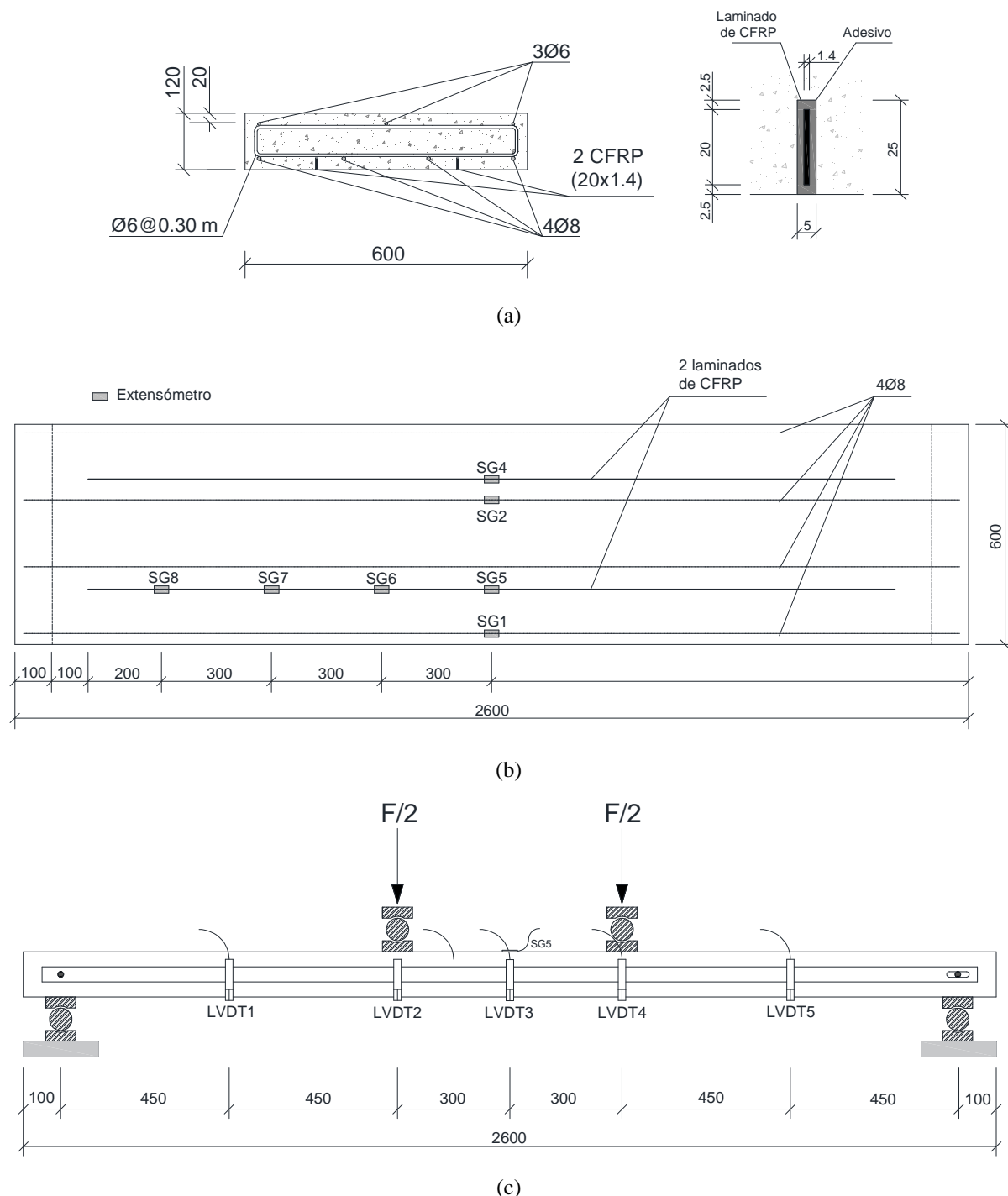


Figura 1. Faixas de laje: (a) geometria da secção transversal; (b) geometria longitudinal e posição dos extensómetros; (c) configuração do ensaio. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

A Fig. 1(c) ilustra a configuração do ensaio utilizada. Existem quatro pontos de carga de forma a solicitar a faixa de laje aos esforços pretendidos. A distância entre apoios inferiores (vão) é de 2400 mm, sendo

o vão de corte de 900 mm. A instrumentação das faixas de laje incluiu a mediação da carga aplicada, dos deslocamentos verticais ao longo do seu eixo longitudinal, das extensões em distintas secções dos laminados de CFRP e das extensões da armadura longitudinal inferior e betão na zona de compressão máxima a meio vão. Em duas das quatro armaduras inferiores foram colocados a meio vão dois extensómetros (SG1 e SG2), um em cada, e no betão na fibra superior mais comprimida foi também aplicado a meio vão outro extensómetro (SG3). Por fim, nos laminados foram colocados cinco extensómetros (SG4 a SG8), existindo em cada laje apenas um laminado instrumentado com quatro extensómetros (SG5 a SG8) e um extensómetro colocado no outro laminado de CFRP, a meio vão (SG4), como é ilustrado na Fig. 1(b). Na medição das extensões nos laminados e armadura longitudinal usaram-se extensómetros TML BFLA-5-3-3L, enquanto que para a medição das extensões no betão foram usados extensómetros TML PFL-30-11-3L. Para monitorizar os deslocamentos verticais ao longo do eixo longitudinal da laje foram colocados cinco LVDT's (LVDT1 a LVDT5) tal como é apresentado na Fig.1(c). Os LVDT1 e LVDT5 têm um campo de medida de  $\pm 25$  mm (precisão de 0.09% F.S.), enquanto que no caso dos LVDT2 a LVDT4, o campo de medida é de  $\pm 75$  mm (precisão de 0.08% F.S.). Por sua vez, a força aplicada,  $F$ , foi monitorizada através de uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kN (precisão de  $\pm 0.05\%$  F.S.). Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamento através do LVDT3, tendo sido adotada uma velocidade constante de 20  $\mu\text{m/s}$ .

### 2.3. Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão foi realizada usando cilindros com 150 mm de diâmetro e altura de 300 mm. Esta avaliação foi feita em dois momentos distintos: (i) 28 e (ii) 110 dias de idade de cura do betão, sendo que esta última data aproximadamente coincidiu com a data da realização dos ensaios das faixas de laje. A determinação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão seguiu as recomendações LNEC E-397-1993:1993 e NP EN 12390-3:2009, respetivamente. Aos 28 dias, o módulo de elasticidade obtido foi de ( $E_{cm}$ ) 27.0 GPa, com um coeficiente de variação, CoV, de 0.5%, enquanto que a resistência à compressão ( $f_{cm}$ ) foi de 35.4 MPa (CoV = 4.8%). Aos 110 dias de cura, foram obtidos  $E_{cm} = 28.3$  GPa (CoV = 2.5%) bem como  $f_{cm} = 38.5$  MPa (CoV = 2.1%). As propriedades mecânicas do adesivo foram avaliadas de acordo como a norma ISO 527-2:2012, tendo sido obtidos os seguintes valores 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%) e  $f_a = 17.19$  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 (L20) podem ser encontradas em [5]. Por sua vez, as propriedades mecânicas determinadas experimentalmente dos varões de aço (A400 NR SD) utilizados encontram-se em [6].

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Principais resultados obtidos

O Quadro 2 apresenta os principais resultados obtidos dos ensaios de flexão realizados sobre as faixas de laje. Neste quadro,  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$  representam, respetivamente, a rigidez à flexão apresentada pelas faixas de laje nas três fases que compõe a resposta típica deste tipo de elementos estruturais: (i) fase elástica; (ii) fase fendilhada; (iii) fase pós-cedência da armadura longitudinal;  $F_{cr}$ ,  $F_y$  e  $F_{max}$  correspondem, respetivamente, à força registada aquando do início da fendilhação, da plastificação das armaduras e carga máxima, enquanto  $\delta_{cr}$ ,  $\delta_y$  e  $\delta_{max}$  representam os respetivos deslocamentos verticais a meio vão;  $\varepsilon_{f_{max}}$  é a extensão no laminado registada para  $F_{max}$ . É também apresentado o incremento de carga percentual relativo à laje de referência para as lajes reforçadas. A análise da ductilidade apresentada por cada uma das faixas de laje foi também realizada e encontra-se expressa através da relação entre os valores dos deslocamentos relativos às forças  $F_{max}$  e  $F_y$ , i.e.,  $\delta_{max}/\delta_y$ . Por fim, a última coluna indica o modo de rotura observado para cada uma das faixas de laje ensaiada.

Quadro 2. Resultados dos ensaios às faixas de laje.

Faixa de laje	Rigidez à flexão			Início da fendilhação		Plastificação das armaduras			Carga máxima			Parâmetro de ductilidade	MR
	$K_I$	$K_{II}$	$K_{III}$	$\delta_{cr}$	$F_{cr}$	$\delta_y$	$F_y$	$\delta_{max}$	$F_{max}$	$\epsilon_{fmax}$	$\delta_{max}/\delta_y$	--	
	[kN/mm]			[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[10 <sup>-3</sup> ]	[-]	--	
SL_REF	7.75	0.78	0.01	0.71	7.57	20.17	21.47	158.43 <sup>(1)</sup>	23.56 <sup>(1)</sup>	--	--	--	
SL_ADH1_U	9.57	1.10	0.40	1.25	10.86 (43%)	21.85	31.93 (49%)	74.04	52.87 (124%)	12.06	3.39	F	
SL_ADH2_U	8.95	1.07	0.41	1.35	10.52 (39%)	22.47	31.11 (45%)	74.95	52.08 (121%)	12.49	3.34	F	
SL_ADH3_U	7.94	1.28	0.34	1.58	10.86 (43%)	20.79	27.35 (27%)	72.24	42.71 (81%)	8.46	3.47	D	
SL_ADH1_C	6.30 <sup>(2)</sup>	1.92	0.41	1.32 <sup>(2)</sup>	7.16 <sup>(2)</sup>	18.95	31.58 (47%)	68.87	51.53 (119%)	12.46	3.63	F	
SL_ADH2_C	6.03 <sup>(2)</sup>	1.91	0.40	0.99 <sup>(2)</sup>	7.78 <sup>(2)</sup>	17.36	30.47 (42%)	69.33	51.06 (117%)	12.02	3.99	F	
SL_ADH3_C	5.38 <sup>(2)</sup>	1.81	0.34	1.06 <sup>(2)</sup>	6.18 <sup>(2)</sup>	13.97	24.61 (15%)	69.54	41.82 (78%)	8.33	4.98	D	

Notas: F – Rotura do laminado de CFRP; D – Deslizamento do laminado de CFRP; os valores entre parêntesis representam o incremento percentual em termos de força relativo à faixa de laje de referência (SL\_REF) para cada uma das fases em estudo.

<sup>(1)</sup> Valores máximos registados durante o ensaio sem que tenha havido rotura da laje (esmagamento do betão por compressão ou rotura das armaduras longitudinais de tração).

<sup>(2)</sup> Valores resultantes da fase de pré-fendilhação (para mais detalhes consultar [6]).

### 3.2. Curvas força versus deslocamento a meio vão

A Fig. 2 apresenta as curvas força versus deslocamento vertical a meio vão ( $F-\delta$ ) obtidas durante os ensaios realizados às faixas de laje em estudo.

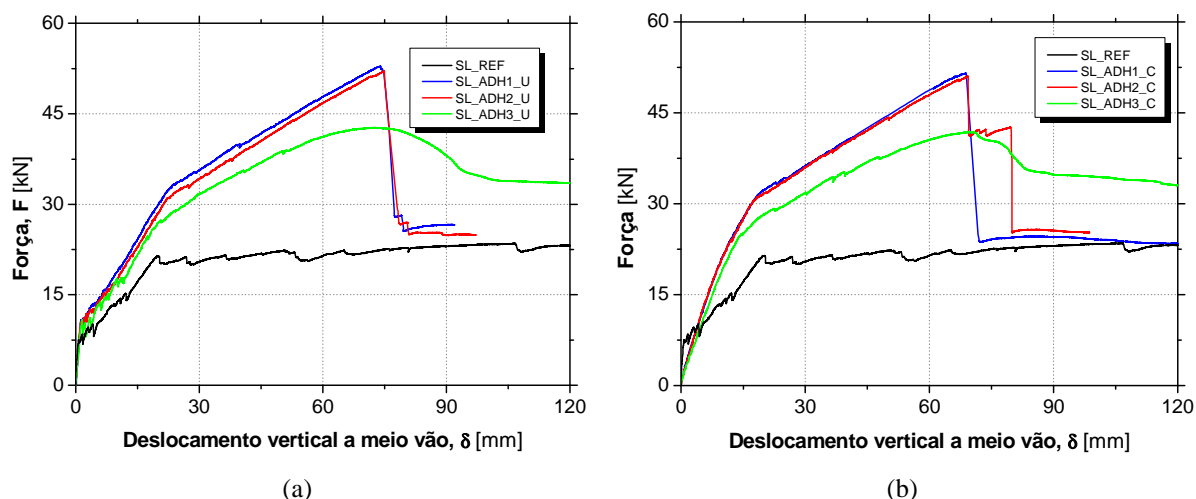


Figura 2. Força vs. deslocamento a meio vão para as séries não pré-fendilhada (a) e pré-fendilhada (b).

As curvas  $F-\delta$  apresentam o comportamento típico para elementos de BA reforçados com sistemas NSM-CFRP sujeitos a esforços de flexão. O primeiro aspeto importante prende-se com o aumento evidente da capacidade de carga resultante da aplicação do reforço. Com exceção das faixas de laje pré-fendilhadas, podem observar-se três importantes fases. A primeira, fase elástica, estende-se desde o início do ensaio até ao início da fendilhação do betão tracionado (inexistente nas faixas de laje

pré-fendilhadas). Nesta fase, todos os materiais constituintes das faixas de laje contribuem para a rigidez elástica à flexão ( $K_I$ ). A segunda fase vai desde o início da fendilhação até à cedência das armaduras longitudinais de tração (rigidez  $K_{II}$ ), enquanto que a terceira fase começa na cedência destas armaduras e vai até à carga máxima, (rigidez  $K_{III}$ ). Assim, as faixas de laje da série não pré-fendilhada exibem os três estados de comportamento à flexão, enquanto as da série pré-fendilhada exibem apenas dois (II e III). Na passagem entre fases existe diminuição considerável da rigidez à flexão devido à perda de eficiência mecânica dos materiais e da interligação entre estes, para além da fissuração.

A resposta obtida em fase elástica foi idêntica para todas as faixas de laje, sendo aproximadamente igual à SL\_REF devido ao baixo nível de reforço utilizado. O mesmo se verificou para a fase fendilhada; no entanto, a rigidez de SL\_REF à flexão é inferior. A faixa de laje SL\_REF tem um comportamento plástico após a cedência das armaduras de tração como já era expectável. Pelo contrário, nas lajes reforçadas, após a cedência das armaduras, as faixas de laje SL\_ADH1 e SL\_ADH2 apresentam comportamento quase linear até à rotura devido à contribuição dos laminados de CFRP. Refira-se que nesta fase o aço em tração já se encontra em cedência e o betão tracionado já está fendilhado pelo que a capacidade crescente de carga é assegurada fundamentalmente pelos laminados à tração e pelo betão à compressão. Por outro lado, haverá que referir que nestas lajes os adesivos em causa asseguram um elevado nível de aderência entre os laminados de CFRP e o substrato. Uma vez explorada a capacidade resistente dos laminados, o comportamento das faixas de laje reforçadas passa a ser bastante próximo do observado para a faixa de laje de referência. No caso das faixas de laje SL\_ADH3 e no terceiro ramo, ao contrário das faixas de laje reforçadas SL\_ADH1 e SL\_ADH2, a partir de determinado momento deixam de apresentar comportamento similar às restantes. Nestas faixas de laje, as propriedades resistentes do laminado de CFRP não foram completamente exploradas, como se mostrará posteriormente. Após o registo da carga máxima, há lugar a uma queda suave da força registada com o aumento da deformação imposta, sendo que a tendência é o comportamento destas lajes se aproximar de forma gradual ao observado na laje de referência. Esta tendência de aproximação poderá estar associado à perda gradual da aderência entre o laminado de CFRP e o adesivo, bem como à desagregação das características mecânicas do adesivo, o que implica uma cada vez menor contribuição dos laminados de CFRP para a resistência à flexão das faixas de laje.

### 3.3. Curvas força versus extensão no laminado de CFRP a meio vão

A Fig. 3 apresenta as curvas força *versus* extensão no CFRP a meio vão. À semelhança da resposta em termos de força *versus* deslocamento a meio vão, nas curvas força *versus* extensão no CFRP a meio vão observam-se também as três fases distintas de comportamento nos casos em que não existe pré-fendilhação e das duas fases distintas de comportamento quando a pré-fendilhação está presente.

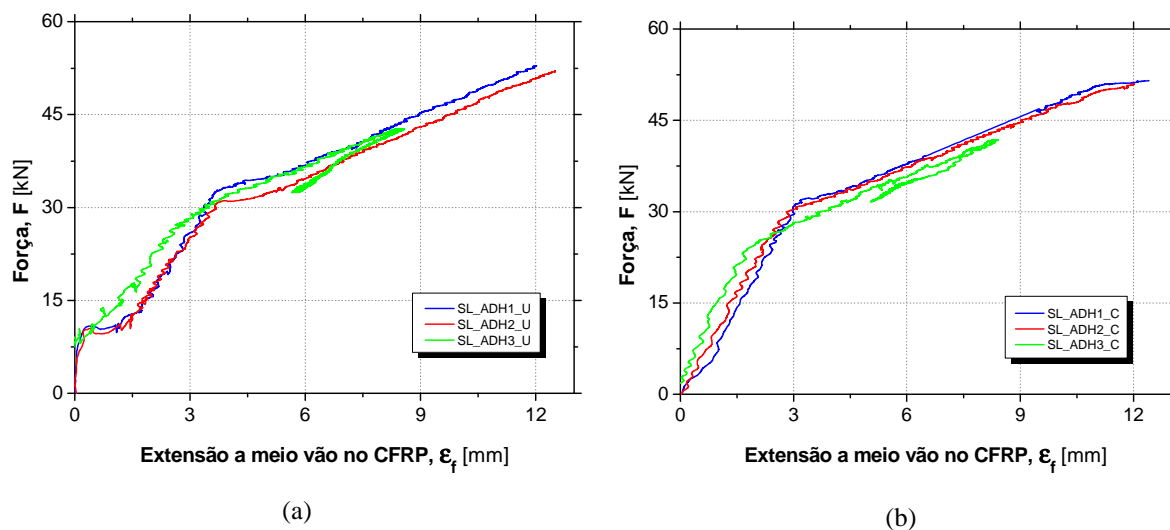


Figura 3. Força vs. deslocamento a meio vão para as séries não pré-fendilhada (a) e pré-fendilhada (b).

Regra geral, a mobilização do laminado é maior com o uso dos adesivos ADH1 e ADH2, comparativamente com o adesivo ADH3, o que mostra a maior capacidade dos dois primeiros adesivos. Contrariamente ao que acontece nas faixas de laje SL\_ADH1 e SL\_ADH2, no caso das SL\_ADH3 não há lugar à rotura do CFRP, existindo a partir do valor de força máxima registado nas curvas força *versus* deslocamento uma diminuição da extensão verificada a meio vão no laminado, devido à fendilhação do adesivo e perda de aderência na interface laminado-adesivo.

### 3.4. Modos de rotura

Fundamentalmente foram observados dois modos de rotura distintos nas faixas de laje ensaiadas (ver Fig. 4), diretamente relacionados com as propriedades mecânicas dos três tipos de adesivos em estudo. Assim, nas faixas de laje SL\_ADH1 e SL\_ADH2, ocorreu a rotura dos laminados de CFRP a meio vão (ver Fig. 4(a)). Por sua vez, as faixas de laje SL\_ADH3 apresentaram um modo de rotura distinto, i.e., deslizamento do laminado relativamente ao betão e rotura do adesivo, sem que os laminados de CFRP atingissem a sua tensão máxima. A meio vão foi evidente o deslizamento na interface laminado/adesivo (ver Fig. 4(b)), enquanto que nos extremos, nalguns casos, o adesivo ficou completamente destruído (ver Fig. 4(c)). Pontualmente foram também notados indícios de deslizamento do laminado de CFRP noutras zonas do reforço.

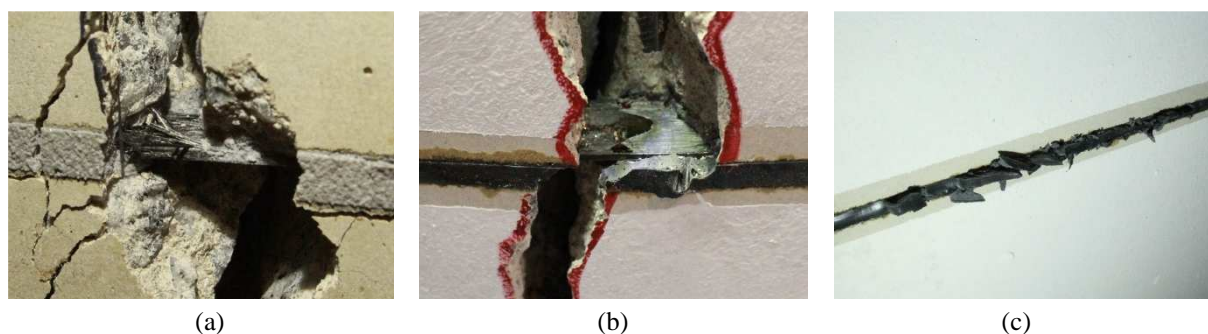


Figura 4. Modos de rotura: (a) rotura do laminado de CFRP (lajes reforçadas com os adesivos ADH1 e ADH2); (b) deslizamento do laminado (lajes reforçadas com o adesivo ADH3); (c) desagregação do adesivo na extremidade (lajes reforçadas com o adesivo ADH3).

### 3.5. Influência do tipo de adesivo e da pré-fendilhação no comportamento à flexão das faixas de laje

Nesta secção é apresentada a comparação entre as respostas obtidas nos ensaios das faixas de laje tendo em conta os parâmetros estudados. Assim, os seguintes aspetos são analisados: (i) forças registadas no momento da fendilhação do betão, plastificação das armaduras e carga máxima; (ii) extensão máxima no laminado de CFRP; (iii) ductilidade proporcionada em cada uma das situações.

Como é óbvio, a fendilhação do betão tracionado ocorre apenas nas faixas de laje reforçadas em que não foi realizada fendilhação prévia ao reforço. O reforço permite aumentar a carga para a qual a fendilhação do betão tracionado se inicia, comparativamente com a faixa de laje SL\_REF. Esta carga foi bastante próxima para as três faixas de laje em causa. Os valores obtidos foram: SL\_ADH1\_U - 10.86 kN; SL\_ADH2\_U - 10.52 kN e SL\_ADH3\_U - 10.86 kN, o que representa um aumento médio de 42% relativamente à faixa de laje SL\_REF (ver Quadro 1 e Fig. 5). Assim, poder-se-á concluir que na fase elástica, o comportamento das lajes reforçadas não depende do tipo de adesivo utilizado, em virtude, muito provavelmente, do nível do estado de tensão atingido nestes. Por outro lado, o reforço tem pouca influência no comportamento durante a fase elástica, uma vez que a sua área homogeneizada em betão é reduzida. Quanto à rigidez elástica apresentada pelas faixas de laje nesta fase, é notório um incremento resultante do reforço, mais pronunciado na SL\_ADH1\_U, sendo o incremento menor na SL\_ADH2\_U e ainda menor na SL\_ADH3\_U (ver Quadro 1). Este comportamento poderá estar associado à rigidez de cada um dos adesivos epóxi.

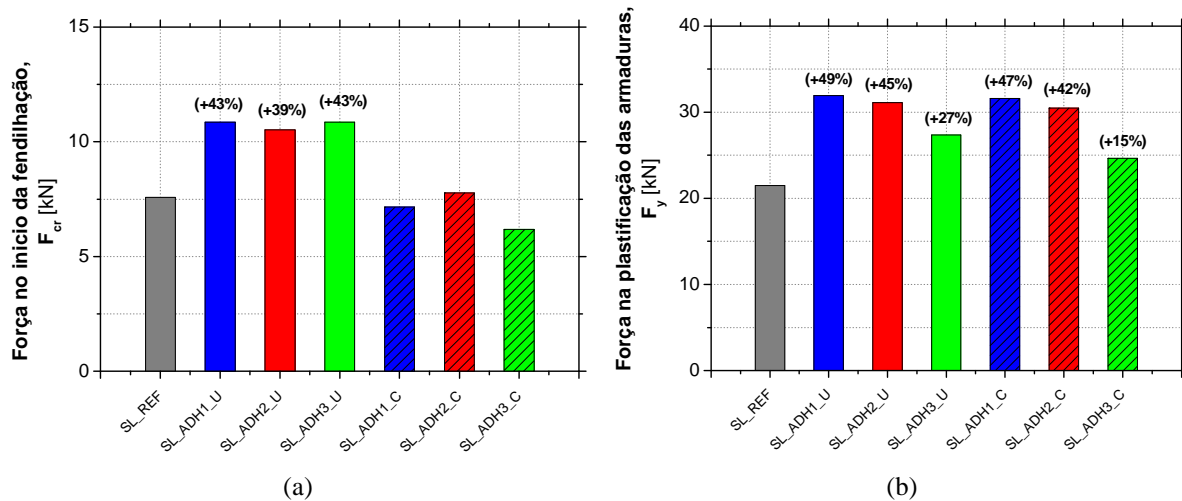


Figura 5. Cargas de fendilhação do betão (a) e plastificação das armaduras (b). Notas: os valores de força no início da fendilhação do betão tracionado apresentados em (a) para as lajes pré-fendilhadas correspondem aos valores obtidos no ensaio de pré-fendilhação. Os valores entre parêntesis são o aumento percentual de carga relativo à faixa de laje de referência para esta fase do ensaio.

Na fase de plastificação das armaduras de tração, em ambas as séries, os valores de carga aplicada registados nas faixas de laje SL\_ADH1 e SL\_ADH2 não são significativamente diferentes; no entanto, as faixas de laje SL\_ADH1 os valores de carga são ligeiramente superiores. Comparativamente com a faixa de laje SL\_REF, na série não pré-fendilhada, o incremento em termos de carga correspondente à plastificação das armaduras foi de 49% e 45% respetivamente para as faixas de laje SL\_ADH1\_U e SL\_ADH2\_U. Por sua vez, na faixa de laje SL\_ADH3\_U, a plastificação das armaduras ocorre para menores valores de carregamento (incremento de 27%). Relativamente aos aspetos relacionados com a pré-fendilhação, os incrementos em termos de carga de plastificação das armaduras foram de 47% e 42% respetivamente para as faixas de laje SL\_ADH1\_C e SL\_ADH2\_C. Na SL\_ADH3\_C, o incremento percentual em termos de carga de plastificação das armaduras foi bastante reduzido (apenas 15%) quando comparado com os anteriores, o que mostra que a pré-fendilhação provocou efeitos negativos no comportamento utilizando o adesivo 3, já que relativamente à faixa de laje em que não existe pré-fendilhação a carga nesta fase sofre um decréscimo de 44%, ao contrário das lajes com os adesivos 1 e 2 que sofrem decréscimos de carga de plastificação das armaduras de 1.1% e 2.1% respetivamente. Esta leve diminuição nas cargas de cedência das armaduras poderá estar relacionada com a existência de alguma deformação residual associada a extensões residuais internas (não recuperadas) no aço das armaduras longitudinais inferiores, o que faz com que a sua eficiência seja ligeiramente menor. Já no que respeita à laje SL\_ADH3\_C, a deformabilidade do respetivo adesivo poderá ter contribuído de forma decisiva para a resposta obtida. Ao contrário do que foi verificado no momento da fendilhação do betão, até esta fase de cedência das armaduras, pode concluir-se o tipo de adesivo utilizado influencia os padrões de comportamento observados, bem como alguma influência da pré-fendilhação, sobretudo no caso das lajes SL\_ADH3.

Na Fig. 6(a) são apresentadas as cargas máximas registadas para cada faixa de laje, bem como os aumentos percentuais relativos à faixa de laje SL\_REF. No caso das faixas de laje SL\_ADH1\_U e SL\_ADH2\_U os valores de carga máxima foram bastante similares (respetivamente 52.87 kN e 52.08 kN), o que representa um aumento percentual relativo à faixa de laje de referência de respetivamente 124% e 121%, ou seja, para mais do dobro. Quanto à faixa de laje SL\_ADH3\_U, o valor registado foi de 42.71 kN, sendo o incremento em termos da carga máxima inferior aos anteriores, com cerca de 81%, o que representa uma capacidade de carga 18% inferior à capacidade média obtida com a utilização dos outros dois adesivos. No caso da existência de pré-fendilhação, os valores obtidos são ligeiramente menores (SL\_ADH1\_C – 51.53 kN; SL\_ADH2\_C – 51.06 kN; SL\_ADH3\_C – 41.82 kN), com aumentos de 119%, 117% e 78% respetivamente. À semelhança do observado no caso da ausência de pré-fendilhação, o adesivo ADH3 proporciona pior desempenho do que os dois restantes, apresentando capacidade de carga também 18% inferior à capacidade de carga média das duas faixas de



laje reforçadas com os dois outros adesivos em estudo. Desta forma, o incremento de carga foi superior no caso da utilização dos adesivos ADH1 e ADH2, em que o adesivo foi mobilizado até à rotura do laminado, ao contrário do reforço com o adesivo ADH3 em que a capacidade resistente do laminado não foi completamente explorada, não existindo rotura por esgotamento da capacidade resistente deste. Assim, a extensão máxima no laminado de CFRP (ver Fig. 6(b)) é bastante superior nas lajes SL\_ADH1 e SL\_ADH2 comparativamente com as faixas de laje SL\_ADH3 (a média das extensões máximas no laminado com a utilização do adesivo 3 é 32% inferior à média das extensões verificadas com o uso dos adesivos ADH1 e ADH2) em que apenas houve deslizamento e não rotura deste (ver Fig. 4).

Em termos de influência da pré-fendilhação, não houve lugar a alterações significativas na carga máxima, sendo as diferenças percentuais relativas à faixa de laje de referência de 5.7%, 4.3% e 3.8% respetivamente para as faixas de laje SL\_ADH1, SL\_ADH2 e SL\_ADH3. No mesmo sentido, em termos de extensões máximas no laminado, os valores para as duas séries são idênticos. A explicação para este fenómeno pode residir no facto de no momento da rotura apenas existir a ação conjunta do betão comprimido, do laminado de CFRP e do aço em cedência, o que de alguma forma justifica a proximidade de valores obtidos quer para a carga máxima, quer para a extensão máxima do laminado de CFRP. De salientar que a baixa influência da pré-fendilhação na máxima capacidade de carga de faixas de laje é um aspeto comum a outros estudos presentes na literatura (e.g. [2]).

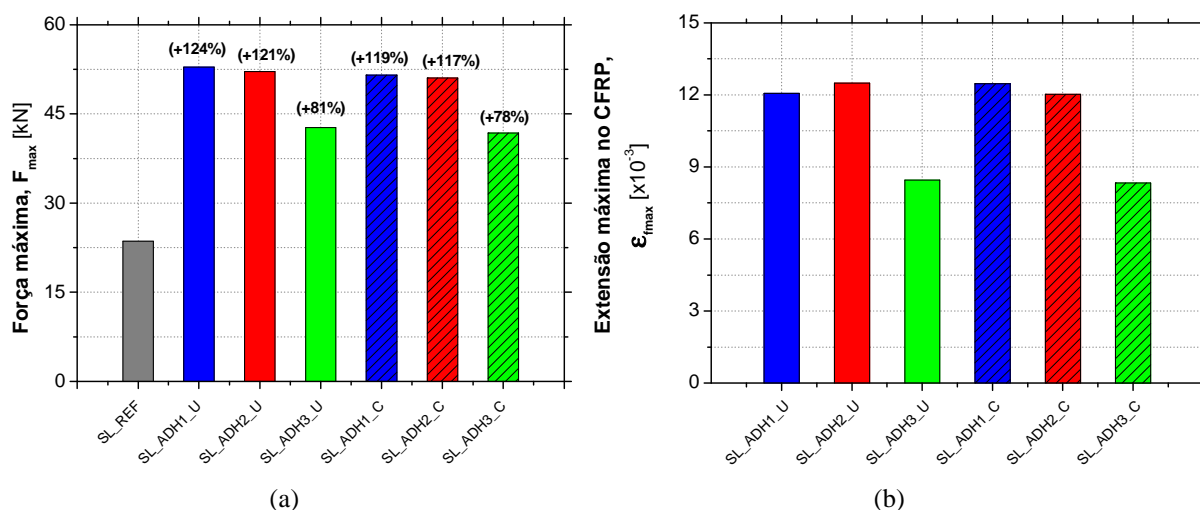


Figura 6. Valores máximos: (a) forças aplicadas; (b) extensão máxima no laminado de CFRP. Nota: os valores entre parêntesis são o aumento de carga percentual relativo à faixa de laje de referência para esta fase.

Relativamente ao parâmetro de ductilidade expresso pelo rácio  $\delta_{max}/\delta_y$  (ver Quadro 2), os valores obtidos são bastante razoáveis quando comparados com os obtidos em estudos semelhantes em que foram utilizadas outras técnicas de colagem de laminados de CFRP (e.g. [7]). Relativamente à série não pré-fendilhada, os valores são bastante próximos, não existindo diferenças significativas entre adesivos. Comparando a série não pré-fendilhada com a pré-fendilhada, a ductilidade foi ligeiramente superior no segundo caso para as faixas de laje SL\_ADH1 e SL\_ADH2, sendo a diferença mais significativa nas faixas de laje SL\_ADH3. Desta forma, verificou-se uma tendência para a pré-fendilhação aumentar os níveis de ductilidade.

#### 4. CONCLUSÕES

Foi realizado um programa experimental com vista a avaliar o comportamento à flexão de faixas de laje em função do tipo de adesivo utilizado para o reforço segundo a técnica NSM e da existência ou não de pré-fendilhação. Em termos do comportamento à flexão observado, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- O reforço aumenta a capacidade de carga das faixas de laje;

- As cargas para as quais se dá a fendilhação do betão na série não pré-fendilhada não são significativamente influenciadas pelo tipo de adesivo utilizado;
- No momento da plastificação das armaduras longitudinais observa-se já alguma influência do tipo de adesivo nos valores de carga registados;
- Os adesivos 1 e 2 proporcionam uma capacidade de carga máxima semelhante. Com o uso do adesivo 3 a capacidade de carga das faixas de laje é menor;
- A resposta das faixas de laje não é significativamente diferente com a existência de pré-fendilhação, exceto na primeira fase, uma vez que o betão já se encontra em estado fendilhado;
- Com o uso do adesivo 3, o laminado de CFRP não é completamente explorada, uma vez que este não esgota a sua capacidade de carga;
- Na presença do adesivo 3, após a ter sido atingida a carga máxima, o laminado de CFRP continua a mobilizar capacidade de carga em virtude deste não ter rompido e o respetivo adesivo continuar a ter capacidade resistente;
- A resposta pós-carga máxima é diferente nas faixas de laje em que o adesivo 3 foi utilizado, comparativamente com os adesivos 1 e 2, sendo que nestas últimas se observa uma rotura súbita.

## 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] 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.
- [2] Dias, S.J.E.; Juvandes, L.F.P.; Figueiras, J.A. (2004) Efeito da pré-fendilhação do betão no comportamento à flexão de faixas de laje reforçadas com sistemas compósitos de CFRP. *REC Número 19*, pp. 41-54.
- [3] Mostakhdemin Hosseini, M.R.; Dias, S.J.E.; Barros, J.A.O. (2014) Effectiveness of prestressed NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC slabs. *Composite Structures 111*, pp. 249-258.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Cruz, J.R. (2016) Influência do tipo de adesivo no comportamento de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM. *Dissertação de Mestrado*, Universidade do Minho.
- [7] Sena-Cruz, J.M.; Barros, J.A.O.; Coelho, M.R.F.; Silva, L.F.F.T. (2012) Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading. *Construction and Building Materials 29*, pp. 175-182.