

COMPORTAMENTO DE LAJES DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO USANDO A TÉCNICA NSM COM LAMINADOS DE CFRP PRÉ-TENSIONADOS

BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE SLABS FLEXURALLY STRENGTHENED USING NSM TECHNIQUE WITH PRESTRESSED CFRP LAMINATES

S. Dias¹, M. R. Mostakhdemin Hosseini², J. Barros³

¹ ISISE, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, sdias@civil.uminho.pt

² ISISE, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, hoseini_engineer@yahoo.com

³ ISISE, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, barros@civil.uminho.pt



RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um programa experimental que foi realizado para avaliar o comportamento de lajes de betão armado reforçadas à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados. No total foram testadas quatro lajes de betão armado: a de referência sem CFRP, e três reforçadas à flexão usando a técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados, diferenciadas pela percentagem de pré-tensão nos laminados de CFRP: 0%, 20% e 40% da capacidade máxima resistente à tração do CFRP. As lajes tinham uma percentagem de armadura longitudinal de cerca de 0,35% e a percentagem de reforço de CFRP adotada foi de aproximadamente 0,08%. Os resultados obtidos são apresentados e analisados em termos do comportamento estrutural das lajes ensaiadas, modos de rotura e desempenho da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados.

ABSTRACT

To investigate the behaviour of RC slabs flexurally strengthened using NSM technique with prestressed CFRP laminates, an experimental program was carried out. A total of four RC slabs were tested, a reference slab (without CFRP), and three slabs flexurally strengthened using NSM CFRP laminates with different prestress level: 0%, 20% and 40% of the ultimate tensile strength of the CFRP material. The tested slabs have a percentage of longitudinal tensile steel bars of about 0.35%, while the CFRP strengthening percentage is approximately 0.08%. The obtained results are presented and analysed in terms of the structural behaviour of the RC slabs, failure modes and performance of the NSM technique with prestressed CFRP laminates.

1. INTRODUÇÃO

Uma das possibilidades existentes para reforçar à flexão estruturas de betão armado usando materiais compósitos é recorrer à técnica que consiste na inserção de laminados de CFRP em finos entalhes efetuados

no betão de recobrimento. Esta técnica é designada na literatura internacional por Near Surface Mounted (NSM).

Atualmente existem vários estudos realizados sobre o desempenho da técnica NSM, com laminados de CFRP aplicados de

forma passiva (reforço passivo), quando usada no reforço à flexão de vigas (Carolin, 2003; El-Hacha e Riskalla, 2004; Barros e Fortes, 2005; Barros *et al.*, 2007; Kotynia, 2007; Dias *et al.*, 2012) e lajes de betão armado (Bonaldi, 2008; Dalfré, 2013). Nestes estudos verificou-se que a aplicação, dos laminados de CFRP inseridos sem qualquer pré-tensão, no reforço à flexão pode aumentar significativamente a capacidade de carga máxima dos elementos estruturais de betão armado. No entanto, também se verificou que para níveis de deformação correspondentes a estados limites de serviço, o grau de eficácia do reforço em termos de acréscimo de capacidade de carga não é tão significativo. Uma solução para contornar o menor desempenho da técnica NSM com laminados de CFRP em condições de serviço passa pela aplicação de uma pré-tensão nos laminados de CFRP.

Neste trabalho apresenta-se o programa experimental que foi realizado para avaliar a eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados no reforço à flexão de lajes de betão armado. No total foram ensaiadas quatro lajes de betão armado com o propósito de avaliar a influência do nível de pré-tensão no comportamento deste tipo de estruturas, quer em termos de estados limites de serviço como na rotura. Após a apresentação do programa experimental efetuado (conceção dos modelos, tipo de ensaio, sistema de instrumentação, caracterização dos materiais e aplicação do reforço de CFRP), serão apresentados e discutidos os resultados alcançados e referidas as principais conclusões que foram obtidas.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Conceção dos modelos, tipo de ensaio e sistema de instrumentação

O programa experimental realizado envolveu a execução de quatro lajes de betão armado com 2600 mm de comprimento e secção transversal de $600 \times 120 \text{ mm}^2$ (Figura 1). Em todas as lajes foram utilizados três varões de aço nervurado de 6 mm de diâmetro ($3\phi 6$) para a armadura longitudinal de

compressão e quatro varões de aço nervurado de 8 mm de diâmetro ($4\phi 8$) para a armadura longitudinal de tração. Para armadura transversal foram adotados varões de aço nervurado de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm ($\phi 6@300\text{mm}$). O betão de recobrimento das armaduras longitudinais foi de 20 mm (Figura 1).

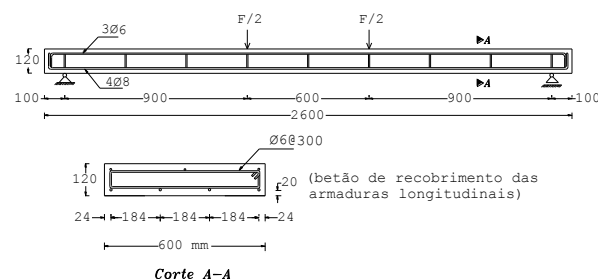


Fig. 1 – Geometria das lajes, tipo de ensaio e armaduras das lajes ensaiadas (dimensões em mm).

Das quatro lajes ensaiadas, uma era de referência sem reforço de CFRP (laje SREF) e três foram reforçadas à flexão com dois laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento de acordo com a disposição representada na Figura 2. As três lajes reforçadas com CFRP distinguiam-se pelo nível de pré-tensão instalado nos laminados de CFRP: 0% (laje S2L-0), 20% (laje S2L-20) e 40% (laje S2L-40) da capacidade máxima resistente à tração dos laminados de CFRP. Os laminados de CFRP usados no presente programa experimental tinham uma secção transversal com dimensões de 1,4 mm (espessura) $\times$ 20 mm (profundidade). De acordo com os dados da Tabela 1, as lajes ensaiadas tinham uma percentagem de armadura longitudinal (ρ_{sl}) de cerca de 0,35%, e a percentagem de reforço adotada (ρ_f) foi de aproximadamente 0,08%.

As lajes foram submetidas a ensaios à flexão sob quatro pontos de carga, tal como está representado nas Figuras 3 e 4. Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamentos à velocidade de 0,02 mm/s.

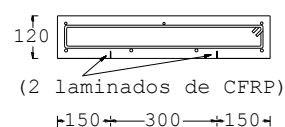


Fig. 2 – Solução de reforço de CFRP testada, com ou sem pré-tensão (dimensões em mm).

Tabela 1 – Informações gerais das lajes ensaiadas.

Laje	ρ_{sl} (%) ^a	Reforço à flexão com laminados de CFRP inseridos	ρ_f (%) ^b	Nível de pré- esforço (%)
		Quantidade		
SREF		-	-	-
S2L-0	0,349	2 laminados com secção	0,077	0
S2L-20		de $1,4 \times 20 \text{ mm}^2$		20
S2L-40		($A_f = 2 \times 1,4 \times 20 = 56 \text{ mm}^2$)		40

^a A percentagem de armadura longitudinal foi obtida por $\rho_{sl} = (A_{sl} / (b_w \times d)) \times 100$ em que A_{sl} é a área de aço correspondente às armaduras longitudinais de tração (ver Figura 1), $b_w = 600 \text{ mm}$ é a largura da secção transversal da laje e d é a distância da fibra de betão mais comprimida ao baricentro dos varões de aço da armadura longitudinal de tração.

^b A percentagem de CFRP foi obtida a partir de $\rho_f = (A_f / A_c) \times 100$ em que A_f é a área de reforço de CFRP e A_c é a área da secção transversal das lajes.

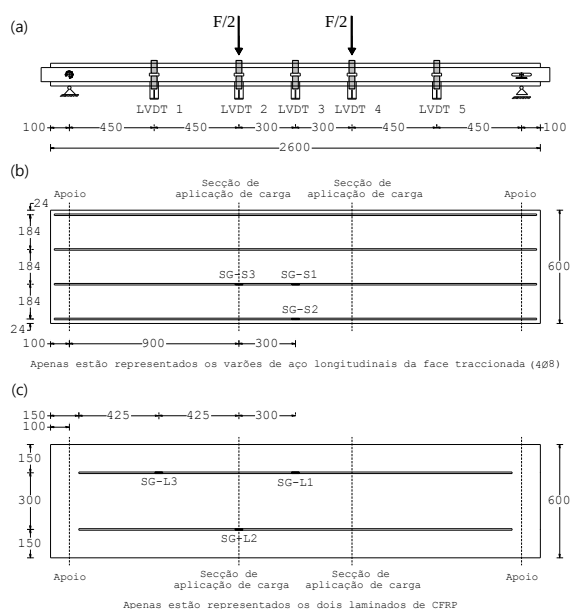


Fig. 3 – Posição dos: a) transdutores de deslocamentos (LVDTs); b) extensómetros nos varões de aço longitudinais; c) extensómetros nos laminados de CFRP (dimensões em mm).



Fig. 4 – Ensaio à flexão sob quatro pontos de carga.

Todas as lajes foram instrumentadas para que fosse possível quantificar a carga aplicada, a deformação das lajes e as

extensões, quer no CFRP como nas armaduras longitudinais tracionadas.

A deformação das lajes foi medida por intermédio de transdutores de deslocamento (LVDTs) posicionados nas secções representadas na Figura 3a. Para avaliar as extensões nos varões de aço longitudinais tracionados foram instalados três extensómetros (SG-S1, SG-S2 e SG-S3) de acordo com o representado na Figura 3b. Em todas as lajes reforçadas com CFRP, os laminados foram instrumentados com três extensómetros elétricos (SG-L1, SG-L2 e SG-L3) para avaliar a variação do campo de extensões do reforço de CFRP. Na Figura 3c estão identificadas as secções dos laminados de cada laje onde foram colados os extensómetros.

2.2 Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão das lajes foi efetuada experimentalmente à data da realização dos ensaios das lajes. Para tal, ensaios de compressão uniaxial com cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura foram efetuados segundo as recomendações da norma EN 206-1 (2000). O valor médio da resistência à compressão do betão obtido foi de 46,7 MPa ($f_{cm} = 46,7 \text{ MPa}$). Nas lajes ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm e 8 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tração uniaxial efetuados segundo o estipulado na norma EN 10002-1 (1990). A caracterização dos laminados de CFRP utilizados (S&P Laminates CFK 150/2000) foi efetuada por intermédio da realização de ensaios de tração uniaxial segundo a ISO 527-5 (1997). A Tabela 2 apresenta os valores médios, obtidos experimentalmente, das propriedades mecânicas mais significativas do betão, do aço e dos laminados de CFRP usados no presente programa experimental.

A fixação dos laminados ao betão foi efetuada por intermédio de um adesivo epoxídico (S&P Resin 220). Costa e Barros (2013) avaliaram as propriedades deste adesivo, tendo obtido para módulo de elasticidade e resistência à tração do adesivo o valor médio de 20 MPa e 7 GPa, respetivamente.

Tabela 2 – Valores das propriedades dos materiais.

Betão	Resistência à compressão do betão		
	$f_{cm} = 46,7$ MPa (aos 294 dias - idade do betão à data da realização dos ensaios das lajes)		
Aço	Tensão (MPa)	$\phi 6$	$\phi 8$
	Cedência	464,0	486,0
	Máxima	617,7	570,2
Laminado de CFRP	Tensão de rotura	Módulo de elasticidade	Extensão máxima
	2483,9 MPa	153,2 GPa	16,2 ‰

2.3 Aplicação do reforço de CFRP

Na aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP sem pré-tensão (laje S2L-0) foram executadas as seguintes tarefas: 1) execução dos entalhes com cerca de 5 mm de largura e 25 mm de profundidade, efetuados no betão de recobrimento da face tracionada das lajes (Figura 5a); 2) limpeza dos entalhes por intermédio da aplicação de jatos de ar (Figura 5b); 3) os laminados, fornecidos em rolos de 150 m com secção transversal de $1,4 \times 20$ mm², foram cortados com o comprimento desejado e, posteriormente, foram limpos com um desengordurante (Figura 5c); 4) fabrico do adesivo epoxídico de acordo com as especificações do fabricante (Figura 5d); 5) os entalhes foram preenchidos com adesivo (Figura 5e) e, depois, aplicou-se adesivo em ambas as faces dos laminados (Figura 5f); 6) os laminados foram inseridos nos entalhes (Figura 5g) e a intervenção de reforço terminou com a remoção do adesivo em excesso e a execução do acabamento final (Figura 5h).

Na Figura 5i apresenta-se o aspeto final da laje S2L-0 após ter sido reforçada à flexão com dois laminados de CFRP, sem pré-tensão, aplicados com a técnica NSM.

A Figura 6a apresenta a pista usada para a aplicação da pré-tensão nos laminados de CFRP. Após a correta instalação da laje na pista de pré-tensão, os laminados foram colocados nos entalhes (previamente realizados com cerca de 5 mm de largura e 25 mm de profundidade) e ancorados numa das extremidades (ancoragem passiva – ver Figura 6a). De seguida, os laminados foram tensionados na outra extremidade (ancoragem ativa) usando, para tal, macacos hidráulicos (Figura 6b).

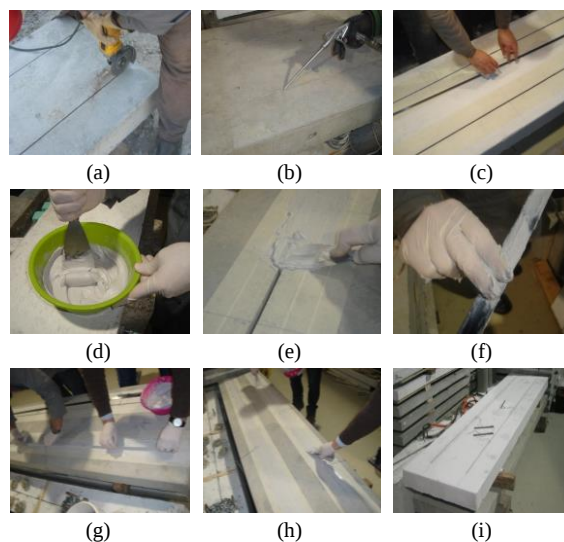


Fig. 5 – Aplicação do reforço à flexão da laje com dois laminados de CFRP aplicados com a técnica NSM.

A força de pré-tensão aplicada nos laminados das lajes S2L-20 e S2L-40 foi a correspondente a cerca de, respetivamente, 20% e 40% da tensão máxima resistente à tração dos laminados de CFRP. A força de pré-esforço foi aplicada com incrementos de carga de 0,5 kN/min. Uma vez aplicada a totalidade da pré-tensão nos laminados de CFRP, introduziu-se o adesivo nos entalhes com o auxílio de uma espátula (Figura 6c). Passados cerca de sete dias, a força de pré-tensão foi aliviada gradualmente (0,3 kN/min), de forma a evitar a ocorrência de elevados gradientes de tensão no processo de transferência de tensões dos laminados para o meio envolvente.

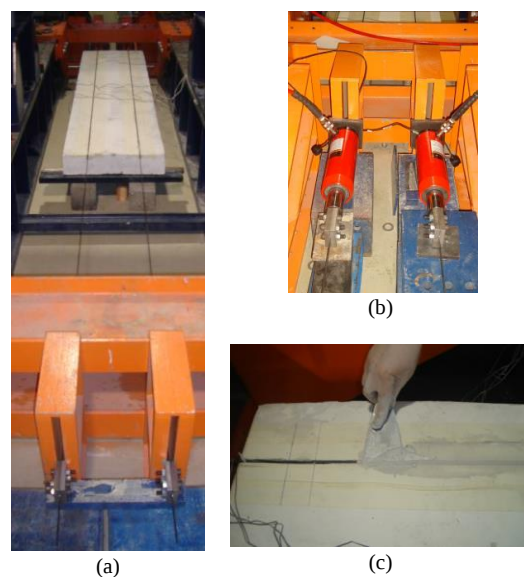


Fig. 6 – Aplicação do reforço à flexão de uma laje com laminados de CFRP pré-tensionados.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Capacidade de carga das lajes

Na Figura 7 apresenta-se a resposta força vs flecha a meio-vão das quatro lajes que foram ensaiadas com um carregamento monotónico até à rotura. As lajes reforçadas com os laminados de CFRP inseridos registaram três estados principais de comportamento até atingirem a sua capacidade de carga máxima: 1) betão não fendilhado; 2) betão fendilhado com o aço não plastificado; 3) betão fendilhado após cedência do aço das armaduras longitudinais. Após a cedência das armaduras verifica-se que apenas o compósito contribui para o aumento da capacidade resistente da laje. Isto justifica o aparecimento do troço reto nas curvas das lajes reforçadas após a cedência das armaduras, em consequência do comportamento linear dos laminados de CFRP. Independentemente do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP (0%, 20% e 40%), a solução de reforço adotada proporcionou às lajes consideráveis acréscimos de capacidade de carga.

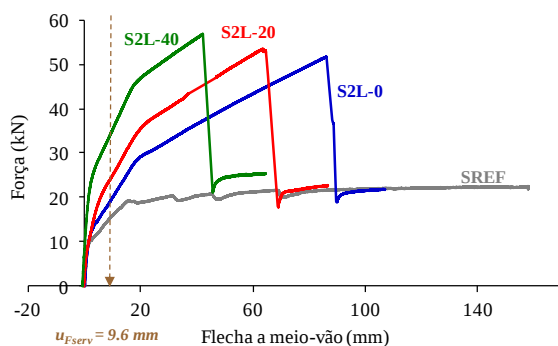


Fig. 7 – Força vs flecha a meio-vão das lajes.

A Tabela 3 apresenta os principais resultados obtidos nas lajes SREF, S2L-0, S2L-20 e S2L-40. Assim, para cada uma destas lajes são apresentados os valores da carga de serviço (F_{serv}), da carga correspondente à cedência das armaduras de aço (F_{sy}) e da carga máxima (F_{max}). Os valores da flecha a meio-vão correspondentes à força F_{max} (u_{Fmax}) também se encontram registados na Tabela 3. A carga de serviço é a registada para a

flecha correspondente a estados limites de serviço, que de acordo com o Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1, 2004) vale $l/250$, em que l é o vão livre das lajes ($l/250 = 2400 \text{ mm}/250 = 9,6 \text{ mm}$).

De acordo com a Tabela 3, os valores da carga de serviço das lajes SREF (laje de referência), S2L-0 (laje reforçada não pré-esforçada), S2L-20 (laje reforçada com 20% de pré-tensão) e S2L-40 (laje reforçada com 40% de pré-tensão) foram, respetivamente, 15,89 kN, 19,76 kN, 24,65 kN e 34,76 kN, o que demonstra os benefícios, em termos de condições de serviço, da aplicação dos laminados inseridos com uma determinada pré-tensão. A carga máxima das lajes reforçadas com CFRP variou entre 51,8 kN e 56,9 kN, verificando-se assim que, quando se comparam estes valores com o valor da carga máxima da laje de referência SREF (22,6 kN), a presença do CFRP proporcionou um aumento significativo em termos de capacidade resistente máxima. Os valores da flecha a meio-vão correspondentes à carga máxima das lajes (u_{Fmax}) com 0%, 20% e 40% de pré-tensão no CFRP foram, respetivamente, 85,90 mm, 63,33 mm e 42,29 mm, o que evidencia o facto da aplicação de uma pré-tensão nos laminados de CFRP diminuir consideravelmente o nível de deformação dos elementos estruturais na rotura. O reforço à flexão das lajes com laminados de CFRP inseridos proporcionou acréscimos ao valor da carga de cedência das armaduras (F_{sy}), verificando-se que este aumento foi tanto maior quanto maior foi o nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP. Com efeito, os valores da força F_{sy} das lajes com 0%, 20% e 40% de pré-tensão no CFRP foram, respetivamente, 29,0 kN, 36,3 kN e 46,0 kN.

Tabela 3 – Compilação de resultados obtidos em termos de forças e flechas.

Laje	Serviço	Cedência	Rotura	
	F_{serv} (kN)	F_{sy} (kN)	F_{max} (kN)	u_{Fmax} (mm)
SREF	15,89	19,00	22,60	158,15
S2L-0	19,76	29,00	51,80	85,90
S2L-20	24,65	36,30	53,33	63,33
S2L-40	34,76	46,00	56,90	42,29

3.2 Modos de rotura

As primeiras fendas que surgiram durante os ensaios das lajes registaram-se na zona de flexão pura entre pontos de carga. Com o aumento do carregamento foram também aparecendo fendas nos vãos de corte das lajes. Na Figura 8 apresenta-se o padrão de fendilhação final registado nas lajes SREF, S2L-0, S2L-20 e S2L-40 após a realização dos ensaios. A laje SREF apresenta um padrão de fendilhação menos extensivo do que as lajes reforçadas com CFRP. Além disso, na Figura 8 verifica-se que com o aumentar do nível de pré-tensão no CFRP o padrão de fendilhação torna-se menos extenso.

O modo de rotura da laje SREF, tal como ilustrado na Figura 9a, ocorreu pelo esmagamento do betão na zona comprimida com as armaduras longitudinais tracionadas em cedência. Nas lajes reforçadas ocorreu a rotura dos laminados de CFRP (Figura 9b) com as armaduras longitudinais tracionadas em cedência.

3.3 Extensões no CFRP

Na Tabela 4 apresenta-se na coluna “Total”, para cada laje reforçada, o valor da extensão máxima registada nos três extensómetros colados nos laminados de CFRP (SG-L1, SG-L2 e SG-L3 - ver Figura 3c). Estes valores foram os registados até ao instante em que as lajes atingiram a sua capacidade de carga máxima. Cada um dos referidos valores corresponde à adição do valor da extensão correspondente à pré-tensão (coluna “Pré-tensão”) com o valor da máxima extensão registada durante o ensaio até a laje atingir a sua capacidade de carga máxima (coluna “Ensaio à rotura”).

Os valores da máxima extensão medida no CFRP (coluna “Total” da Tabela 4), designadamente no extensómetro SG-L2, são próximos do valor médio da extensão máxima registada nos ensaios de tração uniaxial dos laminados (16,2‰ - ver Tabela 2), o que, por um lado, justifica os modos de rotura das lajes reforçadas, e por outro lado demonstram o elevado desempenho da técnica NSM com laminados de CFRP quando aplicada no reforço à flexão de lajes de betão armado.

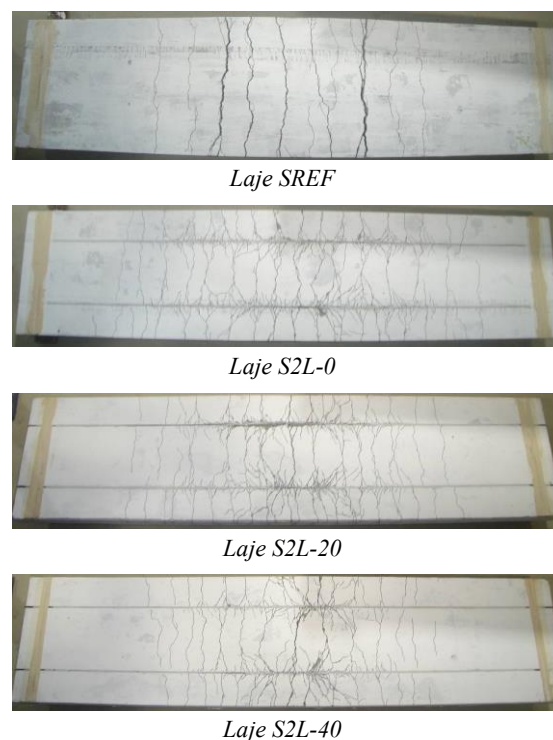


Fig. 8 – Padrão de fendilhação final das lajes ensaiadas.

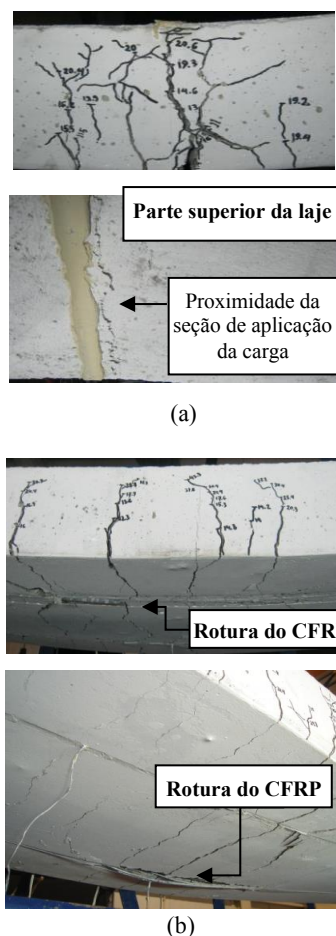


Fig. 9 – Modos de rotura: a) esmagamento do betão da laje SREF; b) rotura do CFRP nas lajes reforçadas com CFRP.

Tabela 4 – Valores máximos da extensão obtidos nos extensómetros colados nos laminados de CFRP.

Laje	SG-L1(‰)		
	Pré-tensão	Ensaio à rotura ^a	Total
S2L-0	-	13,90	13,90
S2L-20	2,68	11,96	14,64
S2L-40	6,45	9,33	15,78

Laje	SG-L2(‰)		
	Pré-tensão	Ensaio à rotura ^a	Total
S2L-0	-	15,03	15,03
S2L-20	3,34	11,86	15,20
S2L-40	6,93	9,19	16,12

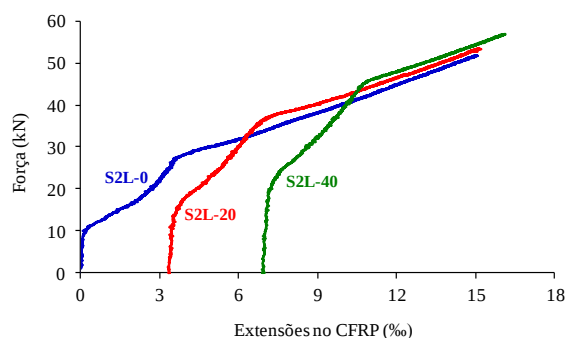
Laje	SG-L3(‰)		
	Pré-tensão	Ensaio à rotura ^a	Total
S2L-0	-	3,95	3,95
S2L-20	2,74	2,36	5,10
S2L-40	6,41	1,53	7,94

^a Valor máximo da extensão registada até a laje alcançar a sua capacidade de carga máxima.

A Figura 10 representa a relação força vs extensão no CFRP registada no extensómetro SG-L2. De acordo com os valores da Tabela 4, o valor da extensão inicial no CFRP para as lajes com 0%, 20% e 40% de pré-tensão foi respetivamente, 0‰, 3,34‰ e 6,93‰. As curvas força vs extensão no CFRP representadas na Figura 10 apresentam os três estados de comportamento identificados na análise da Figura 7: 1) até ao início de fendilhação do betão, onde a variação da extensão é praticamente nula; 2) entre o início de fendilhação do betão e o início da cedência das armaduras longitudinais, onde as extensões aumentam com a carga; 3) e entre o início de cedência das armaduras longitudinais e a carga máxima, onde se verifica uma variação muito semelhante da extensão no CFRP para as três lajes. Nesta última fase de comportamento, as extensões no CFRP aumentam mais rapidamente com o aumento da carga devido ao facto das armaduras longitudinais estarem em cedência.

3.4 Efeito do pré-esforço

Na Tabela 5 apresentam-se os parâmetros quantificados para avaliar o efeito, do nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP, no comportamento es-

**Fig. 10** – Força vs extensão no CFRP (SG-L2).

trutural das lajes quer em termos de estados limites de serviço como na rotura. Tendo como base os valores da carga de serviço (F_{serv}), da carga máxima (F_{max}) e da flecha a meio-vão associada à carga máxima (u_{Fmax}) da laje de referência sem reforço de CFRP, na Tabela 5 apresentam-se os valores do acréscimo da carga de serviço, do acréscimo da carga máxima e da diminuição da flecha a meio-vão associada à carga máxima proporcionados pelas soluções de reforço de CFRP das lajes S2L-0, S2L-20 e S2L-40.

Tabela 5 – Avaliação do efeito do nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP.

Laje	Acréscimo da carga de serviço (%)	Acréscimo da carga máxima (%)	Diminuição da flecha máxima (%)
S2L-0	24,35	129,20	45,68
S2L-20	55,13	135,97	59,96
S2L-40	118,75	151,77	73,26

De acordo com os valores apresentados na Tabela 5, o reforço de CFRP com 0%, 20% e 40% de pré-tensão nos laminados proporcionaram aumentos de, respetivamente, 24,35%, 55,13% e 118,75% em termos de carga de serviço (F_{serv}), e um aumento de, respetivamente, 129,20%, 135,97% e 151,77% em termos de carga máxima (F_{max}). Desta forma conclui-se que o reforço à flexão das lajes com laminados de CFRP inseridos e pré-tensionados aumentou a capacidade de carga dos elementos estruturais em termos de estados limites de serviço e estados limites últimos. No entanto, o reforço de CFRP com 0%, 20% e 40% de pré-tensão nos laminados originou uma diminuição da flecha máxima (u_{Fmax}) de, respetivamente, 45,68%, 59,96% e 73,26%,

verificando-se assim uma diminuição da ductilidade com o aumento do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP.

A Figura 11 apresenta o efeito do nível de pré-tensão aplicado nos laminados de CFRP em termos do acréscimo de carga de serviço e carga máxima, tendo como base o valor obtido para as referidas cargas na laje de referência sem CFRP. Nesta figura é evidente o efeito muito favorável da aplicação da pré-tensão nos laminados de CFRP em termos de carga de serviço, enquanto que os benefícios da aplicação da pré-tensão nos laminados de CFRP em termos de carga máxima não foram tão significativos.

A Figura 12 apresenta o efeito do aumento da pré-tensão dos laminados de CFRP na flecha a meio-vão correspondente à carga máxima, tendo como base o valor obtido para a referida flecha na laje de referência sem CFRP. Nesta figura é possível verificar a diminuição da capacidade deformacional na rotura das lajes com o aumento do nível de pré-tensão nos laminados de CFRP.

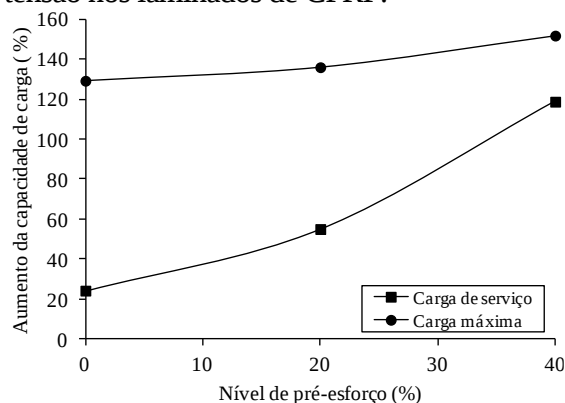


Fig. 11 – Aumento da capacidade de carga vs nível de pré-esforço no CFRP.

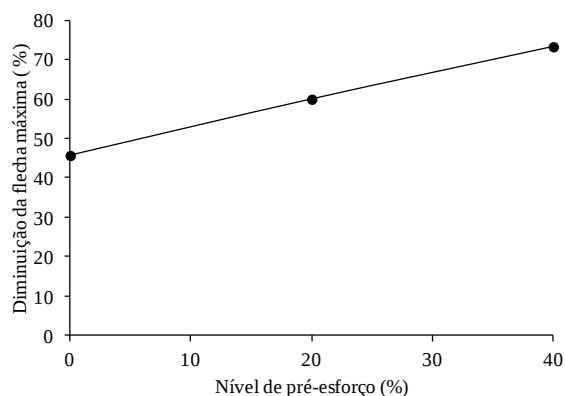


Fig. 12 – Diminuição da flecha máxima vs nível de pré-esforço no CFRP.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no âmbito do programa experimental apresentado neste trabalho permitiram extrair as seguintes conclusões:

- Independentemente do nível de pré-tensão no CFRP, verificou-se elevada eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP quando aplicada no reforço à flexão de lajes de betão armado. Tendo como base o comportamento da laje de referência sem CFRP, a solução de reforço testada, correspondente a uma percentagem de CFRP de aproximadamente 0,08%, permitiu aumentos da capacidade de carga máxima que variaram entre 129% e 152%.
- A aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP pré-tensionados resultou em aumentos significativos de capacidade de carga em serviço e na rotura. Aplicando uma pré-tensão de valor igual a 20% da capacidade máxima resistente à tração do CFRP, e tendo como base a laje de referência sem CFRP, a carga de serviço e a carga máxima aumentaram, respetivamente, 55% e 136%. Com a aplicação de uma pré-tensão de 40%, e tendo como base a laje de referência sem CFRP, a carga de serviço e a carga máxima aumentaram, respetivamente, 119% e 152%.
- Aumentando o nível de pré-tensão nos laminados de CFRP inseridos, a capacidade de carga das lajes aumentou quer em termos de serviço como na rotura. No entanto, verificou-se uma diminuição da flecha na rotura com o aumento da pré-tensão nos laminados.
- Independentemente do nível de pré-tensão no CFRP, o modo de rotura que se observou em todas as lajes reforçadas com CFRP foi a rotura do CFRP com as armaduras longitudinais tracionadas em cedência. Este modo de rotura demonstra a elevada eficácia da técnica NSM com laminados de CFRP quando aplicada no reforço à flexão de lajes de betão armado.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho expressam o seu agradecimento à empresa S&P Reinforcement pelo fornecimento dos

laminados de CFRP e do adesivo epoxídico para fixação dos laminados ao betão.

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto Prelami - FCOMP-01-0124-FEDER-014844. O segundo autor agradece a bolsa ao abrigo deste projeto.

REFERÊNCIAS

- Barros, J.A.O. and Fortes, A.S., 2005, “Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits”, *Journal Cement and Concrete Composites*, 27(4), pp. 471-480.
- Barros, J.A.O., Dias, S.J.E. and Lima J.L.T., 2007, “Efficacy of CFRP-BASED techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams”, *Journal Cement & Concrete Composites*, Volume 29, Issue 3, March, pp. 203-217.
- Bonaldo, E., 2008, “Composite materials and discrete steel fibres for the strengthening of thin concrete structures”, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Minho.
- Carolin, A., 2003, “Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements”, PhD Thesis, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Lulea, Sweden, 190 pp.
- Costa, I.G. and Barros, J.A.O., 2013, “Assessment of the long term behavior of structural adhesives in the context of NSM flexural strengthening technique with prestressed CFRP laminates”, 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-11), Guimarães, Portugal, June 26-28 (CD-ROM).
- Dalfré, G.M., 2013, “Flexural and shear strengthening of RC structures”, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Minho.
- Dias, S.J.E., Barros, J.A.O. e Azevedo, C.R., 2012, “Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos”, *Actas do Encontro Nacional Betão Estrutural BE2012*, FEUP, Porto, 24-26 Outubro (CD-ROM).
- El-Hacha, R. and Riskalla, S.H., 2004, “Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures”, *ACI Structural Journal*, 101(5), pp. 717-726.
- EN 206-1, 2000, “Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity.” European standard, CEN, 69 pp.
- EN 1992-1-1, 2004, “Eurocode2: Design of Concrete Structures Parte 1-1: General Rules for Buildings”, CEN, Brussels, Belgium.
- EN 10002-1, 1990, “Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)”, European standard, CEN, 35 pp.
- ISO 527-5, 1997, “Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites”, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp.
- Kotynia, R., 2007, “Analysis of the flexural response of NSM FRP-strengthened concrete beams”, 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, Greece, July 16-18.