

Comportamento de lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados

L. Correia¹, J. Sena-Cruz², J. Michels³, P. França⁴, T. Teixeira⁵

¹ ISE/Universidade do Minho, Guimarães, lcorreia@civil.uminho.pt

² ISE/Universidade do Minho, Guimarães, jsena@civil.uminho.pt

³ Líder de Projetos, EMPA, Julien.Michels@empa.ch

⁴ CERis, ICIST e CCCEE/Universidade da Madeira, Madeira, pfranca@uma.pt

⁵ ISE/Universidade do Minho, Guimarães, tiago.teixeira@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Lajes de betão armado; Laminados de CFRP; Pré-esforço

RESUMO

O presente artigo resume o trabalho experimental relativo a ensaios à flexão até à rotura em 12 lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados. Foram estudados os seguintes parâmetros: dois sistemas de ancoragem (ancoragem metálica e ancoragem do gradiente de força), sistema passivo versus passivo, largura (50 mm e 80 mm) e espessura (1.2 mm e 1.4 mm) do laminado de CFRP e a influência da geometria da laje (2600 mm e 2200 mm de comprimento). No presente artigo o programa experimental é descrito e os principais resultados são apresentados e analisados.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas assistiu-se ao uso crescente dos FRP (*Fiber Reinforced Polymers*) na reabilitação de estruturas de betão armado (BA) em virtude das suas inúmeras vantagens [1-7]. Em consequência disto, os FRP e técnicas de reforço associadas encontram-se relativamente bem conhecidas entre investigadores, projetistas e construtores. No caso das estruturas de BA as técnicas mais usadas são a EBR (*Externally Bonded Reinforced*) e a NSM (*Near-Surface Mounted*), que normalmente utilizam como materiais de reforço os CFRP (*Carbon FRP*) [4-7].

A técnica EBR é utilizada de forma a aumentar a resistência à flexão, através da colagem externa do FRP ao elemento estrutural a reforçar. A utilização de pré-esforço nos FRP combina as vantagens do pré-esforço externo com as vantagens da técnica EBR. De acordo com El-Hacha *et al.* [8] esta técnica tem as seguintes principais vantagens: (i) maior durabilidade devido a exclusiva utilização de materiais não corrosivos; (ii) redução de deformações; (iii) redução da espessura das fendas e atraso do início da fissuração; (iv) redução da tensão e atraso do início da cedência da armadura de aço; (v) maior resistência à fadiga; (vi) uso mais eficiente do betão e do material FRP; (vii) aumento da capacidade resistente da estrutura (flexão e corte); (viii) pode ser utilizado de forma a compensar perdas no pré-esforço interno.

Muito do sucesso da técnica que recorre a FRP pré-esforçados depende do sistema de ancoragem utilizado. De facto, as elevadas tensões de corte existentes na interface de ligação entre o FRP e o betão são, porventura, o principal problema associado às técnicas de pré-esforço [9]. Para tal, são necessários sistemas de ancoragem nas extremidades dos FRP pré-esforçados adequados [10]. No contexto do presente trabalho estudaram-se dois sistemas de ancoragens: o sistema de ancoragem mecânico (MA - *Mechanical Anchorage*) e o sistema do gradiente da força (GA - *Gradient Anchorage*) [10].

De forma a avaliar o desempenho dos dois sistemas de ancoragem anteriormente referidos (MA e GA), desenvolveu-se uma campanha de ensaios experimentais composta por 12 lajes de betão armado. Além do sistema de ancoragem, foi também estudado o tipo de reforço (passivo e ativo), a geometria do laminado de FRP (espessura e largura) e a geometria das lajes (comprimento). Todas as lajes de BA foram ensaiadas monotonicamente em flexão até rotura, sob controlo de deslocamentos. Nas secções subsequentes são descritos os protótipos e os procedimentos de ensaio e os resultados obtidos são apresentados e analisados.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Séries, protótipos e configurações de ensaio

Na Tabela 1 apresenta-se o conjunto de provetes que constituem o programa experimental desenvolvido. Este programa é composto por 12 lajes de betão armado, divididas em duas séries, em função da sua geometria: (i) série S2600, composta por oito lajes com 2600 mm de comprimento; (ii) série S2200 é composta por quatro lajes de 2200 mm de comprimento. Três lajes foram utilizadas como provetes de referência (S2600_REF1, S2600_REF2, e S2200_REF), que consistem em lajes de betão armado sem qualquer reforço. Em cada uma das lajes reforçadas foi apenas aplicado um laminado de CFRP segundo a técnica EBR. Em cada série foi reforçada uma laje com o laminado aplicado de forma passiva, i.e. sem pré-esforço (S2600_50×1.4_EBR e S2200_50×1.4_EBR). Nas restantes sete lajes utilizaram-se laminados de CFRP pré-esforçados aplicados com os dois sistemas de ancoragem em estudo: o método da ancoragem mecânica (MA) e o método do gradiente da força (GA). Nas lajes da série S2200 usaram-se apenas laminados com secção transversal de 50 mm×1.4 mm, enquanto para a série S2600 usaram-se adicionalmente laminados de 50 mm×1.2 mm e 80 mm×1.4 mm.

Tabela 1: Provetes do programa experimental.

Laje	Laminado de CFRP, ($b_f \times t_f$)	Extensão inicial, $\epsilon_{f,p}$ [$\times 10^{-3}$]	Sistema de Ancoragem	Betonagem
Série S2600				
S2600_REF1	-	-	-	B1
S2600_50×1.4_EBR	50 mm × 1.4 mm	0.00	-	B1
S2600_50×1.4_MA	50 mm × 1.4 mm	3.98	MA	B1
S2600_50×1.4_GA	50 mm × 1.4 mm	4.05	GA	B1
S2600_REF2	-	-	-	B2
S2600_50×1.2_MA	50 mm × 1.2 mm	4.19	MA	B3
S2600_80×1.2_MA	80 mm × 1.4 mm	3.99	MA	B2
S2600_80×1.2_GA	80 mm × 1.4 mm	4.06	GA	B2
Série S2200				
S2200_REF	-	-	-	B4
S2200_50×1.4_EBR	50 mm × 1.4 mm	0.00	-	B4
S2200_50×1.4_MA	50 mm × 1.4 mm	4.00	MA	B4
S2200_50×1.4_GA	50 mm × 1.4 mm	3.98	GA	B4

Notas: MA= método da ancoragem mecânica; GA = método do gradiente; b_f = largura do laminado; t_f = espessura do laminado

A Figura 1 ilustra a geometria das lajes, bem como a configuração de ensaio adotada. Em ambas as séries a secção transversal tem uma largura e espessura de 600 mm e 120 mm, respetivamente. O comprimento das lajes na série S2600 é de 2600 mm, enquanto que na série S2200 é de 2200 mm. As

lajes são armadas à flexão com 5 varões longitudinais de aço nervurado de 8 mm (5Ø8) junto à face inferior, enquanto que junto à face superior a armadura longitudinal é constituída por 3 varões de 6 mm (3Ø6). A armadura de distribuição é constituída por varões Ø6@300.

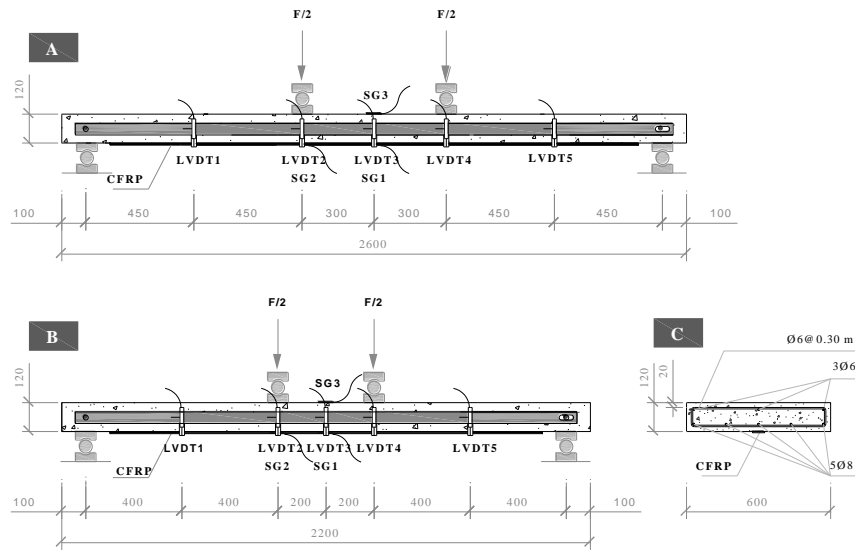


Figura 1: Geometria e configuração de ensaio das lajes da série S2600 (a) e S2400 (b), com secção transversal (c).

Foi usado um equipamento servo-controlado para realizar os ensaios sob controlo do deslocamento a meio vão a uma velocidade 1.2 mm/min, com uma configuração de quatro pontos de carga. A força aplicada foi medida através de uma célula de carga com 200 kN de capacidade máxima e uma linearidade de $\pm 0.05\%$. Os deslocamentos verticais em diferentes posições ao longo do eixo longitudinal da laje foram medidos através de cinco transdutores de deslocamento (LVDT 1 a 5 - *Linear Variable Differential Transducers*), com um campo de medida de ± 75 mm e uma linearidade de $\pm 0.1\%$. Foram colados dois extensómetros (TML BFLA-5-3) no laminado de CFRP, para monitorizar a sua extensão a meio vão (SG1) e sob um dos pontos de aplicação de carga (SG2). Foi ainda usado um extensómetro para avaliar a extensão no betão, a meio do vão, na zona de compressão junto à face superior da laje (SG3) (TML PFL-30-11-3L).

2.2. Caracterização dos materiais

Para a confeção das lajes em causa realizaram-se quatro betonagens. A caracterização mecânica do betão de cada betonagem foi efetuada através de ensaios de compressão a provetes cilíndricos (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura). A avaliação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do betão realizou-se em conformidade com as recomendações LNEC E397-1993:1993 [11] e a norma NP EN 12390-3:2011 [12], respetivamente. Os ensaios de caracterização do betão realizaram-se na véspera dos respetivos ensaios das lajes. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 2. À exceção de uma das betonagens (B2), pode dizer-se que o betão usado no presente programa experimental apresenta características mecânicas bastantes similares.

A armadura longitudinal e transversal (Ø8 e Ø6) usada foi caracterizada segundo a norma NP EN ISO 6892-1:2012 [13]. Para o efeito usaram-se três amostras de 500 mm de comprimento para cada um dos diâmetros utilizados. Dos resultados obtidos (ver Tabela 2) é possível concluir que ambas as armaduras têm um módulo de elasticidade muito próximo (cerca de 210 GPa) e uma tensão de rotura próxima dos 600 MPa para o caso do Ø8, enquanto que para o Ø6 foi próxima dos 670 MPa.

Os laminados de CFRP utilizados neste trabalho, com a designação comercial de CFK 150/2000, foram produzidos pela empresa S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda. Nos ensaios de caracterização foram usadas quatro amostras de cada tipo de laminado de CFRP. Os ensaios realizaram-se em conformidade

com a ISO 527-5:1997 [15], tendo-se determinado o módulo de elasticidade e a tensão rotura. Dos resultados obtidos (ver Tabela 2) foi possível concluir que o módulo de elasticidade variou entre 155 GPa e os 168 GPa, tendo-se obtido tensões de rotura acima dos 2400 MPa.

Tabela 2: Resultados da caracterização mecânica dos materiais (valores médios).

Betão				
Série	Betonagem	E_c [GPa]	f_c [MPa]	
S2600	B1	32.2 (7.5%)	53.4 (4.3%)	
	B2	32.6 (0.1%)	57.4 (3.0%)	
	B3	30.7 (n.a.)	49.5 (3.1%)	
S2200	B4	32.2 (2.1%)	50.3 (4.3%)	
Aço				
Série	Diâmetro	E_s [GPa]	f_y [MPa]	f_t [MPa]
S2600 e S2200	Ø6	209.5 (8.5%)	579.3 (3.3%)	669.7 (1.7%)
	Ø8	212.8 (9.7%)	501.4 (5.9%)	593.9 (3.9%)
CFRP				
Série	Geometria [mm ²]	E_f [GPa]	f_t [MPa]	
S2600	50×1.2	167.7 (2.9%)	2943.5 (1.6%)	
	50×1.4	154.8 (4.6%)	2457.1 (1.2%)	
	80×1.4	164.6 (0.2%)	2455.3 (5.0%)	
S2200	50×1.4	154.8 (4.6%)	2457.1 (1.2%)	

Notas:

Os valores entre parênteses são os respetivos coeficientes de variação (CoV)

Betão: E_c =Módulo de elasticidade; f_c =Resistência à compressão

Aço: E_s =Módulo de elasticidade; f_y =Tensão de cedência; f_t =Tensão de rotura

CFRP: E_f = Módulo de elasticidade; f_t =Tensão de rotura

A colagem dos laminados de CFRP ao betão realizou-se com recurso à resina epoxídica “S&P Resin 220 epoxy adhesive” produzida pela mesma empresa que produz os laminados. Este epóxi bi-componente não foi caracterizado no âmbito do presente trabalho. Contudo, tendo por base resultados de ensaios de caracterização deste epóxi existentes na bibliografia (e.g. [16]), pode dizer-se que, quando curado a 20 °C durante 7 dias, tem um módulo de elasticidade próximo dos 8 GPa e uma tensão de rotura à tração de cerca de 22 MPa.

2.3. Preparação e reforço dos provetes

Os procedimentos associados à preparação e reforço das lajes do presente programa experimental encontram-se devidamente documentados em [17], pelo que se remete o leitor para a consulta dessa publicação. Contudo deverá ser salientado que no âmbito do presente trabalho, o nível de pré-esforço aplicado aos laminados foi o que conduziu a uma extensão inicial ($\epsilon_{f,p}$) de cerca de 0.4%. Este valor está dentro dos valores recomendados pela bibliografia [17]. Na Tabela 1 apresentam-se os valores da pré-extensão efetivamente aplicada, obtidos com base na extensometria instalada.

3. RESULTADOS

3.1. Comportamento em serviço

Na Figura 2 apresenta-se a relação força *versus* deslocamento a meio vão das lajes ensaiadas, enquanto que na Tabela 3 apresentam-se os principais resultados obtidos. Tal como seria de esperar, os resultados comprovam que a aplicação do reforço permitiu o aumento da rigidez em estado fendilhado (K_{II}), sendo que no caso das lajes pré-esforçadas este aumento foi mais significativo, tendo atingido nalguns casos

mais do dobro da rigidez da laje de referência. A rigidez das lajes em estado não fendilhado (K_I) foi marginalmente alterada com a existência do reforço, pois na realidade, a percentagem deste não é significativa, conduzindo por isso a variações pouco apreciáveis.

Tabela 3: Resultados obtidos nos ensaios à rotura das lajes.

Séries/lajes	Rigidez		Fendilhação		Cedência		Rotura			MR
	K_I [kN/mm]	K_{II} [kN/mm]	δ_{cr} [mm]	F_{cr} [kN]	δ_y [mm]	F_y [kN]	δ_{max} [mm]	F_{max} [kN]	ϵ_{fmax} [10 ⁻³]	
Série S2600										
S2600_REF1	9.54	0.79	1.00	9.53	15.74	21.50	100.02 ^(a)	25.42 ^(b)	-	-
S2600_50x1.4_EBR	8.98	1.21	1.64	14.73	17.00	33.30	20.47	35.06	4.64	D
S2600_50x1.4_MA	9.81	1.43	2.25	22.07	17.80	44.32	69.84	61.76	11.97	D
S2600_50x1.4_GA	10.60	1.48	2.25	23.84	18.86	48.35	34.39	56.02	10.29	D
S2600_REF2	10.09	0.87	1.05	9.67	15.96	22.90	100.00 ^(a)	26.94 ^(b)	-	-
S2600_50x1.2_MA	9.02	1.22	2.53	22.81	20.57	44.89	73.23	59.09	12.53	D
S2600_80x1.2_MA	11.44	1.88	2.51	28.71	18.43	58.67	48.62	72.58	10.13	D
S2600_80x1.2_GA	9.92	1.71	2.88	28.56	20.31	58.31	30.61	66.21	8.96	D
Série S2200										
S2200_REF	16.11	1.45	0.84	13.53	10.42	27.42	70.00 ^(a)	30.17 ^(b)	-	-
S2200_50x1.4_EBR	20.93	2.09	0.73	15.28	12.37	39.59	16.55	43.26	4.44	D
S2200_50x1.4_MA	18.31	2.31	1.50	27.47	13.07	54.22	48.55	75.27	13.39	D
S2200_50x1.4_GA	16.13	2.35	1.58	25.49	13.56	53.64	21.18	61.04	55.72	D

Notas: K_I = Rigidez à flexão para o estado não fendilhado; K_{II} = Rigidez à flexão para o estado fendilhado; δ = Deslocamento a meio vão; F = Força máxima aplicada; MR = Modo de rotura; D = Destacamento.

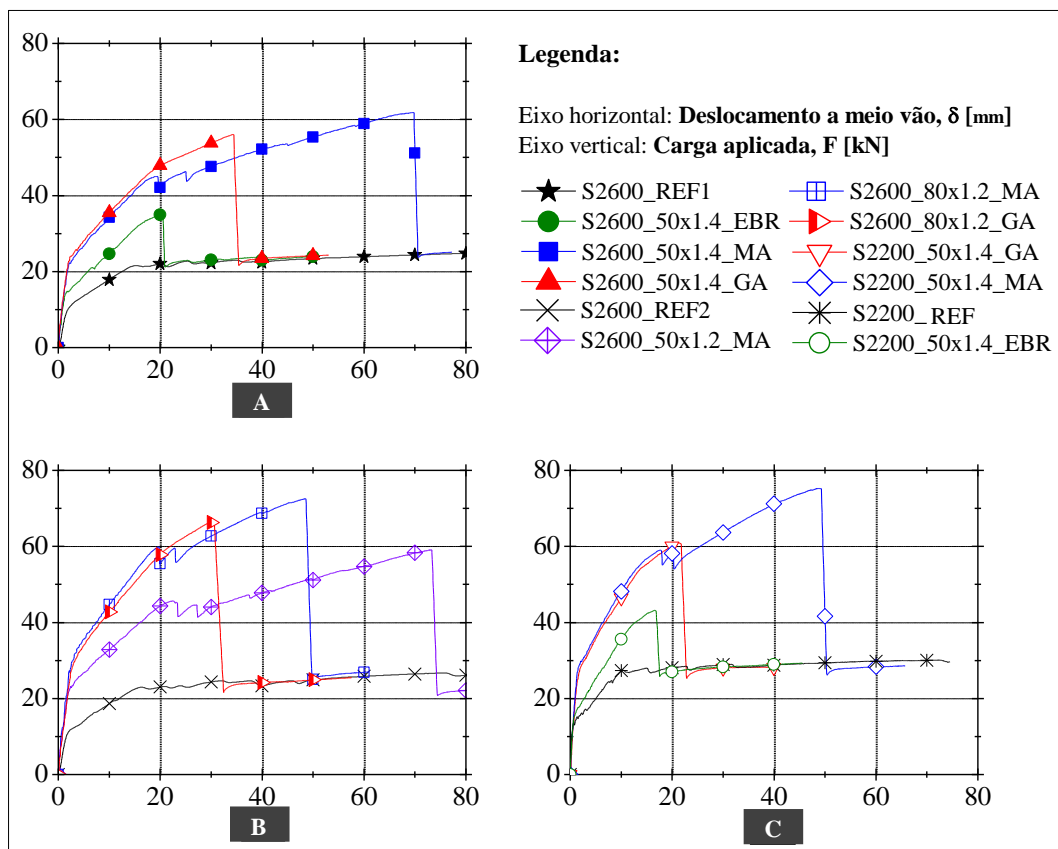


Figura 2: Relações força *versus* deslocamento para as lajes ensaiadas.

Tal como seria de esperar, a carga de início de fendilhação (F_{cr}) sofreu variações importantes com a aplicação de reforço, existência de pré-esforço aplicado e rigidez do laminado usado. Assim, para a série S2600, a carga de início de fendilhação das lajes pré-esforçadas teve um aumento aproximado médio de 108% e 158%, quando reforçadas com laminados de 50 mm×1.4 mm e 80 mm×1.2 mm respetivamente, independentemente do tipo de ancoragem usada.

No final de cada ensaio foi feito o levantamento do padrão de fendilhação de cada laje, cujo resultado é apresentado na Figura 3. De uma forma geral é possível concluir que o reforço permitiu diminuir a distância entre fendas. Esta diminuição foi ainda mais efetiva para as lajes reforçadas com laminados pré-esforçados. Assim, no caso da série S2600 obteve-se um valor médio de distância máxima entre fendas de cerca de 117 mm, 96 mm e 92 mm, para o caso das lajes de referência (S2600_REF), lajes reforçadas com laminados pré-esforçados S2600_50x1.4 e S2600_80x1.2, respetivamente. No caso da série S2200, na laje de referência (S2200_REF) obteve-se uma distância máxima média entre fendas de cerca de 152 mm, enquanto nas lajes reforçadas com laminados pré-esforçados este valor baixo para os 98 mm. A análise efetuada não permitiu tirar ilações quanto à influência do sistema de ancoragem no padrão de fendilhação.

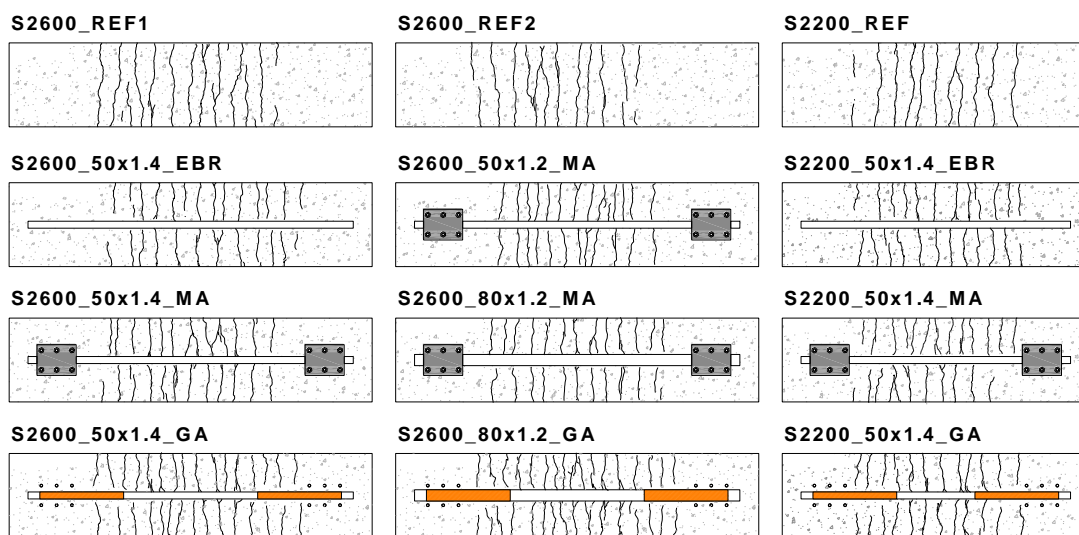


Figura 3: Padrão de fendilhação para as lajes ensaiadas.

3.2. Comportamento à rotura

A Figura 2 e Tabela 3 permitem inferir que o uso de reforço permitiu aumentar a força de início da cedência das armaduras longitudinais (F_y), bem como a carga de rotura (F_{max}). Este aumento foi bem mais significativo para o caso das lajes com laminados de CFRP pré-esforçados.

Em qualquer das séries foi possível observar que ambos os sistemas de ancoragem apresentaram comportamento semelhante até à cedência das armaduras longitudinais. Contudo, a partir desse ponto, o comportamento alterou-se significativamente. Para as lajes MA é possível observar que, a certa altura, existem duas quedas abruptas da força que resultam da perda de aderência do laminado ao substrato entre as placas de ancoragem. A partir dessa altura o laminado começa a funcionar com um “cabo de pré-esforço não aderente”, preso nas extremidades. A carga máxima é atingida quando ocorre o deslizamento do laminado no interior das chapas de ancoragem. No caso do sistema GA, após a cedência das armaduras longitudinais o reforço continua aderente ao betão até que se dá a rotura da laje por destacamento deste em relação ao substrato. Assim, devido a estes comportamentos distintos é possível concluir que a rigidez, após a cedência das armaduras longitudinais, é maior no sistema GA, quando comparada com a do MA. Finalmente, será ainda de salientar que pelo facto de o laminado estar ancorado no caso do sistema MA, é possível atingir cargas de rotura mais elevadas.

A influência da largura do laminado foi avaliada através da comparação do comportamento das lajes S2600_50x1.2_MA e S2600_80x1.2_MA (ver Figura 2b). Dos resultados obtidos, foi possível concluir que a laje com o laminado mais largo evidenciou um desempenho superior, visto que apresenta maior secção e, como tal, maior capacidade de explorar o elemento de betão armado. Contudo, observou-se

para esta uma menor ductilidade em resultado da rotura prematura condicionada pela capacidade resistente ao corte das ancoragens metálicas nas extremidades.

Apesar da bibliografia referir o efeito da espessura do reforço como um fator importante na resposta estrutural, observam-se comportamentos similares nas lajes S2600_50×1.2_MA e S2600_50×1.4_MA. Note-se que em ambas as lajes foram utilizadas chapas de ancoragem nas extremidades e a rotura pode ter sido condicionada pelo comportamento destas ancoragens. A diferença de rigidez axial entre estes provetes era apenas de cerca de 8% o que, para este caso particular, não foi suficiente para diferenciar o seu comportamento.

Todas as lajes reforçadas apresentaram modos de rotura (MR) idênticos: destacamento do laminado a partir de uma ou de ambas as extremidades. A rotura iniciou-se na interface entre o laminado de CFRP e o adesivo epóxi junto à zona de ancoragem das lajes MA e GA. A restante zona do laminado parece ter sofrido simultaneamente rotura entre a interface laminado/epóxi e rotura coesiva do betão. Finalmente, refere-se que em oposição às restantes lajes, na S2600_50×1.4_EBR a rotura ocorreu na interface entre o adesivo epoxídico e betão.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um programa experimental que teve como principal objetivo avaliar o comportamento em serviço e à rotura de dois distintos sistemas de ancoragem: o método da ancoragem mecânica (MA) e o método do gradiente (GA). Assim, através do programa experimental realizado foi possível obter as seguintes principais conclusões:

- Em serviço, o reforço (passivo ou ativo) melhorou o comportamento das lajes através da redução de deformações devido ao aumento de rigidez conseguido, retardação da abertura de fendas e diminuição do espaço entre fendas;
- Até ao início da cedência das armaduras, ambos os sistemas de ancoragem (MA e GA) apresentaram comportamentos semelhantes. Contudo as chapas de ancoragem do sistema MA permitiram evitar rotura prematura obtendo-se, por isso, deformações e capacidade de cargas mais elevadas na rotura;
- As nove lajes reforçadas tiveram uma rotura pelo destacamento do laminado de CFRP na interface CFRP betão;
- O uso mais eficiente do laminado de CFRP foi conseguido com a utilização do pré-esforço. Enquanto o reforço passivo apenas permitiu extensões até 30% da capacidade máxima do laminado, no reforço ativo o laminado de CFRP teve extensões máximas entre 60% e 84% da sua capacidade máxima;
- O desempenho dos laminados de CFRP com diferentes espessuras foi semelhante, embora a amostragem utilizada não permita uma conclusão muito sólida nesta matéria;
- As lajes da série S2200 apresentaram maior rigidez quando comparadas às da série S2600. Não obstante, verifica-se que as lajes de ambas as séries possuem parâmetros de ductilidade e eficiência semelhantes.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado por fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT - Fundação Português de Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012. O primeiro autor agradece a bolsa SFRH/BD/98309/2013, atribuída pela FCT. Os autores também agradecem todas as empresas que estiveram envolvidas no desenvolvimento do projeto FRPreDur, nomeadamente: S&P Clever

Reinforcement Ibérica Lda, S&P Clever Reinforcement Company (Switzerland), Tecnipor - Gomes & Taveira Lda., Vialam – Indústrias Metalúrgicas e Metalomecânicas, Lda., Hilti Portugal - Produtos e Serviços, Lda. e SIKA.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Bakis, L. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. Davalos, J. Lesko, et al., “Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review” *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, pp. 73-87, 2002.
- [2] *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*: CRC Press, 2013.
- [3] FIB, “FRP reinforcement in RC structures” in *fib Bulletin 14* vol. 40, FIB, Ed., ed. Switzerland: FIB, 2007, p. 160.
- [4] CNR, “Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures” in *CNR_DT200_2004*, ed. Rome: CNR, 2004.
- [5] ACI, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures” in *ACI 440.2R-02*, ed. USA: ACI Committee 440, 2002, p. 45.
- [6] H. 305, “Design handbook for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs” *Standards Australia GPO Box 476, Sydney, Australia* 2008.
- [7] CAN/CSA-S6-06, “Canadian highway bridge design code” *National Standard of Canada, Ontario, Canada*, 2006.
- [8] R. El-Hacha, R. G. Wight, and M. F. Green, “Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures” *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 3, pp. 111-121, 2001.
- [9] J. Michels, M. Staśkiewicz, C. Czaderski, K. Lasek, R. Kotynia, and M. Motavalli, “Anchorage resistance of CFRP strips externally bonded to various cementitious substrates” *Composites Part B: Engineering*, vol. 63, pp. 50-60, 2014.
- [10] J. Michels, J. Sena-Cruz, C. Czaderski, and M. Motavalli, “Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage” *Journal of Composites for Construction*, vol. 17, pp. 651-661, 2013.
- [11] L.-E. E-397, “Betões – Determinação do módulo de elasticidade” 1993.
- [12] NP-EN-12390-3, “Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens” in *IPQ - Instituto Português da Qualidade*, ed. Caparica, 2011.
- [13] N. E. I. 6892-1, “Metallic Materials. Tensile Testing. Part 1: Method of test at room temperature” *I.-I. P. d. Qualidade*, Ed., ed. Caparica, 2012.
- [14] N. E. 1992-1-1, “Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings” *I.-I. P. d. Qualidade*, Ed., ed. Caparica, 2010.
- [15] ISO, “ISO 527-5:1997,” in *Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*, ed. Switzerland: ISO, 1997, p. 9.
- [16] P. Fernandes, J. L. Granja, A. Benedetti, J. Sena-Cruz, and M. Azenha, “Quality control and monitoring of NSM CFRP systems: E-modulus evolution of epoxy adhesive and its relation to the pull-out force” *Composites Part B: Engineering*, vol. 75, pp. 95-103.
- [17] Correia, L.; Teixeira, T.; Michels, J.; Almeida, J.; Sena-Cruz, J. “Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems” *Composites Part B: Engineering*, vol. 81, pp. 158–170, 2015.