

REFORÇO À FLEXÃO DE LAJES DE BETÃO ARMADO COM LAMINADOS DE CFRP PRÉ-ESFORÇADOS: COMPORTAMENTO EM ESTADO LIMITE ÚLTIMO E DE UTILIZAÇÃO



Tiago Teixeira

Aluno de doutoramento
ISISE, Universidade do
Minho
Guimarães
tiago.teixeira@civil.uminho.pt



Luís Correia

Aluno de doutoramento
ISISE, Universidade do
Minho
Guimarães
lcorreia@civil.uminho.pt



José Sena-Cruz

Professor associado
ISISE, Universidade do
Minho
Guimarães
jsena@civil.uminho.pt



Julien Michels

Líder de projeto
EMPA
Suíça
julien.michels@empa.ch

SUMÁRIO

No contexto do reforço estrutural à flexão com recurso aos laminados de CFRP (*Carbon Fiber-Reinforced Polymers*), a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) é frequentemente utilizada. A aplicação de CFRP pré-esforçados acumula as vantagens da técnica EBR com as do pré-esforço externo. O sistema de ancoragem desempenha um papel fundamental nos sistemas de reforço com laminados de CFRP pré-esforçados. Por esta razão, neste trabalho desenvolveu-se um programa experimental, composto por 8 lajes de betão armado, com o principal objetivo de analisar dois sistemas de ancoragem: (i) ancoragem metálica e (ii) ancoragem do gradiente de força. Além dos sistemas de ancoragem, foi também analisada a influência da geometria do laminado de CFRP. Através dos resultados obtidos verificou-se uma melhoria do comportamento das lajes pré-esforçadas ao nível do estado limite último e de utilização.

Palavras-chave: Reforço estrutural; técnica EBR; Laminados de CFRP pré-esforçados; Estado limite de serviço e último.

1. INTRODUÇÃO

O reforço de estruturas de betão armado com materiais FRP (*Fiber-Reinforced Polymers*) tem sido alvo de intensa investigação nos últimos anos [1-4]. Habitualmente recorre-se à técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) como forma de aumentar a resistência à flexão de estruturas de betão armado, que consiste na colagem externa de um material de reforço sobre o elemento estrutural a reforçar [5]. Os materiais de reforço FRP podem ser aplicados segundo a técnica EBR, no estado passivo ou ativo (pré-esforçados). O uso do pré-esforço combina os benefícios da técnica EBR com as vantagens associadas com o pré-esforço externo, nomeadamente: (i) redução das deformações e da largura de fendas; (ii) atraso no aparecimento de fendas e no início da cedência das armaduras; (iii) maior aproveitamento da capacidade última do betão e do FRP; (iv) redução do risco de descolagem prematura do FRP; (v) aumento da capacidade resistente da estrutura (em termos de flexão e corte) [6, 7].

Os sistemas de ancoragem de FRP pré-esforçados desempenham um papel basilar no êxito da técnica de pré-esforço. De facto, as elevadas tensões de corte existentes no interface de ligação entre o betão e o FRP são o principal problema associado às técnicas de pré-esforço [8]. Normalmente, o problema referido é mitigado através da aplicação de sistemas de ancoragem nas extremidades dos FRP pré-esforçados.

Apesar de existirem vários sistemas de ancoragem no mercado [6], no contexto do presente trabalho foram estudados dois sistemas de ancoragens comercializados pela *S&P Clever Reinforcement Company*: (i) o sistema de ancoragem mecânico (MA – *Mechanical Anchorage*), com recurso a chapas metálicas fixas nas extremidades dos FRP e (ii) o método do gradiente (GA – *Gradient Anchorage*) da força [6].

De forma a avaliar o desempenho em serviço e em estado limite último dos dois sistemas de ancoragem anteriormente referidos (MA e GA), desenvolveu-se um programa experimental composto por 8 lajes de betão armado (2 lajes de referência e 6 lajes reforçadas). Os principais parâmetros analisados foram: (i) o sistema de reforço (passivo e ativo), (ii) o sistema de ancoragem (MA e GA) e (iii) a geometria do laminado de CFRP (espessura e largura). Nas secções que se seguem são descritos os procedimentos e os resultados obtidos são analisados detalhadamente.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Provetes e configuração de ensaio

O programa experimental compreendeu 8 lajes de betão armado com as características referidas no Quadro 1. Duas lajes foram usadas como protótipos de referência (REF1 e REF2), uma laje foi reforçada com um laminado de CFRP, no estado passivo, aplicado segundo a técnica EBR (SL50×1.4_EBR), as restantes 5 lajes foram reforçadas com um laminado de CFRP pré-esforçado. Tal como previamente foi referido, foram usados dois

sistemas de ancoragem para fixar as extremidades dos laminados pré-esforçados: o método do gradiente (GA) em 2 lajes e a ancoragem mecânica (MA) em 3 lajes. Os laminados de CFRP utilizados apresentavam as seguintes geometrias: (i) $50 \times 1.4 \text{ mm}^2$, (ii) $50 \times 1.2 \text{ mm}^2$ e (iii) $80 \times 1.2 \text{ mm}^2$.

Quadro 1. Programa experimental realizado

Identificação da laje	Laminado [mm^2]	Ancoragem	ϵ_{fp} [$\times 10^{-3}$]	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [GPa]
REF1	-	-	-	53.4 (4.3%)	32.2 (7.5%)
SL50×1.4_GA	50×1.4	GA	4.05		
SL50×1.4_MA	50×1.4	MA	3.98		
SL50×1.4_EBR	50×1.4	-	-		
SL50×1.2_MA	50×1.2	MA	4.19	49.5 (3.1%)	n.a.
REF2	-	-	-	57.4 (3.0%)	32.6 (0.1%)
SL80×1.2_GA	80×1.2	GA	4.06		
SL80×1.2_MA	80×1.2	MA	3.99		

Notas: f_{cm} – resistência à compressão do betão, em cilindros de 150/300 mm, no dia do ensaio das lajes; E_{cm} – módulo de elasticidade do betão no dia do ensaio das lajes; os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV).

A geometria das lajes e a configuração de ensaio adotados neste trabalho experimental encontram-se ilustrados na Figura 1. As lajes de betão armado apresentam 2600 mm de comprimento, 600 mm de largura e 120 mm de espessura. As armaduras longitudinais (de flexão) são compostas por 5 varões de aço nervurado com 8 mm de diâmetro, dispostos na face inferior e 3 varões de aço nervurado com 6 mm de diâmetro junto à face superior. Adicionalmente, a armadura transversal é materializada por intermédio de estribos de aço com 6 mm de diâmetro, espaçados de 300 mm entre si. Nas lajes reforçadas foram usados laminados de CFRP com 2200 mm de comprimento.

A instrumentação adotada incluiu 5 LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*), três posicionados na zona de flexão pura (ver Figura 1), cada um com um campo de medida de $\pm 75 \text{ mm}$ e uma linearidade de $\pm 0.1\%$, e os restantes dois posicionados entre o ponto de aplicação da força e os suportes das lajes, com um campo de medida de $\pm 25 \text{ mm}$ e a mesma linearidade, i.e. $\pm 0.1\%$. Desta forma foi possível avaliar as deformações das lajes ao longo do seu eixo longitudinal. Também foi utilizada uma célula de carga com capacidade de leitura máxima de 200 kN e linearidade de $\pm 0.05\%$ para medir a carga aplicada e um extensómetro da marca TML (referência BFLA-5-3), colado no laminado de CFRP a meio da laje (ver Figura 1 b), de modo a registar as extensões ocorridas durante a aplicação do pré-esforço e do ensaio à rotura. Todas lajes foram ensaiadas monotonicamente, em regime de controlo de deslocamento a meio vão, a uma velocidade de $20 \mu\text{m/s}$.

Durante a realização dos ensaios a evolução da largura de fendas foi monitorizada por intermédio do uso de um microscópio USB portátil (VEHO VMS-004D), com uma resolução

nativa de 640×480 pixels e capacidade de ampliação máxima de 400×. No âmbito do presente trabalho, foi utilizado um fator de ampliação de 20×.

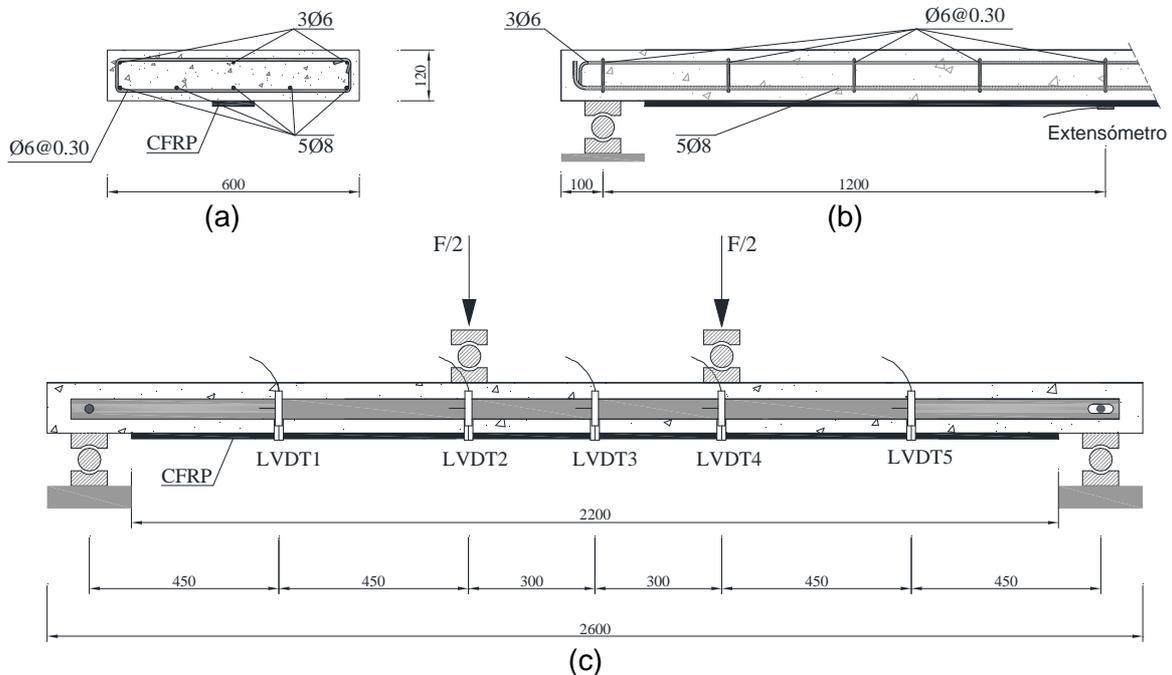


Figura 1. Geometria e configuração de ensaio: a) secção transversal; b) secção longitudinal; c) configuração de ensaio. Nota: unidades em [mm]

2.2 Caracterização dos materiais

2.2.1 Betão

No contexto da avaliação das propriedades mecânicas do betão, utilizado na produção das lajes, foram realizados ensaios de compressão. Para esse efeito foram produzidos seis provetes cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, de cada betão produzido para o fabrico das lajes. A avaliação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do betão foi realizada em conformidade com as recomendações LNEC E397-1993:1993 e NP EN 12390-3:2011, respetivamente. Os provetes de betão e as lajes de betão armado foram ensaiados à mesma data. Os resultados obtidos na caracterização mecânica do betão encontram-se presentes no Quadro 1. Em geral, observa-se que os valores dos coeficientes de variação são baixos, tanto para os valores de resistência à compressão como para o módulo de elasticidade, o que indica uniformidade das amostras. Em média o valor da resistência à compressão do betão foi estimada em 53.4 MPa.

2.2.2 Aço

As propriedades mecânicas do aço foram avaliadas em conformidade com as recomendações da NP EN ISO 6892-1:2012. Para cada diâmetro de aço ($\varnothing 6$ e $\varnothing 8$), utilizados no fabrico das lajes, foram ensaiados três provetes. Através dos ensaios foi possível apurar que o módulo de elasticidade, as tensões de cedência e rotura são iguais a

209.5 GPa (CoV=8.5%), 579.3 MPa (CoV=3.3%) e 669.7 MPa (CoV=1.7%) para os varões com 6 mm de diâmetro e 212.8 GPa (CoV=9.7%), 501.4 MPa (CoV=5.9%) e 593.9 MPa (CoV=3.9%) para os varões com 8 mm de diâmetro, respetivamente.

2.2.3 Laminados de CFRP

Os laminados de CFRP utilizados neste trabalho experimental foram produzidos pela *S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda*. A caracterização das amostras de CFRP foi realizada de acordo com a ISO 527-5:1997, tendo-se obtido os seguintes resultados: (i) o laminado com 50 x 1.4 mm² apresentou um módulo de elasticidade (E_f) de 154.8 GPa (CoV=4.6%) e uma tensão de rotura (f_f) de 2457.1 MPa (CoV=1.2%); (ii) no caso do laminado com 50 x 1.2 mm² obteve-se $E_f = 167.69$ GPa (CoV=2.9%) e $f_f = 2943.5$ MPa (CoV=1.6%); (iii) finalmente para o laminado com 80 x 1.2 mm² obteve-se $E_f = 164.59$ GPa (CoV=0.2%) e $f_f = 2455.3$ MPa (CoV=5.0%).

2.2.4 Adesivo epóxi

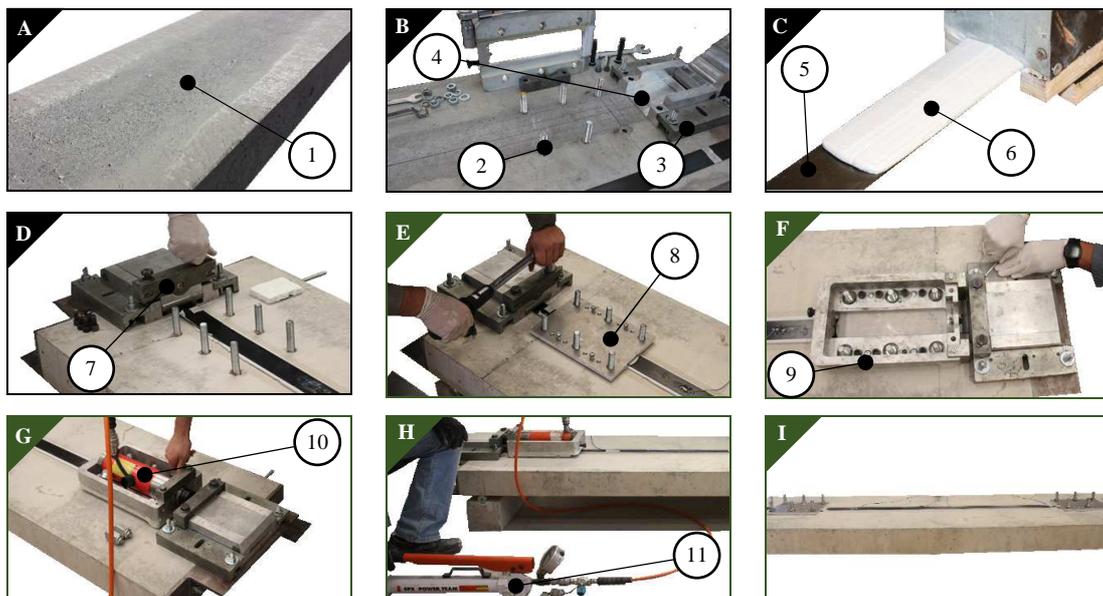
O adesivo utilizado para efeitos de colagem dos laminados CFRP ao betão foi uma resina epóxi com a designação comercial *S&P 220 Resin*, produzida pelo mesmo fabricante dos laminados CFRP. As propriedades mecânicas deste adesivo epóxi foram determinadas em conformidade com o disposto na ISO 527-2:1993. Para este efeito foram produzidos e ensaiados seis provetes normalizados de epóxi, sujeitos às mesmas condições de cura do adesivo aplicado nas lajes reforçadas. O módulo de elasticidade e a tensão de rotura obtidos foram de 6.3 GPa (CoV=4.7%) e de 24.4 MPa (CoV=1.8%), respetivamente.

2.3 Preparação das lajes para o reforço

Os procedimentos adotados antes e durante reforço das lajes de betão armado são compostos por várias etapas. Os sistemas de ancoragem adotados no presente trabalho experimental (MA e GA) apresentam alguns procedimentos e equipamentos comuns. Nas Figuras 2 e 3 ilustram-se as principais etapas para a aplicação dos sistemas de reforço MA e GA, respetivamente, que se resumem de seguida:

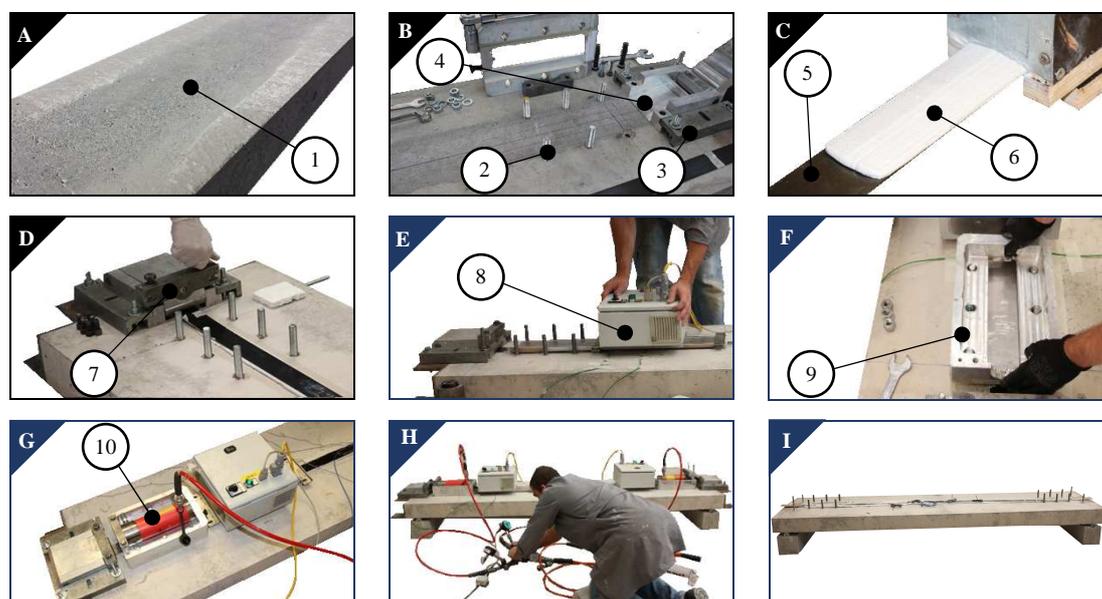
1. Numa fase inicial procede-se ao tratamento da camada superficial de betão com recurso a um esmeril, na zona onde o laminado de CFRP irá ser aplicado. No final desta etapa recorre-se a ar comprimido para limpar a superfície tratada;
2. De seguida são realizados furos nas lajes com vista à instalação de varões roscados necessários para a instalação de sistemas provisórios de aplicação do pré-esforço e, no caso do sistema MA também para a fixação das chapas de ancoragem;
3. Numa fase seguinte, as guias metálicas são instaladas para fixar e guiar as unidades de aperto do laminado de CFRP;
4. De seguida as unidades de aperto são instaladas entre as guias, em cada uma das extremidades da laje;

5. O adesivo epóxi é preparado de acordo com as recomendações do seu fabricante, enquanto o laminado é limpo com acetona. O adesivo epóxi é aplicado na superfície do laminado de CFRP, bem como na superfície de betão em contacto com o mesmo. Depois, o laminado é posicionado e ligeiramente pressionado contra a superfície de betão;
6. As unidades de aperto são fechadas, seguindo-se a instalação das chapas metálicas, para o caso do sistema de ancoragem MA, e dos dispositivos de aquecimento no caso do sistema de ancoragem GA;
7. Os dispositivos metálicos que acomodam os cilindros hidráulicos são instalados e fixos por intermédio de ancoragens. De seguida, procede-se à instalação dos cilindros hidráulicos no interior dos dispositivos metálicos. No caso particular do sistema MA, caso o comprimento do laminado e valor do pré-esforço a aplicar sejam reduzidos, poder-se-á prescindir do uso de dois cilindros hidráulicos (duas ancoragens ativas).
8. Finalmente, a força de pré-esforço é aplicada através de um macaco hidráulico.



Legenda: 1 – Superfície do betão; 2 – Ancoragens auxiliares; 3 – Guias metálicas; 4 – Unidade de aperto; 5 – Laminado de CFRP; 6 – Adesivo epóxi; 7 – Fecho da unidade de aperto; 8 – Chapa de ancoragem; 9 – Quadro metálico; 10 – Cilindro hidráulico; 11 – Macaco hidráulico

Figura 2. Procedimentos de aplicação do sistema MA



Legenda: 1 – Superfície do betão; 2 – Ancoragens auxiliares; 3 – Guias metálicas; 4 – Unidade de aperto; 5 – Laminado de CFRP; 6 – Adesivo epóxi; 7 – Fecho da unidade de aperto; 8 – Dispositivo de aquecimento; 9 – Quadro metálico; 10 – Cilindro hidráulico.

Figura 3. Procedimentos de aplicação do sistema GA

Após aplicação do pré-esforço, procedimentos distintos são seguidos para os sistemas de ancoragem MA e GA. Os referidos procedimentos encontram-se detalhados em [9], no caso de ancoragem mecânica (MA), e em [6], no caso método de gradiente (GA).

No caso do sistema GA, o processo de reforço fica concluído aproximadamente 3 horas após a instalação do laminado. No caso do sistema MA, para condições normais de cura, i.e. com temperaturas iguais ou superiores a 20° C, o reforço fica concluído 24 horas após a aplicação do laminado [10]. De salientar que, de acordo com o fabricante, em geral são necessários três dias para se obter a cura do epóxi, em condições normais de cura. As lajes incluídas no presente programa experimental foram mantidas em ambiente de laboratório após o reforço, pelo menos um mês antes de serem ensaiadas.

O nível de pré-esforço induzido nos laminados de CFRP (ϵ_{fp}) foi aproximadamente 0.4%, valor este que se enquadra com os valores sugeridos na literatura existente. No Quadro 1 podem consultar-se os valores de extensão nos laminados CFRP, provenientes da última leitura dos extensómetros instalados, antes das lajes terem sido submetidas aos respetivos ensaios monotónicos à rotura.

Durante o processo de reforço segundo o sistema GA, todas as lajes foram monitorizadas em termos de força instalada no laminado CFRP através dos manómetros de pressão, e em termos da evolução da temperatura nos diferentes sectores que constituem os dispositivos de aquecimento. A título ilustrativo apresenta-se na Figura 4 os valores registados nas lajes SL50×1.4_GA e SL80×1.2_GA. Refira-se ainda que no contexto do presente trabalho

experimental, o comprimento de ancoragem adotado no sistema do gradiente (GA) foi de 600 mm (zona onde foi promovida a cura rápida do epóxi).

Tendo em conta que cada dispositivo de aquecimento é composto por vários segmentos de aquecimento, cada um com uma área de 100×100 mm², foram mobilizados no total 6 segmentos, agrupados em 3 sectores com 200 mm de comprimento. Nos gráficos apresentadas na Figura 4 é possível observar a evolução da temperatura no tempo, nos sectores de aquecimento mobilizados: (i) inicialmente, a temperatura é elevada e mantida a 160 °C durante 15 minutos; (ii) de seguida a temperatura é reduzida de forma exponencial durante um período de 20 minutos; (iii) finalmente o aquecimento é interrompido, permitindo que o adesivo epóxi arrefeça de modo a recuperar a temperatura ambiente. A redução da força de pré-esforço em cada sector da ancoragem foi de aproximadamente 1/3 da força de pré-esforço total aplicada. As sucessivas reduções da força de pré-esforço ocorreram 15 minutos após o início da fase de arrefecimento do epóxi.

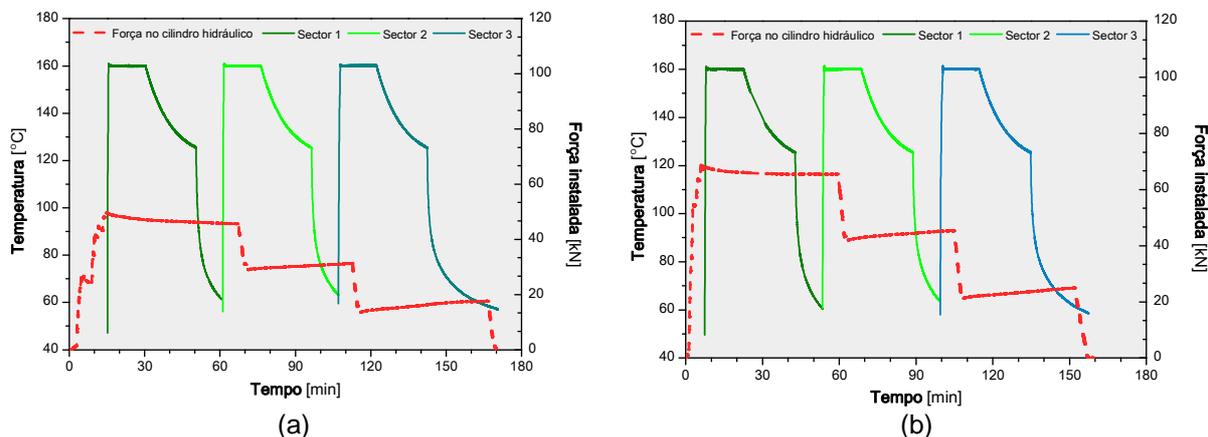


Figura 4. Evolução da temperatura e da força instalada no laminado de CFRP para o caso do método do gradiente (GA): (a) SL50×1.4_GA; (b) SL80×1.2_GA.

3. RESULTADOS

3.1 Comportamento em serviço

3.1.1 Deformações

A Figura 9 mostra a relação entre a carga aplicada e a deformação a meio vão de todas lajes ensaiadas monotonicamente. Complementarmente, no Quadro 2 apresentam-se os principais resultados obtidos através da campanha experimental realizada. Como esperado, as lajes reforçadas com os laminados CFRP evidenciaram uma redução das deformações, motivada pela adição do laminado de CFRP e consequente aumento da rigidez do sistema. O pré-esforço não afetou significativamente a rigidez das lajes, durante a fase elástica. Contudo, comparativamente com as lajes de referência e à laje EBR, verificou-se, um aumento significativo na resposta das lajes pré-esforçadas no que diz respeito às flechas de início da fendilhação e de cedência das armaduras longitudinais. No geral, o desempenho

dos dois sistemas (MA e GA), em termos de comportamento em serviço, foi similar até ao início da fase de cedência das armaduras.

3.1.2 Largura de fendas

A evolução da largura de fendas de cada laje foi alvo de monitorização através de um microscópio, como descrito na seção anterior. Para o efeito foram escolhidas três fendas, ao longo da zona de flexão pura de cada laje (ver Figura 1): (i) duas na proximidade dos pontos de aplicação da carga e (ii) uma no meio vão da laje. Para cada registo gráfico efetuado através do microscópio, foram realizadas três medições ao longo da fenda (ver Figura 5), de forma a obter-se um valor médio, da largura da fenda. Na Figura 6 apresenta-se a evolução da largura média de fendas em relação à carga aplicada.

Como seria expectável, as lajes reforçadas com os laminados CFRP exibiram uma taxa de evolução da largura de fendas inferior à laje não reforçada (REF2). Estes resultados não permitem tirar conclusões evidentes relativamente aos sistemas MA e GA. Contudo, esperava-se que os resultados fossem similares, uma vez que as respostas de ambos os sistemas foi idêntica, em termos de carga aplicada *versus* deformação (ver Figura 9).



Figura 5. Medição da largura de fendas

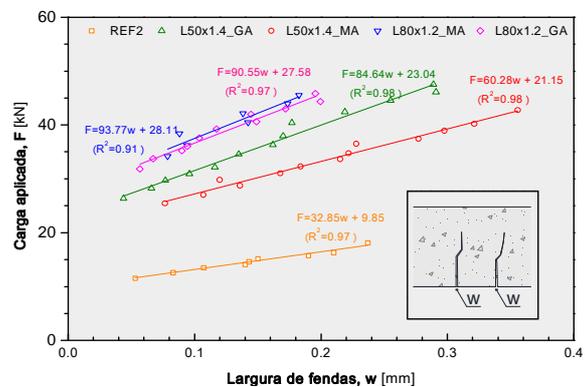


Figura 6. Carga aplicada *versus* largura de fendas

3.1.3 Espaçamento entre fendas

O espaçamento entre fendas foi um outro aspeto igualmente avaliado no final de cada ensaio monotónico, tal como se exemplifica na Figura 7. Os valores médios do espaçamento entre fendas das lajes ensaiadas é exposto na Figura 8. Tal como esperado, verificou-se que o espaçamento entre fendas diminuiu com a aplicação dos laminados de CFRP pré-esforçados. No caso da laje EBR a diminuição do espaçamento entre fendas foi marginal quando comparada com as lajes de referência (REF1 e REF2).

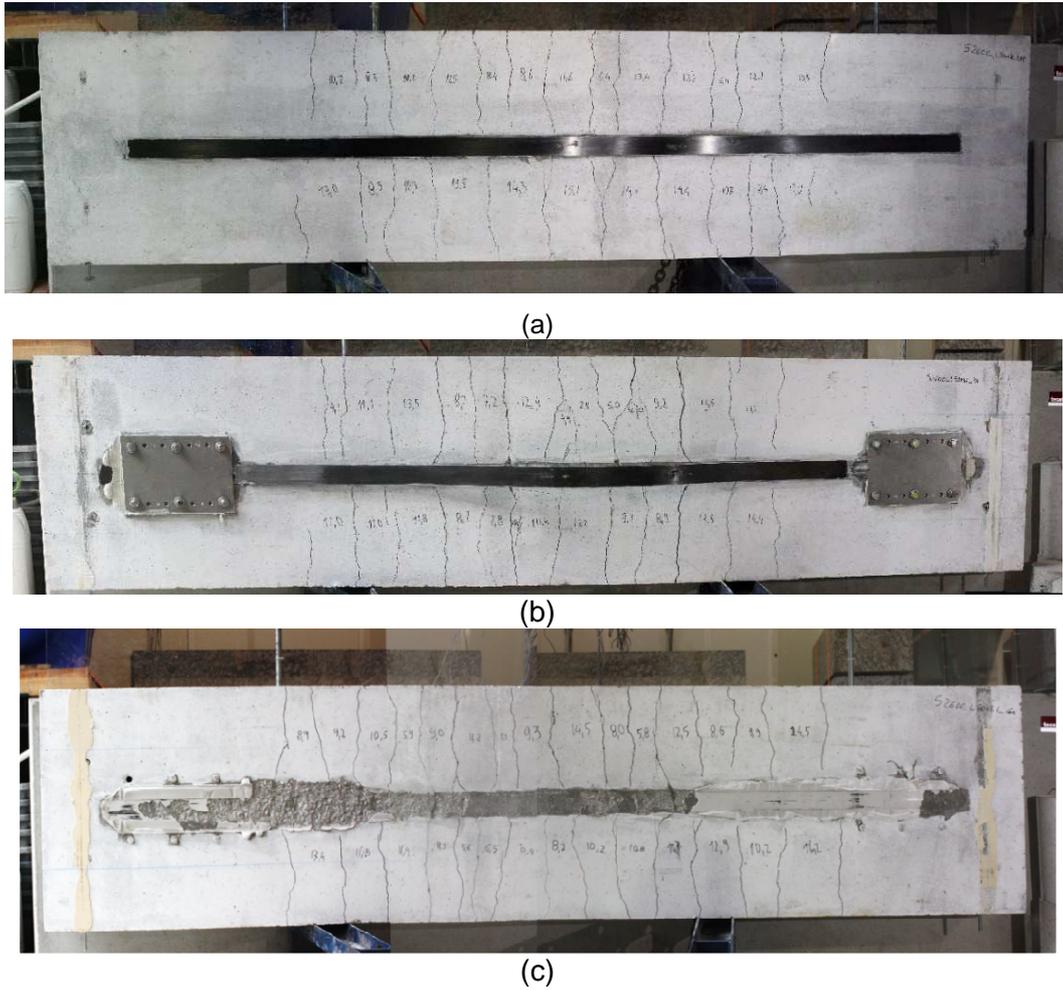


Figura 7. Padrão de fendilhação (a) SL50x1.4_EBR; (b) SL50x1.4_MA; (c) SL50x1.4_GA

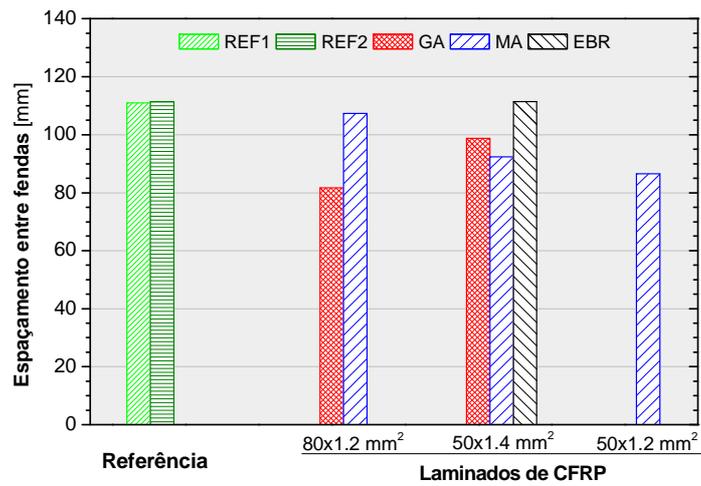


Figura 8. Espaçamento entre fendas nas lajes ensaiadas

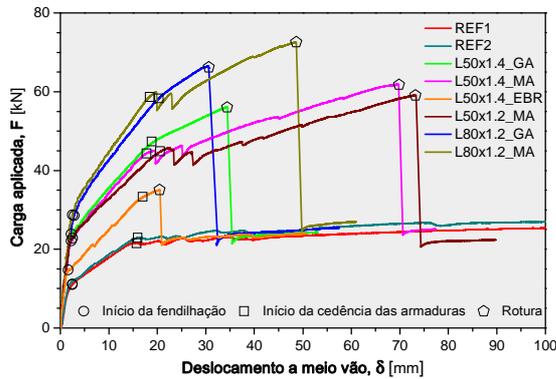


Figura 9. Carga aplicada *versus* deslocamento a meio vão

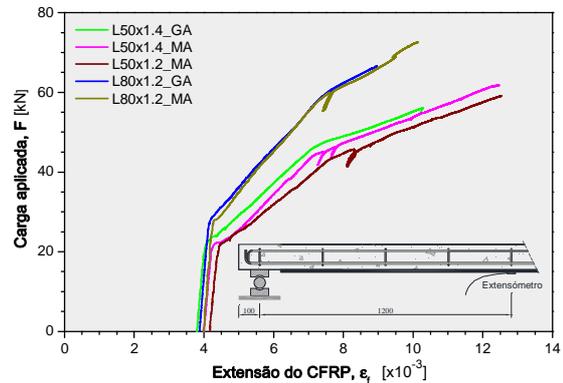


Figura 10. Carga aplicada *versus* extensão do CFRP

Quadro 2. Principais resultados do programa experimental

Identificação da laje	Início da fendilhação		Início da cedência		Capacidade máxima		$E_{fmax} [\times 10^{-3}]$	MR
	$\delta_{cr} [mm]$	$F_{cr} [kN]$	$\delta_y [mm]$	$F_y [kN]$	$\delta_{max} [mm]$	$F_{max} [kN]$		
REF1	2.47	11.04	15.74	21.50	100.00	25.42	-	-
SL50x1.4_GA	2.25	23.84	18.86	48.35	34.39	56.02	10.29	ED
SL50x1.4_MA	2.25	22.07	17.80	44.32	69.84	61.76	11.97	ED
SL50x1.4_EBR	1.64	14.73	17.00	33.30	20.47	35.06	4.64	ED
SL50x1.2_MA	2.53	22.81	20.57	44.89	73.23	59.09	12.53	ED
REF2	2.49	11.12	15.96	22.90	100.00	26.90	-	-
SL80x1.2_GA	2.88	28.56	20.31	58.31	30.61	66.21	8.96	ED
SL80x1.2_MA	2.51	28.71	18.43	58.67	48.62	72.58	10.13	ED

Notas: δ = Deslocamento a meio vão; F = Força aplicada; CR = Início da fendilhação; Y = Início da cedência das armaduras longitudinais; MAX = Capacidade máxima; MR = Modo de rotura; ED = Destacamento do laminado de CFRP em relação ao substrato de betão.

3.2 Estado limite último

3.2.1 Modos de rotura

O modo de rotura de todas as lajes reforçadas foi por destacamento do laminado a partir de uma ou ambas as extremidades. A rotura iniciou-se numa das extremidades propagando-se para a zona central do laminado. Na zona de ancoragem das lajes MA e GA, verificou-se que a rotura surgiu no interface entre o adesivo epóxi e o laminado de CFRP. Na restante zona do laminado o destacamento foi repartido entre a interface entre epóxi/laminado de CFRP e rotura coesiva do betão. Finalmente, refere-se que na laje SL50x1.4_EBR a rotura ocorreu na interface entre o adesivo epóxi e o laminado de CFRP.

3.2.2 Comparação entre reforço ativo e reforço passivo

Tal como se antecipava, o desempenho das lajes pré-esforçadas foi superior ao da laje não pré-esforçada. Verificaram-se melhorias em vários aspetos tais como: o início da fendilhação e da cedência, rigidez e capacidade de carga total.

Embora a rigidez inicial tenha sido similar, sobretudo devido ao baixo valor de pré-esforço induzido no CFRP, o aparecimento das primeiras fendas aconteceu para cargas claramente superiores (cerca de 55% para as lajes com laminados de CFRP com $50 \times 1.4 \text{ mm}^2$). O mesmo pode ser observado no instante relativo ao início da cedência das armaduras longitudinais. Com o pré-esforço a capacidade de carga última das lajes também foi melhorada entre 60% e 107%, comparativamente com a laje EBR.

É importante salientar que com o pré-esforço, a possibilidade de explorar as capacidades mecânicas do CFRP é maior. Este facto foi possível constatar, pois a extensão máxima (ϵ_{fmax}) dos laminados de CFRP, nas lajes pré-esforçadas foi mais do dobro do observado na laje não pré-esforçada.

3.2.3 Comparação entre o sistema GA e sistema MA

Os sistemas de ancoragem GA e MA apresentaram um comportamento muito similar até ao início da cedência das armaduras longitudinais. A partir deste ponto, o CFRP é responsável por suportar as cargas adicionais, uma vez que a contribuição das armaduras de aço é reduzida devido ao facto de estarem em regime plástico. Por este motivo o incremento de força suportado pelo CFRP aumenta significativamente. No caso do sistema de ancoragem MA é possível observar duas “quedas” nas curvas carga (F) *versus* deslocamento (δ), logo após o início da cedência das armaduras (ver Figura 9). Estas variações bruscas estão relacionadas com o início do descolamento do CFRP, nas zonas próximas às chapas de ancoragem. A laje continua a suportar cargas devido à existência das chapas metálicas que evitam o descolamento precoce do laminado de CFRP, funcionando este, nesta fase, como um tirante. Por esta razão o desempenho do sistema de ancoragem MA mostrou ser superior em termos de capacidade de carga última (cerca de 10%) quando comparado com o sistema GA.

3.2.4 Influência da espessura dos laminados de CFRP

A análise da influência da espessura do laminado de CFRP teve por base a análise do desempenho das lajes S2600_L50 \times 1.4_MA e S2600_L50 \times 1.2_MA. Estas lajes apresentaram um comportamento muito similar durante o ensaio, motivado pelo facto de em ambas as lajes a rotura ter ocorrido devido ao destacamento do laminado, nas extremidades. De facto, julga-se que o fator que condiciona a rotura neste tipo de sistemas é a máxima tensão de corte admissível na zona da ancoragem. Tendo em conta que nas lajes S2600_L50 \times 1.4_MA e S2600_L50 \times 1.2_MA, o laminado de CFRP apresenta a mesma largura era expectável que a força suportada pelos laminados fosse aproximadamente a mesma. De salientar que os laminados CFRP encontram-se confinados pelas chapas de ancoragem, com um momento de aperto de $150 \text{ N}\times\text{m}$ aplicado em cada das seis ancoragens (ver Figura 2), que confere um confinamento de cerca de 24.9 MPa.

3.2.5 Influência da largura dos laminados de CFRP

No presente trabalho, a relevância da largura do laminado CFRP nos resultados foi avaliada por meio da comparação do desempenho entre as lajes S2600_L80×1.2_MA e S2600_L50×1.2_MA.

A laje reforçada com o laminado mais largo evidenciou um desempenho superior durante o ensaio monotónico. Contudo, o valor médio da tensão máxima de corte no laminado de CFRP na zona da ancoragem metálica foi igual 9.14 MPa e 7.40 MPa para as lajes S2600_L50×1.2_MA e S2600_L80×1.2_MA, respetivamente. Este resultado é indicador de que na zona da ancoragem metálica, a tensão de corte não é constante e que os laminados com larguras menores redundam num uso mais eficiente do laminado.

De referir também que foram utilizadas chapas metálicas com geometrias idênticas (270 mm × 200 mm) e que o momento de aperto aplicado nos parafusos também foi sempre o mesmo, i.e. 150 N×m. Contudo, dado que a geometria dos laminados é distinta, a pressão de confinamento é diferente (24.9 MPa nas lajes reforçadas com os laminados com 50 mm de largura e 15.6 MPa no caso das lajes reforçadas com os laminados com 80 mm de largura).

4. CONCLUSÕES

O trabalho experimental desenvolvido teve como principal objetivo a avaliação do desempenho, em termos de comportamento em estado limite de serviço e último, de dois métodos de ancoragem, para laminados de CFRP pré-esforçados, aplicados segundo a técnica EBR: o método da ancoragem mecânica (MA) e o método do gradiente (GA).

Através da campanha experimental realizada foi possível obter as seguintes principais conclusões: (i) em geral o reforço melhorou o desempenho das lajes em serviço, evidenciando menores deformações, menor espaçamento entre fendas, atraso no surgimento e redução da largura de fendas; (ii) ambos os sistemas de ancoragem (MA e GA) apresentaram respostas similares, embora o sistema MA tenha exibido um desempenho ligeiramente superior em termos de carga máxima; (iii) o modo de rotura de todas as lajes foi caracterizado pelo destacamento dos laminados CFRP a partir das extremidades; (iv) com o pré-esforço foi possível obter um melhor aproveitamento dos laminados de CFRP, atingindo valores de extensão superiores; (v) o desempenho dos laminados de CFRP com diferentes espessuras foi semelhante.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado pela FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competividade – COMPETE e fundos nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia sob o projeto FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012. Os autores gostariam também de agradecer todas as empresas que estão envolvidas e têm contribuído para o

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. O primeiro e segundo autor desejavam também agradecer as bolsas SFRH/BD/94850/2013 e SFRH/BD/98309/2013, respetivamente, atribuídas pela FCT.

REFERÊNCIAS

- [1] Barros, J.A.O., Dias, S.J.E., e Lima, J.L.T., *Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(3): p. 203-217.
- [2] Yang, D.-S., Park, S.-K., e Neale, K.W., *Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composites*. Composite Structures, 2009. **88**(4): p. 497-508.
- [3] You, Y.C., Choi, K.S., e Kim, J., *An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable anchorage system*. Composites Part B-Engineering, 2012. **43**(8): p. 3026-3036.
- [4] Mukherjee, A. e Rai, G.L., *Performance of reinforced concrete beams externally prestressed with fiber composites*. Construction and Building Materials, 2009. **23**(2): p. 822-828.
- [5] Sena-Cruz, J.M., Barros, J.A.O., Coelho, M.R.F., e Silva, L.F.F.T., *Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading*. Construction and Building Materials, 2012. **29**(0): p. 175-182.
- [6] Michels, J., Sena-Cruz, J., Czaderski, C., e Motavalli, M., *Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage*. Journal of Composites for Construction, 2013. **17**(5): p. 651-661.
- [7] El-Hacha, R., Green, M.F., e Wight, R.G., *Flexural behaviour of concrete beams strengthened with prestressed carbon fibre reinforced polymer sheets subjected to sustained loading and low temperature*. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004. **31**(2): p. 239-252.
- [8] Kotynia, R., Walendziak, R., Stoecklin, I., e Meier, U., *RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cyclic Loading*. Journal of Composites for Construction, 2011. **15**(2)(Special Issue in Honor of Professor Urs Meier): p. 168–180.
- [9] S&P, *Pre-stressed S&P Laminates CFK. Manual for applicators*. Technical Report HüM/03.04.2011, 2010: p. 20.
- [10] Fernandes, P., Granja, J., Sena-Cruz, J., Azenha, M., e Benedetti, A., *A new methodology for assisting quality control of NSM-CFRP systems since very early ages*, in *The 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering – CICE2014*. 2014: 20 a 22 de agosto, Vancouver, Canadá, 6 pp.