

Reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP pré-esforçados usando distintos métodos de ancoragem

Luis Correia¹, José Sena Cruz^{2, †}

*ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P - 4800-058 Guimarães, Portugal*

Julien Michels³

*Ueberlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf, Switzerland*

Paulo França⁴

*CERis, ICIST e CCCEE, Universidade da Madeira
Rua dos Ferreiros
P - 9000-082 Funchal, Portugal*

RESUMO

A utilização de laminados de CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymers) segundo a técnica EBR (Externally Bonded Reinforcement) tem vindo a constituir uma prática comum no reforço de estruturas de betão armado à flexão devido às inúmeras vantagens que os materiais compósitos apresentam. O uso de CFRP pré-esforçados acumula as vantagens da técnica EBR com as do pré-esforço externo. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal contribuir para o conhecimento de dois sistemas de ancoragem de laminados de CFRP pré-esforçados: (i) o sistema com recurso a ancoragens mecânicas e (ii) o sistema de ancoragem do gradiente da força. Para o efeito, foi realizado um programa experimental composto por doze lajes reforçadas à flexão com CFRP. Além do tipo de sistema de ancoragem, foram também estudados outros fatores que influenciam o sistema de reforço, tais como: sistema passivo vs. ativo, a largura (50 mm e 80 mm) e a 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).

O programa experimental é descrito em detalhe e os resultados obtidos são apresentados e analisados de forma detalhada.

¹ Aluno de Doutoramento

[†] Corresponding author (jsena@civil.uminho.pt)

² Professor Associado

³ Líder de Projetos

⁴ Professor Auxiliar

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais FRP (Fiber Reinforced Polymers) no reforço de estruturas de betão armado (BA) tem sido alvo de imensa investigação nas últimas décadas [1-7]. Atualmente, estes materiais e técnicas de reforço são relativamente bem conhecidas entre investigadores sendo que em estruturas de BA a técnica EBR (Externally Bonded Reinforced) e os materiais em CFRP (Carbon FRP) são os mais utilizados [4-7]. Habitualmente a técnica EBR é utilizada de forma a aumentar a resistência à flexão, através da colagem externa de um material de reforço sobre o elemento estrutural a reforçar. A utilização de pré-esforço nestes materiais combina as vantagens do pré-esforço externo com as vantagens da técnica EBR. Tendo por base a bibliografia existente, El-Hacha et al. [8] enumerou as seguintes principais vantagens: (i) a maior durabilidade devido a utilização exclusiva de materiais não corrosivos; (ii) a redução de deformações; (iii) a redução da largura de fendas existentes ou o atraso do início da fendilhação (no caso de estruturas não fissuradas); (iv) a redução da tensão e atraso do início da cedência das armaduras de aço; (v) a maior resistência à fadiga; (vi) o uso mais eficiente do betão e do material FRP; (vii) aumento da capacidade resistente da estrutura (flexão e corte); (viii) o facto de poder ser utilizado de forma a compensar perdas no pré-esforço interno.

Em grande medida, o sucesso da técnica de pré-esforço depende do sistema de ancoragem utilizado na fixação das extremidades do FRP. De facto, as elevadas tensões de corte existentes na interface de ligação entre o FRP e o betão são o principal problema associado às técnicas de pré-esforço [9]. Este problema é mitigado através da aplicação de sistemas de ancoragem adequados nas extremidades dos FRP pré-esforçados. Sugere-se a consulta da publicação Michels et al. [10] com intuito de se obter mais informações sobre sistemas de ancoragem.

No contexto do presente trabalho, foram estudados dois sistemas de ancoragens: o sistema de ancoragens mecânicas (MA – Mechanical Anchorage) e o sistema do gradiente da força (GA – Gradient Anchorage) [10]. De forma a avaliar o desempenho destes dois sistemas de ancoragem (MA e GA), desenvolveu-se um programa experimental composto por 12 lajes de betão armado. Além do sistema de ancoragem, foi também estudado o tipo de sistema de reforço (passivo e ativo), a geometria do laminado (espessura e largura) e a geometria das lajes (comprimento). As lajes de BA foram ensaiadas monotonicamente até rotura, sob controlo do deslocamento a meio vão, segundo uma configuração de quatro pontos de carga. Nas secções que se seguem, são descritos os procedimentos de ensaio e os resultados obtidos apresentados e detalhadamente analisados.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Descrição, provetes e configuração do ensaio

O programa de ensaios experimentais é composto por 12 lajes de betão armado, divididas em duas séries de acordo com a geometria das mesmas: (i) a série S2600 é composta por oito lajes com 2600 mm de comprimento, enquanto que (ii) a série S2200 é composta por quatro lajes de 2200 mm de comprimento. Três lajes foram utilizadas como protótipos de referência (S2600_REF1, S2600_REF2, e S2200_REF). Cada série contemplou uma laje reforçada com um laminado de CFRP, aplicado sem pré-esforço, segundo a técnica EBR (S2600_50×1.4_EBR e S2200_50×1.4_EBR). Nas restantes sete lajes utilizaram-se laminados de CFRP pré-esforçados aplicados segundo dois sistemas de ancoragem: (i) o sistema que

recorre a ancoragens mecânicas (MA) e (ii) o sistema que recorre ao gradiente da força (GA).

Conforme é apresentado na Tabela 1, às lajes foi atribuída uma designação genérica do tipo X_Y_Z, em que X corresponde à série da laje (S2600 ou S2200), Y é a geometria da secção transversal do laminado de CFRP em milímetros (50×1.4, 50×1.2 ou 80×1.2) e Z indica o tipo de ancoragem utilizado (MA ou GA). Nas lajes com reforço passivo Z é-lhe atribuída a sigla EBR.

A geometria das lajes e a configuração de ensaio adotados neste trabalho experimental encontram-se ilustrados na Figura 1. As lajes de betão armado da série S2600 têm 2600 mm de comprimento, enquanto que as da série S2200 têm 2200 mm. Em ambos os casos, a secção transversal (retangular) tem 600 mm de largura e 120 mm de espessura. De forma a resistir aos esforços de flexão, foram colocados 5 varões de aço nervurado com 8 mm de diâmetro junto à face inferior (5Ø8) e 3 varões de aço nervurado com 6 mm de diâmetro junto à face superior (3Ø6). Foi usada armadura transversal constituída por varões em aço com 6 mm de diâmetro, espaçados de 300 mm entre si (Ø6@0.30) com dupla função: (i) armadura de distribuição da armadura principal e (ii) armadura construtiva. Nas lajes reforçadas da série S2600 foram utilizados laminados de CFRP (50×1.4, 50×1.2 ou 80×1.2) com 2200 mm de comprimento, enquanto para os da série S2200 recorreu-se a laminados de CFRP (50×1.4) com 1800 mm de comprimento.

Todas as lajes foram ensaiadas monotonicamente até a rotura, sob controlo de deslocamento a meio vão, a uma velocidade de 1.2 mm/min num equipamento servo-controlado. Os testes foram realizados segundo uma configuração de quatro pontos de carga (ver Figura 1). Em termos de instrumentação, foi usada uma (i) célula de carga com capacidade de leitura máxima de 200 kN e linearidade de $\pm 0.05\%$ para medir a carga aplicada F; (ii) dois extensómetros da marca TML (BFLA-5-3) de forma a monitorizar a extensão a meio vão do laminado de CFRP e sobre o ponto de aplicação de carga; (iii) um extensómetro para avaliar a extensão a meio do vão da zona mais comprimida do betão da marca TML (PFL-30-11-3L); e (iv) cinco LVDTs (Linear Variable Differential Transducers) utilizados para a medição do deslocamento vertical ao longo do eixo longitudinal das lajes. Na Figura 1 é possível observar a posição destes LVDTs: 3 na zona de flexão pura (LVDT2, LVDT3 e LVDT4) com campo de medida de ± 75 mm e uma linearidade de $\pm 0.1\%$, e os restantes dois posicionados entre o ponto de aplicação da carga e os apoios da laje com campo de medida de ± 75 mm e linearidade de $\pm 0.1\%$.

A evolução da largura de fendas foi monitorizada durante o ensaio com recurso a um microscópio USB portátil (VEHO VMS-004D). Este possui uma resolução nativa de 640×480 pixels e capacidade de ampliação máxima de 400×. No presente trabalho foi utilizado um fator de ampliação de 20×.

2.2 Caracterização dos materiais

No âmbito do programa experimental, foi realizada a avaliação das propriedades mecânicas dos diversos materiais utilizados, nomeadamente, o betão, o aço, os laminados CFRP e o adesivo epóxi.

Por limitações quanto ao número de moldes disponíveis foram necessárias quatro betonagens para a produção das lajes. 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_c) e da resistência à compressão (f_c) do betão foi realizada em conformidade com as recomendações LNEC E397-1993:1993 [11] e NP EN 12390-3:2011 [12], respetivamente.

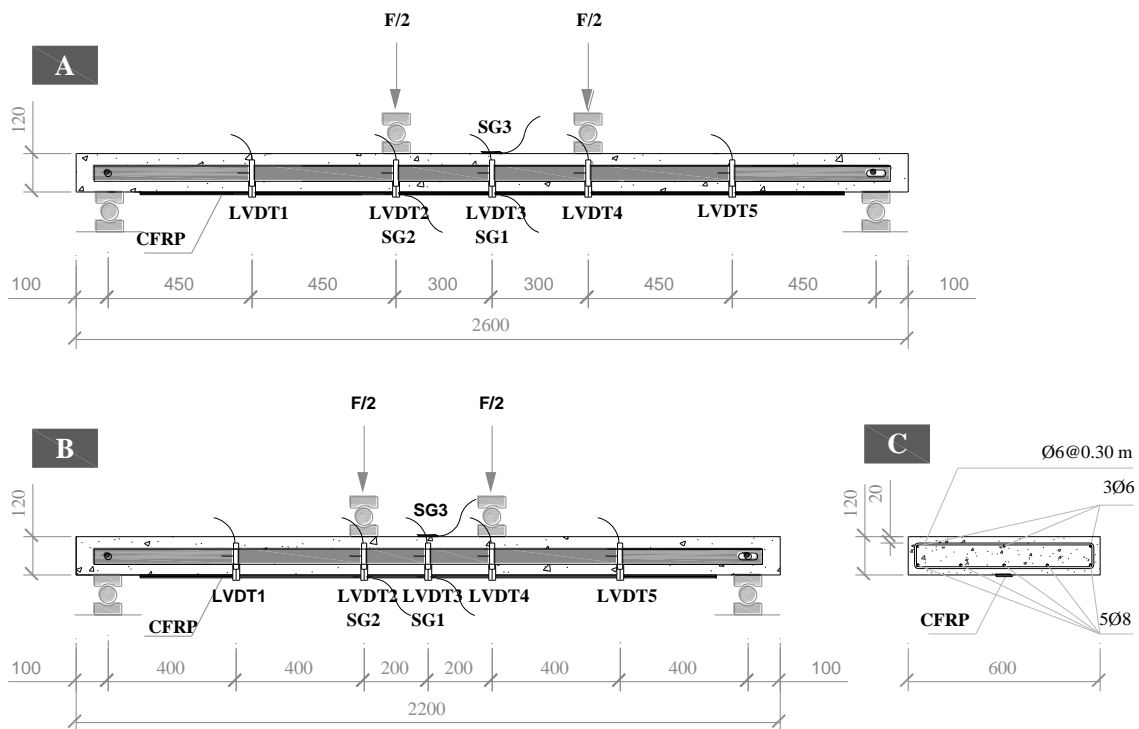


Figura 1 – Geometria e configuração do ensaio: (a) série S2600; (b) série S2200; (c) secção transversal das lajes.

Tabela 1 – Programa experimental.

| Série/Provete | 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: $\epsilon_{f,p}$ = Extensão (constante) registada ao longo do laminado de CFRP aquando da aplicação do pré-esforço; MA = Ancoragem mecânica (*Mechanical anchorage*); GA = Gradiente da Força (*Gradient method*).

Os ensaios de caracterização do betão realizaram-se cerca de 24 horas antes da data de realização dos ensaios das lajes. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 2. Em geral, observaram-se valores dos coeficientes de variação baixos em relação às propriedades analisadas, indiciando uma boa uniformidade das amostras. Em todas as betonagens obtiveram-se valores relativamente próximos, à exceção da B2, sendo que o valor médio da resistência à compressão do betão foi de 52.7 MPa.

As principais características mecânicas da armadura de aço, nomeadamente, o módulo de elasticidade (E_s), tensão de cedência (f_y) e tensão na rotura (f_t), foram avaliadas com recurso a ensaio de tração uniaxial segundo as recomendações da NP EN ISO 6892-1:2012 [13]. Para tal, três amostras com 500 mm de comprimento foram utilizadas para cada tipo de varão ($\varnothing 6$ e $\varnothing 8$). Destes ensaios, concluiu-se que a armadura de aço tem um módulo de elasticidade médio igual a 212 GPa (ver Tabela 2). Tendo por base os valores obtidos para atenuação de cedência, conclui-se que os varões $\varnothing 6$ e $\varnothing 8$ são da classe A500 NR e A400 NR, respetivamente, segundo a NP EN 1992-1-1:2010 [14].

Os laminados de CFRP utilizados neste trabalho experimental (CFK 150/2000) são produzidos pela S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda. Este laminado é composto por fibras de carbono unidirecionais solidarizadas numa matriz de vinilester, apresenta uma superfície lisa e é normalmente fornecido em rolos de 50 ou 100 metros. A caracterização mecânica dos laminados realizou-se com recurso a quatro amostras de cada tipo. Seguindo-se a ISO 527-5:1997 [15] determinou-se o módulo de elasticidade (E_f) e a tensão na rotura (f_f) das amostras de laminado. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 2. Destes, é possível concluir que: (i) o módulo de elasticidade varia entre 155 e 168 GPa, enquanto que a resistência na rotura foi sempre superior a 2450 MPa.

Tabela 2 – Caracterização dos materiais.

| 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 | $\varnothing 6$ | 209.5 (8.5%) | 579.3 (3.3%) | 669.7 (1.7%) |
| | $\varnothing 8$ | 212.8 (9.7%) | 501.4 (5.9%) | 593.9 (3.9%) |
| CFRP | | | | |
| Série | Geometria [mm²] | E_f [GPa] | f_f [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%) | |

Nota: Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação (CoV).

2.3 Aplicação do reforço

No âmbito do programa experimental, foi realizada a avaliação das propriedades mecânicas dos diversos materiais utilizados, nomeadamente, o betão, o aço, os laminados CFRP e o adesivo epóxi.

Conforme já referido, este programa experimental contempla a utilização de dois distintos sistemas de ancoragem: (i) o sistema que recorre a ancoragens mecânicas (MA) e (ii) o sistema que recorre ao gradiente da força (GA). Ambas as técnicas apresentam alguns procedimentos e equipamentos comuns. O sistema MA utiliza chapas de ancoragem metálicas com 270 mm × 200 mm × 20 mm fixadas por intermédio de 6 parafusos M16, guias metálicas, unidades de aperto, quadros metálicos, mangueiras, cilindros hidráulicos, e um macaco hidráulico, conforme se ilustra na Figura 2. Por sua vez, o sistema GA é composto por guias metálicas, unidades de aperto, quadros metálicos, mangueiras, cilindros hidráulicos, manómetros, válvulas, e dispositivos de aquecimento para que seja efetuada uma cura acelerada do adesivo epoxídico (ver Figura 2).

As etapas inerentes à aplicação do pré-esforço através dos sistemas MA e GA são ilustradas na Figura 3. O procedimento pode ser resumido da seguinte forma:

1. A primeira fase corresponde ao tratamento da superfície do elemento de betão a reforçar. Para tal recorre-se ao uso de um esmeril que é aplicado na zona onde o laminado será instalado. Esta etapa tem como objetivo remover a leitada de cimento, tipicamente existente nas superfícies das peças de betão armado, e melhorar a aderência entre o substrato e o adesivo epoxídico. No final desta etapa recorre-se a ar comprimido para limpar a superfície tratada (Figura 3-A);
2. Numa fase seguinte, são realizados furos com vista à instalação de ancoragens (varões roscados), algumas de caráter provisório e outras de caráter definitivo (Figura 3-B). As guias metálicas são fixadas aos varões roscados (Figura 3-C) e, de seguida, as unidades de aperto são instaladas entre as guias metálicas em cada extremidade da laje (Figura 3-D);
3. O adesivo epóxi é preparado de acordo com as recomendações do seu fabricante, enquanto o laminado é limpo através de um solvente apropriado. O adesivo epóxi é então 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 (Figura 3-E);
4. As unidades de aperto são fechadas (Figura 3-F). A partir desta fase, distintos procedimentos são usados para os sistemas de ancoragem: no sistema MA são instaladas as chapas metálicas (Figura 3-GI) enquanto no sistema GA são colocados os dispositivos de aquecimento (Figura 3-GII);
5. Os quadros metálicos são instalados e fixos por intermédio de ancoragens. Nestes dispositivos são posteriormente instalados os cilindros hidráulicos para a aplicação do pré-esforço. 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, passando a ter-se apenas uma ancoragem ativa. No caso do sistema GA, ambas as ancoragens terão de ser necessariamente ativas;
6. Com recurso a um macaco hidráulico é aplicado o pré-esforço.

Uma vez aplicado o pré-esforço, distintos procedimentos são usados nos diferentes sistemas. No sistema MA é aplicado um momento de aperto de 150 N×m em cada uma das seis ancoragens que fixam a chapa metálica. Esta medida tem como objetivo aumentar o confinamento do laminado nesta região. Posteriormente são colocados espaçadores metálicos entre a unidade de aperto e o quadro metálico de forma a evitar perdas de pré-esforço durante a cura do epóxi. O procedimento de reforço fica concluído nas seguintes 24 horas, visto que

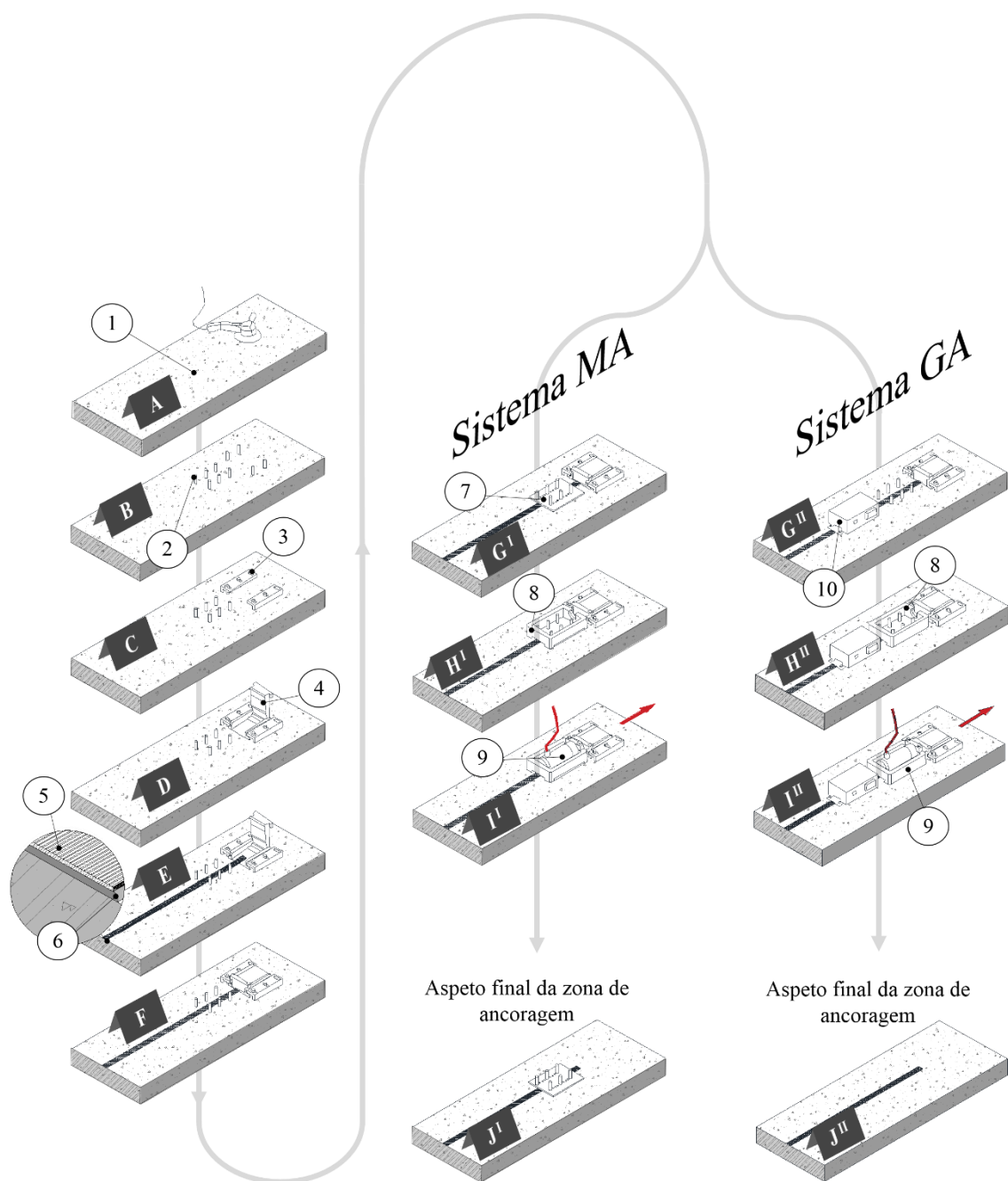
neste espaço temporal o adesivo apresenta um nível de cura próximo dos 90% [16]. É de salientar que, de acordo com o fabricante, são necessários três dias para se obter a cura total do epóxi. Numa fase final, o equipamento é retirado (espaçadores, unidades de aperto, quadro metálico e guias) e o excesso de laminado e as ancoragens metálicas temporárias são removidas.

O sistema GA serve-se da característica que o adesivo epoxídico tem de curar rapidamente a altas temperaturas. Neste caso de estudo, cada ancoragem era composta por três setores (setor 1, 2 e 3), cada um com comprimento igual a 200 mm e largura igual à do laminado (50 ou 80 mm). Deve ser salientado que durante o processo de reforço, todas as lajes foram monitorizadas em termos de força instalada pelos cilindros hidráulicos, e em termos de temperatura nos diferentes sectores que constituem os dispositivos de aquecimento. A título ilustrativo, apresenta-se a Figura 4, na qual é possível observar a evolução da temperatura no tempo, nos setores de aquecimento mobilizados: (i) inicialmente, a temperatura é elevada e mantida a 160 °C durante 15 minutos; (ii) depois é feita uma redução da temperatura de forma exponencial durante um período de 20 minutos; (iii) finalmente o aquecimento é interrompido, possibilitando que o adesivo epóxi arrefeça de modo a recuperar a temperatura ambiente. A força de pré-esforço é reduzida nos 15 minutos subsequentes ao início da fase de arrefecimento do epóxi. A redução da força de pré-esforço em cada sector da ancoragem foi igual a um terço da força de pré-esforço total aplicada.

A Figura 3-J apresenta o aspeto final das lajes MA e GA após a aplicação do reforço.



Figura 2 – Equipamentos utilizado nos sistemas de ancoragem: (a) manómetro e válvulas; (b) chapas de ancoragem; (c) macaco hidráulico; (d) cilindro hidráulico; (e) Dispositivo de aquecimento; (f) guias metálicas; (g) mangueiras hidráulicas; (h) quadro metálico; e (i) unidade de aperto.



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

Figura 3 – Procedimento de aplicação do sistema MA e do sistema GA.

Legenda:

Eixo horizontal: **Tempo [min]**

Eixo vertical (esquerda): **Temperatura [°C]**

Eixo vertical (direita): **Força aplicada [kN]**

— Setor S1 — Setor S3
— Setor S2 — Força no cilindro hidráulico

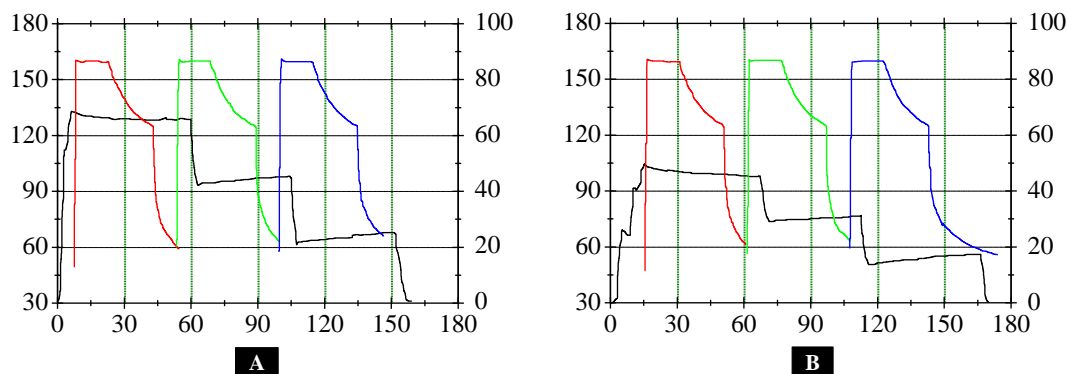


Figura 4 – Evolução da temperatura e da força instalada no laminado de CFRP para o caso do método do gradiente (GA): (a) S2600_80×1.2_GA e (b) S2600_50×1.4_GA.

3. RESULTADOS

3.1 Comportamento em serviço

Deslocamentos

A relação entre a força aplicada e o deslocamento vertical a meio vão encontra-se representada na Figura 5 para as lajes ensaiadas. São também apresentados na Tabela 3 os principais resultados obtidos. Os resultados comprovam que o reforço aumentou a rigidez e a capacidade última das lajes.

Tal como seria de esperar, a aplicação do reforço em CFRP (incluindo o pré-esforço) não afetou significativamente a rigidez elástica das lajes (K_I), devido à baixa percentagem de reforço utilizada. No entanto, verificou-se que o início da fendilhação (δ_{cr} , F_{cr}) e da cedência da armadura longitudinal (δ_y , F_y) ocorreu para níveis superiores carga. Estes foram mais significativos para o caso das lajes com laminados pré-esforçados. Através dos resultados, pode observar-se que, na serie S2600, a rigidez em fase fendilhada (K_{II}) é superior em laminados com maior secção transversal: existe um aumento médio de 39%, 84% e 106% para as lajes com CFRP pré-esforçado de 50×1.2 mm², 50×1.4 mm² e 80×1.2 mm², respetivamente. Na serie S2200, ambas as lajes pré-esforçadas apresentam um aumento médio da rigidez K_{II} de 61% quando comparadas com a laje S2200_REF.

Finalmente é também de referir que para cargas de serviço, verifica-se um comportamento muito similar em ambos os sistemas de ancoragem, i.e., até ao início da cedência das armaduras.

Tabela 3 – Resultados principais.

| Laje | Rigidez | | Fendilhação | | Cedência | | | Capacidade máxima | | | | Parâmetros de ductilidade e eficiência | | | Modo de Rotura |
|--------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|---|------------------------|--------------------------|--------------------------|---|--|--|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
| | K _I [kN/mm] | K _{II} [kN/mm] | δ _{cr} [mm] | F _{cr} [kN] | δ _y [mm] | φ _y [10 ⁻³ m ⁻¹] | F _y [kN] | δ _{max} [mm] | F _{max} [kN] | φ _{max} [10 ⁻³ m ⁻¹] | ε _{fmax} [10 ⁻³] | Parâmetros de ductilidade e eficiência | | | |
| | | | | | | | | | | | | F _{max} /F _y | δ _{max} /δ _y | φ _{max} /φ _y | |
| Série S2600 | | | | | | | | | | | | | | | |
| S2600_REF1 | 4.47 | 0.79 | 2.47 | 11.04 | 15.74 | - | 21.50 | 100.02 ^(a) | 25.42 ^(b) | - | - | - | - | - | - |
| S2600_50x1.4_EBR | 8.98 | 1.21 | 1.64 | 14.73 | 17.00 | 31.59 | 33.30 | 20.47 | 35.06 | 36.42 | 4.64 | 1.05 | 1.20 | 1.15 | D |
| S2600_50x1.4_MA | 9.81 | 1.43 | 2.25 | 22.07 | 17.80 | 36.66 | 44.32 | 69.84 | 61.76 | 86.81 | 11.97 | 1.39 | 3.92 | 2.37 | D |
| S2600_50x1.4_GA | 10.60 | 1.48 | 2.25 | 23.84 | 18.86 | 41.48 | 48.35 | 34.39 | 56.02 | 65.20 | 10.29 | 1.16 | 1.82 | 1.57 | D |
| S2600_REF2 | 4.47 | 0.87 | 2.49 | 11.12 | 15.96 | - | 22.90 | 100.00 ^(a) | 26.94 ^(b) | - | - | - | - | - | - |
| S2600_50x1.2_MA | 9.02 | 1.22 | 2.53 | 22.81 | 20.57 | 45.64 | 44.89 | 73.23 | 59.09 | 91.15 | 12.53 | 1.32 | 3.56 | 2.00 | D |
| S2600_80x1.2_MA | 11.44 | 1.88 | 2.51 | 28.71 | 18.43 | 39.40 | 58.67 | 48.62 | 72.58 | 70.03 | 10.13 | 1.24 | 2.64 | 1.78 | D |
| S2600_80x1.2_GA | 9.92 | 1.71 | 2.88 | 28.56 | 20.31 | 37.31 | 58.31 | 30.61 | 66.21 | 53.02 | 8.96 | 1.14 | 1.51 | 1.42 | 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 | 34.82 | 39.59 | 16.55 | 43.26 | 46.10 | 4.44 | 1.09 | 1.33 | 1.32 | D |
| S2200_50x1.4_MA | 18.31 | 2.31 | 1.50 | 27.47 | 13.07 | 37.69 | 54.22 | 48.55 | 75.27 | 87.82 | 13.39 | 1.39 | 3.71 | 2.33 | D |
| S2200_50x1.4_GA | 16.13 | 2.35 | 1.58 | 25.49 | 13.56 | 37.86 | 53.64 | 21.18 | 61.04 | 55.72 | 9.56 | 1.13 | 1.56 | 1.47 | D |

Nota: K= rigidez; δ=deslocamento a meio vão; F=força aplicada; ε_{fmax}=extensão registada ao longo do laminado para a carga máxima (F_{max}); φ_{max}=curvatura para F_{max}; D=descolamento

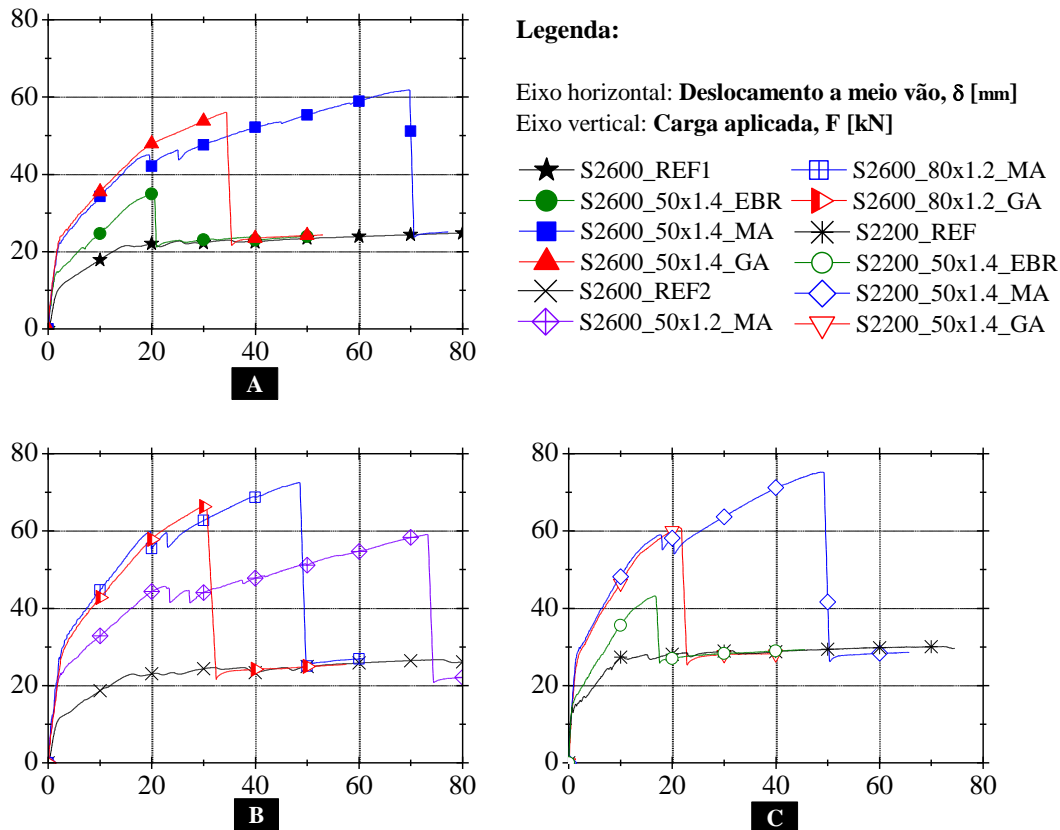


Figura 5 – Força total *versus* deslocamento a meio vão: (a) série S2600 (betonagem B1); (b) série S2600 (betonagens B2 e B3); e (c) série S2200 (betonagem B4).

Largura de fendas

Tal como referido anteriormente, a largura das fendas foi monitorizada através de microscópio USB portátil com um fator de amplificação de 20×. Foram seleccionadas três fendas na zona de flexão pura para cada laje ensaiada: duas perto do ponto de aplicação da carga e uma a meio vão. Para cada fotografia tirada com o microscópio, foram efetuadas três medições de forma a obter a largura média da fenda para esse instante de carga. Na Figura 6, é apresentada a evolução da largura média de fendas em função da força.

Como seria expectável, observou-se menores larguras de fendas nas lajes reforçadas com laminado de CFRP, em comparação com as lajes não reforçadas. Os sistemas MA e GA apresentam resultados semelhantes que podem ser antecipados pelas suas curvas de força-deslocamento (Figura 5) que são idênticas até à cedência da armadura. Finalmente será também de referir que, tal como expectável, a largura de fendas evoluiu linearmente com a carga aplicada (até à cedência das armaduras).

Padrão de fendilhação

No final de cada ensaio foi feita uma análise ao padrão de fendilhação e espaçamento entre fendas. Na Figura 7 é apresentado o padrão de fendilhação na face inferior de cada laje, enquanto que na Figura 8 são representados graficamente os valores médios do espaçamento entre fendas.

De forma geral, os resultados demonstram uma redução na distância média entre fendas devido ao reforço aplicado. Este efeito é mais evidente nas lajes pré-esforçadas: na série S2600 a diminuição da distância média entre fendas nas cinco lajes pré-esforçadas foi de 21% em relação ao valor medido em ambas as lajes de referência; e, na série S2200,

observou-se uma redução do espaçamento médio entre fendas nas lajes pré-esforçadas de 14%. Tal facto seria expetável, visto que com a aplicação do reforço, na zona tracionada da laje de betão armado existe maior capacidade para a retenção de tensões de tração.

Através do padrão de fendilhação ilustrado na Figura 7 é possível verificar que o número total de fendas na zona de flexão pura é maior nas lajes reforçadas, tornando-se ainda mais evidente nas lajes pré-esforçadas. Esta constatação é válida tanto para a série S2600 como para a série S2200.

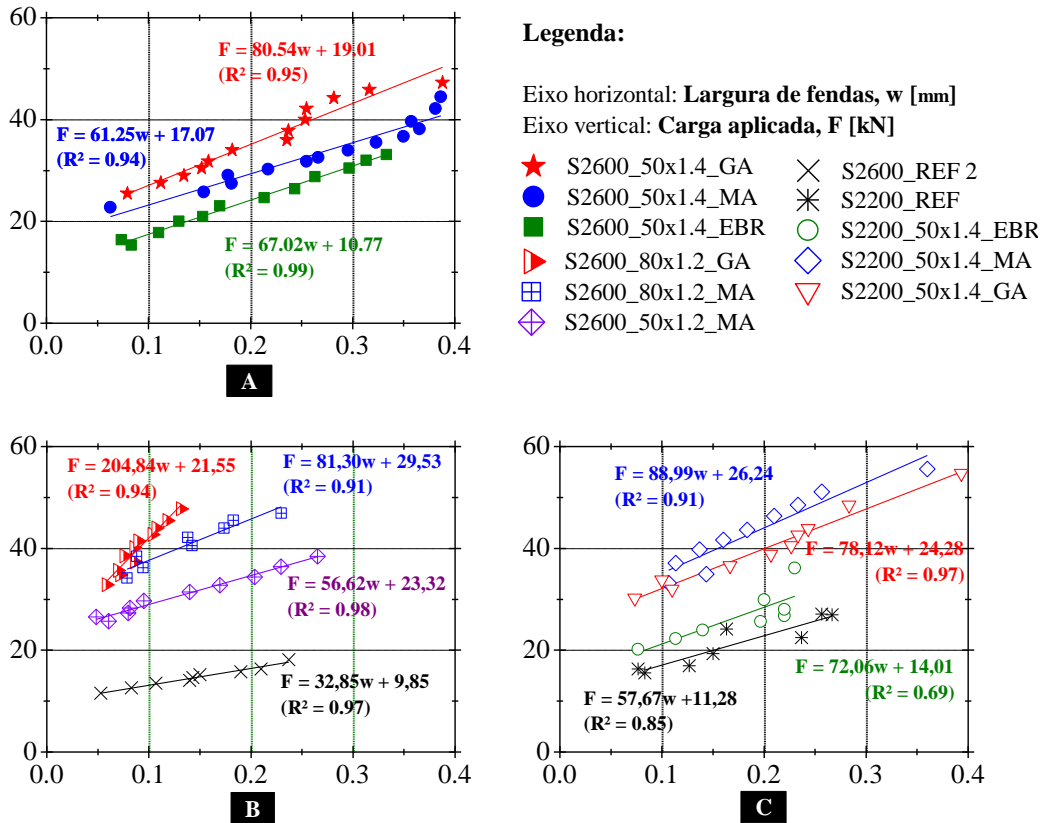


Figura 6 – Carga aplicada *versus* abertura de fendas: (a) Série S2600; (b) Série S2600; e (c) Série S2200.

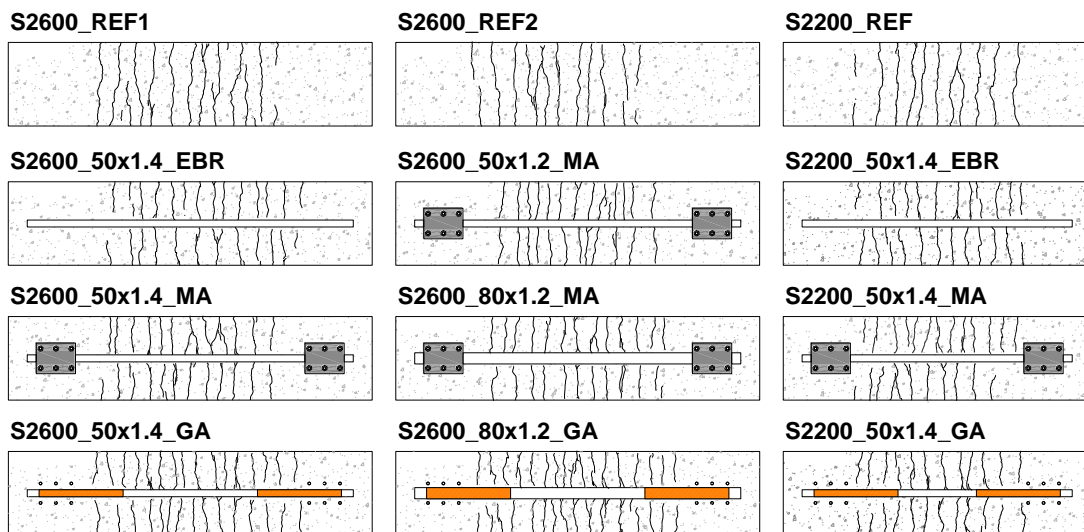


Figura 7 – Padrão de fendilhação.

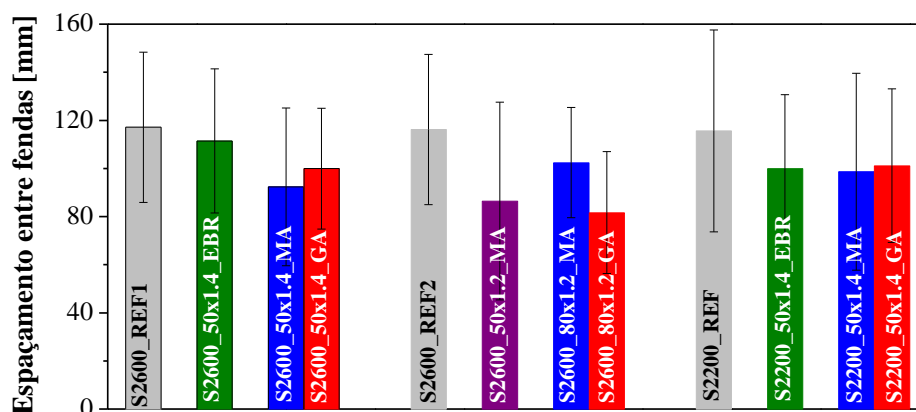


Figura 8 – Espaçamento entre fendas.

Influência do pré-esforço

Conforme já foi antecipado nos parágrafos anteriores, o comportamento das lajes pré-esforçadas foi consideravelmente mais satisfatória em termos de ductilidade e capacidade de carga, quando comparado com as lajes de referência. De uma forma geral, o pré-esforço contribuiu para um início de fendilhação e cedência da armadura longitudinal mais tardio e para o aumento da rigidez em fase II (laje fissurada).

Embora a rigidez durante a fase elástica (K_I) fosse semelhante nas lajes reforçadas (com e sem o pré-esforço), devido, sobretudo, ao baixo valor de pré-esforço induzido no CFRP, observa-se um valor significativamente maior para a carga de fendilhação nas lajes pré-esforçadas: na série S2600, este valor aumentou cerca de 55% nas lajes com laminado pré-esforçado de $50 \times 1.4 \text{ mm}^2$, enquanto na série S2200 o aumento foi de 73%.

3.2 Comportamento à rotura

Modos de rotura

Todas as lajes reforçadas apresentaram modos de rotura idênticos: destacamento do laminado a partir de uma ou 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 quer para o sistema MA, quer para o GA (ver Figura 10-A). A restante zona do laminado parece ter sofrido simultaneamente rotura entre a interface laminado/epóxi e rotura coesiva do betão (ver Figura 10-B). Finalmente, refere-se que em oposição às restantes lajes, na S2600_50x1.4_EBR a rotura ocorreu na interface entre o adesivo epoxídico e betão, conforme exposto na Figura 10-C.

Comparação entre os Sistemas de ancoragens: MA versus GA

Ambos os sistemas de ancoragem apresentaram comportamento semelhante até à cedência da armadura metálica (ver Figura 5). A partir da cedência das armaduras a força aplicada à laje é suportada essencialmente pelo laminado pois a contribuição da armadura de aço é reduzida devido ao facto de estarem em regime plástico (e possuírem um patamar de endurecimento diminuto). Este facto é facilmente constatado através das extensões medidas nos laminados de CFRP ao longo do ensaio de cada laje (ver Figura 9).

O método de MA apresenta duas “quedas” nas curvas força versus deslocamento a meio vão, após a cedência das armaduras. Este comportamento está relacionado com o início do descolamento do laminado que ocorre entre as chapas de ancoragem. Contudo, estas chapas metálicas do sistema MA preveniram a rotura prematura do sistema de reforço e

permitiram que a laje pudesse continuar a suportar incrementos crescentes de carga.

Os resultados indicam um melhor comportamento na rotura do sistema MA, quando comparado com o GA, materializado através de: (i) uma capacidade resistente última superior em 10% e 23% na série S2600 e S2200, respetivamente; e (ii) um maior uso efetivo do laminado (13% a 16% na serie S2600 e 40% na série S2200). De salientar que o descolamento do CFRP nas lajes MA ocorreu sempre antes da rotura das lajes GA; todavia, as ancoragens mecânicas permitiram que a laje continuasse a suportar os crescentes incrementos de carga.

Influência da largura do laminado

A influência da largura do laminado foi avaliada através da resposta das lajes S2600_50×1.2_MA e S2600_80×1.2_MA. A laje com o maior laminado evidenciou um desempenho superior durante o ensaio: (i) o início da fendilhação e cedência das armaduras ocorreu para níveis de carga superiores, (ii) a maior rigidez e (iii) o aumento da capacidade última de carga de cerca de 23%. Não obstante, verifica-se que na rotura a tensão de corte na chapa ancoragem foi igual a 9.14 MPa e 7.40 MPa para os laminados de 50×1.2 mm² e 80×1.2 mm², respetivamente. Este resultado evidencia que a tensão de corte nas ancoragens metálicas não é constante e que, laminados com larguras menores são utilizados com maior eficiência. Refira-se que o método MA utiliza chapas metálicas com geometria fixa (270 mm × 200 mm) e, neste caso de estudo, foi aplicado nos seis parafusos o mesmo momento de aperto (150 N×m). Contudo como a geometria dos laminados é distinta, a pressão de confinamento aplicada é diferente (S2600_50×1.2_MA – 20.83 MPa e S2600_80×1.2_MA – 13.02 MPa).

Influência da espessura do laminado

As lajes S2600_50×1.2_MA e S2600_50×1.4_MA são nesta secção comparadas de forma a poder avaliar a influência da espessura do laminado. Conforme é ilustrado na Figura 5 (A e B), ambas as lajes têm um comportamento semelhante. Esta correspondência deve-se ao facto de em ambas os ensaios, a rotura se ter dado por destacamento do laminado na extremidade. Este tipo de rotura está inteiramente dependente da capacidade máxima resistente ao esforço de corte na zona de ancoragem e, como consequência, da área de contacto entre a laminado e a chapa de ancoragem. Tal foi referido anteriormente, as chapas de ancoragens foram confinadas de forma idêntica através de um momento de aperto de 150 N×m. Este confinamento pode ter diminuído a influência da espessura do laminado na capacidade resistente última do sistema compósito da laje.

Influência da geometria da laje

No presente programa experimental foram usadas duas geometrias e configurações de ensaio distintas (series S2600 e S2200), conforme ilustrado na Figura 1, conduzindo a valores distintos de vão de corte, região de flexão pura e de distância entre o final ancoragem e ponto de aplicação de força (100 mm maior na série S2600).

Conforme era esperado, as lajes com menor comprimento apresentam maior rigidez em fase não fendilhada (K_I) assim como em fase fendilhada (K_{II}). Na série S2200, devido à sua geometria, a iniciação da fendilhação e cedência das armaduras deu-se primeiro em níveis de carga superiores aos registados na série S2600. Não obstante, os parâmetros de ductilidade e eficiência apresentados Tabela 3 serem semelhantes nas lajes de ambas as séries.

Na comparação entre provetes da mesma série observaram-se tendências análogas em ambas as geometrias (descritas nas subsecções anteriores). No entanto, verifica-se que o contributo do reforço na laje S2200_50×1.4_GA é ligeiramente inferior ao verificado nas lajes GA da série S2600. O sistema GA utiliza ancoragens com comprimento constante e igual a

600 mm. Este comprimento acaba por ter uma influência no comportamento da laje. Esta influência é mais preponderante na série S2200: a capacidade última (F_{max}) da laje S2200_50x1.4_GA é 19% inferior à S2200_50x1.4_MA; enquanto na série S2600 as lajes reforçadas segundo o sistema GA (S2600_50x1.4_GA e S2600_80x1.2_GA) apresentaram F_{max} cerca de 9% inferior às lajes pré-esforçadas segundo o sistema MA (S2600_50x1.4_MA e S2600_80x1.2_MA).

Influência do pré-esforço

Os resultados demonstram que, após a fendilhação, a capacidade de carga das lajes pré-esforçadas é melhorado. Na série S2600, observaram-se aumentos na capacidade resistente última das lajes pré-esforçadas de 60% a 107% quando comparada à laje S2600_50x1.4_EBR. Por outro lado, o aumento na resistência devido ao pré-esforço na série S2200 foi de 74% e 41% para as lajes reforçadas pelo sistema MA e GA, respetivamente.

Na Figura 9 é apresentada a evolução da extensão a meio vão do CFRP em função da força total aplicada. Como era expectável, as lajes pré-esforçadas apresentaram extensões superiores na rotura. Desta forma, pode-se afirmar que o pré-esforço não só melhorou o comportamento das lajes (maior rigidez e resistência) como garantiu o uso mais eficiente dos materiais. Pela análise da Figura 9, pode-se também verificar que uma maior percentagem da capacidade do laminado foi utilizada nas lajes pré-esforçadas: na série S2600, a rotura das lajes pré-esforçadas deu-se quando o laminado possuía uma extensão próxima da capacidade máxima (entre 60% e 75%) enquanto na laje simplesmente reforçada com o laminado 50x1.4 mm² a rotura ocorreu quando o mesmo possuía extensão de 4.64×10^{-3} (30% da capacidade do laminado). Uma observação análoga poderá ser feita na série S2200. Na rotura das lajes pré-esforçadas, a extensão no CFRP variou entre 13.39×10^{-3} e 9.56×10^{-3} (84% e 64%) enquanto a S2200_50x1.4_EBR apresentou uma rotura cuja utilização do laminado foi igual a 28%.

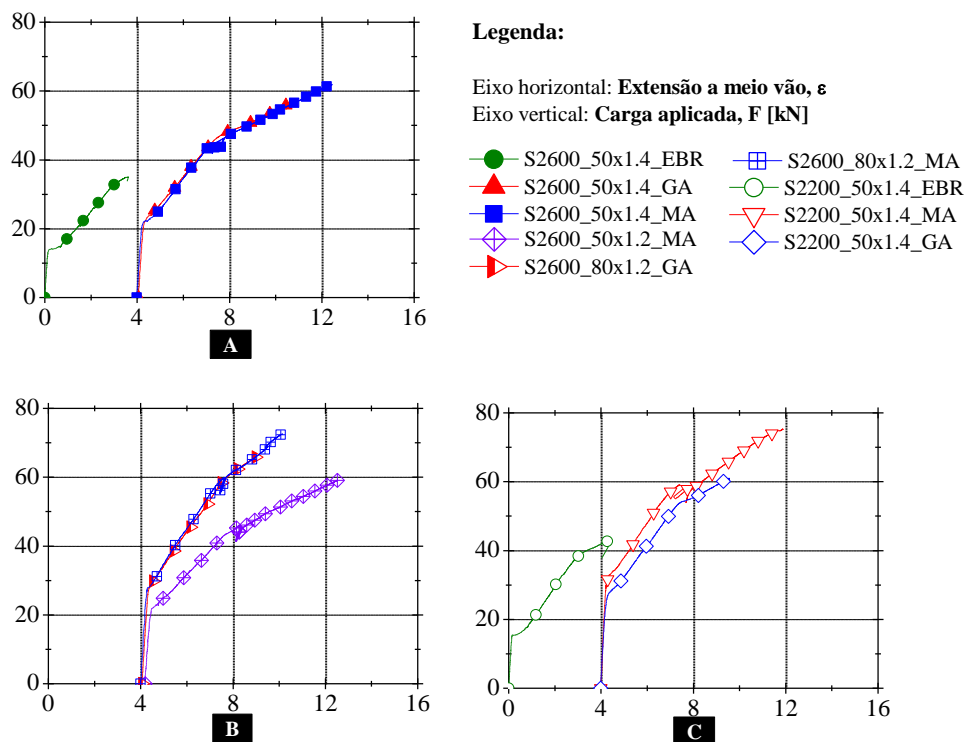


Figura 9 – Força *versus* extensão no laminado de CFRP: (a) Série S2600; (b) série S2600; e (c) série S2200.

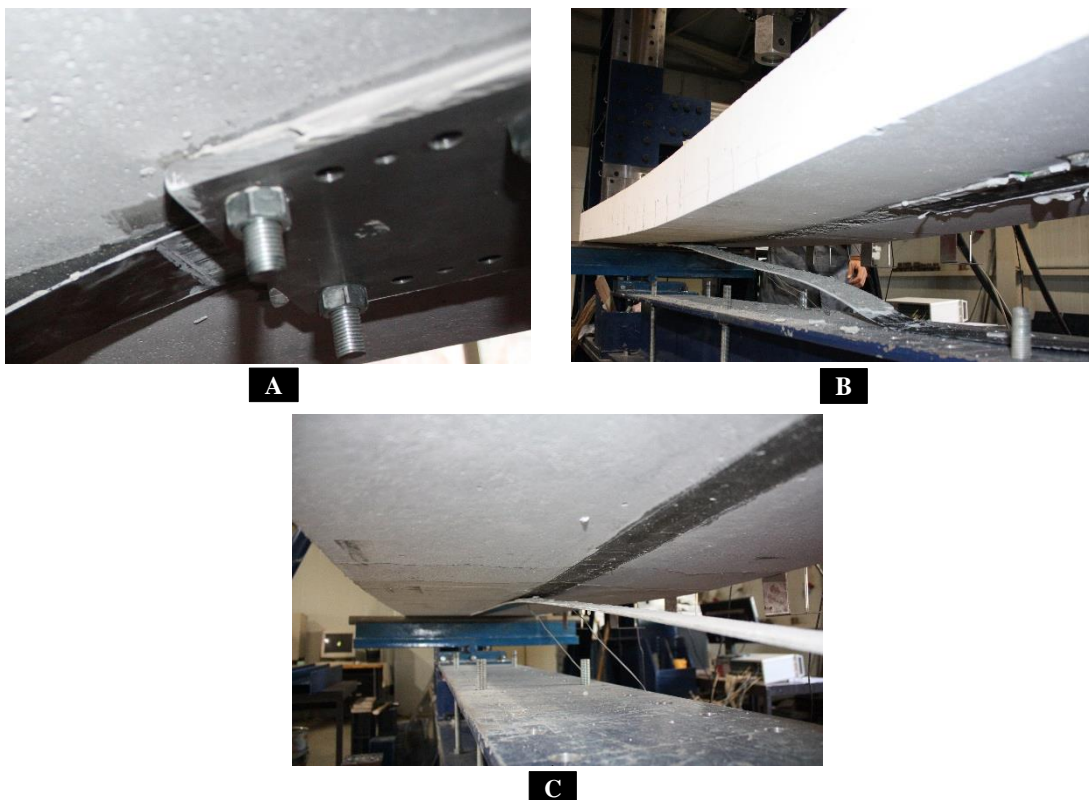


Figura 10 – Modos de rotura típicos: rotura entre a interface adesivo/CFRP para a laje (a) S2600_50×1.4_MA e (b) S2600_80×1.2_GA; e (c) rotura entre a interface epóxi/betão (laje S2600_50×1.4_EBR).

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho detalhou um programa experimental que teve como principal objetivo a avaliação do comportamento em serviço e na rotura de dois sistemas de ancoragem: o sistema que recorre a ancoragens mecânicas (MA – Mechanical Anchorage) e o sistema do gradiente da força (GA – Gradient Anchorage). Através deste programa experimental, foi possível obter as seguintes principais conclusões:

- (i) Em serviço, o reforço (passivo e ativo) melhorou o comportamento das lajes através da redução de deformações, retardação da abertura de fendas e diminuição do espaçamento entre fendas;
- (ii) Ambos os sistemas de ancoragem apresentaram comportamentos semelhantes até à cedência das armaduras longitudinais. Contudo, as chapas de ancoragem do sistema MA preveniram a ocorrência de uma rotura prematura, conduzindo a deformações e de capacidades de carga mais elevadas;
- (iii) Todas as lajes tiveram uma rotura pelo destacamento do laminado. A rotura deu-se numa das extremidades da laje e depois propagou-se em direção ao meio da laje;
- (iv) 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;

- (v) O desempenho dos laminados de CFRP com diferentes espessuras foi semelhante. No entanto, a largura do laminado provou ser um fator influente no comportamento da laje tanto em serviço como na rotura;
- (vi) As lajes da série S2200 apresentaram maior rigidez quando comparadas às da série S2600. Não obstante, verifica-se que as lajes de ambas as series possuem parâmetros de ductilidade e eficiência semelhantes.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado pelo 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 a 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 autor deseja também agradecer a bolsa SFRH/BD/98309/2013, atribuída pela FCT.

Este trabalho é dedicado a Tiago Teixeira (1988-2015), antigo aluno de doutoramento da Unidade de Investigação ISISE e membro do projeto FRPreDur.

6. 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", *Composites for Construction*, vol. 6, pp. 73-87, 2002.
- [2] E. Nigro, G. Cefarelli, A. Bilotta, G. Manfredi, and E. Cosenza, "Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part II: Experimental results and numerical simulations on the thermal field", *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, pp. 1751-1763, 2011.
- [3] FIB, "FRP reinforcement in RC structures", in *fib Bulletin 14*, vol. 40, Switzerland, 2007.
- [4] CNR, "Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures", in *CNR_DT200_2004*, Rome, 2004.
- [5] ACI, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", in *ACI 440.2R-02*, 2002.
- [6] H305 "Design handbook for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs", *Standards Australia GPO Box 476, Sydney*, 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", *Composites for Construction*, vol. 17, pp. 651-661, 2013.

- [11] LNEC, 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, Caparica, 2011.
- [13] NE 6892-1, "Metallic Materials. Tensile Testing. Part 1: Method of test at room temperature," IPQ - Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2012.
- [14] NE 1992-1-1, "Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for bulding", IPQ - Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2010.
- [15] ISO 527-5:1997, "Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites", Switzerland, 1997.
- [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, 2015.