

Efeito de distintas condições ambientes na durabilidade de lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados



L. Correia¹ J. Sena-Cruz² P. França³ J. Michels⁴ E. Pereira⁵ G. Escusa⁶

Resumo

No contexto da reabilitação de estruturas de betão armado (BA) com materiais FRP (*Fiber Reinforced Polimers*), a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) é habitualmente utilizada para aumentar a resistência à flexão. A utilização de pré-esforço em sistemas EBR-FRP combina os benefícios da técnica EBR com as vantagens associadas ao pré-esforço externo.

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o aumento do conhecimento na durabilidade de lajes de BA reforçadas com laminados de CFRP (*Carbon FRP*) pré-esforçados segundo a técnica EBR, de modo a colmatar algumas lacunas relevantes que existem sobre este assunto. Neste contexto, dois sistemas de ancoragem foram estudados: (i) a ancoragem mecânica (MA – *Mechanical Anchorage*) e (ii) o método do gradiente da força (GA – *Gradiente Anchorage*). Foi estudado o efeito das seguintes condições ambientais na resposta estrutural das lajes: (i) imersão em água; (ii) imersão em água com cloretos; (iii) ciclos de molhagem/secagem em água; para além destas condições ambientais foram ainda utilizadas lajes de referência (iv). O programa experimental de ensaios de envelhecimento acelerado incluiu 16 lajes, nas quais, metade para além da condição ambiental foi também submetida a uma carga gravítica (cerca de 1/3 da capacidade máxima) durante um período de oito meses. No final da aplicação das distintas condições ambientais, as lajes foram ensaiadas monotonicamente até à rotura segundo uma configuração de ensaio de quatro pontos de carga. Este artigo faz uma descrição geral do programa experimental realizado e apresenta uma análise dos correspondentes resultados.

Palavras-chave: CFRP, EBR, Pré-esforço, Durabilidade

1. INTRODUÇÃO

¹ ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Univ. do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal; e-mail: lcorreia@civil.uminho.pt

² ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Univ. do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal; e-mail: jsena@civil.uminho.pt

³ CERis, ICIST e CCCEE, Universidade da Madeira, Colégio dos Jesuítas, Portugal; e-mail: pfranca@uma.pt

⁴ Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, Switzerland; email: Julien.Michels@empa.ch

⁵ ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Univ. do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal; e-mail: eduardo.pereira.@civil.uminho.pt

⁶ ISISE, Dept. de Engenharia Civil, Univ. do Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal; e-mail: lcorreia@civil.uminho.pt

O reforço de estruturas de betão armado (BA) com materiais compósitos FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) segundo a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) tem sido alvo de muita investigação nos últimos anos [1]. A utilização de pré-esforço em sistemas EBR-FRP permite combinar os benefícios da técnica EBR com as vantagens associadas à utilização do pré-esforço externo, nomeadamente [2, 3]: (i) a redução das deformações e da largura de fendas; (ii) o atraso no aparecimento de fendas e na cedência das armaduras; (iii) o maior aproveitamento da capacidade última do betão e do FRP; (iv) a redução do risco de descolagem prematura do FRP; (v) o aumento da capacidade resistente da estrutura (em termos de flexão e esforço transversal).

Um importante fator que contribui para o bom funcionamento do sistema de pré-esforço é o tipo de ancoragem utilizado. De facto, o elevado nível de tensões de corte desenvolvidas na interface betão/laminado junto às suas extremidades, é o principal problema associado ao uso de pré-esforço externo [4]. Contudo, este problema pode ser mitigado com o uso de sistemas de ancoragem. Dos vários sistemas propostos, destacam-se os seguintes: (i) o sistema de ancoragem mecânica (MA – *Mechanical Anchorage*), que fixa as extremidades do laminado ao betão por intermédio de ancoragens metálicas; e (ii) o sistema do método do gradiente da força (GA – *Gradient Anchorage*), que utiliza a capacidade do epóxi curar mais rapidamente a elevadas temperaturas para criar uma ancoragem não metálica.

Nos últimos anos tem vindo a ser desenvolvida investigação específica no que respeita à técnica EBR com recurso a FRP pré-esforçados. Esta investigação têm incidido, fundamentalmente, na resposta estrutural deste tipo de sistemas quando usados no reforço à flexão, esforço transversal e punçoamento de elementos lineares e laminares, bem como no confinamento de pilares. Os estudos de durabilidade destes sistemas são praticamente inexistentes [5].

No presente trabalho, a durabilidade de lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados segundo a técnica EBR é estudada para diferentes condições ambientais e de carregamento ao longo do tempo. O programa experimental inclui vinte lajes, das quais dezasseis foram submetidas a quatro condições ambientais distintas e a uma carga gravítica por um período de oito meses. No final destas ações, todas as lajes foram ensaiadas até à rotura segundo uma configuração de ensaio de quatro pontos de carga. Os resultados obtidos permitiram tirar várias conclusões relacionadas com a durabilidade e comportamento geral de ambos os sistemas de ancoragem, que detalham nas secções subsequentes.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Provetes e configuração de ensaio

O programa experimental é composto por vinte lajes de betão armado com as características referidas no Quadro 1: (i) uma laje de referência (REF_T0); (ii) uma laje reforçada com um laminado de CFRP segundo a técnica EBR (EBR_REF_T0); e (iii) dezoito lajes reforçadas com um laminado de CFRP pré-esforçado segundo a técnica EBR, (iii.a) nove com ancoragens mecânicas (MA) e (iii.b) nove com ancoragem do gradiente da força (GA). Dezasseis lajes pré-esforçadas foram expostas a quatro ambientes distintos (ver Quadro 1) durante um período de oito meses, das quais oito foram simultaneamente submetidas a um carregamento gravítico de 20 kN (aproximadamente 1/3 da carga máxima da laje). As lajes foram designadas segundo um nome genérico X_Y_Z, onde X é o tipo de ancoragem (MA ou GA), Y é o ambiente a que a laje foi submetida (REF para ambiente de laboratório, TW para imersão em água, CW para imersão em água com 3.5% de cloretos e WD para ciclos de molhagem e secagem) e Z o estado de fendilhação (U para não fendilhado, C para fendilhado).

A geometria das lajes e configuração de ensaio encontram-se ilustrados na Figura 1. As lajes apresentam uma secção transversal com 600 mm de largura por 120 mm de espessura e um comprimento total igual a 2600 mm. A armadura longitudinal é composta por 5 varões de aço com 8 mm de diâmetro (5Ø8), dispostos junto à face inferior e 3Ø6 junto à face superior. A armadura transversal é composta por

estribos de aço com 6 mm de diâmetro espaçados a 300 mm. Todas as lajes reforçadas utilizam um laminado de CFRP (secção transversal igual a $50 \times 1.2 \text{ mm}^2$) com 2200 mm de comprimento.

Os ensaios monotónicos foram realizados segundo uma configuração de ensaio de quatro pontos de carga. A instrumentação, representada na Figura 1. Inclui cinco LVDTs (LVDT2, LVDT3 e LVDT4 com campo de medida de $\pm 75 \text{ mm}$ e uma linearidade de $\pm 0.1\%$; LVDT1 e LVDT5 com campo de medida de $\pm 25 \text{ mm}$ e uma linearidade de $\pm 0.1\%$) para medir a variação da deformação ao longo do eixo longitudinal da laje, quatro extensómetros TML BFLA-5-3 para monitorizar a extensão ao longo do laminado (ancoragens – SG1 e SG4, meio vão – SG e ponto de aplicação da carga – SG3) e uma célula de carga (com capacidade de leitura máxima de 200 kN e linearidade de $\pm 0.05\%$) para registar a carga aplicada. Estes ensaios foram realizados em regime de controlo de deslocamento a meio vão, segundo uma velocidade de 1.2 mm/min.

Quadro 1. Programa Experimental

| Laje | Serie | Ancoragem | ε_p [%] | f_{cm} [MPa] | E_{cm} [GPa] |
|------------|---|-----------|---------------------|----------------|----------------|
| REF_T0 | | - | - | | |
| EBR_REF_T0 | T0: Lajes ensaiadas no início do programa experimental. | - | 0.00 | 37.32 | 27.78 |
| MA_REF_T0 | | MA | 0.42 | (1.85%) | (2.87%) |
| GA_REF_T0 | | GA | 0.40 | | |
| MA_REF_U | REF: Lajes submetidas a 20 °C e 55% de humidade relativa. | MA | 0.41 | | |
| GA_REF_U | | GA | 0.41 | 39.49 | 26.98 |
| MA_REF_C | | MA | 0.37 | (5.34%) | (2.35%) |
| GA_REF_C | | GA | 0.41 | | |
| MA_TW_U | TW: Lajes submetidas à imersão total em água a 20 °C. | MA | 0.40 | | |
| GA_TW_U | | GA | 0.41 | 50.22 | 33.44 |
| MA_TW_C | | MA | 0.41 | (1.25%) | (1.27%) |
| GA_TW_C | | GA | 0.41 | | |
| MA_CW_U | CW: Lajes submetidas à imersão total em água a 20 °C com 3.5% de cloretos. | MA | 0.40 | | |
| GA_CW_U | | GA | 0.41 | 45.85 | 33.87 |
| MA_CW_C | | MA | 0.41 | (7.98%) | (1.12%) |
| GA_CW_C | | GA | 0.40 | | |
| MA_WD_U | WD: Lajes submetidas a ciclos de molhagem e secagem. | MA | 0.40 | | |
| GA_WD_U | | GA | 0.40 | 48.58 | 32.20 |
| MA_WD_C | | MA | 0.42 | (2.11%) | (5.09%) |
| GA_WD_C | | GA | 0.42 | | |

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).

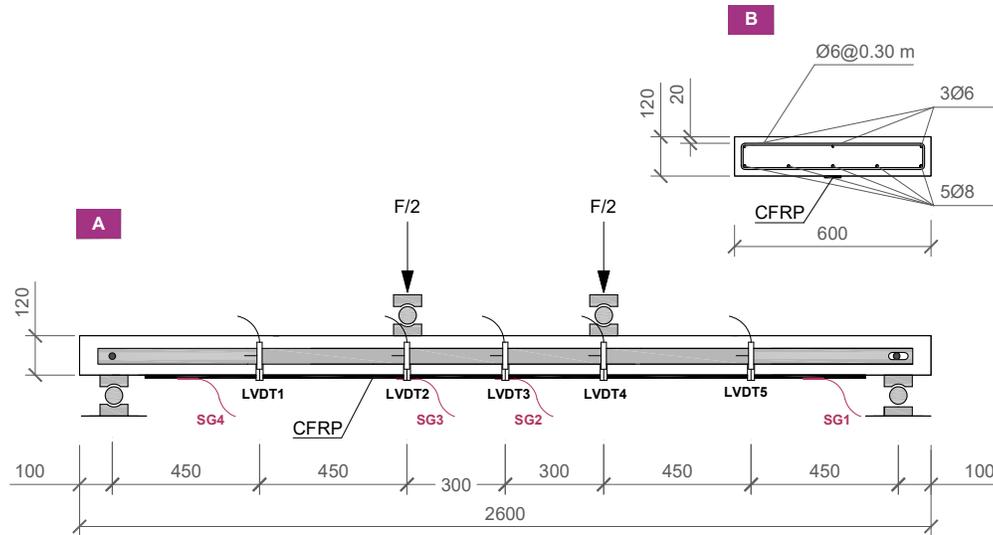


Figura 1. Geometria das lajes e configuração de ensaio; (A) configuração de ensaio; (B) secção transversal. Nota: unidades em [mm].

2.2. Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais inclui a avaliação das propriedades mecânicas do betão, do aço, do laminado de CFRP e do adesivo epóxi. Seis provetes cilíndricos (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura) de cada série de lajes (T0, REF, TW, CW e WD) foram ensaiados à compressão. A avaliação do módulo de elasticidade (E_{cm}) e da resistência à compressão (f_{cm}) foi realizada de acordo com as recomendações da LNEC E397-1993:1993 [6] e da NP EN 12390-3:2011 [7], respetivamente. Os ensaios de caracterização do betão foram realizados à mesma data que os ensaios monotónicos. Em termos médios, obteve-se uma resistência à compressão de 44.3 MPa e um módulo de elasticidade de 30.9 GPa (ver Quadro 1).

As propriedades mecânicas do aço foram obtidas através de ensaios de tração realizados a quatro provetes de 500 mm de comprimento, para cada diâmetro de varão usado. Os ensaios foram realizados em conformidade com as recomendações da NP EN ISO 6892-1:2012 [8]. Através dos ensaios foi possível apurar que o módulo de elasticidade, as tensões de cedência e rotura são iguais a 206.1 GPa (CoV=0.4%), 519.4 MPa (CoV=6.1%) e 670.2 MPa (CoV=5.1%) para os varões com 6 mm de diâmetro e 235.1 GPa (CoV=4.6%), 595.9 MPa (CoV=4.1%) e 699.0 MPa (CoV=2.1%) para os varões com 8 mm de diâmetro, respetivamente.

O laminado de CFRP utilizado (*S&P Laminate CFK*) possui um volume de fibras de carbono superior a 68%. De forma a caracterizar este composto, foram realizados ensaios de tração a seis amostras com 150 mm de comprimento. Estes ensaios tiveram por base a ISO 527-5:1997 [9], tendo-se obtido um módulo de elasticidade médio de 164.0 GPa (CoV=3.1%) e uma tensão de rotura média de 2375.9 MPa (CoV=2.5%).

O adesivo utilizado para efeitos de colagem dos laminados de CFRP ao betão foi uma resina epóxi com a designação comercial de *S&P 220 Resin*, produzida pelo mesmo fabricante dos laminados de CFRP. O adesivo não foi caracterizado mecanicamente no contexto deste trabalho. Contudo, noutro trabalho experimental realizado pelos autores, verificou-se que este epóxi apresenta um módulo de elasticidade de 7.7 GPa (CoV=3.1%) e uma tensão de rotura de 20.7 GPa (CoV=9.9%), após cura de sete dias a 22 °C [10].

2.3. Preparação das lajes

O procedimento inerente ao reforço das lajes engloba várias etapas e equipamentos comuns a ambos os sistemas de ancoragem (MA e GA). Na Figura 2 ilustram-se as principais etapas para a aplicação do pré-esforço com o sistema de ancoragens MA e GA. Numa primeira fase, a superfície do betão é tratada com jato de areia (ver Figura 2-A). Segue-se a instalação das ancoragens auxiliares, das guias metálicas e das unidades de aperto (ver Figura 2-B). O adesivo epóxi é preparado de acordo com as recomendações do fabricante e aplicado sobre o laminado, bem como na superfície de betão em contacto com o mesmo (ver Figura 2-C). Depois das unidades de aperto serem fechadas (ver Figura 2-D), são adotados procedimentos distintos para o sistema MA e GA. No sistema MA, utilizam-se chapas de ancoragem (ver Figura 2-E1,F1,G1,H1) fixas à laje junto à extremidade do laminado. No sistema GA, é utilizado um dispositivo de aquecimento com o objetivo de acelerar a cura do epóxi, o que possibilita a criação de uma ancoragem não metálica em que a força de pré-esforço é reduzida gradualmente (ver Figura 2-E2,F2,G2,H2). O procedimento de reforço segundo o sistema GA fica concluído aproximadamente 3 horas após a instalação do laminado. Por sua vez, no sistema MA, para condições normais de cura (temperatura igual ou superior a 20 °C), o reforço fica concluído 24 horas após a aplicação do laminado. Os procedimentos relativos à aplicação da ancoragem mecânica e ancoragem do gradiente da força encontram-se detalhadamente descritos na literatura [2, 11].

O nível de pré-extensão induzido no laminado de CFRP (ϵ_{fp}) foi de 0.41% (CoV=2.8%), valor este que se enquadra com os valores sugeridos na literatura. O extensómetro colocado a meio vão (SG2) foi utilizado para a controlar o nível de pré-extensão aplicado durante o reforço.

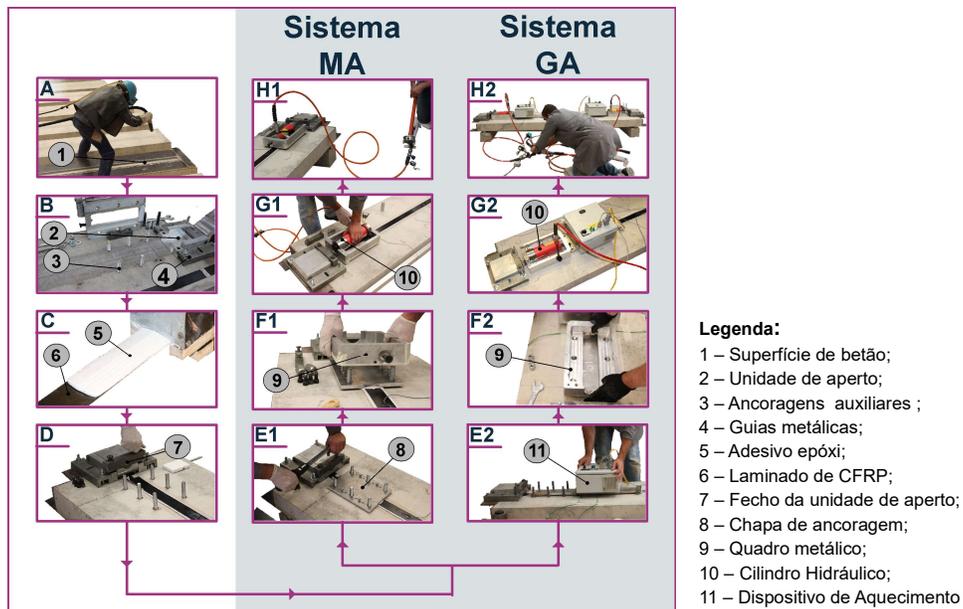


Figura 2. Procedimentos de aplicação dos sistemas de ancoragem (MA e GA).

Após o reforço estar concluído, as lajes foram mantidas em ambiente de laboratório por um período mínimo de dois meses. Depois, as lajes da série T0 foram ensaiadas até à rotura e as restantes lajes foram submetidas às suas respetivas condições ambientais: (i) numa câmara climática a 20 °C e 55% de humidade relativa (série REF); (ii) imersão total em água a 20 °C (TW); (iii) imersão total em água a 20 °C com 3.5% de cloretos (CW); e (iv) ciclos de molhagem e secagem em água a 20 °C (WD). Em cada ambiente, foram colocadas quatro lajes: duas submetidas ao ambiente (“_U”: estado não fendilhado) e duas submetidas ao ambiente e a uma carga gravítica de 20 kN (“_C”: estado fendilhado). Estas condições foram mantidas por um período de 8 meses. Findo este período, o ambiente e a carga gravítica foram removidos e todas as lajes foram mantidas em ambiente de laboratório durante um período de um mês até serem ensaiadas até à rotura. Deve ser referido que, durante a realização do

programa experimental, a laje GA_REF_C apresentou rotura do sistema de reforço (destacamento do laminado de CFRP) devido a um problema técnico no sistema de ar condicionado da câmara climática.

3. RESULTADOS

3.1. Modos de rotura

Dois modos de rotura foram observados nas lajes reforçadas: (i) rotura do laminado de CFRP e (ii) destacamento do laminado de CFRP devido à existência de fendas de flexão. A rotura do CFRP foi observada na laje MA_REF_T0, quando a extensão a meio vão atingiu o valor de 1.48% (ver Figura 3-A). O modo de rotura das restantes lajes ocorreu por destacamento do laminado de CFRP em relação ao betão, tendo sido coesivo ao nível do betão (ver Figura 3-B). O destacamento do laminado iniciou-se a meio vão da laje devido às fendas de flexão e, progressivamente, propagou-se até às extremidades (ver Figura 3-C). Tipicamente, este tipo de rotura é designado na literatura por *intermediate debonding* (ID).

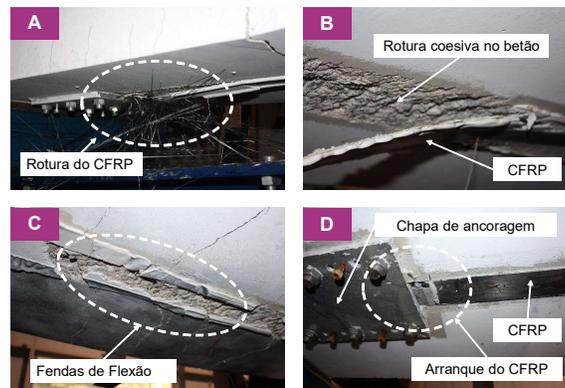


Figura 3. Modos de rotura: (A) rotura do CFRP; (B) rotura coesiva no betão; (C) fendas de flexão a meio vão; (D) arranque do laminado de CFRP da chapa de ancoragem.

Esta análise é confirmada através da correlação digital de imagem (DIC – *Digital image correlation*) realizada a um conjunto de lajes. A Figura 4 apresenta a evolução das fendas na face inferior de uma laje MA e GA. Como pode ser observado, as fendas de flexão causam uma concentração de tensões na zona do reforço e, conseqüentemente, o destacamento do material. Pela Figura 4, torna-se claro que o destacamento se iniciou a meio vão e depois se propagou até às extremidades do laminado. A análise através da DIC na laje MA_TW_U mostra a propagação de fendas na interface epóxi/betão, que se inicia a meio vão da laje e depois desenvolve-se até à chapa de ancoragem.

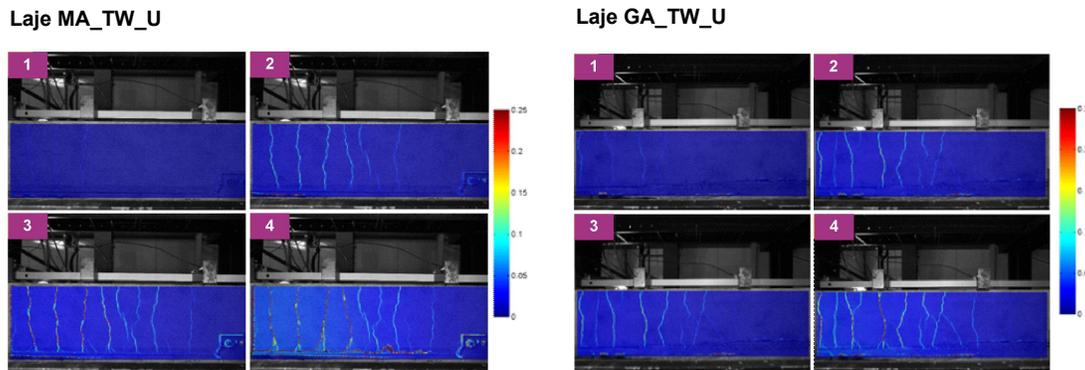


Figura 4. Evolução das fendas na face inferior nas lajes MA_TW_U e GA_TW_U por intermédio da correlação digital de imagem.

Contudo, nas lajes com ancoragem mecânica, o destacamento do laminado de CFRP não correspondeu ao valor da capacidade resistente máxima. A laje continua a suportar cargas devido à existência das chapas metálicas, que evitam o descolamento precoce do laminado de CFRP. A carga máxima é atingida quando o laminado é arrancado da chapa de ancoragem (ver Figura 3-D e Figura 5-A).

3.2. Sistema MA versus sistema GA

Ambos os sistemas de ancoragem exibem comportamentos semelhantes até à cedência da armadura longitudinal. 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. A maioria das lajes MA apresentam duas perdas repentinas de força nas curvas F- δ que correspondem ao início do destacamento do laminado em ambas as extremidades do laminado (Figura 5-A). As chapas metálicas evitam a rotura prematura e permitem que a laje continue a suportar incrementos de carga após o destacamento do laminado. Em contraste, as lajes GA apresentam uma rotura frágil que acontece com o início do destacamento do laminado a meio vão e que, rapidamente, se torna no destacamento total do mesmo. A Figura 5-B apresenta a evolução da extensão no laminado para as lajes MA_TW_C e GA_TW_C. Quando o destacamento do laminado ocorre na laje MA, o sistema reequilibra-se e o laminado funciona como um tirante preso em ambas as extremidades. Por esta razão, as lajes com ancoragens mecânicas apresentam uma deformação a meio vão e capacidade de carga última superior às lajes GA em 32.3% e 5.7%, respetivamente. Refira-se ainda que em termos de extensão última do laminado de CFRP, ambos os sistemas apresentam valores relativamente altos (cerca de 1.16%), quando comparados com a técnica EBR passiva.

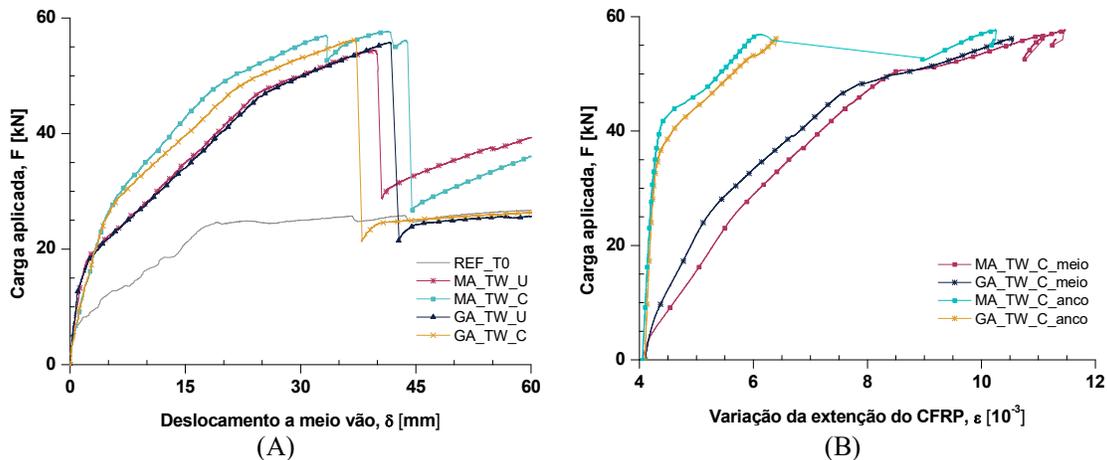


Figura 5. Resultados obtidos: (A) Carga aplicada versus deslocamento a meio vão para lajes imersas em água (série TW); (B) Carga aplicada versus extensão do CFRP para lajes imersas em água (série TW).

3.3. Lajes fendilhadas versus lajes não fendilhadas

A carga gravítica fendilhou as lajes “_C” e, desta forma, permitiu uma maior exposição às condições ambientais e uma maior degradação do sistema de reforço. Apesar de ter sido aplicado 1/3 da carga máxima, tendo por base os resultados dos ensaios à rotura é possível concluir que o processo de fendilhação que resultou a aplicação desta carga gravítica não conduziu à estabilização da fendilhação em estado II (ver Figura 5-A). Após 8 meses sob o efeito da carga gravítica e dos diversos ambientes, a deformação das lajes era aproximadamente 10 mm e o padrão de fendilhação era visível ao olho humano. Com a remoção da carga gravítica, cerca de 41% da deformação foi recuperada.

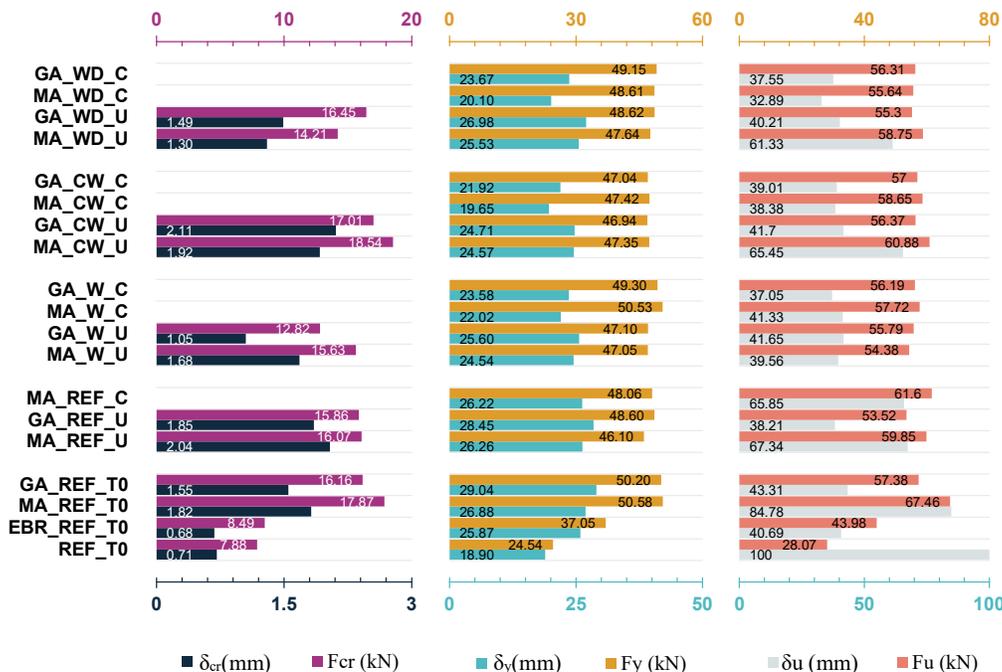
A Figura 6 apresenta os principais resultados obtidos nos ensaios monotónicos. Como se pode observar, a carga gravítica e consequente fendilhação não conduziram a alterações significativas na capacidade de carga das lajes. Em geral, a rotura ocorreu para valores semelhantes de carga, mas, para valores de

deformação menores (23.6% e 6.4% para lajes GA e MA, respectivamente), como seria expectável. Refira-se ainda que, nas lajes “_C”, a cedência da armadura ocorreu para níveis de carga superiores e que estas sinergias de ações (carga gravítica + ambiente) provocaram maiores danos nas lajes MA.

3.4. Influência das condições ambientes

Como era esperado, as quatro condições ambientais provocaram efeitos negativos sobre a cedência das armaduras e capacidade máxima de carga das lajes GA e MA. Em geral, as lajes reforçadas da série “T0” apresentaram maior carga de fendilhação, de cedência das armaduras e última. As lajes submetidas às quatro condições ambientais durante oito meses apresentaram deformações a meio vão inferiores na cedência das armaduras e rotura. Estes efeitos são mais visíveis nas lajes fendilhadas.

A cedência das armaduras das lajes imersas em água com cloretos (série CW) ocorreu para níveis de carga mais baixos, enquanto que as lajes imersas em água sem cloretos (série TW) apresentam a capacidade de carga última, deformação na rotura e extensão do laminado mais baixos. Contudo, a Figura 6 mostra que a influência de cada condição ambiental é diferente para cada tipo de ancoragem: o sistema MA apresenta valores de deformação e carga última mais elevados ($\delta_u=66.6$ mm e $F_u=60.7$ kN) quando submetido ao ambiente de laboratório (série REF); e valores mais baixos ($\delta_u=45.5$ mm e $F_u=56.01$ kN) quando imersos em água sem cloretos (série TW). Em contraste o sistema GA apresenta valores de deformação e carga última mais elevados ($\delta_u=40.4$ mm e $F_u=56.7$ kN) quando imerso em água com 3.5% de cloretos (série CW); e valores mais baixos ($\delta_u=38.2$ mm e $F_u=53.52$ kN) na série REF.



Legenda: F_{cr} =carga de início de fendilhação e respetivo deslocamento a meio vão (δ_{cr}); F_y =carga de cedência das armaduras e correspondente deslocamento a meio vão (δ_y); F_u =carga máxima e correspondente deslocamento a meio vão (δ_u).

Figura 6. Principais resultados do programa experimental.

4. CONCLUSÕES

O trabalho experimental desenvolvido teve como principal objetivo a avaliação da durabilidade de lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados usando dois sistemas de ancoragem

distintos: (i) a ancoragem mecânica (MA) e (ii) a ancoragem usando o método do gradiente da força (GA). Através da campanha experimental realizada foi possível obter as seguintes conclusões:

- i. As lajes MA e GA apresentam um comportamento estrutural semelhante; contudo as chapas de ancoragem do sistema MA previnem um destacamento prematuro do laminado de CFRP e permitem níveis de carga e deformação superiores;
- ii. A laje MA_REF_T0 foi a única laje em que se observou rotura pelo CFRP na sua capacidade máxima, enquanto que as restantes lajes reforçadas atingiram a rotura por destacamento do laminado em relação ao substrato devido às fendas de flexão, coesivo no betão;
- iii. A correlação digital de imagem (DIC) clarificou que o destacamento iniciou-se a meio vão da laje, devido à existência de fendas de flexão, e depois propagou-se para as extremidades do laminado de CFRP;
- iv. Todas as condições ambientais reduziram a carga de cedência das armaduras e carga última de ambos os sistemas de ancoragem, sendo que a imersão total em água (série TW) apresenta os menores valores médios. Todavia, a influência de cada ambiente foi diferente para cada sistema de ancoragem;
- v. As sinergias de ações (carga gravítica + condição ambiental) causaram o maior nível de degradação nas lajes.

5. 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 - FCOMP-01-0124-FEDER-028865 (PTDC/ECM-EST/2424/2012). Este trabalho é também cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Fatores de Competitividade e internacionalização (POCI) e do Programa Regional de Lisboa no âmbito dos projetos FRPLongDur POCI-01-0145-FEDER-016900 (PTDC/ECM-EST/1282/2014) e POCI-01-0145-FEDER-00763. 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 segundo autor desejava também agradecer a bolsa SFRH/BD/98309/2013, atribuída pela FCT. Este artigo é dedicado ao Tiago Teixeira (1988 – 2015), ex-aluno de doutoramento no ISISE e na Universidade do Minho.

REFERÊNCIAS

- [1] Pellegrino, C.; Sena-Cruz, J.M. (Editores) “Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 234-DUC.” RILEM State Art Reports, Vol. 19. ISBN: 978-94-017-7335-5, 2015.
- [2] Michels J, Sena-Cruz J, Czaderski C, Motavalli M. (2013) Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage. *Journal of Composites for Construction*. Vol. 17, pp. 651-61.
- [3] El-Hacha R, Green MF, Wight RG. (2004) 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*; Vol. 31(2), pp.239-52.
- [4] Kotynia R, Walendziak R, Stoecklin I, Meier U. (2011) RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Composites for Construction*. 2011; Vol. 15(2), pp. 168-80.
- [5] Michels, J.; Barros, J.; Costa, I.; Sena-Cruz, J.; Czaderski, C.; Giacomini, C.; Kotynia, R.; Lees, J.; Pellegrino, C.; Zile, E. (2015) “Prestressed FRP Systems” Design Procedures for the Use of

- Composites in Strengthening of Reinforced Concrete, RILEM State-of-the-Art Reports 19, C. Pellegrino and J. Sena-Cruz (eds.), 263-301.
- [6] LNEC E397-1993 (1993) Concrete - Determination of the elasticity Young modulus under compression. *Portuguese specification from LNEC*
- [7] NP EN ISO 6892-1:2012 (2011) Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. *Caparica: IPQ - Instituto Português da Qualidade.*
- [8] NP EN ISO 6892-1:2012 (2012) Metallic Materials. Tensile Testing. Part 1: Method of test at room temperature. *Caparica: IPQ - Instituto Português da Qualidade.*
- [9] ISO 527-5:1997 (1997) Plastics — Determination of tensile properties — Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites. *Genève: ISO - International Organization for Standardization*; pp. 11.
- [10] Sena-Cruz J, Michels J, Czaderski C, Motavalli M. (2012) Mechanical behavior of epoxy adhesives cured at high temperatures, *Technical Report no. 880163*, Switzerland: Empa. pp. 30.
- [11] S&P (2010) Pre-stressed S&P Laminates CFK. Manual for applicators. *Technical Report Hüm/03.04.2011*, pp. 20.