

30 SEMINÁRIO

**SOBRE O PROJETO DE
REFORÇO DE ESTRUTURAS
DE BETÃO COM FRP'S**

Editores:

José Sena Cruz & Luís Correia



Universidade do Minho





ISBN 978-989-8793-02-7

© Departamento de Engenharia Civil – Escola de Engenharia – Universidade do Minho

Todos os direitos reservados. Não é permitida a reprodução total ou parcial deste documento, nem o registo em suporte informático, nem a transmissão através de qualquer processo, eletrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

Este livro foi elaborado a partir da reprodução dos originais enviados pelos autores. Os editores não assumem a responsabilidade pelo conteúdo nem por possíveis incorreções do texto.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Prefácio..... | iv |
| Efeitos da fluência num adesivo epóxi: investigação experimental <i>Patrícia Silva, José Sena-Cruz, Miguel Azenha.....</i> | 1 |
| Durabilidade de um adesivo epóxi e um laminado de CFRP expostos a distintas condições ambientais <i>Pedro Fernandes, Patrícia Silva, Luís Correia, José Sena-Cruz</i> | 8 |
| Comparação entre modelos constitutivos de interface: abordagem total versus abordagem com plasticidade <i>M. Coelho, A. Caggiano, J. Sena-Cruz, L. Neves</i> | 16 |
| Comportamento de lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados <i>L. Correia, J. Sena-Cruz, J. Michels, P. França, T. Teixeira</i> | 23 |

Prefácio

Nas três últimas décadas, o recurso ao uso de polímeros reforçados com fibras (FRP) no reforço de estruturas existentes de betão tem vindo a ganhar crescente notoriedade, sendo atualmente bem conhecidos e usados pela indústria da construção. Tipicamente estes compósitos são colados externamente (técnica EBR) ou inseridos no betão de recobrimento (técnica NSM) dos elementos a reforçar, com recurso a adesivos de natureza epoxídica. De emergentes, as técnicas EBR e NSM passaram a ser consideradas perfeitamente consolidadas, existindo na atualidade diversos códigos que permitem o seu uso.

Mais recentemente, o uso de FRP pré-esforçados no reforço a estruturas de betão tem vindo a ganhar notoriedade. Esta técnica específica combina os benefícios do sistema passivo (EBR ou NSM) com as vantagens do pré-esforço externo. A aplicação de FRP's pré-esforçados tem evidenciado diversas vantagens, não só ao nível dos estados limite de serviço, mas também em termos de estados limite últimos, quando comparadas com as soluções sem pré-esforço, entre as quais se destacam: a redução de flechas e largura de fendas; a armadura longitudinal atinge a cedência para valores superiores de carga; o uso mais eficiente do betão e do FRP; a possibilidade de anular cargas devidas ao peso próprio e sobrecargas; a redução da possibilidade da rotura prematura; e, aumento da capacidade resistente à flexão e ao corte.

O 3º Seminário sobre o Projeto de Reforço de Estruturas de Betão com FRP's (SPREB-FRP 2015) pretende, mais uma vez, constituir um fórum de conhecimento e discussão no âmbito do uso de FRP's no reforço de estruturas de betão. O programa inclui diversas palestras que serão proferidas por especialistas nacionais e internacionais no uso de FRP's pré-esforçados na Engenharia Civil. Durante a parte da manhã o SPREB-FRP 2015 incidirá sobre sistemas de aplicação de FRP's pré-esforçados e respetivo comportamento.

Na parte da tarde será dado grande enfoque ao projeto FRPreDur (PTDC/ECM-EST/2424/2012) – Comportamento estrutural a curto e longo prazo de elementos de betão armado reforçados à flexão com laminados de CFRP pré-esforçados.

A Comissão Organizadora

José Sena Cruz, Luís Correia, Gonçalo Escusa, Mário Coelho, Patrícia Silva

Comissão Organizadora

José Sena Cruz

Luís Correia

Gonçalo Escusa

Mário Coelho

Patrícia Silva

Palestrantes

Joaquim Barros,

Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

José Sena Cruz

Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

Julien Michels

Investigador, EMPA - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Dübendorf, Suíça

Paulo Costeira Silva,

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Politécnico de Viseu

Filipe Dourado

Engenheiro Civil, CEO da S&P Clever Reinforcement Ibérica, Lda.

Luís Correia

Aluno de Doutoramento, ISISE, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

Mário Coelho

Aluno de Doutoramento, ISISE, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

Patrícia Silva

Aluna de Doutoramento, ISISE, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

Pedro Fernandes

Aluno de Doutoramento, ISISE, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

Comunicações

Efeitos da fluência num adesivo epóxi: investigação experimental

Patrícia Silva ¹, José Sena-Cruz ², Miguel Azenha ³

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

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

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

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

Palavras-chave: Adesivo epóxi, fluência.

RESUMO

Os adesivos epoxídicos têm vindo a ser bastante usados no reforço estrutural, conduzindo assim, a uma premente necessidade em avaliar o seu comportamento a longo prazo, nomeadamente os efeitos viscoelásticos. O objetivo deste trabalho consiste em estudar o comportamento a longo prazo de um adesivo epoxídico comercial com enfoque nos efeitos de fluência. Para isso foi desenvolvido um programa experimental com ensaios de fluência à tração dividido em duas séries: (i) série S1 – provetes de epóxi sujeitos a diferentes níveis de tensão para uma idade inicial predefinida; e, (ii) série S2 – provetes de epóxi sujeitos ao mesmo nível de tensão mas carregados a diferentes idades. Este artigo apresenta os principais resultados obtidos até ao momento e as suas conclusões mais relevantes.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas três décadas, têm sido propostas diversas técnicas de reforço com polímeros reforçados com fibras (FRP) com o intuito de melhorar o desempenho de estruturas existentes, nomeadamente através do aumento da sua capacidade de carga. Na maioria dessas técnicas, como por exemplo o reforço colado externamente (EBR) ou reforço inserido em ranhuras pré-executadas (NSM), os materiais de FRP são colados ao membro estrutural a reforçar através de adesivos epoxídicos. O adesivo é um material que consegue transmitir tensões entre o substrato e o reforço sem perder a integridade estrutural. As principais vantagens no uso de adesivos estruturais são: (i) distribuição uniforme de tensões ao longo de toda a área, minimizando a concentração de tensões; e, (ii) a ligação de diferentes materiais, reduzindo o peso global do sistema de reforço comparativamente a outros sistemas de reforço existentes [1]. De acordo com a bibliografia, os adesivos epoxídicos exibem deformações por fluência relevantes quando sujeitos a carregamentos prolongados [2]. Isto conduz a uma importante necessidade em se avaliar o comportamento deformacional adesivo ao longo do tempo, uma vez que as resinas epóxi apresentam natureza viscoelástica [1, 3]. Para além disso, o comportamento ao longo do tempo dos adesivos epoxídicos tem sido descrito como sendo fortemente afetado pelo nível de tensão e condições de exposição ambiental, tais como temperatura e humidade [4].

Costa e Barros [4] realizaram ensaios experimentais de fluência em tração com um adesivo epoxídico em que observaram deformações diferidas consideráveis nos provetes ensaiados durante um período de 1000 horas de carregamento. Os provetes deste programa experimental tinham sido submetidos a tensão constante (nível máximo de tensão foi 60% da tensão última) em condições ambientais controladas (20 °C e 60% RH). Meshgin *et al.* [5] também realizaram um estudo experimental com o objetivo de avaliar a resposta de um adesivo aplicado na interface betão-laminado quando sujeito a tensão de corte constante durante período prolongado. Os resultados mostraram que ocorreu uma significativa deformação por fluência no adesivo dentro de um curto período de tempo, em comparação com uma deformação muito menor e mais tardia observada no betão. A magnitude da tensão de corte aplicada e

o tempo de cura prévio ao carregamento foram fatores determinantes no comportamento diferido ao corte do epóxi na interface betão-FRP.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento diferido de um adesivo estrutural comercialmente disponível para a aplicação no reforço de estruturas de betão. Devido à relevante influência deste material na resposta global da estrutura reforçada ao longo do tempo, foi realizado um programa experimental com ensaios de fluência em tração dividido em duas séries: (i) série S1, na qual os provetes de epóxi foram submetidos a diferentes níveis de tensão aos 7 dias de idade; e (ii) série S2, em que foi aplicado o mesmo nível de tensão em todos os provetes mas a distintas idades (1,2,3 e 7 dias). Este artigo descreve o programa experimental em curso e apresenta os principais resultados obtidos.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Material – adesivo epóxi

O adesivo epoxídico estudado tem a designação “S&P Resin 220” [6] e é produzido pela empresa S&P® Clever Reinforcement. Este adesivo epoxídico é bicomponente, sem solventes, tixotrópico e os dois componentes quando misturados apresentam uma cor cinza (componente A = resina, de cor cinza claro; Componente B = endurecedor, de cor preta). De acordo com o fornecedor, depois da mistura dos dois componentes, a composição homogeneizada apresenta uma densidade de 1.70 a 1.80 g/cm³ e as seguintes propriedades mecânicas: resistência à compressão >70 MPa; módulo de elasticidade >7.1 GPa; resistência ao corte >26 MPa; resistência à tração (ao fim de 3 dias a 20 °C, quando aplicada sobre o betão ou no laminado S&P CFK) >3 MPa. A temperatura de aplicação recomendada é entre +10 °C e +35 °C. Com recurso a microscópio eletrónico de varrimento (SEM) com espectroscopia de energia dispersiva foi possível determinar a composição química dos constituintes do epóxi, que se encontra descrita detalhadamente na referência [7]. A partir dessa análise foram observados alguns inertes minerais, tais como, quartzo, feldspato, (SIAIK), bário (SBaO) entre outros silicatos.

2.2 Procedimento experimental

Neste programa experimental foram produzidos 42 provetes de adesivo epóxi, em que 8 desses provetes foram sujeitos a um carregamento constante com o intuito de estudar os efeitos da fluência. Os restantes provetes foram ensaiados monotonicamente à tração até à rotura. Os provetes foram produzidos de acordo com a norma ISO 527-2:2012 e para avaliar as propriedades mecânicas do adesivo endurecido, foram realizados ensaios à tração de acordo com a norma ISO 527-1:2012. A geometria dos provetes ensaiados está representada na Figura 1(a): os provetes têm 4 mm de espessura, 10 mm de largura na região de estudo e 115 mm de distância entre as amarras. Os provetes foram moldados em moldes de Teflon, dentro de uma câmara climática a 20 °C e 55% de humidade relativa (HR). As três misturas realizadas (uma para a série S1 e duas para a série S2) foram produzidas a partir da mesma embalagem de adesivo epoxídico.

Tal como referido anteriormente, o programa experimental foi dividido em duas partes materializadas através da série S1 e S2. Cada série inclui 4 provetes que foram submetidos a tensão de tração constante. Ambas as séries de ensaios de fluência (S1 e S2) foram realizadas em ambiente controlado através de uma câmara climática, a temperatura ambiente e a humidade relativa de 20 °C e 55%, respetivamente. As principais diferenças entre a série S1 e a série S2 relacionam-se com o nível de tensão aplicado e com a idade de carregamento. Todos os provetes da série S1 foram carregados aos 7 dias de idade: (i) 2 provetes carregados com 20% da sua tensão última e os (ii) restantes dois carregados com 40% da tensão última. No caso da série S2, todos os provetes foram submetidos a um nível de tensão constante de 30% da tensão última a diferentes idades de carregamento, nomeadamente, 1, 2, 3 e 7 dias de idade. Na

Tabela 1 os provetes encontram-se designados por S, C, e D, i.e. S1_C20_D7 para a série 1 (S1) sujeita a uma tensão constante de 20% da tensão última (C20) aplicada aos 7 dias (D7). As letras A e B distinguem provetes sujeitos às mesmas condições.

Os ensaios de fluência foram realizados através de um sistema mecânico, onde os provetes foram sujeitos a uma tensão constante através da aplicação de cargas gravíticas. O sistema mecânico foi baseado numa estrutura com alavancas [5]. O comprimento da alavanca onde provete se encontra fixo é de 125 mm, e o da alavanca onde a carga gravítica é suspensa é de 375 mm. Para determinar o peso a

aplicar durante os ensaios de fluência, foram realizados ensaios monotónicos à tração em provetes iguais e à mesma idade. Os ensaios monotónicos foram realizados numa máquina universal sob controlo do deslocamento, a velocidade de 1 mm/min e de acordo com a norma EN ISO 527-1:2012. A força aplicada foi avaliada por uma célula de carga com capacidade máxima admissível de 50 kN (linearidade inferior a 0.5%). A extensão axial a meio vão foi medida por um extensómetro (SG) da TML do tipo BFLA-5-3-3L (comprimento de medida de 5 mm). Os ensaios monotónicos à tração compreenderam o ensaio de 5 provetes para cada idade de carregamento dos ensaios de fluência.

Após os provetes terem sido desmoldados, procedeu-se à medição da espessura e largura da secção com um paquímetro digital (0.01 mm de precisão) em três secções distintas (A, B e C), identificadas na Figura 1(a). Com base nessas medições foi calculada a área média da secção do provete. De seguida, os provetes foram instrumentados com recurso a dois extensómetros (SG) colados a meia altura e em faces opostas, como se observa na Figura 1b, e conectados a um sistema de aquisição de dados NI Compact DAQ ® com o módulo de leitura de extensometria NI 9235. Tendo por base a tensão máxima obtida, calculou-se a carga gravítica a aplicar a cada provete. De seguida os provetes foram cuidadosamente carregados.

As principais propriedades dos ensaios de fluência encontram-se apresentadas na

Tabela 1. Para cada provete ensaiado foi definida a secção (A) e a correspondente tensão aplicada (σ) com base nos resultados dos ensaios monotónicos à tração (ver Secção 3.1). A carga gravítica aplicada em cada provete (P) foi calculada com base na equação (1).

$$\sigma = \frac{3 \cdot P}{A} \quad (1)$$

No entanto, não foi possível aplicar exatamente o nível de tensão predefinido com os pesos padrão disponíveis no laboratório, tendo sido, por isso, aplicado um peso aproximado. Na

Tabela 1 encontra-se o peso ($P_{aplicado}$) que foi efetivamente aplicado. Para além disso, com base no $P_{aplicado}$, foi determinada a tensão experimentalmente aplicada e a respetiva percentagem real da tensão última aplicada ($\%f_{ult}$), que por sua vez foi muito próxima da pretendida.

A duração dos ensaios de fluência das séries S1 foi cerca de 85 dias (2040 horas). Depois disso, os provetes foram descarregados e foi efetuada a monitorização da recuperação da deformação. Os ensaios de fluência da série S2 ainda se encontram em curso à data de redação deste artigo, e irão decorrer até perfazer, pelo menos, 1000 horas. Esta duração de ensaio é recomendada pelas normas ISO 899-1:2003 e ASTM D 2990-09.

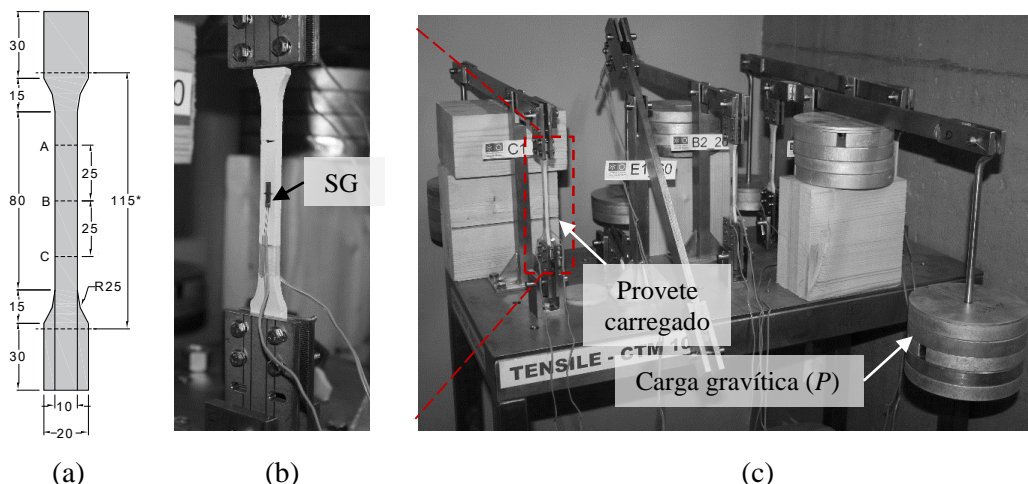


Figura 1: Provete e ensaio de fluência: (a) geometria do provete de acordo com a ISO 527-2:2012 (*distância entre amarras); (b) vista detalhada do provete e amarras; (c) aspeto geral dos ensaios de fluência.

Tabela 1: Propriedades dos ensaios de fluência à tração das séries S1 e S2.

| Séries | ID do provete | A [mm ²] | P _{aplicado} [kg] | σ _{aplicada} [MPa] | %f _{ult} [%] |
|--------|---------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| S1 | S1_C20_D7_A | 46.77 | 7.30 | 4.59 | 19.9 |
| | S1_C20_D7_B | 44.73 | 7.29 | 4.79 | 20.8 |
| | S1_C40_D7_A | 45.98 | 14.38 | 9.19 | 39.9 |
| | S1_C40_D7_B | 45.57 | 14.28 | 9.22 | 40.0 |
| S2 | S2_C30_D1 | 44.60 | 8.39 | 5.54 | 29.7 |
| | S2_C30_D2 | 42.77 | 10.51 | 7.23 | 29.9 |
| | S2_C30_D3 | 44.43 | 10.18 | 6.74 | 29.9 |
| | S2_C30_D7 | 44.76 | 11.21 | 7.37 | 29.9 |

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios de tração

Na Figura 2 estão representadas as curvas tensão-extensão obtidas às diferentes idades para as séries S1 e S2. A

Tabela 2 inclui as principais propriedades obtidas nos ensaios monotónicos à tração, nomeadamente, tensão última (f_{ult}), módulo de elasticidade ($E_{adesivo}$) e extensão última (ϵ_{ult}). O módulo de elasticidade foi calculado pelo declive da reta secante entre os valores de extensão de 0.05% e 0.25% na curva tensão-extensão obtida nos ensaios monotónicos de tração, de acordo com as recomendações da norma ISO 527-1:2012. Na série S1 verificou-se um ligeiro aumento da resistência do adesivo (cerca de 11%) entre os ensaios realizados aos 7 e os 85 dias, idades de carregamento e descarregamento dos provetes S1, respetivamente. No entanto a variação do módulo de elasticidade foi bem menos significativa, cerca de 3% (ver Tabela 2).

Na Figura 2b é possível observar a evolução do processo de cura do adesivo epóxi traduzido por um aumento de rigidez e resistência às diferentes idades. Em termos de rigidez, traduzida pelo declive das curvas, observa-se que a diferença de declives foi menor entre os 2 e os 7 dias de idade do que entre o 1º e 2º dia, o que leva a constatar que as reações de cura ocorrem principalmente nos 3 primeiros dias de idade. Este efeito é corroborado pelos valores de módulos de elasticidade da série S2 (ver Tabela 2). O módulo de elasticidade no 1º dia de idade foi cerca de 4 GPa e aumentou cerca de 50% até aos 3 dias de idade.

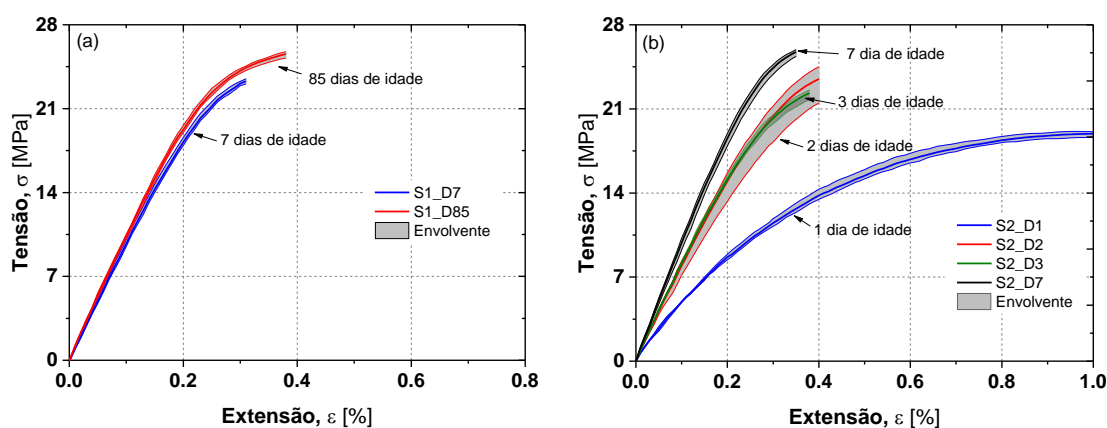


Figura 2: Curvas tensão-extensão obtidas a partir de ensaios à tração a diferentes idades: (a) série S1 e (b) série S2.

Apesar da diferença de idades dos provetes, a tensão máxima obtida nos ensaios monotónicos para todos os provetes das séries S1 e S2 foi bastante semelhante, com a exceção dos provetes ensaiados a 1 dia de idade. No entanto, o módulo de elasticidade das séries S1 e S2 apenas apresenta similaridade aos 7 dias de idade. Estas observações indicam que a evolução da resistência máxima do adesivo foi atingida muito

mais rapidamente do que a rigidez e estão em concordância com resultados anteriormente reportados [8].

Tabela 2: Resultados dos ensaios de tração das séries S1 e S2 às diferentes idades.

| Séries | ID | $A_{average}$ [mm ²] | f_{ult} [MPa] | $E_{adesivo}$ [GPa] | ϵ_{ult} [%] |
|--------|--------|-------------------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| S1 | S1_D7 | 46.06 (2.6%) | 23.06 (4.4%) | 8.27 (1.2%) | 0.313 (12.8%) |
| | S1_D85 | 44.70 (3.7%) | 25.61 (1.4%) | 8.54 (1.0%) | 0.442 (8.4%) |
| S2 | S2_D1 | 45.10 (0.6%) | 18.65 (3.2%) | 3.73 (3.8%) | 0.955 (15.6%) |
| | S2_D2 | 43.93 (1.5%) | 24.17 (3.9%) | 6.99 (6.0%) | 0.496 (16.6%) |
| | S2_D3 | 44.90 (0.9%) | 22.51 (3.2%) | 6.93 (2.1%) | 0.432 (9.6%) |
| | S2_D7 | 45.53 (2.6%) | 24.64 (7.5%) | 8.44 (2.2%) | 0.342 (17.7%) |

3.2 Efeito da fluência

3.2.1 Série S1

Na Figura 3a está representada a resposta diferida dos provetes da série S1 inicialmente submetidos a tensão constante e posteriormente descarregados, exibindo portanto a correspondente recuperação de deformações. As respetivas curvas função de fluência-tempo estão apresentadas na Figura 3b. Na Figura 3a é possível observar uma boa coerência entre os provetes A e B (mesmo tipo de provete nas mesmas condições). Os valores de deformação elástica calculados com base no módulo de elasticidade obtido nos ensaios monotónicos de tração foram identificados com pontos na mesma figura. Também se observa que as deformações elásticas calculadas para a série S1_C40 não são exatamente o dobro da série S1_C20, conforme seria expectável dada a proporção dos carregamentos. Estas variações podem estar relacionadas com ligeiro desalinhamento entre a alavanca e o provete no próprio sistema mecânico, alguma variação da secção geométrica dos provetes e variações intrínsecas nas propriedades dos materiais.

Durante o período em que a carga esteve aplicada, a evolução da extensão de fluência foi afetada pelas oscilações da temperatura dentro da câmara climática (± 2 °C) devido ao elevado coeficiente de expansão térmica dos adesivos epoxídicos ($\approx 41 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Assim, foi necessário proceder à compensação da extensão medida para ter em consideração os efeitos da temperatura. O coeficiente de fluência foi calculado com base na razão $(\epsilon_{max} - \epsilon_{elast})/\epsilon_{elast}$. No presente programa experimental, os coeficientes de fluência calculados para provetes carregados aos 7 dias e com uma duração de ensaio de 85 dias foram 1.2 e 1.7 para o caso dos provetes sujeitos a um nível de tensão de 20% e 40%, respetivamente. Esta diferença de coeficientes de fluência e a diferença entre as funções de fluência apresentadas na Figura 3b parecem sugerir falta de homogeneidade do comportamento viscoelástico do adesivo. Para um material viscoelástico linear, a função de fluência é independente do nível de tensão, o que significa que as curvas da função fluência a diferentes níveis de tensão deveriam coincidir [3]. No entanto, não está descartada a potencial ocorrência de erro experimental sistemático, pelo que serão aconselháveis trabalhos futuros para endereçar esta questão em específico.

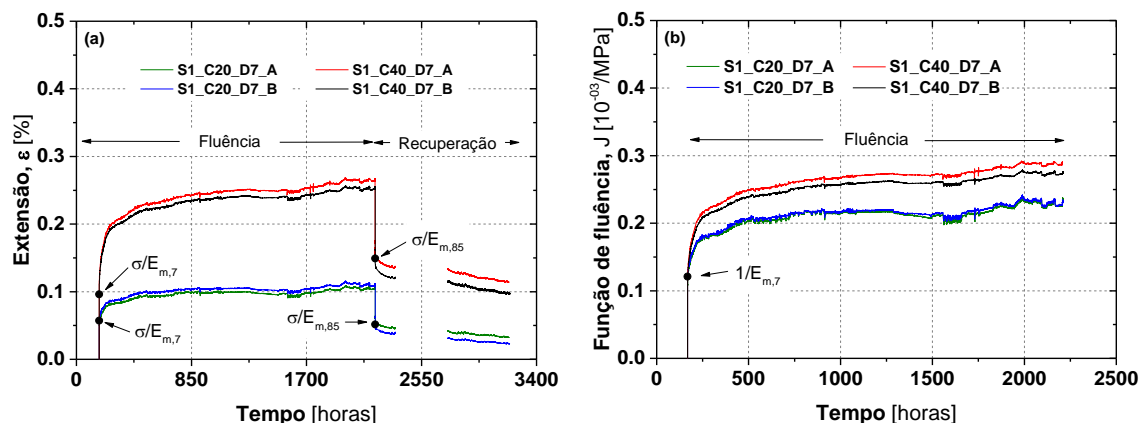


Figura 3: Ensaios de fluência da série S1: (a) comportamento de fluência e recuperação; (b) função de fluência.

Após o descarregamento (aos 85 dias de idade), verificou-se que a extensão elástica foi praticamente recuperada, uma vez que a extensão calculada através do módulo determinado pelos ensaios monotónicos de tração realizados à idade do descarregamento $\sigma/E_{m,85}$ coincide com a extensão medida no instante de remoção da carga, com exceção do provete S1_C20_D7_A, como mostra a Figura 3a. De acordo com a linearidade do material viscoelástico, isto conduz à verificação do princípio de sobreposição de Boltzmann [3]. Durante a fase de recuperação, os provetes apresentaram uma cinética de evolução da deformação semelhante à resposta que haviam exibido após o carregamento inicial. Considerando a recuperação da deformação por fluência até ao momento de redação deste artigo, os provetes que tinham sido sujeitos a um nível de tensão de 20% e 40% recuperaram em média 58% e 37% da extensão, respetivamente.

3.2.2 Série S2

Na Figura 4 estão representadas as evoluções das extensões durante os ensaios de fluência de provetes carregados a diferentes idades. Os valores das deformações elásticas representadas por σ/E foram calculados com base no módulo de elasticidade obtido a partir dos ensaios monotónicos de tração realizados às mesmas idades. Esses valores estão muito próximos da extensão elástica medida experimentalmente nos ensaios de fluência. Embora a deformação elástica do provete carregado a um dia de idade aparente ser bastante mais elevada que nas restantes idades (ver Figura 4a), a ampliação da resposta nos primeiros minutos mostra o contrário (ver Figura 4b e c) A evolução da extensão de fluência deste provete apenas é considerável até às primeiras 80 horas, aproximadamente. De facto, ocorrem dois fenómenos simultaneamente a partir do instante de carregamento: reações de cura do material e o efeito de fluência. Este comportamento pode ser também observado nos restantes provetes a diferentes idades, mas com menor evidência. As deformações de fluência decrescem para idades de carregamento mais avançadas (ver Figura 4b), tal como acontece em outros materiais, como por exemplo o betão.

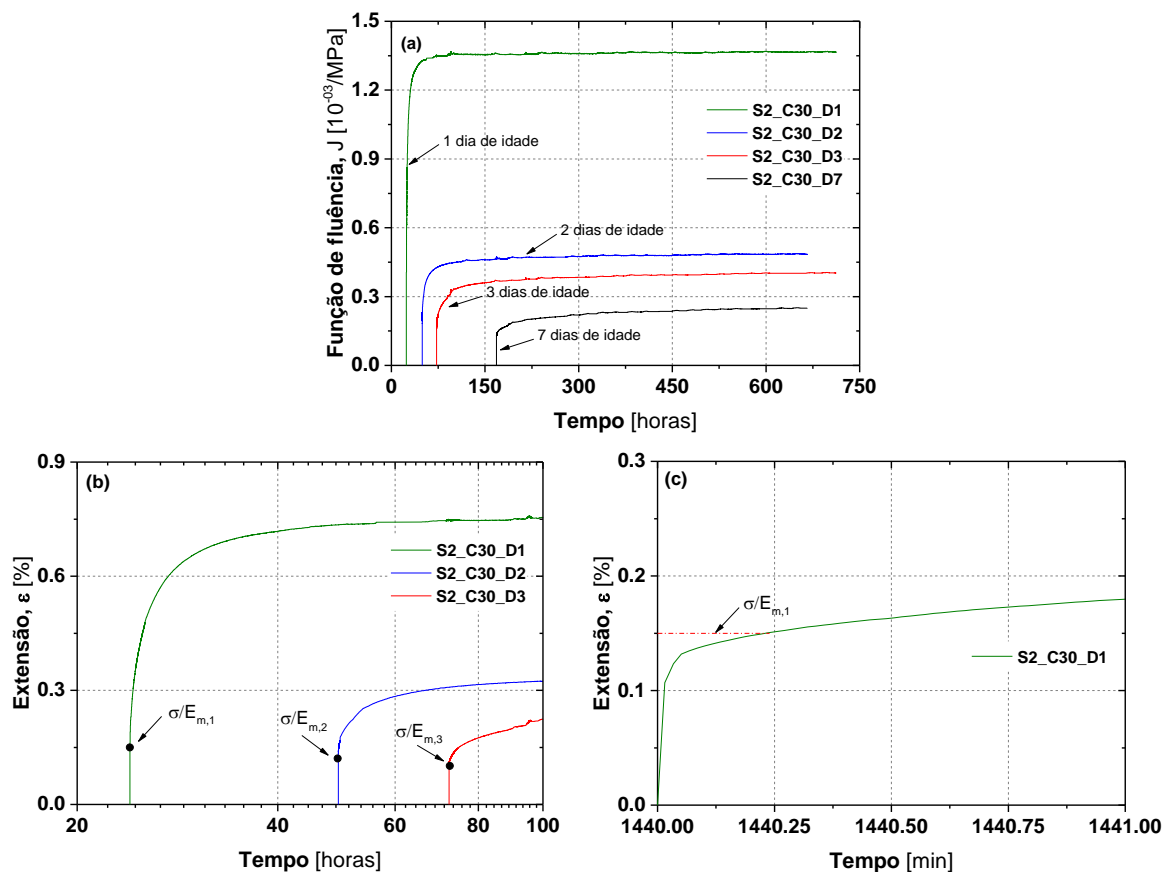


Figura 4: Ensaio de fluência a diferentes idades: (a) provetes carregados a 1, 2, 3 e 7 dias de idade; (b) detalhe da resposta de fluência a 1, 2 e 3 dias de idade; (c) detalhe da extensão elástica do provete carregado a 1 dia de idade.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de fluência de um adesivo epoxídico estrutural usado em aplicações de reforço com FRP. Os ensaios experimentais foram realizados em duas séries, sendo que na primeira foram avaliados distintos níveis de tensão enquanto e na segunda série diferentes idades de carregamento. As principais conclusões foram as seguintes: (i) em ambas as séries a deformação elástica foi coerente com a calculada pelos ensaios monotónicos; (ii) os provetes carregados aos 7 dias de idade exibiram um comportamento que aparenta desviar-se ligeiramente do critério de homogeneidade; (iii) depois de descarregados os provetes, a extensão elástica foi praticamente recuperada, permitindo verificar o princípio da sobreposição de Boltzmann; e (iv) as deformações de fluência foram diminuindo para idades de carregamento mais avançadas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado por fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT - Fundação Português de Ciência e Tecnologia no âmbito dos projectos FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012 e VisCoDyn EXPL/ECM-EST/1323/2013. Os autores também gostariam de agradecer à empresa S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda. Pelo apoio e contribuição no desenvolvimento deste estudo. O primeiro autor gostaria ainda de agradecer a bolsa de doutoramento SFRH/BD/89768/2012 financiada pela FCT.

REFERÊNCIAS

- [1] Feng CW, Keong CW, Hsueh YP, Wang YY, Sue HJ. Modeling of long-term creep behavior of structural epoxy adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2005;25(5):427-436.
- [2] Meyers MA, Chawla KK, *Mechanical behavior of materials* vol. 2: Cambridge university press Cambridge, 2009.
- [3] Guedes RM, *Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites*: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [4] Costa I, Barros JAO. Creep of structural adhesives : an overview. In: CICE 2012 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Rome; 2012. p.
- [5] Meshgin P, Choi K-K, Reda Taha MM. Experimental and analytical investigations of creep of epoxy adhesive at the concrete-FRP interfaces. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2009;29(1):56-66.
- [6] S&P, Technical Data Sheet. S&P Resin 220 epoxy adhesive. S&P Clever Reinforcement ed, 2013, p. 3.
- [7] Sena-Cruz J, Silva P, Fernandes P, Azenha M, Barros JC, Sousa C, Castro F, Teixeira T. Creep behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under different environmental conditions. In: FRPRCS-11 11th International Symposium on Fibre Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures, Guimarães; 2013. p. 12.
- [8] Fernandes P, Granja JL, Benedetti A, Sena-Cruz J, Azenha M. 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* 2015;75(0):95-103.

Durabilidade de um adesivo epóxi e um laminado de CFRP expostos a distintas condições ambientais

Pedro Fernandes ¹, Patrícia Silva ², Luís Correia ³ e José Sena-Cruz ⁴

¹ ISISE/Universidade do Minho, Guimarães, pfernandes@civil.uminho.pt

² ISISE/Universidade do Minho, Guimarães, patricia.silva@civil.uminho.pt

³ ISISE/Universidade do Minho, Guimarães, lcorreia@civil.uminho.pt

⁴ ISISE/Universidade do Minho, Guimarães, jsena@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Adesivo epóxi; laminado de CFRP; durabilidade; ensaios de envelhecimento acelerado; ações ambientais.

RESUMO

No contexto das estruturas reforçadas, os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) são normalmente colados aos elementos a reforçar através de adesivos epóxicos. Nas duas últimas décadas tem sido desenvolvida significativa investigação, dedicada principalmente ao comportamento estrutural a curto prazo de estruturas reforçadas e raramente foi considerado a avaliação do tempo de vida útil da estrutura. A previsão do tempo de vida útil de uma estrutura requiere a avaliação da durabilidade dos materiais envolvidos. O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o conhecimento de dois materiais específicos, um laminado de CFRP e um adesivo epoxídico, amplamente utilizados neste contexto. Para esse efeito, foi desenvolvido um programa experimental para avaliar a degradação das propriedades mecânicas em tração destes materiais devido ao efeito de cinco ações ambientais distintas: (i) ciclos térmicos; (ii) ciclos de gelo-degelo; (iii) imersão em água pura; (iv) imersão em água com cloretos; e, (v) ciclos de molhagem-secagem em água com cloretos. Os resultados obtidos indicam que a imersão em água pura foi o ambiente mais crítico para as amostras de epóxi, verificando-se uma redução da resistência máxima de 38% após dois anos de exposição. Os resultados também mostraram que os provetes de CFRP não apresentaram alterações significativas nas suas propriedades à tração, sendo o máximo decréscimo de 7% na tensão máxima.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP) no reforço de estruturas existentes constitui uma alternativa viável quando comparados com os materiais convencionais como o aço e o betão, sobretudo devido às vantagens que apresentam em relação a estes. Em geral, estes materiais podem ser designados de acordo com o tipo de fibras (carbono, vidro, aramida e basalto), da forma (laminados, mantas ou varões) e o sistema (pré-fabricados, curados *in situ* e *prepeg*). Os sistemas pré-fabricados são produzidos por pultrusão ou laminação e pré-curados sendo aplicados diretamente no elemento a reforçar, enquanto que os sistemas curados *in situ* são sistemas constituídos por mantas ou tecidos de fibras que podem ser aplicados em superfícies retas e convexas devido à sua flexibilidade, e em várias direções. Os sistemas *prepeg* são mantas ou tecidos unidirecionais ou multidirecionais pré-impregnados na fase de produção e parcialmente polimerizados com resina [1].

Várias técnicas de reforço com FRP têm sido desenvolvidas ao longo das últimas três décadas, sendo as técnicas mais comuns: (i) a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) em que os FRP são colados externamente sobre a superfície do elemento estrutural a reforçar; e (ii) a NSM (*Near-Surface Mounted*) em que os laminados (ou varões) são inseridos em ranhuras abertas no betão de recobrimento. Devido à

sua baixa densidade, elevada resistência à tração e rigidez o FRP de carbono (CFRP) é o FRP mais usado para o caso de estruturas de betão. A ligação entre os FRP e a superfície de betão é um fator importante para o sucesso e eficiência da técnica de reforço. Normalmente a ligação é feita através de adesivos estruturais. Vários estudos mostram que CFRP colados com adesivo epóxi podem aumentar a capacidade máxima de carga e melhorar o comportamento em serviço das estruturas de betão armado [2, 3, 4].

Quando o sistema de reforço está exposto a diferentes condições ambientais, a evolução e variação das propriedades dos materiais envolvidos, bem como o sistema CFRP/epóxi/betão devem ser conhecidas, uma vez que desempenham um papel fundamental na viabilidade e tempo de vida útil da solução de reforço. Contudo, poucos trabalhos podem ser encontrados na literatura que abordem este tópico, e.g. [5, 6, 7].

A presente comunicação tem como objetivo contribuir para o conhecimento existente na durabilidade de dois materiais, nomeadamente laminado de CFRP e um adesivo epóxi. Para este efeito, com recurso a ensaios de envelhecimento acelerado, um extenso programa experimental de ensaios de tração realizados com laminados de CFRP e um adesivo epóxi, em provetes previamente expostos às seguintes condições ambientais: (i) ciclos térmicos; (ii) ciclos de gelo-degelo; (iii) imersão em água pura; (iv) imersão em água com 3.5% de cloretos; e, (v) ciclos de molhagem-secagem em água com 3.5% de cloretos. Adicionalmente, provetes de referência (ambiente de laboratório), sem qualquer tipo de ação de envelhecimento foram também testados. Dependendo da condição ambiental o período de exposição variou entre 120 e 720 dias.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Adesivo epóxi e laminado de CFRP

O presente trabalho detalha o programa experimental, realizado com o objetivo de identificar e avaliar a influência de várias condições ambientais nas propriedades mecânicas do laminado de CFRP e um adesivo epoxídico amplamente utilizados pela indústria no reforço e reabilitação estrutural.

Os laminados de CFRP utilizados no presente trabalho, com secção transversal de 1.4 mm de espessura e 10 mm de largura, designação comercial *CFK 150/2000*, foram produzidos pela empresa S&P® Clever Reinforcement Ibérica e fornecido em rolos de 50 - 100 metros cada. Este laminado é constituído por fibras de carbono unidireccionais (percentagem em peso de cerca de 70%) solidarizadas através de uma matriz de *vinylester*, e apresenta uma superfície lisa. De acordo com o fabricante, o módulo de elasticidade e a resistência à tração devem ser superiores a 165 GPa e 2000 MPa, respetivamente [8].

O adesivo epoxídico usado neste trabalho foi também fornecido pela mesma empresa, com a denominação comercial *S&P Resin 220*. Trata-se de um adesivo epóxi bicomponente sem solventes, tixotrópico, que foi especialmente desenvolvido para colagem de laminados de fibra de carbono (S&P laminates CFK). De acordo com a ficha técnica do fabricante, o módulo de elasticidade é superior a 7.1 GPa; os valores médios da resistência à tração em flexão, a resistência à compressão e a tensão de aderência betão/laminado deste adesivo são respetivamente iguais a 30 MPa, 90 MPa e 3 MPa [9].

2.2. Descrição do programa experimental

O programa experimental foi composto por 72 amostras de adesivo epóxi (*dog bone geometry*) e 60 provetes de laminado de CFRP. Os provetes foram agrupados em 6 séries como mostra a Tabela 1. Cada série, composta por 6 provetes, foi submetida a diferentes ações ambientais por um período de tempo que variou de 120 a 720 dias de exposição.

A série S0 foi usada como ambiente de referência (ADH_REF720, FRP_REF), i.e. os provetes foram mantidos em ambiente de laboratório durante dois anos a uma média de 20 °C de temperatura e 56% de humidade relativa. No caso do epóxi, foi considerada uma série adicional (ADH_REF) que foi ensaiada

no início do programa experimental. O efeito das ações térmicas foi estudado através das séries S1 e S2, através de ciclos térmicos (TC) e ciclos de gelo/degelo (FT). Para estas ações, duas subséries foram definidas: provetes envelhecidos durante 120 e 240 dias, (TC120 e FT120) e (TC120 e TC240), respetivamente. Para ambos os casos, cada ciclo teve uma duração de 24 horas. Para a série S1, o ciclo térmico foi definido com base na norma EN 13687-3:2002 [10], tendo uma variação de temperaturas entre $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (com patamares de 12.5 e 10 horas para as duas temperaturas extremas). Os ciclos de gelo/degelo foram efetuados entre $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de acordo com a norma CEN/TS 12390-9:2006 [11] e imersos em água no período do ciclo em que as temperaturas eram positivas. Para além das ações ambientais atrás referidas, como mostra a Tabela 1, foram consideradas mais três ações ambientais: provetes imersos em água pura a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (série S3 - PW); provetes imersos em água a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ com 3.5% de cloretos (série S4 - CW); e provetes submetidos a ciclos de molhagem-secagem com água a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ e com 3.5% de cloretos (série S5 - WD). Para estas séries metade dos provetes foram submetidos a estas ações durante 360 dias, enquanto que a outra metade continuou nas condições de envelhecimento até aos 720 dias.

Para cada série foi atribuída a denominação genérica: X_YZ, em que X representa o tipo de material (ADH – adesivo epóxi; FRP – laminado de CFRP), Y indica a ação ambiental a que os provetes foram sujeitos (REF – ambiente de laboratório - referência, TC – ciclos térmicos, FT – ciclos de gelo/degelo, PW – água pura, CW – água com cloretos, WD – molhagem/secagem em água com cloretos) e Z é o número de dias que os provetes foram submetidos à correspondente ação ambiental.

Tabela 1: Programa experimental.

| Séries | Ação ambiental | Adesivo epóxi | Laminado de CFRP |
|--------|---|------------------------|------------------------|
| S0 | Ambiente de laboratório (referência) | ADH_REF ADH_REF720 | FRP_REF |
| S1 | Ciclos térmicos | ADH_TC120 ADH_TC240 | FRP_TC120 FRP_TC240 |
| S2 | Ciclos de gelo/degelo | ADH_FT120 ADH_FT240 | FRP_FT120 FRP_FT240 |
| S3 | Imersão em água pura a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ | ADH_PW360 ADH_PW720 | FRP_PW360 FRP_PW720 |
| S4 | Imersão em água a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ com 3.5% de cloretos | ADH_CW360 ADH_CW720 | FRP_CW360 FRP_CW720 |
| S5 | Ciclos de molhagem/secagem com água a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ com 3.5% de cloretos | ADH_WD360 ADH_WD720 | FRP_WD360 FRP_WD720 |

2.3. Geometria dos provetes e configuração de ensaio

As propriedades mecânicas, nomeadamente à tração, do adesivo epóxi e do laminado de CFRP foram avaliadas de acordo com as normas ISO 527-2:1993 [12] e ISO 527-5:1997 [13], respetivamente, depois de serem submetidos às ações de envelhecimento. No caso do adesivo epóxi foram usados uns moldes especiais para preparar os provetes, enquanto que no caso dos laminados de CFRP foram cortados diretamente do rolo com as dimensões exigidas.

As amostras de epóxi foram ensaiadas numa máquina universal, em controlo deslocamento à velocidade de 1 mm/min . Foi utilizada uma célula de carga com capacidade máxima de 50 kN (precisão de $1/1000 \pm 0.5\%$) para medir as forças aplicadas. Para avaliar o módulo de elasticidade e as extensões foi utilizado um clip gauge de 50 mm de comprimento na região central do provete ou através de um extensómetro (TML BFLA-5-3-3L) (ver Figura 1a). Os laminados de CFRP foram também ensaiados numa máquina universal em controlo deslocamento à velocidade de 2 mm/min . Nos provetes de CFRP a força aplicada foi medida com uma célula de 200 kN de capacidade máxima e as extensões foram medidas através de um clip gauge de 50 mm de comprimento na região central do provete (ver Figura 1b).

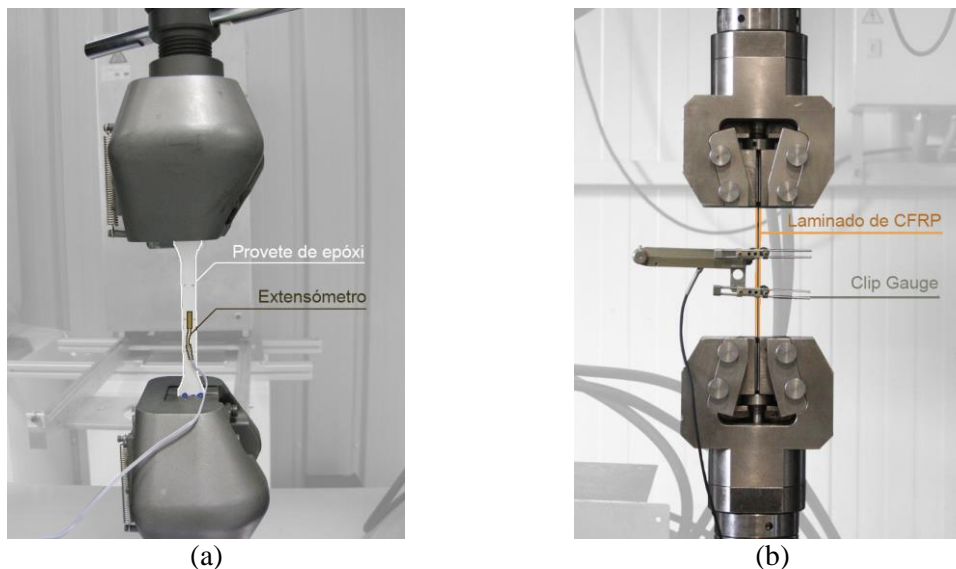


Figura 1: Configuração de ensaio adotada: (a) adesivo epóxi; (b) laminado de CFRP.

3. RESULTADOS

3.1. Adesivo epóxi

Figura 2a apresenta um exemplo típico da relação tensão *versus* extensão obtida nos ensaios de tração realizados no adesivo epóxi. Na Tabela 2 são apresentadas os valores médios e respetivos coeficientes de variação (CoV) relativos às propriedades mecânicas do adesivo epóxi obtidos a partir de 6 amostras por série, submetidos às diferentes condições ambientais consideradas (ver secção 2). As propriedades avaliadas foram: resistência à tração (f_{ult}), módulo de elasticidade (E_{adh}) e extensão corresponde à tensão máxima (ϵ_{ult}). A partir dos resultados as principais conclusões podem ser retiradas: (i) um aumento da tensão máxima e do módulo de elasticidade para as séries ADH_TC120 e ADH_TC240; (ii) um decréscimo na tensão máxima e no módulo de elasticidade para os provetes sujeitos a ciclos de gelo-degelo; e, por último, (iii) um decréscimo generalizado da tensão máxima e do módulo de elasticidade para as séries S3, S4 e S5.

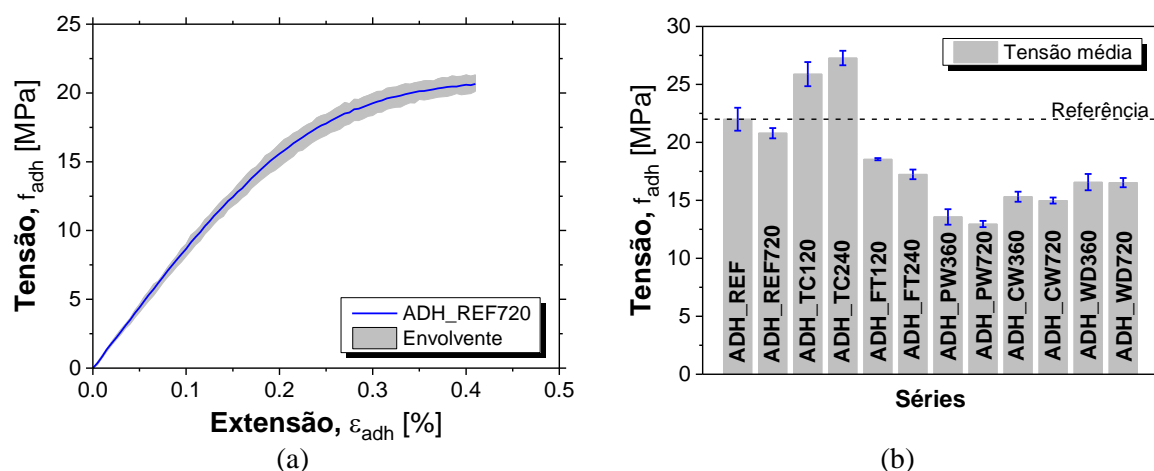


Figura 2: Adesivo epóxi: (a) curva típica tensão *versus* extensão; (b) resistência à tração obtida para cada série.

A resistência à tração aumentou 18% e 24% para as subséries ADH_TC120 e ADH_TC240 (séries S1), respetivamente, quando comparadas com a série de referência ADH_REF (ver Figura 2b). A ficha técnica do adesivo epóxi não disponibiliza qualquer informação sobre o processo de cura e pós-cura do material. Contudo Moussa *et al.* [14] reportam que, dependendo do tipo de resina, é comum a existência

de uma fase pós-cura, que melhora as propriedades mecânicas do epóxi. Este processo começa quando o material é exposto a temperaturas superiores à temperatura da primeira cura.

Para as séries S2 (ciclos de gelo-degelo) a tendência esperada foi observada, i.e. verificou-se uma degradação das propriedades mecânicas devido ao envelhecimento. Para os provetes sujeitos a 120 e 240 ciclos (FT120 e FT240) verificou-se uma diminuição de cerca de 15% e 21% da resistência à tração do adesivo, respetivamente. O efeito da duração da ação ambiental, também representa um fator importante na variação das propriedades mecânicas, sendo maior para os provetes envelhecidos para períodos de exposição mais longos. Finalmente, deve ser referido que para estas séries a fase de pós-cura não ocorreu uma vez que as temperaturas aplicadas variaram entre $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabela 2: Resistência à tração, módulo de elasticidade e extensão última obtida nos ensaios à tração no adesivo epóxi (valores médios).

| Séries | f_{Adh} [MPa] | E_{Adh} [GPa] | ϵ_{Adh} [%] |
|------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| ADH_REF | 22.00 (4.52%) | 7.15 (3.71%) | 0.36 (15.22%) |
| ADH_REF720 | 20.79 (2.16%) | 6.66 (3.41%) | 0.43 (6.10%) |
| ADH_TC120 | 25.88 (4.02%) | 7.50 (3.15%) | 0.39 (10.76%) |
| ADH_TC240 | 27.27 (2.28%) | 7.64 (4.66%) | 0.43 (5.27%) |
| ADH_FT120 | 18.55 (0.55%) | 5.93 (1.36%) | 0.48 (6.12%) |
| ADH_FT240 | 17.24 (2.45%) | 5.54 (1.75%) | 0.45 (11.78%) |
| ADH_PW360 | 13.57 (4.89%) | 4.10 (3.01%) | 0.55 (23.78%) |
| ADH_PW720 | 12.96 (2.06%) | 3.52 (3.31%) | 0.75 (14.07%) |
| ADH_CW360 | 15.31 (2.86%) | 4.72 (3.47%) | 0.50 (10.57%) |
| ADH_CW720 | 14.99 (1.73%) | 4.36 (1.45%) | 0.68 (11.39%) |
| ADH_WD360 | 16.57 (4.24%) | 5.43 (2.76%) | 0.39 (18.20%) |
| ADH_WD720 | 16.53 (2.45%) | 5.20 (3.24%) | 0.51 (13.55%) |

Note: Os valores entre parêntesis são os correspondentes coeficientes de variação (CoV).

As restantes séries (S3, S4 e S5) apresentaram rácios de degradação mais elevados, quando comparadas com as séries S1 e S2. Como foi referido anteriormente, o tempo pode ser um fator importante na evolução das propriedades mecânicas. Assim, para estes provetes que foram envelhecidos por períodos de tempo mais longos, todas as comparações foram feitas em relação a ADH_REF720 (provetes mantidos em ambiente de laboratório durante 720 dias). Os resultados mostram que nos provetes imersos em água pura (série S3) tiveram a maior taxa de degradação (-34% e -38% para as subséries ADH_PW360 e ADH_PW720, respetivamente).

Os adesivos epoxídicos absorvem água (humidade) e, como consequência ocorre a plasticização, aumentando o seu volume, provocando a degradação e correspondente diminuição das suas propriedades mecânicas, nomeadamente: a rigidez, resistência à tração e a diminuição da temperatura de transição vítrea [15, 16]. El Yagoubi *et al.* [16] explicam que o fenómeno de hidrólise observado quando este tipo de materiais são sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, é caracterizado por reações químicas ao nível molecular que provocam a rotura das cadeias poliméricas. As séries S4 e S5 apresentam um menor rácio de degradação em comparação com os provetes imersos em água pura (série S3). Este facto pode estar relacionado com a presença dos cloretos, que não penetram no epóxi, e ao mesmo tempo desenvolvem uma membrana semipermeável. Como consequência, o processo de degradação ocorre de uma forma mais lenta [17].

Em resumo, as propriedades mecânicas do adesivo epóxi diminuem devido à presença da água. Por outro lado, para a série S1, devido à pós-cura que ocorreu devido à gama de temperaturas aplicadas, provocou um aumento das propriedades mecânicas.

3.2. Laminado de CFRP

A relação típica da tensão *versus* extensão obtida nos ensaios de tração dos laminados de CFRP é apresentada na Figura 3a (série FRP_CW720), enquanto que a Tabela 3 inclui as propriedades mecânicas em termos de valores médios, nomeadamente tensão última (f_{FRP}), módulo de elasticidade (E_{FRP}) e extensão última, correspondente à tensão máxima (ϵ_{FRP}), determinados a partir de 6 amostras por subsérie, para todos os provetes ensaiados. De uma maneira geral, os laminados de CFRP parecem suportar as ações de envelhecimento a que foram expostos, sem grandes perdas das suas propriedades mecânicas (ver Figura 3b). O máximo decréscimo (7%) da resistência à tração ocorreu para as séries FRP_CW720 e FRP_WD720, quando comparadas com a série de referência FRP_REF. Para os mesmos provetes observou-se uma redução de 5% a 6% na extensão última. Os provetes imersos em água pura durante 720 dias tiveram uma redução de 3% da resistência à tração. Os provetes expostos aos ciclos térmicos e gelo-degelo mantiveram as suas propriedades originais. Apesar da ligeira diminuição de 7% nas series S4 e S5 poder-se considerar desprezável, este resultado indica que a exposição aos cloretos (completamente imersos ou exposto a ciclos de molhagem/secagem) pode ser prejudicial ao sistema de reforço com laminados de CFRP.

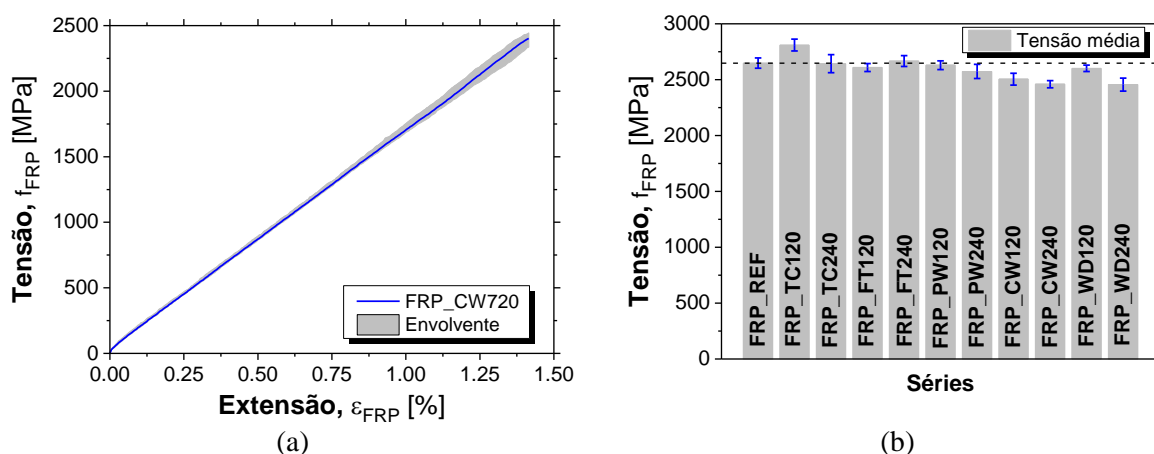


Figura 3: Laminado de CFRP: (a) curva típica tensão *versus* extensão; (b) resistência à tração obtida para cada série.

Tabela 3: Resistência à tração, módulo de elasticidade e extensão última obtida nos ensaios à tração no laminado de CFRP (valores médios).

| Séries | f_{FRP} [MPa] | E_{FRP} [GPa] | $\epsilon_{FRP,u}$ [%] |
|-----------|-----------------|-----------------|------------------------|
| FRP_REF | 2648.26 (1.76%) | 169.48 (2.50%) | 1.563 (1.80%) |
| FRP_TC120 | 2809.86 (1.89%) | 169.56 (2.62%) | 1.648 (3.54%) |
| FRP_TC240 | 2642.79 (3.04%) | 169.42 (2.37%) | 1.560 (2.03%) |
| FRP_FT120 | 2609.14 (1.37%) | 166.05 (1.79%) | 1.572 (2.64%) |
| FRP_FT240 | 2666.74 (1.82%) | 169.66 (2.08%) | 1.573 (3.56%) |
| FRP_PW360 | 2629.58 (1.48%) | 166.48 (2.87%) | 1.582 (2.65%) |
| FRP_PW720 | 2573.58 (2.46%) | 165.44 (2.46%) | 1.557 (4.20%) |
| FRP_CW360 | 2504.52 (2.13%) | 170.13 (2.69%) | 1.482 (3.53%) |
| FRP_CW720 | 2459.38 (1.31%) | 167.30 (0.68%) | 1.467 (1.19%) |
| FRP_WD360 | 2601.36 (1.12%) | 165.08 (5.05%) | 1.580 (6.25%) |
| FRP_WD720 | 2455.77 (2.34%) | 166.12 (0.82%) | 1.479 (2.97%) |

Note: Os valores entre parêntesis são os correspondentes coeficientes de variação (CoV).

4. CONCLUSÕES

Foi realizado um programa experimental para avaliar a durabilidade de dois materiais comuns, utilizados no reforço de estruturas de betão armado: um adesivo epoxídico e um laminado de CFRP. Para tal, os materiais, foram expostos a diferentes condições ambientais. De acordo com os resultados obtidos as principais conclusões podem ser retiradas: (i) os provetes de CFRP apresentam perdas desprezáveis nas

propriedades mecânicas; (ii) os ciclos térmicos causaram uma pós-cura do epóxi que explica o aumento da resistência e rigidez; (iii) redução da tensão máxima e do módulo de elasticidade do epóxi devido à presença da água, nas séries S3, S4 e S5; e finalmente, (iv) o adesivo epóxi estudado parece ser mais suscetível à degradação quando imerso em água pura.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado por fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT - Fundação Português de Ciência e Tecnologia no âmbito do projecto FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012. O primeiro, segundo e terceiro autores agradecem também as bolsas SFRH/BD/80338/2011, SFRH/BD/89768/2012 e SFRH/BD/98309/2013, respetivamente, financiadas pela FCT. Os autores deste trabalho querem também agradecer a todas as empresas que apoiaram e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente, à S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda., Casais – Engenharia & Construção S.A., Artercanter - Indústria de Transformação de Granitos, Lda., Tecnipor - Gomes & Taveira Lda., Vialam – Indústrias Metalúrgicas e Metalomecânicas, Lda., Hilti Portugal-Produtos e Serviços, Lda., Novo Modelo Europa, S.A., Sika Portugal - Produtos Construção e Indústria, S.A., Cachapuz - Equipamentos para Pesagem, Lda.

REFERÊNCIAS

- [1] FIB, 2001, Fib Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Fédération internationale du béton (fib): 138 pp. Lausanne, Switzerland.
- [2] Sena-Cruz, J., J. A. O. Barros, M. R. F. Coelho, and L. F. F. T. Silva, 2012, Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading. *Construction and Building Materials*, 29, 175-182, 4.
- [3] Michels, J., J. Sena-Cruz, C. Czaderski, and M. Motavalli, 2013, Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage. *Journal of Composites for Construction*, 17, 651-661.
- [4] Correia, L., T. Teixeira, J. Sena-Cruz, and J. Michels, (2014) Flexural strengthening of RC slabs with prestressed CFRP strips using different anchorage systems, presented at the 7th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2014), Vancouver, Canadá.
- [5] Silva, P., P. Fernandes, J. Sena-Cruz, M. Azenha, and J. Barros, 2014a, Creep behavior and durability of concrete elements strengthened with NSM CFRP strips. 7th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2014), Vancouver, Canada.
- [6] Silva, P., P. Fernandes, J. Sena-Cruz, M. Azenha, and J. Barros, 2014a, Behaviour of concrete elements strengthened with near surface mounted CFRP strips under thermal cycles. 7th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2014), Vancouver, Canada.
- [7] Myers, J. J., and N. P. Muncy, 2014, Long term in-situ bond behavior of externally bonded fiber reinforced polymer laminates subjected to environmental conditioning. 7th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2014), Vancouver, Canada.
- [8] S&P, 2014, Technical Data Sheet. S&P CFRP – Laminates. S&P slot-applied laminates. S&P Clever Reinforcement: 6pp.
- [9] S&P, 2013, Technical Data Sheet. S&P Resin 220 epoxy adhesive. S&P Clever Reinforcement: 3pp.
- [10] BSI, 2002, BS EN 13687-3. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of thermal compatibility. Thermal cycling without de-icing salt impact. British Standard Institution (BSI): 12pp. London, England.
- [11] BSI, 2006, DD CEN/TS 12390-9. Testing hardened concrete. Freeze-thaw resistance. Scaling. British Standard Institution (BSI): 12pp. London, England.
- [12] ISO, 1993, 527-2 1993. Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. International Organization for Standardization (ISO): 5pp. Genève, Switzerland.

- [13] ISO, 1997, 527-5:1997. Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites. ISO - International Organization for Standardization, Genève, 11 pp.
- [14] Moussa, O., A. P. Vassilopoulos, J. de Castro, and T. Keller, 2012, Time-temperature dependence of thermomechanical recovery of cold-curing structural adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 35, 94-101.
- [15] Cabral-Fonseca, S., J. R. Correia, M. P. Rodrigues, and F. Branco, 2012, Artificial Accelerated Ageing of GFRP Pultruded Profiles Made of Polyester and Vinylester Resins: Characterisation of Physical-Chemical and Mechanical Damage. *Strain*. 48, 162-173.
- [16] El Yagoubi, J., G. Lubineau, S. Saghir, J. Verdu, and A. Askari, 2014, Thermomechanical and hygroelastic properties of an epoxy system under humid and cold-warm cycling conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 99, 146-155.
- [17] Jones F.R., 1999, Durability of reinforced plastics in liquid environments. *Reinforced Plastics Durability*, 70-110.

Comparação entre modelos constitutivos de interface: abordagem total *versus* abordagem com plasticidade

M. Coelho¹, A. Caggiano², J. Sena-Cruz³, L. Neves⁴

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

² Universidade de Buenos Aires, Argentina, acaggiano@fi.uba.ar

³ ISE/Universidade do Minho, Guimarães, jsena@civil.uminho.pt

⁴ Universidade de Nottingham, Reino Unido, luis.neves@nottingham.ac.uk

Palavras-chave: Método dos elementos finitos; Modelos constitutivos de interface; NSM

RESUMO

Nos últimos anos, a técnica de inserção de polímeros reforçados com fibras (FRP) no recobrimento de betão tem sido cada vez mais utilizada para reforçar estruturas de betão (técnica NSM). Este artigo apresenta os resultados obtidos em simulações numéricas de ensaios de arranque direto efetuados em cubos de betão reforçados com sistemas de FRP NSM. Duas estratégias diferentes são usadas para simular a interface entre o FRP e o betão envolvente. Uma estratégia baseia-se em expressões analíticas conhecidas a priori, enquanto a outra se baseia na teoria clássica de plasticidade com escoamento. Os resultados revelaram que ambas as estratégias são capazes de simular o comportamento global obtido nos ensaios de arranque.

1. INTRODUÇÃO

No contexto do reforço das estruturas de betão, o uso de polímeros reforçados com fibras (FRP) tem surgido nas últimas décadas como uma boa alternativa aos materiais tradicionais. A sua elevada rigidez e resistência à tração, baixo peso, os procedimentos de instalação simples, alta durabilidade (sem corrosão), permeabilidade eletromagnética e a disponibilidade praticamente ilimitada em termos de geometria e tamanho são as principais vantagens dos FRP [1].

As técnicas mais utilizadas consistem em usar o FRP colado externamente (EBR) ou inserido no recobrimento (NSM) dos elementos a reforçar. Uma vez que o FRP é inserido no betão, verifica-se que a técnica NSM apresenta várias vantagens quando comparada com a EBR. Além disso, também tem sido demonstrado que os sistemas de FRP NSM constituídos por varões retangulares colados com uma resina epóxi são os mais eficientes do ponto de vista da utilização do FRP [2]. Por estas razões, neste trabalho, a técnica NSM com varões retangulares (também designados laminados) de FRP é abordada.

Um aspeto crucial em técnicas baseadas em sistemas de FRP consiste em perceber como é que as tensões são transferidas do elemento de betão para o FRP. Este fenómeno é geralmente estudado através de ensaios de arranque e complementado com simulações numéricas (por exemplo, [3]). O presente trabalho apresenta a simulação numérica, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), de ensaios de arranque com FRP NSM.

Para simular tais ensaios de arranque, é necessário considerar três materiais (betão, FRP e adesivo), e ainda as duas interfaces existentes (FRP/adesivo e adesivo/betão). Em relação aos três materiais, já existem bons modelos constitutivos disponíveis que podem ser usados para simular o comportamento quasi-frágil do betão e do adesivo, e o comportamento elástico do FRP.

Em relação às interfaces, a mesma abundância de modelos constitutivos não se verifica. Na verdade, o processo mais vulgarmente usado para simular as interfaces de sistemas de FRP NSM consiste em adotar uma expressão analítica que funciona como modelo constitutivo para as interfaces. Alguns exemplos do uso desta estratégia podem ser encontrados na literatura [3-5], que demonstram que já existem várias expressões analíticas suscetíveis de ser utilizadas para este fim. A simulação numérica consiste em, por ajuste aos resultados experimentais, calibrar os parâmetros da expressão analítica adotada.

A principal desvantagem desta estratégia reside no facto de a referida expressão analítica necessitar de ser conhecida *a priori*, quando esta deveria ser obtida no fim da simulação MEF. Além disso, esta expressão não tem significado físico direto. Na verdade, pode dizer-se que simula o comportamento estrutural total e não o comportamento local das interfaces. Por estas razões, esta estratégia é designada de abordagem total neste trabalho.

Para resolver estes problemas, neste trabalho, é adotada uma estratégia diferente, utilizando um modelo constitutivo disponível na literatura. Embora este modelo tenha sido inicialmente desenvolvido para materiais frágeis, este também já foi adaptado no passado para simular elementos de betão reforçados com laminados de FRP, utilizando a técnica EBR [6]. Os resultados aí obtidos foram muito bons pelo que se tentou agora utilizar esse mesmo modelo no contexto da técnica NSM. Uma vez que o modelo é baseado na teoria clássica da plasticidade com escoamento, esta estratégia foi designada de abordagem com plasticidade. Os seguintes parágrafos detalham ambos os tipos de abordagens e os resultados obtidos através das simulações MEF realizadas.

2. MODELOS DE INTERFACE

O modelo utilizado na abordagem total é descrito pela equação (1). Nesta equação, τ_m e s_m são a resistência da ligação e o correspondente deslizamento, respetivamente; α e α' definem a forma da lei de aderência nos tramos pré e pós-pico, respetivamente. Assim, esta equação traduz a evolução da tensão tangencial com o deslizamento tangencial na interface.

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^\alpha & \text{if } s \leq s_m \\ \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^{-\alpha'} & \text{if } s > s_m \end{cases} \quad (1)$$

O modelo com plasticidade é formulado no contexto da teoria clássica da plasticidade com escoamento. Por uma questão de brevidade, aqui apenas se apresentam a função de cedência ($f(\tau, W)$) na equação (2) e a lei de amolecimento adotada para a tensão tangencial (3). O modelo é formulado em termos da relação entre o trabalho, W , e a energia de fratura disponível em modo de fratura II, G_f'' . Em particular, a evolução do amolecimento pós-pico é por sua vez formulada por meio do parâmetro adimensional apresentado na equação (4). Nas equações abaixo, τ_m é a tensão tangencial, $\tau_{m,0}$ a resistência da ligação e α é um parâmetro de forma da lei de amolecimento.

$$f(\tau, \kappa) = \tau^2 - \tau_m^2 \leq 0 \quad (2)$$

$$\tau_m = \tau_{m,0} \left[1 - \frac{e^{-\alpha} \xi}{1 + (e^{-\alpha} - 1) \xi} \right] \quad (3)$$

$$\xi = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi W}{G_f''} \right) \right] & \text{if } 0 \leq W \leq G_f'' \\ 1 & \text{if } W > G_f'' \end{cases} \quad (4)$$

O trabalho apresentado neste artigo foi desenvolvido no software de análise estrutural FEMIX 4.0 [7]. O modelo da abordagem total já foi implementado no software e validado em vários trabalhos anteriores (por exemplo, [3]). Contrariamente, o modelo da abordagem com plasticidade foi apenas recentemente implementado, assim, a sua implementação e validação serão apresentadas em primeiro lugar.

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Para avaliar o desempenho de ambas as abordagens, foram realizadas simulações MEF de ensaios de arranque direto (DPT). Os ensaios são similares aos descritos em [8]. A Figura 1a mostra um provete genérico, que consiste num cubo de betão simples com 200 milímetros de aresta. Num dos lados do provete foi feito um entalhe e um laminado de CFRP foi colado no seu interior utilizando um adesivo epóxi. O entalhe foi cortado ao longo da altura desse lado com 15 mm de profundidade e 5 mm de largura. O laminado era de 1.4 mm de espessura, 10 mm de largura e 400 mm de comprimento de modo a alcançar a amarra da máquina de ensaio. No topo do cubo de betão foi colocada uma chapa de aço com 20 mm de espessura. Esta foi fixa à base por quatro varões roscados de aço. Nos varões foi aplicado um momento de aperto de 30 N×m.

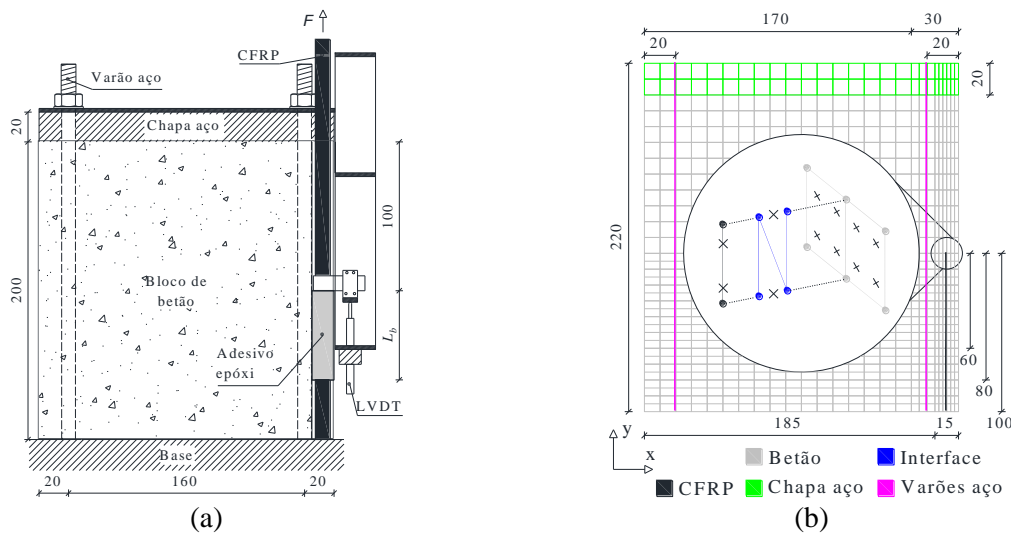


Figura 1: Ensaios de arranque direto: (a) geometria e configuração de ensaio; (b) malha de elementos finitos adotada. Nota: as dimensões são em milímetros.

Para evitar a rotura prematura do provete devido à formação de um cone de betão perto do topo, o comprimento de amarração, L_b , foi iniciada a 100 mm do topo do provete, prolongando-se para baixo. Foram ensaiadas três séries diferentes, sendo a única diferença entre elas o comprimento de amarração L_b . Este foi definido como 60, 80 e 100 mm. Cada série continha três exemplares iguais.

Um transdutor de deslocamento (LVDT) registou os deslocamentos relativos entre o CFRP e o betão, enquanto a força aplicada F foi registada por uma célula de carga.

A partir da caracterização dos materiais realizada foram obtidos os módulos de elasticidade de 28.4 GPa e 165.0 GPa para o betão e o CFRP, respetivamente. Em relação aos resultados dos ensaios DPT, na Tabela 1 apresentam-se os valores da máxima força de arranque obtida em cada série. Enquanto na série

com L_b 60 a rotura ocorreu por deslizamento na interface entre o laminado de CFRP e o adesivo epóxi, nas outras duas séries a rotura ocorreu por tração no laminado de CFRP.

Uma vez que no DPT não foi verificado dano no adesivo e/ou no betão, e devido ao facto de o laminado de CFRP ter um comportamento elástico linear, nas simulações MEF, todos os materiais foram simulados com comportamento linear elástico usando os módulos de elasticidade referidos acima.

Neste trabalho apenas são apresentadas simulações MEF 2D, assim, o adesivo não foi explicitamente simulado. Em alternativa, o seu comportamento foi considerado em conjunto com o comportamento de ambas as interfaces existentes (CFRP/adesivo e adesivo/betão). Assim, toda a não-linearidade verificada na resposta experimental foi simulada por meio do modelo constitutivo adotado para a interface entre o laminado de CFRP e o substrato de betão.

A Figura 1b apresenta a malha MEF adotada. Os ensaios experimentais foram simulados como um problema em estado plano de tensão, assim, apenas a superfície média do provete foi simulada, sendo a totalidade do volume representada pelos diferentes valores de espessura atribuídos a cada parte da malha. Ambos, bloco de betão e chapa de aço, foram modelados com elementos de Serendipity de 4 nós (com esquema de integração de Gauss-Legendre 2×2). O laminado de CFRP e os varões de aço foram modelados com elementos de 2 nós de cabo e pórtico 2D, respetivamente, ambos com 2 pontos de integração de Gauss-Legendre. Por último, os elementos de interface foram modeladas com elementos de interface de linha de 4 nós e dois pontos de integração de Gauss-Lobatto. A única diferença entre as malhas adotadas nas três séries analisadas, encontra-se no comprimento de amarração, ou seja, no número de pares de elementos de interface/CFRP que foram usados.

As condições de suporte dos ensaios foram simuladas bloqueando o deslocamento vertical na base do bloco de betão, uma vez que foi verificado experimentalmente que o deslocamento vertical do bloco era negligenciável. Além disso, o efeito do pré-esforço nos varões de aço foi simulado através da aplicação de uma variação de temperatura uniforme equivalente ao momento de aperto aplicado nos ensaios.

A força de arranque foi aplicada por meio de um deslocamento prescrito no nó superior do elemento de CFRP.

4. RESULTADOS

Uma vez que apenas na série L_b 60 o modo de rotura ocorreu por mecanismos de descolagem, as simulações começaram por esta série, a fim de calibrar os parâmetros de cada tipo de modelo de interface. No final, os parâmetros obtidos para o modelo de abordagem total foram: 0.3 mm, 23.0 MPa, 0.6 e 0.7 para s_m , τ_m , e α e α' , respetivamente. Na abordagem com plasticidade os parâmetros obtidos foram: 20.0 MPa, 0, 30.0 N/mm e 145.0 N·mm para $\tau_{m,0}$, α , G_f e rigidez tangencial elástica, respetivamente. O comportamento na direção normal foi considerado elástico em ambas as abordagens. Isto foi conseguido através da atribuição de um valor elevado para a rigidez normal em ambos os modelos de interface. No entanto, vale a pena ressaltar que se os valores da rigidez normal forem demasiado elevados podem criar problemas no cálculo da matriz de rigidez global.

Em seguida, utilizando os conjuntos de parâmetros de entrada encontrados para os modelos de interface, as outras duas séries foram simuladas. Assim, a única diferença entre as simulações das três séries residia no comprimento de amarração, tudo o resto permaneceu exatamente igual.

A Tabela 1 resume os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas. A Figura 2a-c apresenta a resposta completa obtida em cada série de DPT. São apresentadas ambas as envolventes, experimental e MEF, com as abordagens total e com plasticidade. Os deslizamentos MEF foram lidos no ponto de integração do elemento de interface mais perto da extremidade carregada, enquanto a força de arranque foi lida no nó de CFRP onde o deslocamento prescrito foi aplicado.

Nesta mesma figura, a lei local tensão-deslizamento tangenciais adotada por cada abordagem é apresentada (Figura 2d). De notar que, enquanto para a abordagem total esta lei era conhecida desde o princípio, na abordagem com plasticidade esta só foi obtida no final da simulação MEF analisando os deslizamentos e tensões no ponto de integração do elemento de interface mais perto da extremidade carregada.

Tabela 1: Resultados dos DPT (em kN).

| Série | Força de arranque máxima | | |
|-----------|---------------------------|------------------------------|---|
| | Experimental ^a | Abordagem total ^b | Abordagem com plasticidade ^b |
| L_b 60 | 26.72 (3.67%) | 26.55 (0.65%) | 26.58 (0.54%) |
| L_b 80 | 36.52 (1.71%) | 32.40 (11.3%) | 33.78 (7.50%) |
| L_b 100 | 36.60 (2.43%) | ^c | ^c |

^a valor em parêntesis é o coeficiente de variação em cada série; ^b valor em parêntesis é a diferença para o valor experimental correspondente; ^c pode ser considerado igual ao valor experimental (ver explicação no texto principal acima).

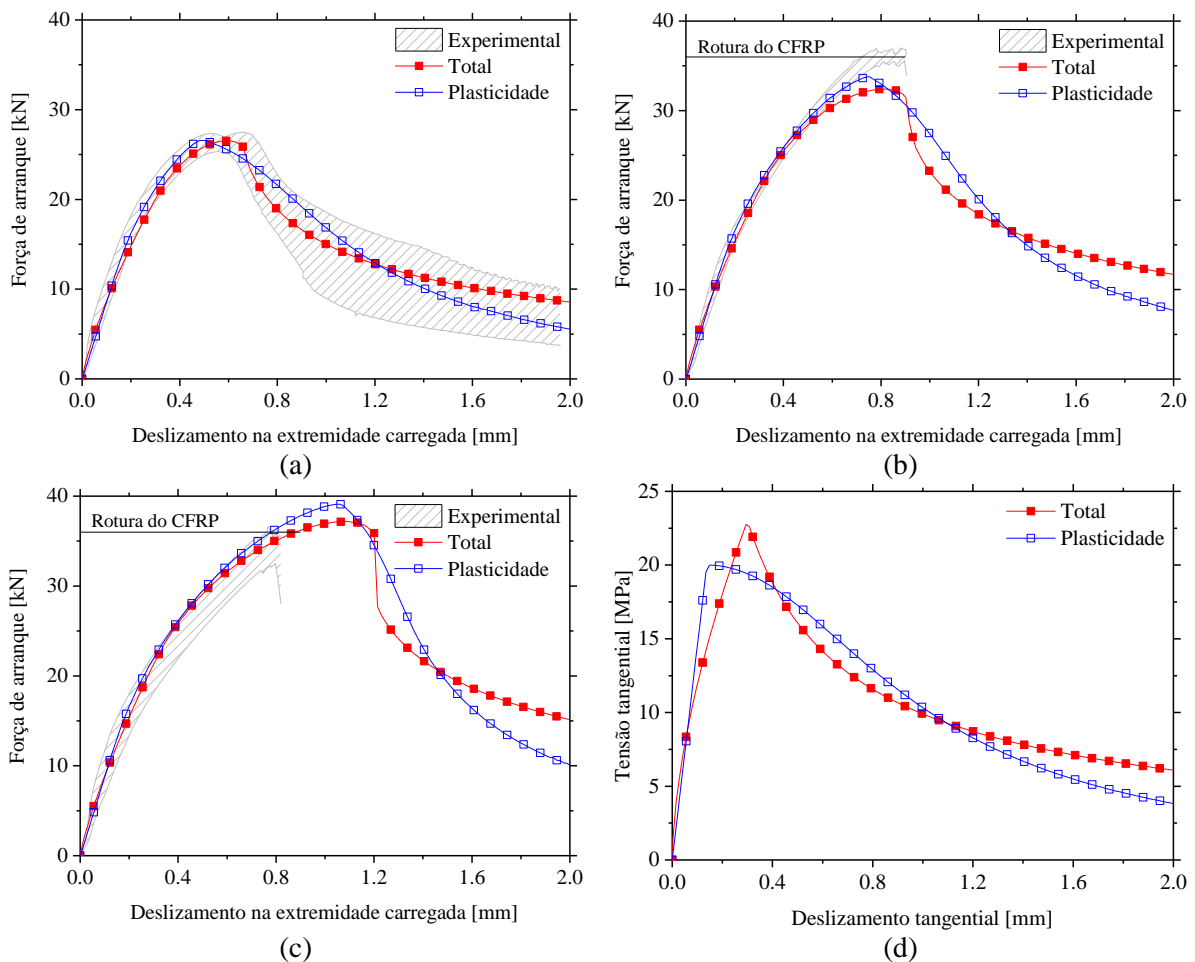


Figura 1: Resultados das simulações MEF para as séries: (a) L_b 60; (b) L_b 80; (c) L_b 100; (d) leis tensão-deslizamento locais.

Tendo em conta que ambos os modelos de interface foram calibrados para a série L_b 60, os resultados desta série estão, naturalmente, muito próximos dos experimentais. No entanto, verifica-se uma diferença importante em termos de resistência da ligação. Esta precisa de ser maior no modelo com a abordagem total de modo a ser capaz de simular a mesma relação deslizamento *versus* força de arranque.

Tendo em conta que este é um parâmetro importante nas normas existentes para o projeto de sistemas de FRP NSM [2], esta diferença é ainda mais relevante.

Analisando a série L_b 80, verificou-se que ambas as abordagens atingiram uma força de arranque máxima mais baixa do que a obtida nos ensaios experimentais. Analisando em pormenor a Figura 2b pode ver-se que, até ao deslizamento de 0.4 mm, ambas as abordagens têm um comportamento idêntico. A partir deste ponto e até o valor de pico, a abordagem com plasticidade reproduz os resultados experimentais melhor do que a abordagem total, tanto em termos de rigidez como de força de arranque máxima. Uma vez que o CFRP foi simulado com comportamento elástico linear e não foi utilizado mais nenhum outro critério para limitar a sua resposta (por exemplo, limite da resistência à tração), ambas as simulações MEF apresentam um tramo pós-pico que não existia nos ensaios experimentais.

Isto também ocorreu nas simulações da série L_b 100. No entanto, nesses casos, a simulação MEF deve apenas ser considerada até ao ponto em que a força de arranque atinge a resistência à tração do CFRP. Esse valor máximo foi identificado como cerca de 36.5 kN nas séries em que a rotura ocorreu pelo CFRP (séries L_b 80 e 100). Assim, considerando este valor como o final das simulações MEF, pode dizer-se que ambas as abordagens foram capazes de simular a série L_b 100.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados dois tipos de modelos constitutivos de interface para a simulação do comportamento das interfaces existentes em ensaios de arranque direto com sistemas FRP NSM. Como referência foi utilizado um modelo tradicionalmente adotado, baseado numa expressão analítica conhecida *a priori* (designada “abordagem total”). Em alternativa, foi proposto um modelo baseado na teoria clássica da plasticidade com escoamento (designada “abordagem com plasticidade”). Os resultados mostraram que ambas as abordagens são adequadas uma vez que ambas conseguiram captar o comportamento global dos ensaios de arranque.

Nos exemplos simulados apenas foi considerado o deslizamento ao longo da interface na direção tangencial (modo de fratura II puro). No entanto, no âmbito da técnica NSM ambos deslizamento e abertura (modos de fratura II e I, respetivamente) são relevantes. A explicação para se ter considerado apenas o deslizamento está relacionada com a abordagem total. Para se considerar diferentes comportamentos em diferentes direções com tais modelos, teriam de ser definidas diferentes expressões para cada direção. Isso é muito difícil de realizar, não tendo sido encontrado qualquer trabalho em que tal procedimento seja adotado. Normalmente, os modelos de abordagem total apenas consideram a componente de deslizamento, sendo o comportamento nas outras direções considerado elástico (tal como aqui se fez).

Para que a análise aqui apresentada fosse rigorosa, apenas se considerou deslizamento também na abordagem com plasticidade. No entanto, ressalta-se que os modelos com plasticidade, pela sua natureza, são fáceis de adaptar para simular os dois modos de fratura, em análises MEF 2D ou 3D. De facto, este aspeto está já a ser tido em conta e será apresentado em futuros trabalhos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado por fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT - Fundação Português de Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012. O primeiro autor gostaria ainda de agradecer a bolsa de doutoramento SFRH/BD/87443/2012 financiada pela FCT e a bolsa de mobilidade providenciada pelo projeto “EnCoRe” Project (FP7-PEOPLE-2011-IRSES nº 295283; www.encore-fp7.unisa.it) financiado pela União Europeia no âmbito do FP7.

REFERÊNCIAS

- [1] Bakis C, Bank L, Brown V, Cosenza E, Davalos J, Lesko J, et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*. 2002;6(2):73-87.
- [2] Coelho M, Sena Cruz J, Neves L. A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. *Construction and Building Materials* (accepted). 2015.
- [3] Sena Cruz J, Barros J, Gettu R, Azevedo Á. Bond Behavior of Near-Surface Mounted CFRP Laminate Strips under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Composites for Construction*. 2006;10(4):295-303.
- [4] Ceroni F, Barros JAO, Pecce M, Ianniciello M. Assessment of nonlinear bond laws for near-surface-mounted systems in concrete elements. *Composites Part B: Engineering*. 2013;45(1):666-81.
- [5] Sharaky IA, Barros JAO, Torres L. FEM-based Modelling of NSM-FRP Bond Behaviour. FRPRCS-11. Guimarães, Portugal. 2013. p. 10.
- [6] Caggiano A, Martinelli E, Faella C. A zero-thickness interface model for simulating the bond behaviour of FRP-strips glued on concrete. CICE 2012. Rome, Italy. 2012. p. 8.
- [7] Sena-Cruz JM, Barros JAO, Azevedo A, Gouveia AV. Numerical simulation of the nonlinear behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP strips. CNME 2007-Congress on Numerical Methods in Engineering and XXVIII CILAMCE – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. FEUP, Porto. 2007. p. 20.
- [8] Fernandes PMG, Silva PM, Sena-Cruz J. Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading. *Engineering Structures*. 2015;84(0):350-61.

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

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

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

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

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

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

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

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

RESUMO

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

1. INTRODUÇÃO

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

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

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

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

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Séries, protótipos e configurações de ensaio

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

Tabela 1: Provetes do programa experimental.

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

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

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

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

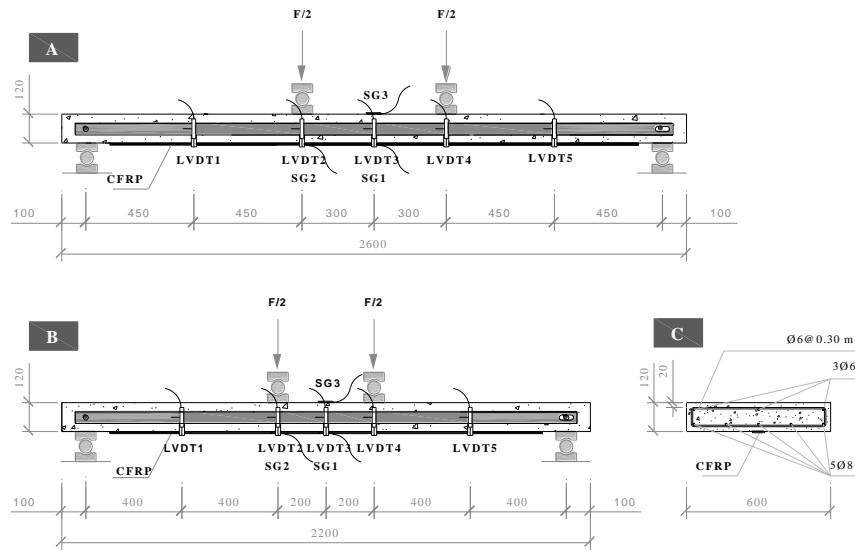


Figura 1: Geometria e configuração de ensaio das lajes da série S2600 (a) e S2400 (b), com secção transversal (c).

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

2.2. Caracterização dos materiais

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

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

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

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

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

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

Notas:

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

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

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

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

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

2.3. Preparação e reforço dos provetes

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

3. RESULTADOS

3.1. Comportamento em serviço

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

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

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

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

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

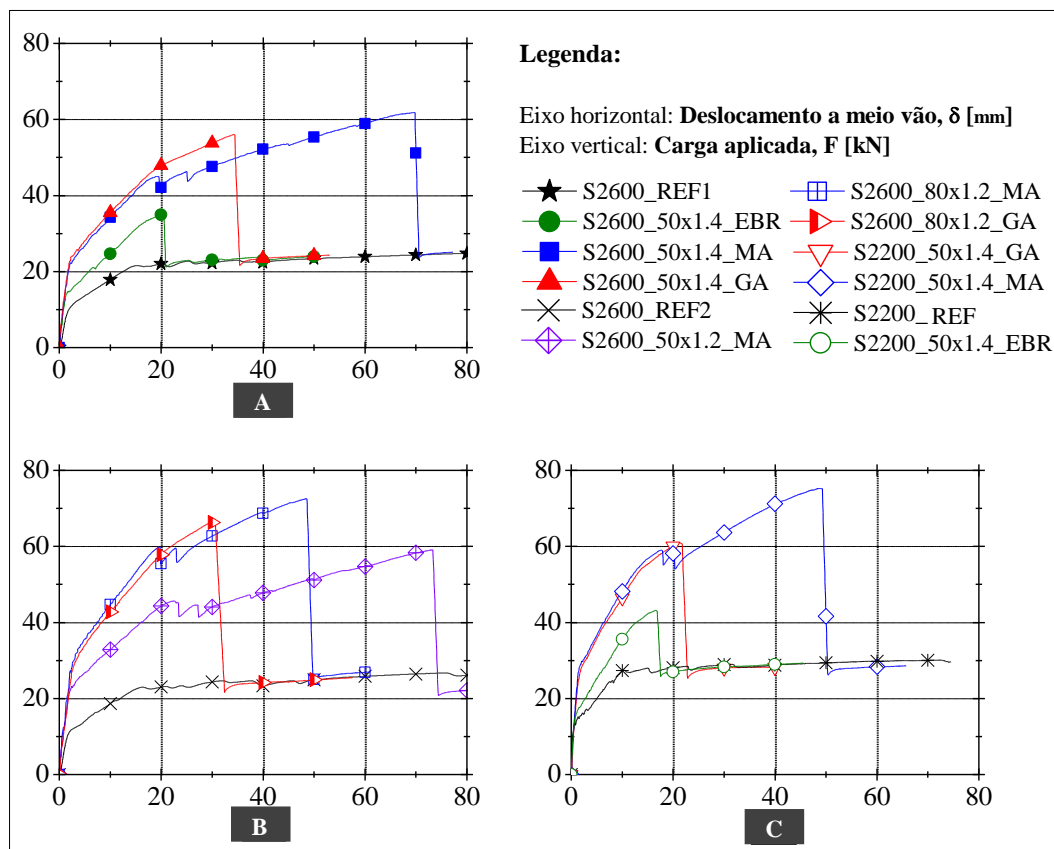


Figura 2: Relações força *versus* deslocamento para as lajes ensaiadas.

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

No final de cada ensaio foi feito o levantamento do padrão de fendilhação de cada laje, cujo resultado é apresentado na Figura 3. De uma forma geral é possível concluir que o reforço permitiu diminuir a distância entre fendas. Esta diminuição foi ainda mais efetiva para as lajes reforçadas com laminados pré-esforçados. Assim, no caso da série S2600 obteve-se um valor médio de distância máxima entre fendas de cerca de 117 mm, 96 mm e 92 mm, para o caso das lajes de referência (S2600_REF), lajes reforçadas com laminados pré-esforçados S2600_50×1.4 e S2600_80×1.2, respetivamente. No caso da série S2200, na laje de referência (S2200_REF) obteve-se uma distância máxima média entre fendas de cerca de 152 mm, enquanto nas lajes reforçadas com laminados pré-esforçados este valor baixo para os 98 mm. A análise efetuada não permitiu tirar ilações quanto à influência do sistema de ancoragem no padrão de fendilhação.

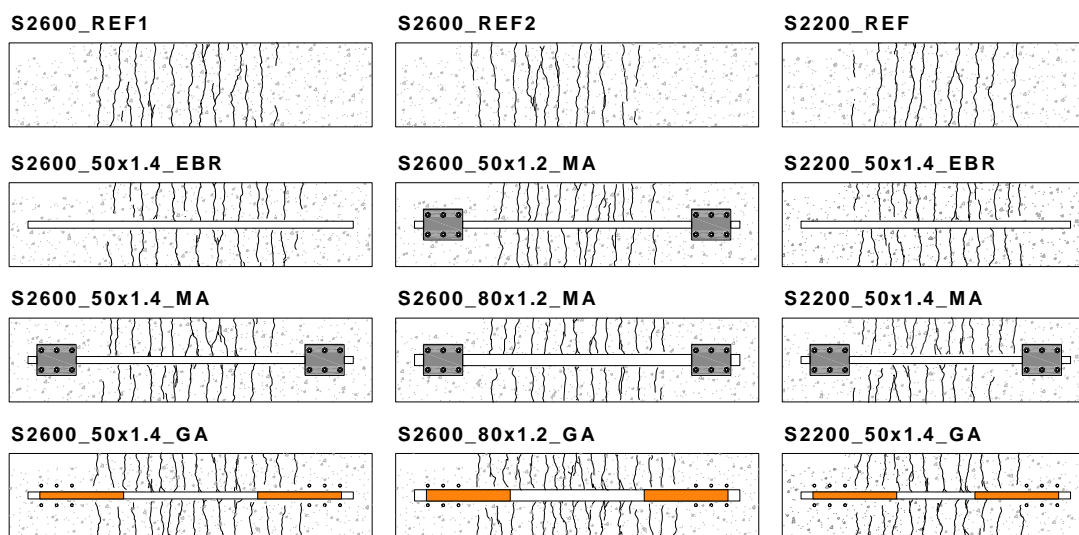


Figura 3: Padrão de fendilhação para as lajes ensaiadas.

3.2. Comportamento à rotura

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

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

A influência da largura do laminado foi avaliada através da comparação do comportamento das lajes S2600_50×1.2_MA e S2600_80×1.2_MA (ver Figura 2b). Dos resultados obtidos, foi possível concluir que a laje com o laminado mais largo evidenciou um desempenho superior, visto que apresenta maior secção e, como tal, maior capacidade de explorar o elemento de betão armado. Contudo, observou-se

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

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

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

4. CONCLUSÕES

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

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

AGRADECIMENTOS

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

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

REFERÊNCIAS

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