

Durabilidade da ligação betão-CFRP em sistemas de reforço com as técnicas EBR e NSM sob efeito de envelhecimento natural

Durability of concrete-CFRP bond in EBR and NSM reinforcement systems under natural ageing

Ricardo Cruz

Luís Correia

Susana Cabral-Fonseca

José Sena-Cruz

Resumo

A durabilidade das estruturas de betão armado reforçadas com polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) tem vindo a ser estudada essencialmente através de protocolos de envelhecimento acelerado em laboratório, existindo poucos estudos de envelhecimento natural (real).

Este trabalho pretende contribuir para o conhecimento da durabilidade da ligação entre betão e laminados de CFRP, aplicados segundo as técnicas EBR e NSM, utilizando um adesivo epoxídico. Foi implementado um programa experimental, que incluía um ambiente de referência (20 °C / 55% HR) e quatro condições de exposição natural, induzindo principalmente (i) carbonatação, (ii) ciclos gelo-degelo, (iii) temperaturas extremas, e (iv) ação de cloretos. Foi ainda estudado o efeito da imersão contínua em água a 20 °C.

A durabilidade da ligação foi avaliada até 2 anos de exposição, através de ensaios de arranque direto. Constatou-se que o desempenho da ligação nos envelhecimentos naturais apresentou níveis relativamente reduzidos de degradação para ambas as técnicas de reforço.

Abstract

The durability of reinforced concrete structures strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has been studied mainly with accelerated ageing protocols under laboratory conditions, with very few studies performed under natural ageing (real).

This work aims to contribute to the knowledge of the durability of the bond between concrete and CFRP laminates, applied according to the EBR and NSM techniques with an epoxy adhesive. An experimental study was implemented, where a reference environment (20 °C / 55% RH) and four different types of natural exposure conditions were included, inducing mainly (i) carbonation, (ii) freeze-thaw cycles, (iii) extreme temperatures and (iv) chlorides action. The effects of continuous immersion of these systems in water at 20 °C was also studied.

The durability of bond was evaluated up to 2 years of exposure through direct pullout tests. It was found that the bond performance after natural ageing showed relatively low levels of degradation for both techniques.

Palavras-chave: Durabilidade / Ligação betão-CFRP / Técnicas EBR e NSM / Envelhecimento natural

Keywords: Durability / Concrete-CFRP bond / EBR and NSM techniques / Natural ageing

Ricardo Cruz

ISISE/IB-S
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
a51314@alunos.uminho.pt

Luís Correia

ISISE/IB-S
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
lcorreia@civil.uminho.pt

Susana Cabral-Fonseca

Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Departamento de Materiais
Lisboa, Portugal
sbravo@lnec.pt

José Sena-Cruz

ISISE/IB-S
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
jsena@civil.uminho.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

CRUZ, R. [et al.] – Durabilidade da ligação betão-CFRP em sistemas de reforço com as técnicas EBR e NSM sob efeito de envelhecimento natural. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 18. ISSN 2183-8488. (março 2022) 33-42.

1 Introdução

Nas últimas décadas, a aplicação de compósitos baseados em sistemas de fibra de carbono/matriz polimérica (*carbon fibre reinforced polymer* – CFRP) no reforço de estruturas existentes de betão armado (BA) tem vindo a aumentar. Estes materiais compósitos podem ser aplicados na superfície do betão de recobrimento (técnica denominada de *Externally Bonded Reinforcement* – EBR) ou inseridos no betão de recobrimento (técnica denominada de *Near Surface Mounted* – NSM). A durabilidade de estruturas de BA reforçadas com materiais CFRP tem vindo a ser objeto de estudo através de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório. No entanto, existem ainda várias lacunas no conhecimento, principalmente na durabilidade e comportamento a longo prazo deste tipo de soluções de reforço quando expostas ao ambiente exteriores de envelhecimento natural. Outro aspeto importante que necessita de ser estudado é a relação entre os efeitos do envelhecimento acelerado e envelhecimento natural [1]. Na literatura podem ser encontradas algumas publicações sobre este tópico. Uma incluem ambos os tipos de exposição, bem como tentativas para estabelecer relações entre ambos os tipos de exposição, e.g. [1-5]. Outras, apenas abordam a durabilidade em ambiente natural [6-9]. De um modo geral, o nível de degradação observado com o envelhecimento acelerado em condições laboratoriais é superior ao observado em envelhecimento natural para tempos de exposição semelhantes.

Este trabalho apresenta os resultados de uma campanha experimental implementada com o objetivo de avaliar a durabilidade da ligação betão-CFRP quando exposta a quatro ambientes naturais induzindo envelhecimento principalmente por carbonatação, ciclos gelo-degelo, temperaturas extremas e a ação de cloretos, até dois anos de exposição. Neste estudo foram igualmente incluídos um ambiente de referência e um ambiente que consiste na imersão dos provetes em água sob temperatura controlada (20 °C). Nas secções que se seguem detalha-se o programa experimental, apresenta-se e discute-se os resultados obtidos.

2 Programa experimental

2.1 Descrição geral

O programa experimental foi realizado no âmbito do projeto "FRPLongDur – Comportamento estrutural e durabilidade de elementos de betão armado reforçados à flexão com laminados CFRP", com o objetivo de investigar o comportamento estrutural a longo prazo e a durabilidade de elementos de BA reforçados à flexão com laminados CFRP em ambientes artificiais e naturais relevantes. Este projeto inclui vários tipos de protótipos para avaliação de durabilidade em diferentes escalas: (i) amostras dos materiais (betão, dois adesivos epoxídicos e laminados de CFRP), (ii) provetes para o estudo da aderência (técnicas EBR e NSM) e, (iii) lajes de BA à escala real reforçadas à flexão com laminados CFRP (técnicas EBR e NSM). O presente artigo apenas inclui os estudos de durabilidade dos provetes de aderência até 2 anos de envelhecimento.

Foram considerados seis ambientes diferentes: dois ambientes artificiais em laboratório (E1 e E2) e quatro ambientes reais (E3 a E6). O ambiente E1, com condições higrotérmicas controladas

(20 °C / 55% HR), foi considerado o ambiente de referência; o ambiente E2 foi escolhido para investigar o efeito da imersão em água a temperatura controlada de 20 °C. Ambos os ambientes artificiais foram encontrados na Universidade do Minho. Os ambientes reais localizam-se em vários pontos de Portugal, na tentativa de serem alcançadas condições específicas de envelhecimento, nomeadamente: E3 – níveis de carbonatação do betão elevados, tendo a estação experimental sido instalada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa; E4 – ciclos de gelo-degelo, tendo a estação experimental sido instalada na Barragem da Lagoa Comprida (Seia), na Serra da Estrela; E5 – temperaturas de serviço extremas e baixa humidade relativa, tendo a estação experimental sido instalada na fábrica da S&P Clever e Reinforcement Ibérica, em Elvas; e, E6 – níveis elevados de concentração de cloretos em suspensão no ar e elevada humidade relativa, tendo a estação experimental sido instalada Porto de Mar de Viana do Castelo (APDL), em Viana do Castelo. A título de exemplo, na Figura 1 apresentam-se os provetes instalados nos ambientes E3 e E4.



(a)



(b)

Figura 1 Aspecto dos provetes para estudo da aderência instalados nos ambientes (a) E3 e (b) E4

As principais etapas para a produção e instalação dos provetes nos diferentes ambientes resumem-se da seguinte forma:

- novembro de 2016: produção de todos os provetes de betão a partir de uma única betonagem, com um volume de betão de cerca de 12 m³;
- março de 2017: aplicação dos sistemas de reforço com laminados de CFRP. Após a aplicação destes sistemas CFRP, os provetes permaneceram em ambiente de laboratório até à sua instalação nos respetivos ambientes;
- outubro 2017: ensaios de caracterização inicial;
- maio a dezembro de 2018: instalação destes provetes nos respetivos ambientes.

Dois anos após a exposição aos diferentes ambientes, 24 provetes (4 de cada ambiente) foram recolhidos e ensaiados de modo a estudar a durabilidade da aderência betão-CFRP para as técnicas EBR e NSM. O protocolo seguido incluiu um período de dessorção durante 3 semanas com as condições higrotérmicas definidas para o ambiente E1. No caso dos provetes do ambiente E2 (imersão em água), todos os provetes foram testados saturados, i.e. foram ensaiados imediatamente após a sua remoção da água.

Durante o período de envelhecimento, foi registado de forma contínua a temperatura e a humidade relativa do ar de cada ambiente. Todos os detalhes relativos a esta caracterização podem ser consultados na publicação [10].

2.2 Caracterização dos materiais

A Tabela 1 resume os resultados da caracterização inicial dos materiais utilizados, nomeadamente, o betão, o adesivo e os laminados de CFRP. Para avaliar a resistência à compressão (f_c) e o módulo de elasticidade (E_c) do betão aos 28 dias, realizaram-se ensaios de compressão em provetes cilíndricos 150/300 mm (diâmetro/altura) de acordo com as NP EN 12390-3:2011 e NP EN 12390-13:2014, respetivamente. A resistência à tração (f_a), o módulo de elasticidade (E_a) e a extensão na rotura (ϵ_a) do adesivo (S&P® Resin 220 epoxy adhesive) foram avaliados após 7 dias de cura, através de ensaios de tração segundo a EN ISO 527-2:2012. Finalmente, a resistência à tração (f_f), o módulo de elasticidade (E_f) e a extensão de rotura (ϵ_f) dos laminados CFRP (S&P® CFK 150/2000) foram avaliados de acordo com a EN ISO 527-5: 2009.

Tabela 1 Resultados médios obtidos na caracterização dos materiais (betão, adesivo e laminados)

Material	Propriedades mecânicas		
Betão	f_c [MPa] (CoV [%])	E_c [GPa] (CoV [%])	–
	41,5 (4,4)	29,1 (4,7)	–
Adesivo	f_a [MPa] (CoV [%])	E_a [GPa] (CoV [%])	ϵ_a [$\times 10^{-3}$] (CoV [%])
	19,9 (3,0)	6,5 (3,0)	$4,0 \times 10^{-3}$ (6,2)
Laminados	f_f [MPa] (CoV [%])	E_f [GPa] (CoV [%])	ϵ_f [$\times 10^{-3}$] (CoV [%])
	CFRP_L10 2405 (3,8)	164 (1,2)	$14,6 \times 10^{-3}$ (3,8)
CFRP_L50 2527 (10,8)	190 (9,3)	$13,3 \times 10^{-3}$ (13,6)	

2.3 Geometria dos provetes e configuração de ensaio

2.3.1 EBR

A Figura 2 apresenta a geometria dos provetes para o estudo da aderência da ligação EBR e a respetiva configuração de ensaio.

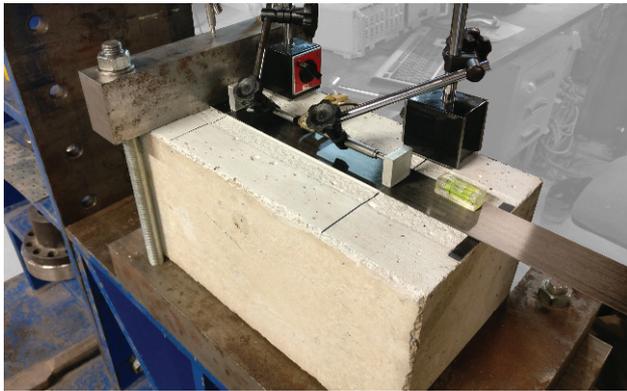
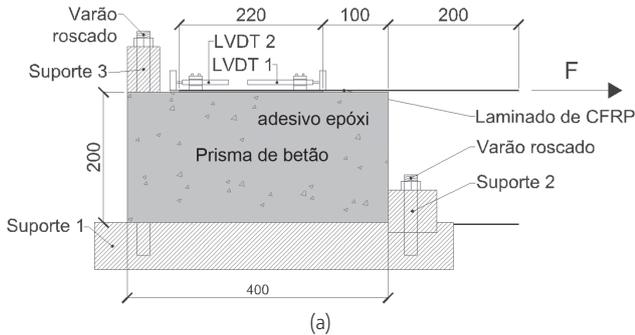


Figura 2 (a) Geometria do provete e configuração de ensaio, e (b) fotografia ilustrativa de um ensaio de aderência EBR. Nota: todas as dimensões encontram-se em [mm]

Foi utilizado um prisma de betão com $400 \times 200 \times 200$ [mm], sendo aplicadas duas tiras de laminado de CFRP com seção transversal de $50 \times 1,2$ mm² (L50) em faces opostas (paralelas à direção de betonagem), de acordo com a técnica EBR, de modo a permitir a realização de dois ensaios por provete de betão. Foi adotado um comprimento de aderência de 220 mm (superior ao comprimento efetivo, estimado em 101 mm [11]), com 100 mm livres da extremidade do prisma de betão de forma a evitar a rotura prematura por destacamento do betão entre a extremidade do prisma e a extremidade carregada. Os ensaios foram realizados recorrendo a um equipamento servo-controlado, sendo a força aplicada medida por intermédio de uma célula de carga de capacidade máxima de 200 kN (erro linear de 0,05% FS). O deslocamento relativo entre o CFRP e o betão (deslizamento) na extremidade carregada (s_c) e na extremidade livre (s_f) foram medidos usando os transdutores de deslocamento LVDT1 e LVDT2, respetivamente, com um curso de ± 10 mm (erro linear de 0,24% FS). Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento através do LVDT1, com uma velocidade de 2 μ m/s.

2.3.2 NSM

A durabilidade da ligação do sistema NSM foi estudada com recurso também a ensaios de arranque direto. A Figura 3 apresenta a geometria dos provetes e a respetiva configuração de ensaio. Foi adotado um bloco cúbico de betão com 200 mm de aresta, sendo aplicado um laminado de CFRP de $10 \times 1,4$ [mm] (L10) ao longo de um comprimento de ligação de 60 mm. O laminado CFRP foi inserido no centro de um entalhe com 15×5 [mm] previamente aberto na superfície do bloco de betão. O valor do comprimento de aderência foi adotado para (i) evitar a rotura do CFRP e (ii) ter comprimento suficiente para ser representativo do sistema e minimizar a influência dos efeitos de extremidade inevitáveis [5]. Para realizar o ensaio foi utilizado um equipamento servo controlado. O deslocamento nas extremidades carregadas e livre, foram medidos através de dois LVDTs (campo de medição $\pm 2,5$ mm e erro linear de $\pm 0,05\%$ F.S.), respetivamente, LVDT1 e LVDT2. A força (F) foi medida por uma célula de carga colocada entre a garra e o atuador, com capacidade de 200 kN (erro linear de $\pm 0,05\%$ F.S.). Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento através do LVDT1, com uma velocidade de 2 μ m/s.

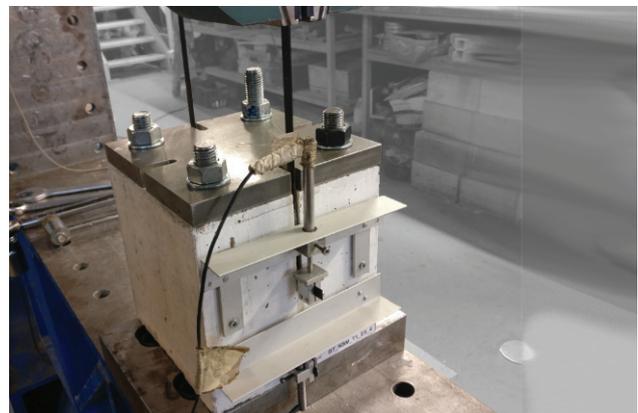
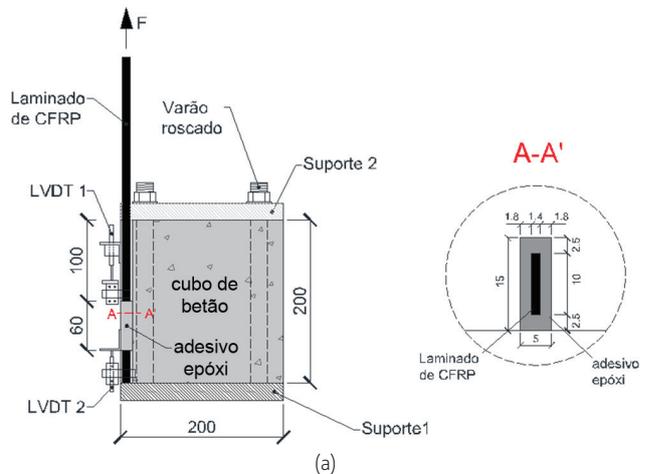


Figura 3 (a) Geometria do provete e configuração de ensaio, e (b) configuração do ensaio de aderência NSM. Nota: todas as dimensões encontram-se em [mm]

3 Resultados e discussão

3.1 EBR

A Tabela 2 apresenta os resultados médios dos ensaios de arranque direto realizados nos provetes de aderência EBR na caracterização inicial (T0) e após dois anos de exposição (T2) – cada ambiente e idade inclui 4 provetes. Nesta tabela, F_{max} representa a força de corte máxima atingida durante o ensaio. Os modos de rotura observados são também apresentados, sendo estes detalhados na Figura 5. A Figura 4a apresenta as curvas força de corte versus deslizamento na extremidade carregada ($F_l - s_l$) representativas para cada ambiente obtidas nos ensaios (dos 4 provetes, foi escolhida uma curva). Estas curvas apresentaram o comportamento típico neste tipo de técnica: numa primeira fase existe um ramo inicialmente linear ascendente, com rigidez decrescente até ser atingida a carga de máxima (suportada pelo comprimento efetivo de acordo com [11]); numa segunda fase, para uma força sensivelmente constante, observa-se um aumento do deslizamento na extremidade carregada aumenta até à rotura [12-14]. Na Figura 4b representam-se as forças de corte máximas (F_{max}) obtidas na caracterização inicial e após dois anos de exposição aos diferentes ambientes.

Tabela 2 Principais resultados obtidos nos ensaios de aderência EBR após dois anos de exposição aos ambientes de estudo (E1 to E6) (resultados médios de 4 provetes)

Ambiente	F_{max} [kN] (CoV [%])		Modo de rotura	
	T0	T2	T0	T2
E1		27,7 (11,0%)		C (4)
E2		31,1 (10,0%)		C (3); C+F/A (1)
E3	30,2 (13,3%)	35,1 (9,1%)	F/A+C (2); C (2)	C (4)
E4		34,4 (11,1%)		C (4)
E5		30,1 (5,9%)		C (4)
E6		29,2 (6,0%)		C (4)

Modos de rotura: C = rotura coesiva no betão; C + F/A = rotura coesiva no betão e destacamento na interface laminado-adesivo; os valores entre parênteses são os respetivos coeficientes de variação ou número de provetes onde o modo de rotura indicado ocorreu.

Em T0 foi atingida uma força de corte máxima média de 30,2 kN, sendo o modo de rotura dominante a rotura coesiva do betão (C). Em 2 provetes, em aproximadamente metade do comprimento da ancoragem, foi também observado destacamento ao nível da interface laminado-adesivo (F/A). A tensão máxima média no CFRP obtida foi de 503 MPa (~20% da resistência à tração do laminado de CFRP), que está de acordo com o resultado obtido através do uso da formulação proposta na CNR [11] (505 MPa). Adicionalmente, os resultados obtidos na caracterização inicial estão de acordo com os resultados de trabalhos semelhantes, e.g. [12].

Após dois anos de exposição, o maior decréscimo de F_{max} (8,3%, quando comparado com a caracterização inicial) foi observado no ambiente de referência E1. Considerando que o modo de rotura

dominante foi coesivo no betão (ver Figura 5), esta observação deve-se provavelmente a variações nas propriedades mecânicas do adesivo através do reportado “physical ageing” que caracteriza os adesivos poliméricos. Comparando os valores de F_{max} obtidos nos provetes E2-E6 após dois anos de exposição com a caracterização inicial, o maior aumento de F_{max} (+16,2%) foi verificado no ambiente E3, enquanto no E4 o aumento foi de +13,6%. Além disso, obteve-se também aumento em E2 (3,0%), e pequenos decréscimos em E5 (-0,3%) e E6 (-3,3%). A absorção de água pode causar plasticização e um aumento do volume nos adesivos de origem epoxídica, levando a reduções consideráveis no módulo de elasticidade e resistência, tal como descrito na literatura, e.g. [15-16]. No entanto, é de ressaltar que, a imersão em água (ambiente E2) e o ensaio em estado saturado do provete parecem não afetar o comportamento da aderência nos provetes EBR. Este facto pode estar relacionado com a plasticização do adesivo, que pode ter levado a uma redução nos picos de tensão nas interfaces e levar a uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo do comprimento da ancoragem, conduzindo a um aumento da força máxima. Em relação ao aumento da força máxima nos ambientes naturais, o motivo para tal observação pode estar relacionado com a pós-cura do adesivo que certamente ocorreu durante o período de exposição, bem como, a variação da resistência à tração superficial do betão.

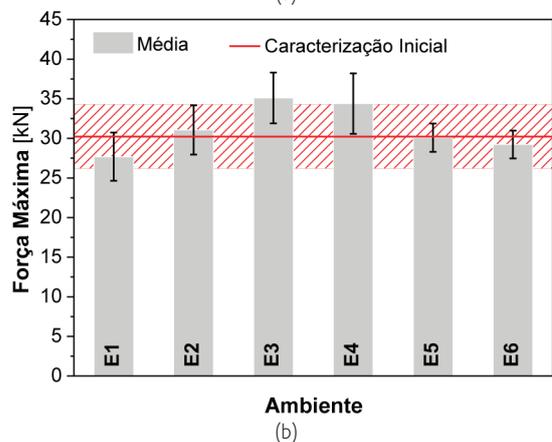
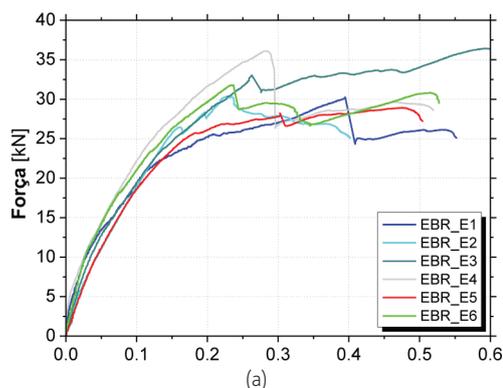


Figura 4 Resultados de ensaios de aderência EBR após dois anos de exposição em cada ambiente: (a) Curvas típicas força de corte vs. deslizamento na extremidade carregada; (b) força de corte máxima

A Figura 5 apresenta os modos de rotura observados nos ensaios de aderência EBR. O modo de rotura dominante após dois anos de exposição foi a rotura coesiva no betão - apenas num ensaio foi também observada a rotura coesiva do betão simultaneamente com destacamento na interface laminado-adesivo, conforme apresentado na Tabela 3. Não foram observadas diferenças significativas entre os modos de rotura com o tipo de exposição.



Figura 5 Modos de rotura típicos observados nos ensaios de aderência EBR: (a) rotura coesiva do betão - C e (b) rotura coesiva do betão e destacamento na interface laminado-adesivo - C + F/A

3.2 NSM

A Tabela 3 apresenta os resultados médios dos ensaios de arranque direto na caracterização inicial (T0) e após dois anos de exposição (T2) - cada ambiente e idade inclui 4 provetes. Nesta tabela, F_{max} representa a força máxima de arranque atingida durante o ensaio e s_{lmax} representa o deslizamento na extremidade carregada para F_{max} . Os modos de rotura observados são também apresentados. A Figura 6a apresenta as curvas média força de arranque versus deslizamento na extremidade carregada ($F_i - s_i$) para todos os ambientes (curva média de 4 ensaios) obtidas após dois anos de exposição. Embora existam grandes semelhanças entre a forma destas curvas, os

resultados mostram variações de F_{max} e respetivos s_{lmax} para cada ambiente. A Figura 6b apresenta uma representação gráfica das forças máximas de arranque para os provetes NSM na caracterização inicial e após dois anos de exposição aos diferentes ambientes.

Modos de rotura: F/A = rotura por deslizamento na interface CFRP-Adesivo; A/C = rotura por deslizamento na interface betão-adesivo; C = rotura coesiva do betão; A = rotura coesiva do adesivo; CC = fendilhação do betão; CS = destacamento do betão; os valores entre parênteses são os respetivos coeficientes de variação ou número de provetes onde o modo de rotura indicado ocorreu.

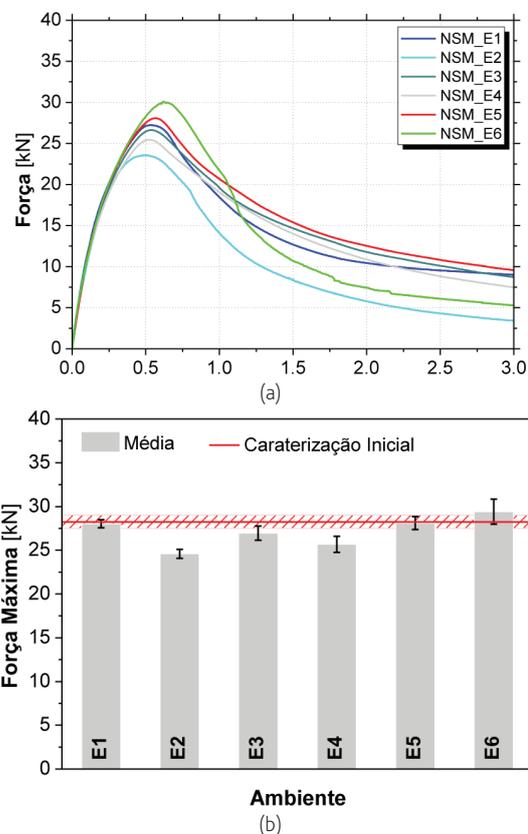


Figura 6 (a) Resultados de ensaios de aderência EBR após dois anos de exposição em cada ambiente: (a) Curvas típicas $F_i - s_i$; (b) força de corte máxima

Nos ensaios de aderência NSM em T0, a força máxima média atingida nos provetes foi de 28,2 kN - este valor corresponde a um nível de tensão de cerca de 70% da resistência última à tração do laminado. Tal como no caso do sistema EBR, nestes ensaios obtiveram-se respostas ($F_i - s_i$) semelhantes às reportadas na literatura, e.g. [5]. O modo de rotura dominante foi o deslizamento ao nível da interface laminado-adesivo (F/A), observado na maioria dos ensaios. Comparando as duas técnicas de reforço, fica mais uma vez patente a superior eficiência da técnica NSM, para a qual se atingem tensões máximas mais elevadas no sistema de reforço, com um menor comprimento de aderência. De referir que os resultados da caracterização inicial são idênticos aos resultados obtidos em outros trabalhos semelhantes, e.g. [5, 17, 18].

Tabela 3 Principais resultados dos ensaios de arranque direto em provetes de aderência NSM após dois anos de exposição aos ambientes estudados (E1 a E6) (resultados médios de 4 ensaios)

Ambiente	F_{max} [kN] (CoV [%])		s_{lmax} [mm] (CoV [%])		Modo de rotura	
	T0	T2	T0	T2	T0	T2
E1		28,0 (1,6)		0,6 (10,3)		F/A + CC (1); F/A (3)
E2		24,6 (2,0)		0,5 (21,0)		F/A + CS (2); F/A+ F/C + CS (1); A + CS (1)
E3	28,2 (2,5)	27,0 (3,0)	0,5 (5,7)	0,5 (8,6)	F/A (4)	F/A + CC (3); F/A + CS (1)
E4		25,7 (3,6)		0,5 (6,3)		F/A + CC (2); F/A + CS (2)
E5		28,1 (2,6)		0,6 (1,9)		F/A + CC (3); F/A +CS (1)
E6		29,4 (4,8)		0,6 (13,4)		F/A+ F/C (1) + CS (3)



(a)



(b)

Figura 7 Modos de rotura dominantes nos ensaios de aderência NSM: (a) rotura por deslizamento na interface laminado-adesivo com fendilhação do betão – F/A + CC e (b) rotura por deslizamento na interface laminado-adesivo com destacamento de betão – F/A + CS

A Figura 7 apresenta os dois modos de rotura dominantes observados nos ensaios após dois anos de exposição. Estes modos de rotura foram classificados de acordo com o local onde ocorreram: (i) betão - C; (ii) adesivo - A; (iii) interface laminado/adesivo – F/A; ou (iv) interface adesivo-betão – A/C. Em alguns provetes, estes modos de rotura são acompanhados por fissuração no betão (CC), destacamento do betão (CS) ou fissuração do adesivo (AC). O modo de rotura F/A foi observado em todos os ensaios, exceto nos provetes E2, onde ocorreu uma gama mais ampla de modos de rotura (ver Tabela 3).

Variações insignificantes nos valores de F_{max} (0,7%) foram observadas após a exposição dos provetes de aderência NSM ao ambiente E1 durante dois anos, o que pode indicar uma conservação do desempenho do sistema em ambiente controlado. A maior redução de F_{max} foi observada após dois anos de imersão em água (ambiente E2) (-12,2% quando comparada com a o ambiente de referência E1). De salientar que além da imersão em água por um longo período, estes provetes foram testados saturados, o que pode justificar

este resultado. Conforme referido anteriormente, o adesivo epóxi absorve água levando à sua plasticização, conforme mencionado anteriormente. A diminuição de F_{max} também foi observada em E3 (-3,8%) e E4 (-8,4%). Um aumento negligenciável (+0,3%) foi observado em E5, enquanto em E6, foi registado um maior aumento (+4,9%). Estas variações observadas após envelhecimento natural, resultam da sinergia de ações características de cada ambiente (e.g., temperatura, humidade, radiação ultravioleta) que podem levar a efeitos deteriorantes como a plasticização do adesivo ou fissuração do betão, podendo também produzir efeitos benéficos como a pós-cura do adesivo. Verifica-se a evidente alteração no modo de rotura, entre o ambiente E1 (T0 e T2) e os ambientes E3-E6 (T2), de F/A, em E1, para F/A + CC ou F/A + CS nos ambientes E3, E4 e E5, ou para F/A + F/C + CS no ambiente E6. Assim, a variação do modo de rotura pode indicar que a alteração da F_{max} é um efeito da variação das características do betão. Não obstante, variações nos restantes materiais, assim como nas interfaces betão/adesivo e adesivo/laminado podem ser também críticas no desempenho da ligação.

4 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se um estudo de durabilidade da aderência da ligação betão-CFRP utilizando duas técnicas para reforço de estruturas de betão armado existentes (EBR e NSM) sob o efeito do envelhecimento natural. Foram considerados quatro ambientes naturais para induzir o envelhecimento, principalmente por carbonatação (E3), ciclos gelo-degelo (E4), temperaturas elevadas (E5) e ação dos cloretos em suspensão no ar provenientes da água do mar (E6). Foram também incluídos um ambiente de controlo (referência) (E1) e um ambiente baseado na imersão em água sob temperatura controlada (E2). Os provetes foram ensaiados antes do início do envelhecimento e após 2 anos de exposição. Deste trabalho podem listar-se as seguintes principais conclusões:

- O comportamento da ligação e a força máxima observada na caracterização inicial da ligação foram semelhantes a outros estudos equivalentes anteriores;
- Após dois anos de exposição ao ambiente E1, a ligação EBR apresenta uma diminuição de ~10% na força máxima, enquanto na ligação NSM as variações são negligenciáveis;
- Após dois anos de exposição, a força máxima alcançada nos provetes de aderência da técnica EBR dos ambientes E2-E4 aumentou até ~16%, por comparação com a caracterização inicial; no caso da técnica NSM, houve diminuição da resistência da ligação nos provetes dos ambientes E2-E5, principalmente nos provetes imersos (~13%), enquanto nos provetes E6 as variações foram diminutas;
- Os modos de rotura observados nos provetes EBR da caracterização inicial e após dois anos de exposição foram semelhantes (rotura coesiva no betão); nos provetes NSM, os modos de rotura mudaram com a exposição.

A partir desta campanha experimental não foi possível obter uma tendência clara de evolução, sendo necessário ensaios com períodos de exposição mais longos para uma melhor compreensão da evolução das propriedades mecânicas da ligação nas técnicas de reforço EBR e NSM sob envelhecimento natural. Neste contexto, está a ser dado continuidade ao projeto associado ao presente estudo, pelo que nos próximos anos serão apresentadas novas conclusões para períodos de exposição mais alargados.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito dos projetos FRP LongDur (referências POCI-01-0145-FEDER-016900 e FCT PTDC/ECM-EST/1282/2014) e Durable-FRP (referência PTDC/ECI-EGC/4609/2020) financiado por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização (POCI) e do Programa Operacional Regional de Lisboa e, parcialmente financiado pelo projeto PO-CI-01-0145-FEDER-007633, e parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia Estrutural (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020.

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia, ao abrigo de convenção de subvenção (SFRH/BD/131259/2017) atribuída ao primeiro autor. Os autores agradecem ainda a todas as empresas que se envolveram apoiando e contribuindo para o desenvolvimento deste estudo, nomeadamente: S&P Clever Reinforcement Iberia Lda, Instituto Português do Mar e da Atmosfera, IP (IPMA, IP), Hilti Portugal-Produtos e Serviços, Lda., Artecanter – Indústria Criativa, Lda., e Tecnipor – Gomes & Taveira Lda.

Referências

- [1] Tatar, J.; Hamilton, HR. (2016) – Comparison of laboratory and field environmental conditioning on FRP-concrete bond durability. *Construction and Building Materials*, 122, 525-536.
- [2] Kabir, MI.; Shrestha, R.; Samali, B. (2016) – Effects of applied environmental conditions on the pull-out strengths of CFRP-concrete bond. *Construction and Building Materials*, 114, 817-830.
- [3] Hassan, SA. *et al.* (2015) – Characteristics of concrete/CFRP bonding system under natural tropical climate. *Construction and Building Materials*, 77, 297-306.
- [4] Mohd Hashim, MH.; Mohd Sam, AR.; Hussin, M. (2016) – Experimental investigation on the effect of natural tropical weather on interfacial bonding performance of CFRP-concrete bonding system. 11, 584-604.
- [5] Fernandes, P. *et al.* (2018) – Durability of bond in NSM CFRP-concrete systems under different environmental conditions. *Composites Part B: Engineering*, 138, 19-34.
- [6] Hsieh, C-T.; Lin, Y.; Lin, S-K. (2016) – Impact-echo method for the deterioration evaluation of near-surface mounted CFRP strengthening under outdoor exposure conditions. *Materials and Structures*, 50, 72.
- [7] Sen, R. (2015) – Developments in the durability of FRP-concrete bond. *Construction and Building Materials*, 78, 112-125.
- [8] Al-Tamimi Adil, K. *et al.* (2015) – Durability of the bond between CFRP plates and concrete exposed to harsh environments. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27: 04014252.
- [9] Bhashya, V. *et al.* (2015) – Long term studies on FRP strengthened concrete specimens. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 22, 465-472.
- [10] Cruz, R.; Correia, L.; Cruz, J. (2021) – Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing. *Materials*, 14(6), 1533.
- [11] CNR. (2013) CNR-DT 200 R1/2013 – Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures.
- [12] Soares, S. *et al.* (2019) – Influence of surface preparation method on the bond behavior of externally bonded CFRP reinforcements in concrete. *Materials*, 12, 414.
- [13] Mazzotti, C BA. *et al.* – Bond between EBR FRP and concrete. In: Pellegrino C, Sena-Cruz J, editors. *RILEM State-of-the-Art Reports*, vol. 19, Dordrecht: Springer Netherlands; 2016, p. 39-96.
- [14] Iovinella, I.; Protta, A.; Mazzotti, C. (2013) – Influence of surface roughness on the bond of FRP laminates to concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 533-542.
- [15] Cabral-Fonseca, S. *et al.* (2018) – Durability of FRP - concrete bonded joints in structural rehabilitation: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, 153-167.

- [16] Sousa, J.M.; Correia, J.R.; Cabral-Fonseca, S. (2018) – Durability of an epoxy adhesive used in civil structural applications. *Construction and Building Materials*, 161, 618-633.
- [17] Fernandes, P.M.G.; Silva, P.M.; Sena-Cruz, J. (2015) – Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading. *Engineering Structures*, 84, 350-361.
- [18] Ricardo Cruz, J. *et al.* (2020) – Bond behaviour of NSM CFRP laminate strip systems in concrete using stiff and flexible adhesives. *Composite Structures*, 245: 112369.

