

Durabilidade da ligação entre o betão e laminados de CFRP aplicados de acordo com a técnica NSM



Pedro Fernandes¹



José Sena-Cruz²



José Xavier³



Patrícia Silva⁴



Sérgio Soares⁵

Resumo

Nos últimos anos, considerável investigação tem sido desenvolvida no reforço de estruturas de betão armado com a técnica NSM. Esta técnica consiste na introdução de laminados ou varões de FRP em ranhuras pré-executadas no betão de recobrimento do elemento a reforçar. Normalmente, são utilizados adesivos epoxídicos na ligação entre FRP e betão.

O presente trabalho procura contribuir para o conhecimento da durabilidade do comportamento da aderência entre o betão e laminados de fibra de carbono (CFRP) aplicados de acordo com a técnica NSM, de modo a colmatar algumas lacunas relevantes que existem sobre este assunto. Com esse propósito, foi realizado um extenso programa experimental através de ensaios de arranque direto em provetes cúbicos de betão reforçados com laminados de CFRP aplicando a técnica NSM (sistema NSM CFRP). A geometria da ranhura, o comprimento de amarração e a classe de resistência do betão foram considerados parâmetros fixos. Os provetes foram inicialmente submetidos a ações ambientais de envelhecimento acelerado e posteriormente ensaiados até à rotura de forma a ser avaliado o respetivo comportamento da ligação entre CFRP e betão. O efeito das seguintes condições ambientais no comportamento da ligação foi estudado: (i) imersão em água pura; (ii) imersão em água com cloretos; (iii) ciclos de molhagem/secagem em água com cloretos; (iv) ciclos térmicos; e, (v) ciclos de gelo/degelo. O período de exposição variou entre 240 a 480 dias. Após terem sido submetidos às respetivas condições ambientais, os provetes foram monotonicamente ensaiados até à rotura, monitorizando-se a força de arranque aplicada e o deslizamento do laminado na extremidade carregada da ligação. As ações ambientais investigadas não conduziram a níveis de degradação significativos no desempenho global da ligação do sistema NSM CFRP-betão, sendo que a máxima redução da resistência da ligação obtida foi cerca de 5% e ocorreu nos provetes que estiveram expostos a 240 ciclos de gelo-degelo.

Palavras-chave: NSM, CFRP, durabilidade, aderência, degradação.

¹ ISISE, Univ. do Minho, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: pfernandes@civil.uminho.pt

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

³ CITAB, Univ. de Trás-os-Montes e Alto Douro, Dep. de Engenharia Civil, Vila Real, Portugal; e-mail: jxavier3@gmail.com

⁴ ISISE, Univ. do Minho, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: patricia.silva@civil.uminho.

⁵ ISISE, Univ. do Minho, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: a65181@alumni.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas duas décadas, a utilização de materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP) no reforço de estruturas de betão armado existentes tem vindo a aumentar, sendo estes, nos dias de hoje, materiais bem conhecidos e frequentemente utilizados na indústria de construção, e.g. [1, 2, 3, 4, 5]. Tipicamente, estes materiais compósitos são colados externamente na superfície do elemento a reforçar (técnica EBR - *Externally Bonded Reinforcement*) ou inseridos em ranhuras pré-executadas no respetivo betão de recobrimento (técnica NSM - *Near-Surface Mounted*).

A avaliação do comportamento estrutural a longo prazo e de durabilidade de elementos de betão armado reforçados com materiais do tipo FRP constituem temas fulcrais que necessitam de ser estudados, de modo a permitir que todas as vantagens da utilização destes materiais/tecnologias sejam totalmente aproveitadas pela indústria da construção. De forma geral, os investigadores têm vindo a estudar este tema por intermédio dos chamados ensaios de envelhecimento artificial acelerado em laboratório.

Até à data, a investigação desenvolvida sobre a técnica NSM foi maioritariamente dedicada ao desempenho estrutural a curto prazo de elementos estruturais reforçados e, raramente, foi considerado o seu tempo de vida útil completo. A avaliação da totalidade do tempo de vida útil da estrutura requer, não só, a avaliação da durabilidade do sistema de reforço, bem como dos materiais que o constituem. O desempenho da estrutura no seu período de vida em serviço é, portanto, muito dependente da durabilidade dos seus componentes e materiais contra agentes de degradação. De acordo com [6], as condições ambientais comuns no estudo da durabilidade de elementos de betão são os ciclos de molhagem/secagem na presença de sais, ciclos de gelo-degelo, ciclos de temperatura e humidade e ciclos de nevoeiro salino.

O presente trabalho tem como principal objetivo contribuir para o conhecimento da durabilidade da aderência entre elementos de betão e laminados de CFRP aplicados de acordo com a técnica NSM. Para tal, foi realizado um programa experimental constituído por (i) ensaios de arranque direto em provetes de betão reforçados com o sistema NSM CFRP, ensaios de tração em amostras de (ii) laminados de CFRP e de (iii) adesivo epóxi e (iv) ensaios de compressão em provetes de betão. As referidas amostras ensaiadas, foram previamente submetidas, em laboratório, a diferentes ações ambientais em condições de envelhecimento acelerado, durante um período específico de exposição. Adicionalmente, provetes de referência (ambiente de laboratório), sem terem sido submetidos a qualquer tipo de ação de envelhecimento acelerado, foram também ensaiados para que fosse possível fazer comparações e avaliar a taxa de degradação. Dependendo da condição ambiental considerada, o período de tempo de exposição variou entre 240 a 480 dias.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental e os métodos de ensaio associados à avaliação da durabilidade da aderência do sistema NSM CFRP, realizados no âmbito deste trabalho, são descritos na presente secção. Tal como foi referido anteriormente, o principal objetivo deste trabalho experimental foi o de investigar os efeitos de diferentes condições ambientais no comportamento da ligação entre elementos de betão e laminados de CFRP aplicados de acordo com a técnica NSM. Com esse propósito, realizou-se um programa experimental composto por 5 séries (sendo que cada uma das séries era constituída por quatro provetes) de ensaios de arranque direto (DPT - *direct pullout test*), de modo a estudar o efeito das seguintes condições ambientais (ver Fig. 1): (i) humidade, (ii) cloretos, (iii) gelo-degelo, (iv) ciclos de molhagem/secagem e, (v) ciclos térmicos. Adicionalmente, ao longo do período de tempo de exposição, foi efetuada a caracterização mecânica dos materiais envolvidos. O comportamento da aderência foi avaliado através dos ensaios de arranque direto. O comprimento de amarração, a geometria da ranhura onde o laminado é introduzido e a classe de resistência do betão foram considerados parâmetros fixos.

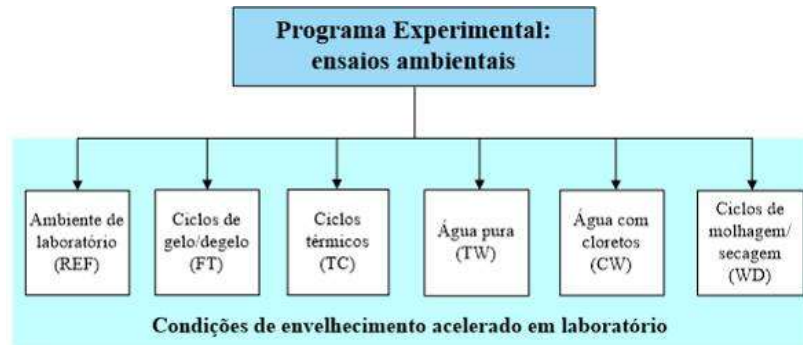


Figura 1. Programa experimental realizado.

2.1. Ações ambientais: ensaios de envelhecimento artificial acelerado

Para simular as diferentes condições ambientais, foram utilizados ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório. Geralmente, os ensaios de envelhecimento acelerado são utilizados no estudo e caracterização da durabilidade de materiais de construção, sendo estes muitas vezes adotados pela comunidade científica. Contudo, a escassez de procedimentos padrão para a realização deste tipo de ensaios laboratoriais, tem resultado numa grande variedade de procedimentos de ensaio adotados por diferentes investigadores. Consequentemente, no presente trabalho, estratégias apropriadas foram seguidas. Após a preparação, reforço e cura, os provetes foram inicialmente expostos a diferentes condições ambientais durante diferentes períodos de tempo que variaram entre 240 a 480 dias, e posteriormente foram monotonicamente ensaiados até à rotura. A nomenclatura adotada para cada série segue o formato “Zn” onde “Z” define a condição ambiental (REF – ambiente de laboratório; TW – imersão em água pura; CW – imersão em água com cloretos; WD – ciclos de molhagem/secagem em água com cloretos; TC – ciclos térmicos com temperaturas que variam entre -15 °C a +60 °C; FT – ciclos gelo/degelo) e “n” indica o tempo de exposição, isto é, o número de dias/ciclos a que a série de ensaios é submetida à respetiva condição ambiental (240 ou 480 dias). No caso das séries TC e FT, adicionalmente às séries envelhecidas, uma correspondente série de referência (R) foi ensaiada à mesma data.

2.2. Geometria das amostras e configurações de ensaio

Nos ensaios de arranque direto (DPT), representados na Fig. 2a, as amostras consistem em provetes cúbicos de betão com 200 mm de aresta, onde o laminado de CFRP, com área da secção transversal de $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$, foi instalado numa ranhura pré-executada no betão de recobrimento. A profundidade e a largura da ranhura foi de 15 mm e 5 mm, respetivamente. Foi adoptado um comprimento de amarração constante de 60 mm, preenchido com adesivo epóxi. Os ensaios DPT foram realizados em controlo de força até aos 10 kN a uma velocidade de 0.013 kN/s, sendo, a partir desse valor de força realizados em controlo de deslocamento por intermédio de um transdutor de deslocamento (LVDT) na secção da extremidade carregada, a uma velocidade de 2 $\mu\text{m/s}$. As propriedades mecânicas do laminado CFRP e do adesivo epóxi utilizado no reforço, foram determinadas através de ensaios de tração (TT), como pode ser visualizado nas Figs. 2b e 2c, respectivamente, enquanto que a caracterização mecânica do betão foi efetuado por intermédio de ensaios de compressão. Informações mais detalhadas sobre a configuração dos ensaios de arranque direto, tração do laminado de CFRP e do adesivo epóxi e ensaios de compressão do betão, bem como, sobre a preparação das amostras ensaiadas e dos procedimentos de ensaio de envelhecimento acelerado, podem ser encontradas em [7].

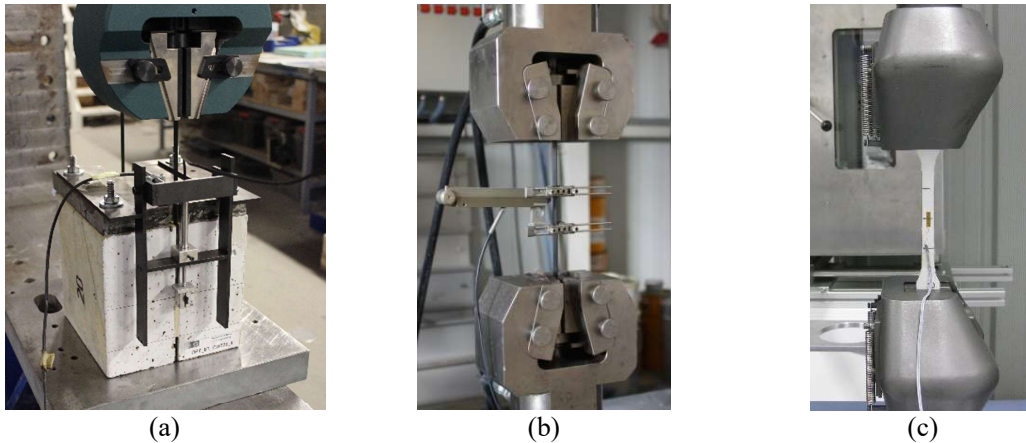


Figura 2. Configurações de ensaio: (a) DPT em provetes cúbicos de betão; (b) TT no laminado de CFRP; (c) TT em amostras de adesivo epóxi.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Materiais

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão em provetes de betão revelaram uma resistência média à compressão em cilindros (f_{cm}) de 36 MPa, com um coeficiente de variação (CoV) de 3.9% e um módulo de elasticidade médio de 28.4 GPa (CoV = 5.8%), aos 28 dias de idade. No entanto, devido à inclusão de uma quantidade considerável de cinzas volantes na composição do betão (a fração de cinzas volantes foi de 40% na quantidade total de ligante), a resistência média à compressão do betão continuou a evoluir até aproximadamente um ano de idade, onde uma resistência à compressão máxima de 52 MPa (CoV = 2.5%) foi atingida. Os valores médios dos principais parâmetros obtidos (resistência à tração e módulo de elasticidade) dos ensaios de tração das amostras dos materiais (CFRP e adesivo epóxi), após estas terem sido submetidas às distintas condições ambientais, são apresentados no Quadro 1.

Tendo em conta os resultados obtidos, em termos de alteração/degradação das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos no programa experimental (betão, CFRP, epóxi), as seguintes principais observações podem ser destacadas: (i) em termos gerais, todas as condições ambientais investigadas não causaram variações significativas na resistência à compressão do betão (inferiores a 5%); (ii) as amostras de CFRP também apresentaram perdas desprezáveis nas suas propriedades mecânicas à tração quando expostas a diferentes condições ambientais, com uma redução máxima de resistência à tração de cerca de 7% nas séries CW480 e WD480, quando comparadas com o ambiente de controlo (REF0); (iii) nas propriedades mecânicas do adesivo epóxi, foi observado um aumento até 31% e 15% na resistência à tração e no módulo de elasticidade, respetivamente, quando as amostras foram expostas a ciclos térmicos (TC240), devido à fase de pós-cura que ocorre quando temperaturas superiores àquelas que já tinham sido experimentadas na primeira fase de cura são atingidas. Pelo contrário, uma significativa redução nas suas propriedades mecânicas até 38% e 47% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respetivamente, foi observada quando as amostras de adesivo epóxi foram submetidas a ambientes na presença de água (TW, CW e WD), devido à absorção de água por parte do epóxi (fenómeno designado por plasticização). O adesivo epóxi absorve água e, como consequência, este plastifica, aumentando assim o seu volume e reduzindo as suas propriedades mecânicas, nomeadamente a rigidez e resistência à tração e a respetiva temperatura de transição vítrea [8, 9, 10].

Quadro 1. Propriedades mecânicas à tração do laminado CFRP e do adesivo epóxi.

Condição ambiental	CFRP		Adesivo epóxi	
	Módulo de elasticidade E_{FRP} [GPa]	Resistência à tração f_{FRP} [MPa]	Módulo de elasticidade E_{ADH} [GPa]	Resistência à tração f_{ADH} [MPa]
REF0			7.2 (3.7%)	22.0 (4.5%)
TC240R	169.5 (2.5%)	2648.3 (1.8%)	6.7 (3.4%)	20.8 (2.2%)
FT240R				
REF480				
TW480	165.4 (2.5%)	2573.6 (2.5%)	3.5 (3.3%)	13.0 (2.1%)
CW480	167.3 (0.7%)	2459.5 (1.3%)	4.4 (1.5%)	15.0 (1.7%)
WD480	166.1 (0.8%)	2455.8 (2.3%)	5.2 (3.2%)	16.5 (2.5%)
TC240	169.4 (2.4%)	2642.8 (3.0%)	7.6 (4.7%)	27.3 (2.3%)
FT240	169.7 (2.1%)	2666.7 (1.8%)	5.5 (1.8%)	17.2 (2.5%)

3.2. Ensaio de arranque direto

Os principais resultados obtidos nos ensaios monotónicos de arranque direto, após as amostras terem sido submetidas ao respetivo envelhecimento acelerado, estão sumarizados no Quadro 2, onde são apresentados para cada série os valores médios: da força de arranque máxima, F_{lmax} ; do deslizamento na extremidade carregada quando atingida a F_{lmax} , s_{lmax} ; da tensão média máxima de corte da ligação ao nível da interface CFRP-epóxi, τ_{max} , que é calculada pela expressão $F_{lmax}/(P_f L_b)$, onde $P_f (= 2 \times w_f + 2 \times t_f)$ é o perímetro da secção transversal de CFRP em contacto com adesivo, sendo w_f e t_f a largura e a espessura do CFRP, respetivamente, e L_b o comprimento de amarração. Salienta-se que cada série é constituída por 4 provetes.

A Fig. 3 apresentam-se as curvas médias da relação entre a força de arranque e o respetivo deslizamento na extremidade carregada (F_l-s_l), obtidas nos ensaios pós-envelhecimento das amostras que foram submetidas às condições de envelhecimento acelerado estudadas. Nas mesmas curvas, os correspondentes resultados médios das séries de referência são também incluídos. Torna-se importante realçar que, tal como no Quadro 2, cada uma das curvas apresentada é obtida pelo valor médio dos resultados das quatro amostras ensaiadas para cada série/condição ambiental.

Com base nos resultados obtidos, em termos de alterações no comportamento de aderência dos provetes de betão reforçados com o sistema NSM CFRP devido às diferentes condições de exposição ambiental, a máxima redução da resistência da ligação do sistema em cerca de 5%, foi verificada nas amostras expostas a 240 ciclos de gelo/degelo (FT240). Por outro lado, o máximo aumento na resistência da ligação (de 8%) foi verificada no caso dos ciclos térmicos cujas temperaturas variaram entre -15 °C e +60 °C (TC240). Torna-se relevante notar que a forte redução nas propriedades mecânicas da resina epoxídica (38% e 47% para a resistência à tração e módulo de elasticidade, respetivamente) verificada devido ao efeito do fenómeno de plasticização, não teve influência na resposta global da ligação do sistema NSM CFRP-betão. Até ser atingida a carga de pico, o mecanismo resistente da ligação é essencialmente governado pela adesão química entre materiais (betão/adesivo e adesivo/CFRP), e apesar da degradação das propriedades mecânicas da resina epoxídica (uma vez que para os outros materiais a degradação registada é desprezável), este continua a ser suficiente para garantir a aderência.

Quadro 2. Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque direto devido às ações artificiais de envelhecimento acelerado.

Série	F_{lmax} [kN]	s_{lmax} [mm]	τ_{max} [MPa]	Modo de rotura*
DPT_E_REF0	24.3 (1.6%)	0.55 (11.1%)	17.7 (1.6%)	I-FA(3)
DPT_E_TC240R	27.4 (3.4%)	0.70 (2.7%)	20.1 (3.4%)	I-FA(4)
DPT_E_FT240R	28.8 (3.3%)	0.79 (5.5%)	21.0 (3.3%)	I-FA(3); I-FA+CC(1)
DPT_E_REF480	26.7 (4.5%)	0.58 (12.0%)	19.5 (4.5%)	I-FA(2); I-FA+CC(1)
DPT_E_TW480	26.9 (1.2%)	0.66 (10.1%)	19.7 (1.2%)	I-FA(3); I-FA+CC(1)
DPT_E_CW480	27.6 (3.7%)	0.73 (13.5%)	20.2 (3.7%)	I-FA(2); I-FA+CC(2)
DPT_E_WD480	26.3 (3.0%)	0.66 (6.5%)	19.3 (3.0%)	I-FA(3); I-FA+CC(1)
DPT_E_TC240	29.7 (1.9%)	0.76 (7.3%)	21.8 (1.9%)	I-FA+CC(2); I-FA(2)
DPT_E_FT240	27.4 (5.2%)	0.72 (11.5%)	20.0 (5.2%)	I-AC+CS(3); I-FA+CS(1)

Nota: os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação das séries constituídas por quatro amostras; * o valor entre parênteses corresponde ao número de amostras onde foi verificado esse modo de rotura.

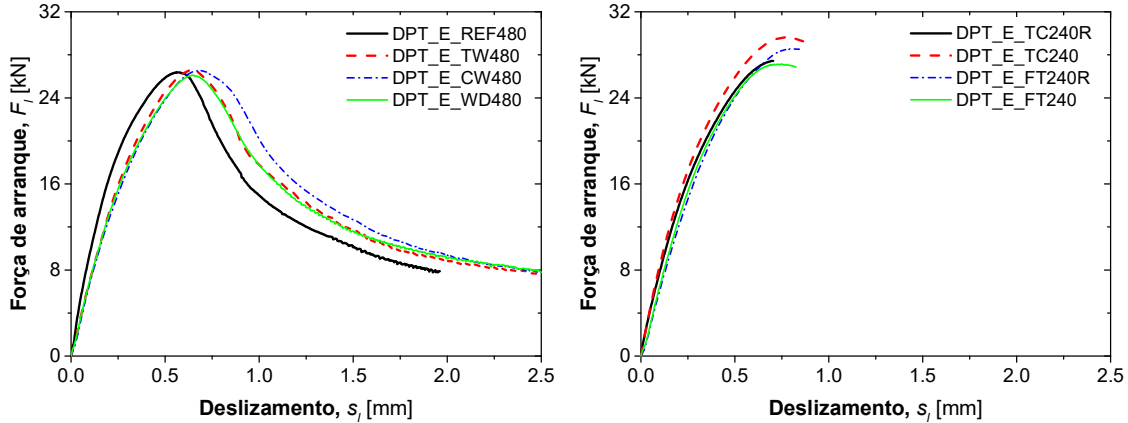


Figura 3. Curvas médias da força de arranque *versus* deslocamento na extremidade carregada das amostras expostas a: (a) água pura, água com cloretos e ciclos de molhagem/secagem; (b) ciclos térmicos e ciclos de gelo-degelo.

Os modos de rotura foram categorizados pela designação genérica “X-Y”, onde X define o modo de rotura (I – na interface; C – coesiva) e Y identifica a localização onde esta ocorreu (C – betão; A – adesivo; FA – na interface FRP/adesivo; AC – na interface adesivo/betão). Para além dos três principais modos de rotura anteriormente descritos (I-FA, I-AC e C-C), em alguns dos provetes também se observou (ver Quadro 2): o destacamento do betão (CS – *concrete splitting*), a fendilhação do adesivo (AC – *adhesive cracking*) e a fendilhação do betão (CC – *concrete cracking*). O modo de rotura predominante ocorreu na interface FRP/adesivo (I-FA), como pode ser observado nas Figs. 4a e 4b. As alterações no modo de rotura das amostras expostas a ciclos de gelo/degelo (ver Fig. 4c), podem ser justificadas devido a: (i) redução das propriedades mecânicas do substrato de betão de recobrimento, embora tal observação não tenha sido verificada na caracterização mecânica do betão através dos ensaios de compressão; (ii) redução da resistência à tração do adesivo após a exposição a ciclos FT; e (iii) deterioração da aderência entre adesivo e betão.

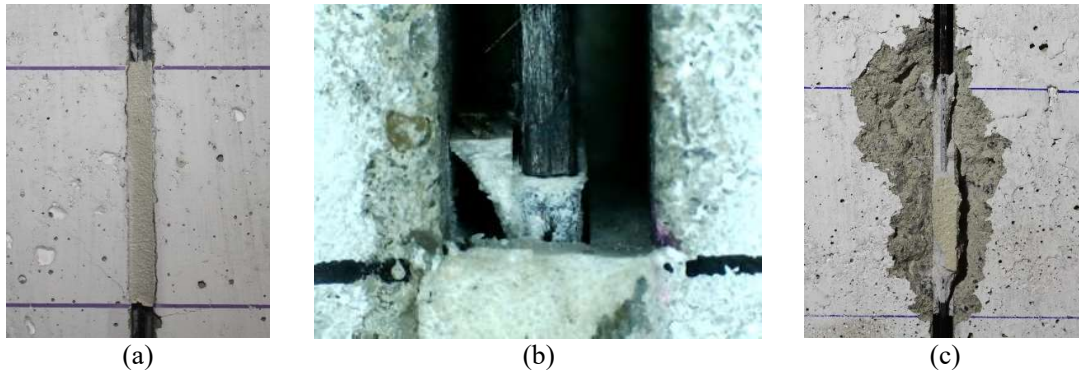


Figura 4. Modos de rotura observados: (a) I-FA: deslizamento ao nível da interface CFRP/adeseivo; (b) amplificação da secção de extremidade carregada após a rotura; (c) I-AC+CS: deslizamento ao nível da interface adesivo/betão com desagregação do betão.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou de forma breve o trabalho experimental realizado no estudo da durabilidade da aderência de sistemas NSM CFRP. As condições ambientais investigadas, que podem ser consideradas bastante severas, não se traduziram em elevados índices de degradação no desempenho global da ligação do sistema NSM CFRP, com uma redução máxima da resistência da ligação em cerca de 5%, ocorrida após as amostras terem sido expostas a 240 ciclos de gelo/degelo. É importante destacar que a forte redução das propriedades mecânicas da resina epoxídica (38% e 47% na resistência à tração e módulo de elasticidade, respetivamente) verificadas devido ao efeito do fenómeno de plasticização, não tiveram influência relevante na resposta global da ligação do sistema NSM CFRP.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado por fundos FEDER através do Programa Operacional para Fatores de Competitividade – COMPETE e fundos nacionais através da FCT- Fundação Portuguesa para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto de investigação CutInDur FCOMP-01-0124-FEDER-014811 (FCT PTDC/ECM/112396/2009), FRPLongDur POCI-01-0145-FEDER-016900 (FCT PTDC/ECM-EST/1282/2014) e em parte financiado pelo projeto POCI-01-0145-FEDER-007633. Os autores também gostariam de agradecer à empresa S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda, que esteve envolvida, apoiando e contribuindo para o desenvolvimento deste estudo. O primeiro e quarto autor desejam também agradecer as bolsas SFRH/BD/80338/2011 e SFRH/BD/89768/2012, respetivamente, financiadas pela FCT.

REFERÊNCIAS

- [1] Zoghi, M. - Ed. (2013). The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering, CRC Press, pp. 359-387 (ISBN 9780849320132).
- [2] FIB (2001). Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Bulletin no. 14, The International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, pp. 130.
- [3] CNR-DT 200 (2004). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. CNR - Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Italy, pp. 154.
- [4] ACI 440.2R-08 (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Reported by ACI Committee 440, American Concrete Institute, pp. 80.

- [5] HB 305 (2008). Design handbook for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs. Standards Australia GPO Box 476, Sydney, NSW 2001, Australia, pp. 76.
- [6] FIB (2007). FRP reinforcement in RC structures. Bulletin no. 40. The International Federation for Structural Concrete (FIB). Report prepared by Task Group 9.3 FRP reinforcement for concrete structures, Lausanne, Switzerland, pp. 160.
- [7] Fernandes, P. (2016). Bond behaviour of NSM CFRP-concrete systems: durability and quality control, PhD thesis. University of Minho, Guimarães, Portugal.
- [8] Cabral-Fonseca, S.; Correia, JR.; Rodrigues, MP.; Branco, FA. (2012). Artificial Accelerated Ageing of GFRP Pultruded Profiles Made of Polyester and Vinylester Resins: Characterisation of Physical–Chemical and Mechanical Damage, *Strain*, Vol. 48(2), pp. 162-73.
- [9] El Yagoubi, J.; Lubineau, G.; Saghir, S.; Verdu, J.; Askari, A. (2014). Thermomechanical and hygroelastic properties of an epoxy system under humid and cold-warm cycling conditions. *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 99, pp. 146-55.
- [10] Frigione, M.; Naddeo, C.; Acierno, D. (2001). Cold-curing epoxy resins: Aging and environmental effects. I-Thermal properties, *Journal of polymer engineering*, Vol. 21(1), pp. 23-52.