

EFEITO DE CICLOS TÉRMICOS E DE CICLOS GELO/DEGELO NO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS DE BETÃO REFORÇADOS COM LAMINADOS DE CFRP PELA TÉCNICA NSM

Patrícia Silva

Aluna Doutoramento
ISISE / Univ. Minho
Guimarães
patricia.silva@civil.uminho.pt

Pedro Fernandes

Aluno Doutoramento
ISISE / Univ. Minho
Guimarães
pfernandes@civil.uminho.pt

José Sena-Cruz*

Prof. Associado
ISISE / Univ. Minho
Guimarães
jsena@civil.uminho.pt

Miguel Azenha

Prof. Auxiliar
ISISE / Univ. Minho
Guimarães
miguel.azenha@civil.uminho.pt

Joaquim Barros

Prof. Catedrático
ISISE / Univ. Minho
Guimarães
barros@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

O presente trabalho pretende contribuir para o conhecimento da durabilidade da técnica NSM com recurso a laminados de CFRP sob a ação de ciclos térmicos e ciclos gelo/degelo. Assim, foi desenvolvido um programa experimental com recurso a ensaios de arrancamento direto em provetes cúbicos e de flexão em lajes. Os provetes foram submetidos às ações ambientais durante um período de 4 e 8 meses. No final de cada período, os provetes foram ensaiados até à rotura. A lei de ciclos térmicos imposta aos provetes foi definida com base na EN 13687-3:2002, cujo intervalo de temperaturas variou entre -15°C e $+60^{\circ}\text{C}$. A lei de ciclos gelo/degelo foi definida com base na CEN/TS 12390-9:2006 e a temperatura variou entre -18°C a $+20^{\circ}\text{C}$. De uma forma geral verificou-se que as ações ambientais impostas não afetaram a capacidade de carga dos provetes reforçados.

Palavras-chave: NSM CFRP; Durabilidade; Ciclos térmicos; Gelo/degelo; Betão

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, a técnica de reforço NSM (*Near-Surface Mounted*), que consiste na inserção de polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*) no betão de recobrimento, tem vindo a ser adotada para aumentar a capacidade de carga de estruturas de betão armado (BA). A investigação existente relativamente à técnica NSM

foca essencialmente os aspetos estruturais. Neste contexto, constata-se que existem ainda muitas áreas onde o conhecimento sobre a técnica NSM é escasso, como é o caso do comportamento a longo-prazo e durabilidade.

A temperatura e humidade são dois dos principais fatores incluídos nas ações ambientais que podem afetar negativamente a durabilidade das estruturas de betão armado reforçadas com FRP. A literatura sobre o comportamento de estruturas de betão reforçadas com laminados e varões de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) submetidas à variação de temperatura e humidade ainda é bastante escassa. No entanto, existem na literatura alguns estudos em que foi testado o efeito de temperaturas elevadas (acima dos 100 °C) e temperaturas baixas (aproximadamente -25 °C) e o efeito de ciclos gelo/degelo (aproximadamente de -25 °C a 21 °C) [1, 2]. Em termos de capacidade de carga e rigidez em fase fendilhada, Burke *et al.* [2] verificaram que as lajes reforçadas com materiais do tipo CFRP de acordo com a técnica NSM não foram afetadas depois de terem sido submetidas a uma temperatura negativa constante de -26 °C. Os mesmos autores realizaram uma outra campanha de ensaios experimentais com lajes submetidas a uma carga de serviço constante, em que verificaram que as lajes foram capazes de resistir a uma temperatura de 100 °C durante um período de 40 minutos e a uma temperatura de 200 °C durante 30 minutos. A rotura ocorreu devido ao deslizamento do reforço na interface adesivo/betão. Ensaio realizados com provetes de epóxi indicaram perdas significativas em termos de resistência quando submetidos a temperaturas elevadas (100 °C e 200 °C), uma vez que os ensaios se efetuaram com temperaturas que excederam consideravelmente a temperatura de transição vítrea (T_g) dos adesivos epóxi usados [1].

Palmieri *et al.* [3], para a técnica NSM, estudaram o comportamento da aderência (ligação) entre laminados de CFRP e o betão através de ensaios de corte duplo a temperaturas elevadas (dos 20 °C aos 100 °C – temperaturas registadas no epóxi). Os resultados indicaram que o T_g do adesivo epóxi usado teve uma influência significativa na resistência da ligação e na carga de rotura do sistema NSM FRP. Para temperaturas acima do T_g ocorreu uma alteração do modo de rotura de fendilhação do adesivo (a 50 °C) para o destacamento do FRP (a 100 °C). No estudo reportado por Yu & Kodur [4], os provetes de betão, reforçados com laminados e varões de CFRP de acordo com a técnica NSM, foram ensaiados para se avaliar a resistência da ligação numa gama de temperaturas entre os 20 °C e os 400 °C (temperatura controlada à superfície do epóxi). Inicialmente, os provetes foram aquecidos, a uma velocidade de 5-10 °C/min., e depois sujeitos ao ensaio de arranque direto. Os autores concluíram que a resistência da ligação do sistema a 200 °C decresceu cerca de ~80% quando comparado com os provetes de referência ensaiados a 20 °C.

Al-Mahmoud *et al.* [5] estudaram os efeitos da exposição ambiental (ciclos de gelo/degelo) no comportamento da ligação de diferentes sistemas de reforço com CFRP, com recurso a ensaios de arranque em flexão. No caso da técnica NSM foram testados dois tipos de materiais de colagem do CFRP ao betão: (i) resina epóxi e (ii) argamassa. Os provetes

JPEE 2014 – Efeito de ciclos térmicos e de ciclos gelo/degelo no comportamento estrutural de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP pela técnica NSM 2

foram expostos a 300 ciclos de gelo/degelo. Cada ciclo consistia em submeter durante 16 horas os provetes uma temperatura de -18°C , seguindo-se 8 horas a uma temperatura de $+15^{\circ}\text{C}$. Para os provetes reforçados com varões NSM CFRP em que o FRP é embebido em resina epóxi, o modo de rotura ocorreu sempre por deslizamento na interface CFRP/epóxi. A ligação entre a resina epóxi e o betão não foi afetada pelos ciclos gelo/degelo. Contudo, foi também observada fendilhação na face exterior da camada de resina. Para os provetes em que foi utilizada a argamassa o modo de rotura foi por deslizamento na interface betão/argamassa para ambos os provetes sujeitos aos ciclos de envelhecimento e não envelhecidos [5].

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar comportamento de estruturas reforçadas com laminado de CFRP de acordo com a técnica NSM quando submetidas ao efeito de ciclos de temperatura e de ciclos gelo/degelo. Para alcançar o objetivo foi desenvolvido um programa experimental composto por duas partes: (i) ensaios de arranque direto com intuito de avaliar a ligação betão/adeseivo/CFRP; (ii) ensaios de flexão em lajes para avaliar o comportamento global ao nível estrutural.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Considerações Gerais

O programa experimental é constituído por um total de 8 lajes (SL) reforçadas e 32 provetes cúbicos de betão para a realização de ensaios de arranque direto (DPT). Metade dos provetes foram submetidos a variações de temperatura numa câmara climática (CC) através de ciclos térmicos (TC) e outra metade foi submetida a ciclos gelo e degelo (FT). Adicionalmente, foram também colocados na CC, 28 provetes para caracterização dos materiais para cada ensaio tipo (TC e FT): 4 provetes cúbicos de betão, 12 laminados de CFRP e 12 provetes de epóxi, de modo a avaliar a sua degradação física, química, mecânica e perceber a influência de cada componente (material) na resposta global observada (efeitos de sinergia). O reforço foi realizado 86 dias após a betonagem que conduziu à moldagem de todos os provetes incluídos no presente programa experimental, a partir de uma única amassadura. Todos os provetes reforçados foram mantidos em ambiente de laboratório até ao início dos respetivos ensaios: (i) provetes TC, 5 meses após o reforço; (ii) provetes FT, 15 meses após o reforço.

O ciclo térmico foi definido com base na norma EN 13687-3:2002 com uma duração de 24 . A temperatura variou entre -15°C e 60°C com patamares de 12.5 h e 10 h, respetivamente, como se pode observar na Fig. 1a. Relativamente à humidade relativa (HR), o objetivo era atingir os 95%, no entanto devido a limitações técnicas da CC, a RH variou entre 20% e 85%. Refira-se que a gama de temperaturas usada corresponde a um cenário limite em condições de serviço para Portugal. Por outro lado haverá ainda a referir o facto de o valor da temperatura de transição vítrea T_g do adesivo epóxi variar entre 55°C e 60°C [6]. Os valores de T_g apresentados foram obtidos através da técnica de análise mecânica dinâmica

JPEE 2014 – Efeito de ciclos térmicos e de ciclos gelo/degelo no comportamento estrutural de elementos de 3
betão reforçados com laminados de CFRP pela técnica NSM

(DMA). Ao fim de 120 ciclos (4 meses), metade dos provetes foram removidos da CC e ensaiados até à rotura. Posteriormente, os restantes provetes foram mantidos na CC durante mais 120 ciclos (perfazendo um total de 240 ciclos). Os provetes de referência (R) (provetes não envelhecidos) foram mantidos em ambiente de laboratório e ensaiados ao mesmo tempo que os provetes envelhecidos.

A estratégia adotada nos ensaios de ciclos gelo/degelo foi semelhante à dos ciclos térmicos, no que diz respeito ao número de ciclos e duração dos ensaios. O ciclo gelo/degelo foi definido com base na CEN/TS 12390-9:2006, com a duração de 24 h por ciclo. Na Fig. 1b apresentam-se as temperaturas observadas, cuja variação ocorreu entre $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, com patamares de 12.5 h e 3 h, respetivamente. No entanto, em alguns períodos do ano o ciclo foi realizado a temperaturas negativas inferiores devido limitações técnicas da CC, uma vez que esta era influenciada pela temperatura ambiente do laboratório, estando, por isso representado o intervalo de temperaturas reais. A HR variou entre 55% e 95%. Para a realização deste ensaio, foi necessário desenvolver um sistema adicional que tentou promover o gelar/degelar os provetes, através da saturação dos mesmos durante o período do ciclo em que as temperaturas eram positivas. Este mesmo sistema procedia à remoção da água excedente usada na saturação dos provetes, antes da CC submeter os provetes a temperaturas negativas. Este sistema incluiu as seguintes etapas: (i) colocação de um tanque dentro da CC para alocar os provetes; (ii) colocação de um depósito de água fora da CC; (iii) instalação de manguerias e bombas de água para fazer a bombagem da água entre o tanque e o depósito. Todo o processo de gelar/degelar os provetes foi automatizado, através do uso de temporizadores digitais.

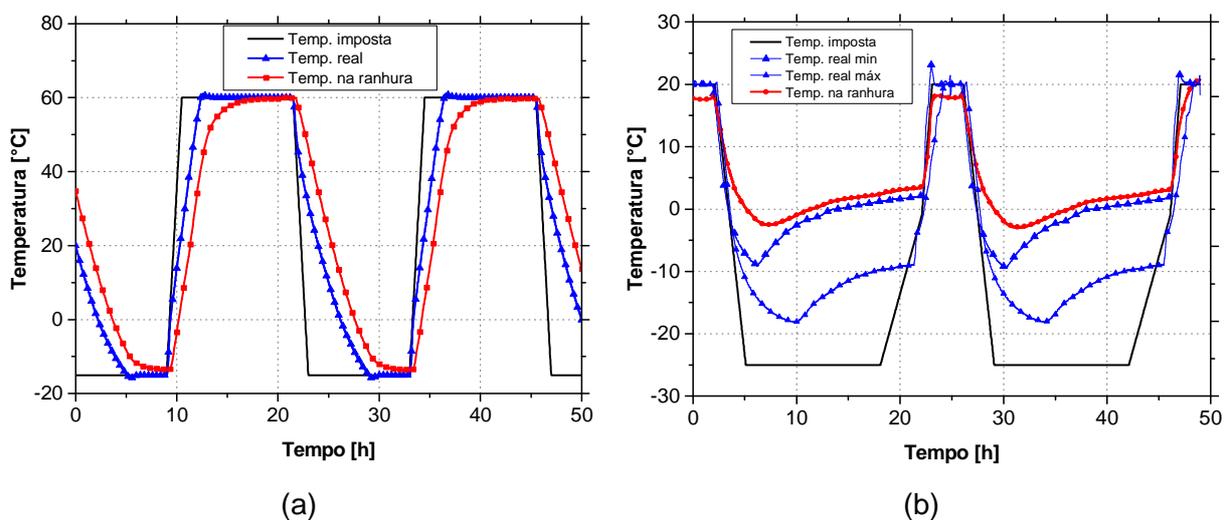


Figura 1. Medições de temperatura: imposta, medida na câmara climática e na ranhura para o ensaio TC (a) e FT (b).

A Fig. 1 também inclui os resultados da evolução da temperatura numa das ranhuras onde os reforços foram instalados, através do uso de um termopar do tipo k colocado nesta aquando do reforço. No que diz respeito aos ensaios TC observa-se apenas uma expectável

ligeira diferença entre a temperatura registada na CC e na ranhura. Esta naturalmente deve-se ao facto de o epóxi apresentar uma certa resistência à transmissão de calor. No que diz respeito aos ensaios FT, observa-se uma maior discrepância entre a temperatura registada na ranhura e na CC, em especial para temperaturas negativas. Para este efeito, para além da existência do epóxi, a saturação dos provetes poderá também ter contribuído para o retardamento da transmissão do arrefecimento para zonas mais distantes da superfície.

A designação dada a cada série de provetes consistiu num conjunto de caracteres alfanuméricos separado por espaços. O primeiro subconjunto de caracteres indica o tipo de provete utilizado (DPT – Provelte prismático para o ensaio de arranque direto; SL – Laje para os ensaios de flexão). O segundo subconjunto de caracteres especifica o tipo de ensaio: TC – ciclos térmicos; FT – ciclos gelo/degelo. De seguida é acrescentado um número que representa o número de ciclos de TC ou FT a que o provete esteve sujeito (120 ou 240). Por último, no caso dos provetes de referência, foi adicionado o carater R à designação. Refere-se ainda que, no caso dos provetes DPT cada série foi composta por quatro provetes.

2.2 Geometria dos provetes e configuração de ensaio

A geometria e a configuração do ensaio de arranque direto (DPT) está representada na Fig. 2a. Os provetes consistem em blocos cúbicos de 200 mm de aresta, em que o laminado de CFRP (com secção transversal de $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$) se encontra embebido numa ranhura pré-executada. O comprimento da colagem inicia-se a 100 mm a partir do topo do bloco de betão para prevenir uma rotura prematura do betão por destacamento. Para minimizar o deslocamento vertical do provete durante o ensaio de arranque, foi colocada uma chapa de aço com 20 mm de espessura no topo deste. A chapa foi fixada à base com recurso a quatro varões roscados M10, tendo sido aplicado um momento de aperto de $30 \text{ N}\cdot\text{m}$, que induziu uma compressão inicial ao betão de $\approx 2.0 \text{ MPa}$. A instrumentação dos provetes consistiu num transdutor de deslocamento (LVDT), para medir o deslizamento na extremidade carregada s_i , e uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kN e precisão de 0.05%, para registar a força aplicada, F . Os ensaios foram controlados por outro LVDT localizado entre o atuador e a amarra, a uma velocidade de $2 \mu\text{m/s}$.

Relativamente à configuração de ensaio e instrumentação das lajes encontra-se ilustrada nas Fig. 2b e 2d. As lajes têm 2000 mm de comprimento, 300 mm de largura e 80 mm de espessura. A armadura longitudinal é composta por $4\phi 6$, que corresponde a uma percentagem de armadura longitudinal igual a 0.47%. A solução de reforço à flexão é composta por 3 laminados de CFRP (com secção transversal de $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$), de acordo com a técnica NSM, que correspondem a uma percentagem de armadura longitudinal equivalente de 0.68%. Neste estudo experimental, foi adotada uma configuração de ensaio à flexão de quatro pontos. O ensaio foi controlado pelo transdutor de deslocamento interno do equipamento a uma velocidade de $20 \mu\text{m/s}$. A instrumentação utilizada durante os ensaios de flexão incluiu 5 LVDTs (ver Fig. 2d), uma célula de carga (capacidade máxima de

200 kN e precisão de 0.05%) e extensómetros (TML BFLA-5-3-3L). Foram colados 5 extensómetros na face lateral do CFRP intermédio para medir as extensões em secções distintas. Foram também colados dois extensómetros na armadura longitudinal e um na fibra superior do betão na secção de meio vão. Mais informações relacionadas com a preparação e reforço dos provetes estão disponíveis em [7]. O reforço foi realizado no laboratório a uma temperatura de 25 °C e a uma HR de 42%.

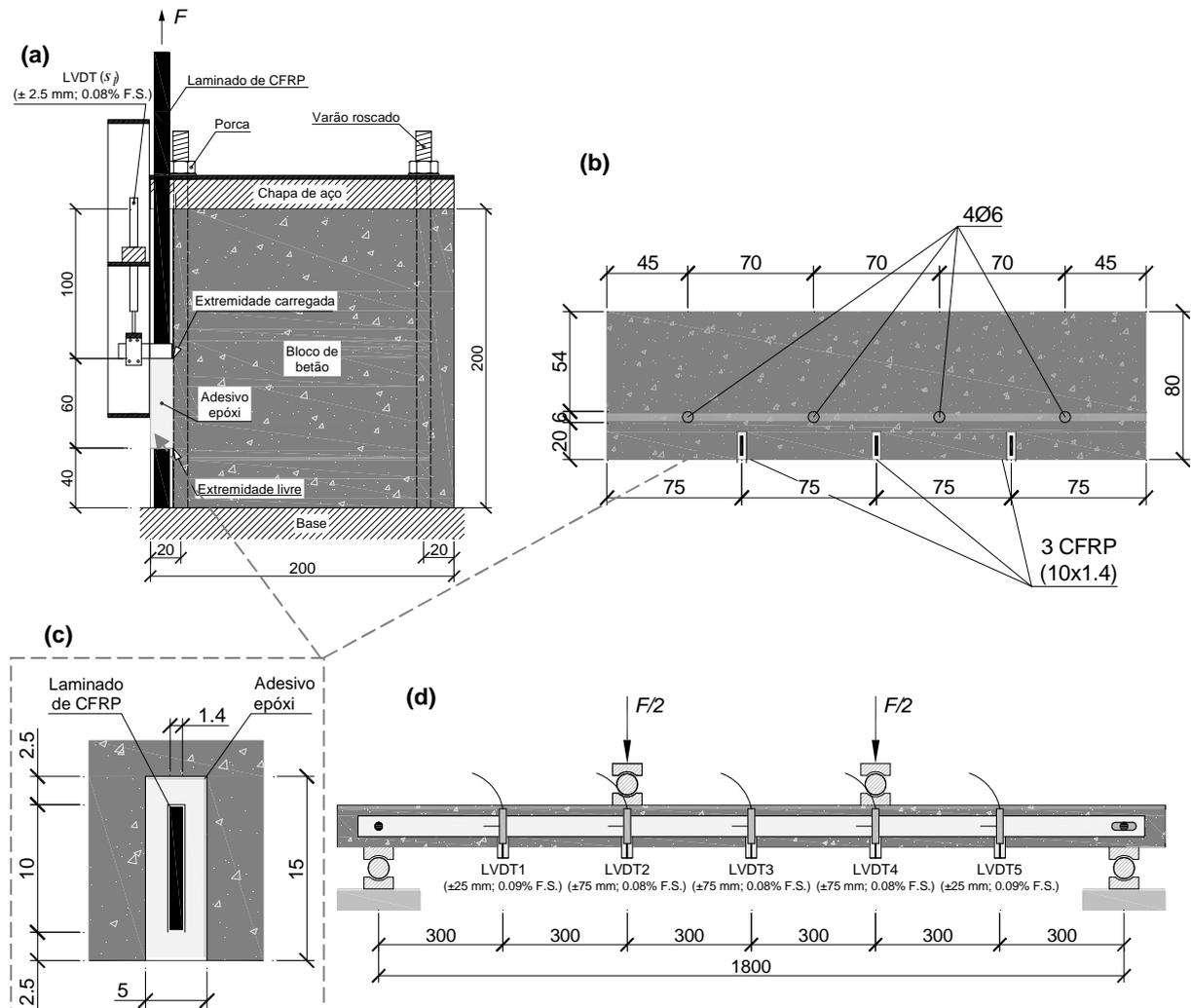


Figura 2. Configuração dos ensaios monotónicos à rotura: (a) ensaio de arranque direto; (b) secção transversal da laje; (c) detalhe do sistema de reforço; (d) ensaio à flexão da laje. Nota: todas as cotas encontram-se em milímetros.

2.3 Caracterização dos materiais

O Quadro 1 inclui as propriedades mecânicas dos materiais intervenientes (valores médios a partir de 6 ensaios/amostras). Os varões de aço da armadura longitudinal foram caracterizados de acordo com a norma NP EN 10002-1:1990. Os laminados de CFRP e o

adesivo epóxi utilizados no presente trabalho foram caracterizados em conformidade com a norma ISO 527-5:1997 e ISO 527-2:1993, respetivamente.

Quadro 1. Propriedades mecânicas dos materiais – provetes não envelhecidos (valores médios).

	Resistência à compressão [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à tração [MPa]
Betão	52.3 ⁽¹⁾ (2.49%); 48.2 ⁽²⁾ (3.19%) 52.2 ⁽³⁾ (0.60%); 54.7 ⁽⁴⁾ (2.92%)	-	-
Aço	-	212.2 (6.3%)	733.0 (1.0%)
CFRP	-	169.5 (2.5%)	2648.3 (1.8%)
Epóxi	-	7.21* (3.7%); n/a**	22.0 ⁽¹⁾ (4.5%); 20.7 ⁽²⁾ (1.0%)

Notas: (1) Ensaios realizados à mesma idade que os TC120; (2) Ensaios realizados à mesma idade que os TC240; (3) Ensaios realizados à mesma idade que os FT120; (4) Ensaios realizados à mesma idade que os FT240; Os valores entre parêntesis são os correspondentes coeficientes de variação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Betão, laminado de CFRP e epóxi

A Fig. 3 resume a variação de resistência dos materiais envelhecidos (submetidos aos ciclos TC) em relação aos de referência, i.e. não envelhecidos. A variação de resistência foi definida como o rácio $(TC - REF) / REF$, em que TC e REF são as resistências dos materiais submetidos aos ciclos térmicos e os de referência, respetivamente, ensaiados à mesma idade. A partir destes resultados, foi possível concluir que os ciclos térmicos não provocaram variações significativas de resistência à tração do laminado de CFRP nem à compressão do betão. A variação de 4% da resistência à compressão do betão (TC240) como se observa na Fig. 3 poderá não traduzir um comportamento realista, uma vez que a resistência à compressão do betão de referência à mesma idade (ver Quadro 1) apresentou um valor abaixo do esperado, quando comparado com os restantes casos de provetes de referência. Contudo não foi possível determinar as causas para este comportamento anómalo. No entanto, a resistência à tração do adesivo epóxi aumentou cerca de 18% e 32% para os provetes submetidos a 120 e 240 ciclos térmicos, respetivamente. A ficha técnica do epóxi não disponibiliza informação acerca do seu processo de cura e pós-cura. Contudo, na literatura é reportado que, dependendo do tipo de resina epóxi, é comum existir uma fase de pós-cura do epóxi, que melhora as suas propriedades mecânicas. O processo de pós-cura acontece quando o material é submetido a uma temperatura superior à da primeira cura [8].

No que diz respeito aos ensaios FT, observou-se que a variação da resistência à compressão do betão foi cerca de 0.2% e -1.5% ao fim de 4 e 8 meses de ensaio, respetivamente. No presente artigo não são reportados resultados relativos ao epóxi e laminado de CFRP para o ensaio FT, em virtude de os mesmos ainda não terem sido realizados.

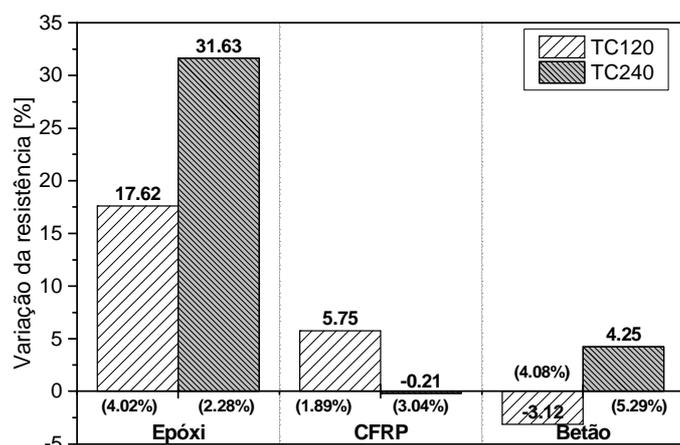


Figura 3. Variação da resistência dos materiais submetidos aos ciclos térmicos em relação aos provetes de referência (não envelhecidos).

3.2 Ensaios de arranque direto

A Fig. 4 apresenta a relação entre força de arranque e o deslizamento na extremidade carregada (F_T - s) para todos os ensaios de aderência realizados. Na análise da performance da ligação betão/adeseivo/CFRP foram avaliados os seguintes parâmetros: F_{Tmax} é a força máxima de arranque; s_{Imax} é o deslizamento na extremidade carregada da ligação correspondente a F_{Tmax} , $\tau_{max} = F_{Tmax} / (P_f L_b)$ é a tensão média de corte da ligação avaliada ao nível da interface CFRP-epóxi, sendo P_f o perímetro da secção do CFRP e o L_b é o comprimento da ligação. O Quadro 2 resume todos os parâmetros analisados, incluindo os modos de rotura observados nos ensaios, tendo sido usada a seguinte nomenclatura: D – deslizamento na interface adesivo/laminado; C – destacamento do betão.

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que os ciclos térmicos melhoraram o comportamento da ligação, conduzindo a valores mais elevados de F_{Tmax} , τ_{max} e s_{Imax} , quando comparados com os provetes de referência. Nos ensaios relativos aos ciclos térmicos (TC) foram observados dois modos de rotura: destacamento do betão (C) na vizinhança da zona da ligação e deslizamento na interface adesivo/laminado (D). Os resultados obtidos pelos ensaios de arranque direto, que comprovam a melhoria da performance da ligação devido aos TC, podem ser justificados pelos resultados observados no adesivo epóxi sujeito aos ciclos térmicos, o qual teve um aumento de resistência devido a efeitos de pós-cura.

Relativamente aos provetes sujeitos aos ciclos de gelo/degelo (FT), em termos globais a resistência da ligação e o s_{Imax} não foram afetados pelas ações ambientais consideradas.

Quanto aos modos de rotura, verificou-se que para os 120 ciclos de envelhecimento (FT120) o modo de rotura alterou-se comparativamente aos provetes de referência, i.e. passou de D para C (ver Fig. 5). Esta alteração é justificada pela ação dos ciclos de gelo/degelo, que apesar de não ter alterado a resistência à compressão do betão (ver secção 3.1), fragilizaram/degradaram as zonas mais expostas dos provetes, i.e. as zonas mais superficiais. Uma vez que na técnica NSM os FRP são inseridos na parte superficial do betão, o modo de rotura passou a ocorrer por destacamento no betão em vez de deslizamento na interface adesivo/laminado. Para os 240 ciclos de envelhecimento (FT240), a rotura ocorreu ao nível da interface adesivo/laminado acompanhada com o destacamento do betão.

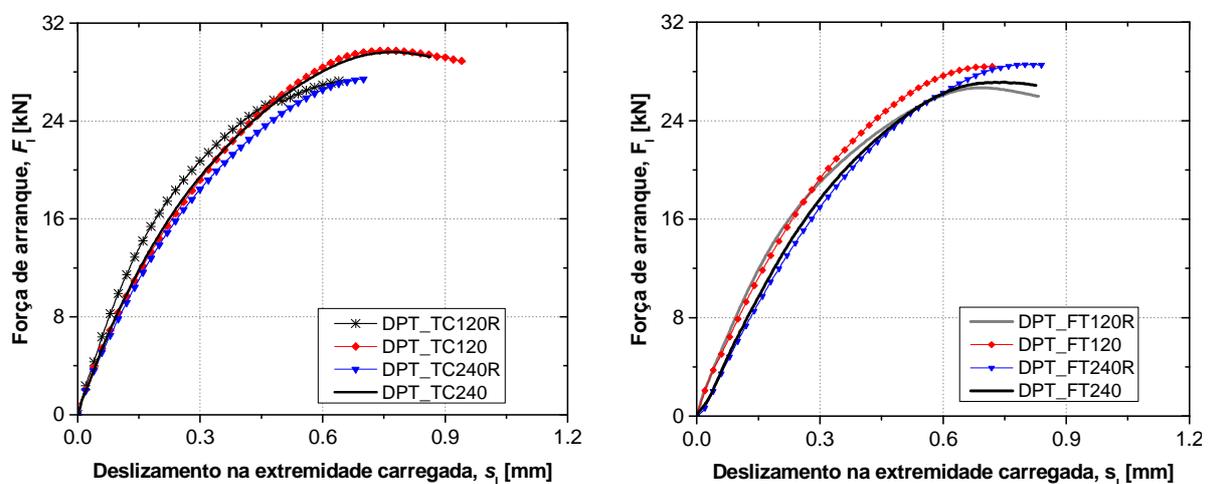


Figura 4. Resultados dos ensaios de arranque direto: (a) ciclos térmicos; (b) ciclos gelo/degelo.

Quadro 2. Resultados obtidos nos ensaios de arranque direto (valores médios)

Séries	F_{\max} [kN]	s_{\max} [mm]	τ_{\max} [MPa]	Modo de Rotura
DPT_TC120R	28.02 (5.83%)	0.64 (24.59%)	20.28 (5.83%)	D(2)*; D+C(2)*
DPT_TC120	29.88 (1.57%)	0.75 (7.58%)	21.84 (1.57%)	D(2)*; D+C(2)*
DPT_TC240R	27.48 (3.45%)	0.70 (2.74%)	20.08 (3.45%)	D(3)*
DPT_TC240	29.75 (1.91%)	0.76 (7.27%)	21.75 (1.91%)	D(2)*; D+C(2)*
DPT_FT120R	26.71 (3.21%)	0.70 (3.88%)	19.52 (5.83%)	D(4)*
DPT_FT120	28.63 (1.68%)	0.72 (10.26%)	20.92 (1.68%)	C(4)*
DPT_FT240R	28.77 (3.25%)	0.79 (5.53%)	21.03 (3.25%)	D(4)*
DPT_FT240	27.40 (5.21%)	0.72 (11.55%)	20.03 (5.21%)	D+C(4)*

Nota: os valores entre parêntesis são os respetivos coeficientes de variação; D – deslizamento na interface adesivo/laminado; C – destacamento do betão; *valor entre parêntesis corresponde ao número de provetes com aquele tipo de modo de rotura.

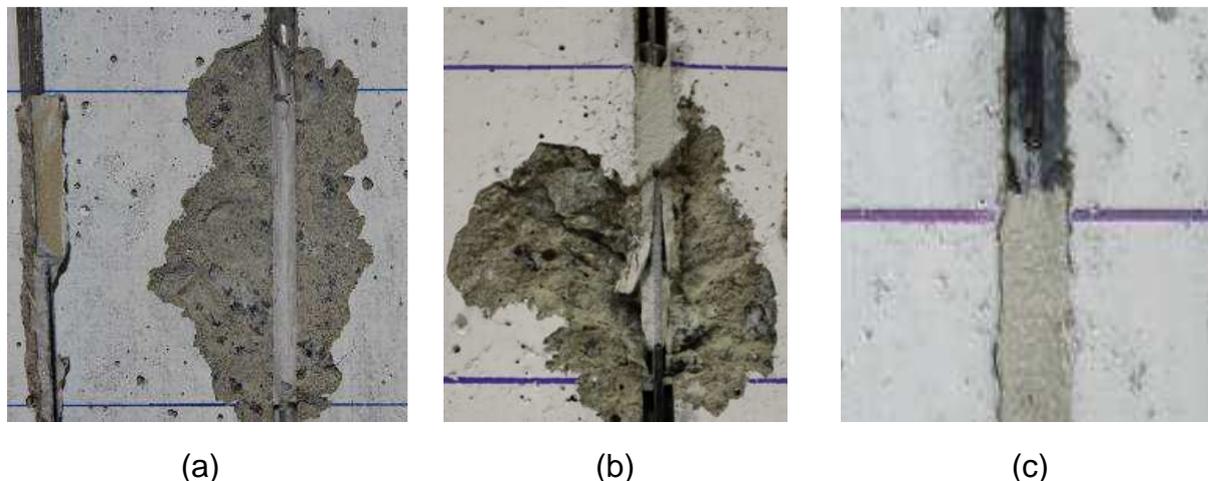


Figura 5. Modos de rotura dos ensaios de arranque direto: (a) destacamento do betão; (b) destacamento do betão + deslizamento na interface adesivo/laminado; (c) deslizamento na interface adesivo/laminado.

3.3 Lajes

Depois de as lajes terem sido submetidas aos ciclos térmicos ou ciclos gelo/degelo durante quatro e oito meses, foram ensaiadas monotonicamente até à rotura. A relação entre força total aplicada e o deslocamento a meio vão das lajes de referência e das lajes envelhecidas está representada na Fig. 6. Quando comparadas com as lajes de referência, observa-se que as lajes envelhecidas apresentam uma variação de resistência negligenciável, para ambos os ensaios.

Relativamente às lajes submetidas aos TC, estes resultados eram expectáveis uma vez que as propriedades mecânicas do betão e do CFRP não foram afetadas. Apesar de as propriedades do adesivo epóxi terem sido melhoradas, esse benefício não foi refletido no comportamento das lajes uma vez que o modo de rotura foi controlado pelas propriedades do betão. O Quadro 3 apresenta os valores de deformação e correspondente carga de início de fendilhação (δ_{cr} , F_{cr}), cedência (δ_y , F_y) e carga última (δ_{max} , F_{max}). Não se apresentam valores das extensões no CFRP das lajes submetidas aos TC em virtude destes extensómetros terem sido danificados durante a aplicação destes ciclos térmicos. O modo de rotura das lajes foi por esmagamento do betão na zona de flexão pura, exceto a laje SL_TC120R que rompeu por corte. Uma vez que este modo de rotura apenas se registou numa laje, uma explicação plausível poderá estar relacionada com um problema no processo de vibração durante a betonagem. Para além disso, o padrão de fendilhação observado revelou uma elevada concentração de fendas na vizinhança da seção de rotura, ao contrário do verificado nas restantes lajes cujo padrão de fendilhação se apresentou com fendas distribuídas ao longo de todo o vão.

As lajes relativas à série dos ensaios FT também apresentaram modo de rotura por esmagamento por betão (ver Fig. 7a). Contudo, a laje SL_FT120R e a laje SL_FT240

apresentaram um modo de rotura misto, isto é, esmagamento do betão mais rotura do laminado de CFRP (ver Fig. 7b). A rotura do CFRP é justificada pela elevada extensão do CFRP (próximo da extensão última, ver secção 2.3) medida na secção do ponto de carga, como se observa no Quadro 3. No entanto, esta ligeira mudança do modo de rotura não estará diretamente relacionada com a ação gelo/degelo uma vez que a resistência do betão não foi afetada por este tipo de ação.

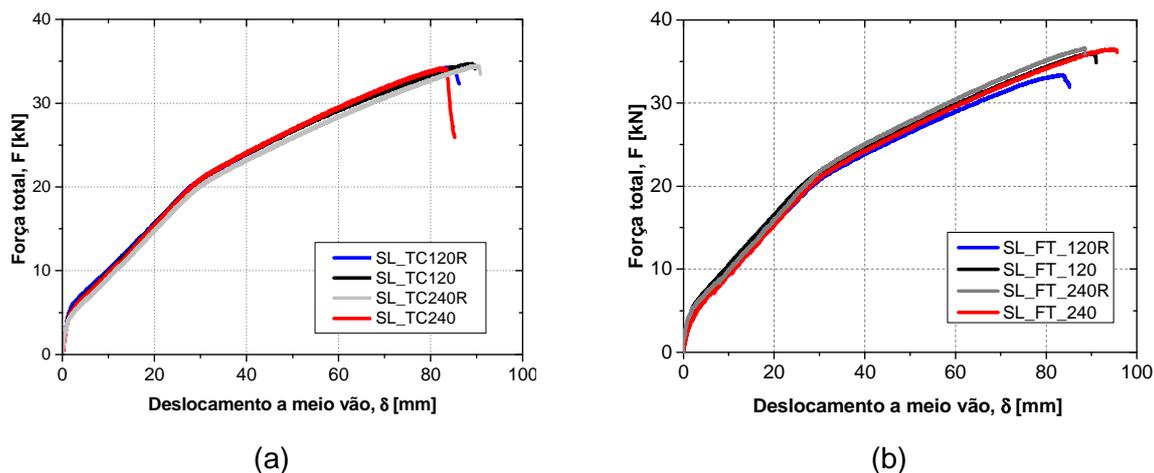


Figura 6. Resultados dos ensaios monotónicos dos ensaios de flexão das lajes: (a) ciclos térmicos; (b) ciclos gelo/degelo.

Quadro 3. Resultados experimentais dos ensaios monotónicos das lajes.

Laje	Fendilhação		Cedência		Rotura		$\varepsilon_f^{(1)}$ [‰]	Modo de rotura
	δ_{cr} [mm]	F_{cr} [kN]	δ_y [mm]	F_y [kN]	δ_{max} [mm]	F_u [kN]		
SL_TC120R	1.75	4.95	29.67	20.76	89.64	34.75	14.18	SF ⁽³⁾
SL_TC120	1.84	5.52	29.13	20.56	86.60	34.29	n.a.	CC ⁽⁴⁾
SL_TC240R	1.32	4.17	29.34	19.79	90.79	34.47	14.82	CC
SL_TC240	1.78	4.82	29.44	20.67	85.22	34.15	n.a.	CC
SL_FT120R	1.61	4.48	29.28	20.36	85.20	33.37	14.67 ⁽²⁾	CC+CFRP
SL_FT120	2.07	5.39	28.01	20.94	91.02	35.99	14.27	CC
SL_FT240R	1.52	4.58	29.83	21.71	88.61	36.62	13.49	CC
SL_FT240	1.86	3.77	29.48	20.79	95.69	36.51	15.82 ⁽²⁾	CC+CFRP

Nota: (1) Extensões no CFRP medidas a meio vão; (2) Extensões medidas na secção do ponto de carga; (3) SF – rotura por corte; (4) CC – rotura por esmagamento do betão.



Figura 7. Modos de rotura das lajes: (a) esmagamento do betão; (b) esmagamento do betão + rotura do CFRP.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho sumariza o efeito de ciclos térmicos (entre -15°C e 60°C) e ciclos gelo/degelo (entre -18°C e 20°C), em estruturas de betão reforçadas com CFRP de acordo com a técnica NSM, para um período de envelhecimento máximo de 8 meses. Os provetes foram submetidos durante 4 e 8 meses à ação de envelhecimento e depois ensaiados monotonicamente até à rotura com o intuito de se avaliar o correspondente desempenho.

Verificou-se que o laminado de CFRP e o betão não foram afetados ao nível de capacidade última pelo efeito dos ciclos térmicos. No entanto, observou-se um aumento da resistência do adesivo epóxi após ter sido sujeito à variação de temperatura entre -15°C e 60°C . Para além disso, também se verificou um aumento da resistência da aderência da ligação através dos ensaios de arranque direto, justificada pelos resultados obtidos no epóxi. Apesar dessa melhoria ao nível da ligação CFRP/epóxi/betão, o modo de rotura não foi influenciado pelos ciclos térmicos. Relativamente às lajes, verificou-se que o comportamento global destas não foi afetado pela ação térmica aplicada.

Através dos ensaios monotónicos realizados nos provetes após terem sido submetidos a ciclos de gelo/degelo, concluiu-se que a resistência do betão não foi afetada, assim como a capacidade resistente da ligação CFRP/epóxi/betão e a capacidade última das lajes. No entanto, verificou-se uma alteração no modo de rotura nos ensaios de arranque direto. O principal modo de rotura dos ensaios de arranque direto foi deslizamento na interface adesivo/laminado, tendo sido alterado para destacamento do betão ao fim de 120 ciclos. O destacamento do betão é justificado pelo enfraquecimento da superfície de betão imposta pela ação gelo/degelo. Tal como foi verificado nos ciclos térmicos, as lajes reforçadas também não mostraram qualquer degradação significativa ao nível de capacidade resistente depois de submetidas a ciclos gelo/degelo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelos fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e Fundos Nacionais através da FCT – Fundação da Ciência e Tecnologia no projeto CutInDur PTDC/ECM/112396/2009. Os autores agradecem também as bolsas SFRH/BD/89768/2012, SFRH/BD/80338/2011, financiadas pela FCT. Por último, os autores agradecem também a colaboração das seguintes empresas no presente projeto: S&P Clever Reinforcement Ibérica, Hilti, Casais, Artecarter, Tecnipor, Vialam, Novo Modelo Europa, Sika e Cachapuz.

REFERÊNCIAS

- [1] Burke, P. J., *et al.* – "Effects of elevated temperature on near surface mounted and externally bonded FRP strengthening systems for concrete", *Cement and Concrete Composites*, 2013, Vol. 35, p. 190-199.
- [2] Burke, P., *et al.* "Performance of NSM FRP strengthened concrete slabs at low temperatures", *Fourth Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2008)*, *International Institute for FRP in Construction (IIFC)*, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2008.
- [3] Palmieri, A., *et al.* "Influence of high temperature on bond between NSM FRP bars/strips and concrete", 10th international symposium of the fiber-reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures, Tampa, 2011.
- [4] Yu, B. e Kodur, V. K. R. – "Effect of high temperature on bond strength of near-surface mounted FRP reinforcement", *Composite Structures*, 2014, Vol. 110, p. 88-97.
- [5] Al-Mahmoud, F., *et al.* – "Bond strength of different strengthening systems – Concrete elements under freeze–thaw cycles and salt water immersion exposure", *Construction and Building Materials*, 2014, Vol. 70, p. 399-409.
- [6] Firmo, J. P., *et al.* – "Contribution to the Understanding of the Mechanical Behaviour of CFRP-Strengthened RC Beams in Fire: Experimental and Numerical Assessment" em *FRPRCS-11: 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures* Ed. 2013, p. 11.
- [7] Sena-Cruz, J., *et al.* – "Creep behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under different environmental conditions" em *FRPRCS-11: 11th International Symposium on Fibre Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures* Ed. por 2013, p. 12.
- [8] Moussa, O., *et al.* – "Effects of low-temperature curing on physical behavior of cold-curing epoxy adhesives in bridge construction", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012, Vol. 32, p. 15-22.