

## Investigação experimental de lajes reforçadas com sistemas NSM CFRP submetidas a temperaturas até 80 °C



Patrícia Silva<sup>1</sup>



Gonçalo Escusa<sup>2</sup>



José Sena-Cruz<sup>3</sup>



Miguel Azenha<sup>4</sup>

### Resumo

A aplicação de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) de acordo com a técnica *Near-Surface Mounted* (NSM) tem provado ser um dos sistemas de reforço mais eficientes no reforço de estruturas de betão armado (BA) à flexão. Apesar disso, existem ainda diversos tópicos que merecem ser investigados, tais como, o comportamento à flexão de lajes de BA reforçadas com sistemas NSM-CFRP expostas a temperaturas elevadas. O presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente o desempenho mecânico de lajes de BA reforçadas com sistemas NSM-CFRP sujeitos a temperaturas elevadas, através de ensaios térmicos em regime estacionário e transiente, combinados com um carregamento imposto. As temperaturas estudadas foram: 20, 40, 50, 70 e 80 °C para os ensaios em regime estacionário, e 20 °C e 80 °C para o caso dos ensaios em regime transiente. Durante os ensaios registaram-se nas lajes deslocamentos, extensões, temperaturas e cargas em todas as fases, com o objetivo de analisar a resposta do sistema em termos de força-deslocamento, evolução de extensões no betão, no CFRP e tensões de aderência entre o adesivo epoxídico e o CFRP. Os resultados experimentais mostraram que as lajes de BA reforçadas com sistemas de NSM-CFRP apresentaram um ligeiro decréscimo na capacidade última de carga e alteração do modo de rotura para apenas os casos de em que as lajes foram submetidas a temperaturas de 80 °C.

**Palavras-chave:** Betão, NSM CFRP, Laje de betão armado, reforço, temperaturas elevadas

---

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: patricia.silva@civil.uminho.pt

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: g.escusa@civil.uminho.pt

<sup>3</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: jsena@civil.uminho.pt

<sup>4</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal; e-mail: miguel.azenha@civil.uminho.pt

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a aplicação da técnica NSM (*Near-Surface Mounted*) usando polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) em estruturas de betão armado (BA) tem vindo a crescer. No entanto existem diversos aspetos fundamentais no desempenho deste sistema de reforço estrutural, como a resposta quando submetido a diferentes temperaturas, que devem ser estudados mais aprofundadamente. De facto, nos casos correntes, as estruturas são reforçadas com recurso a adesivos epoxídicos, os quais apresentam limitações significativas quando submetidos a temperaturas próximas ou superiores das da transição vítrea, à qual esta associada a transição do um material sólido para um material viscoso [1, 2]. Associada a esta mudança de estado, está inerente uma significativa diminuição das propriedades mecânicas do adesivo. Tipicamente, para os epóxis correntemente usados a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) varia entre os 50 e os 70 °C.

Sabendo que em determinadas estruturas, como é exemplo o caso das pontes, se podem registar temperaturas de serviço elevadas (próximas dos 80 °C) devido à existência de asfalto [3], combinado com efeito da radiação solar, o desempenho de estruturas reforçadas com materiais FRP colados com adesivos epoxídicos pode ficar comprometido e, justificando portanto a pertinência da realização de estudos nesta temática.

O comportamento da técnica NSM em contexto de temperaturas elevadas tem sido abordado por diversos autores. A título de exemplo apresentam-se dois estudos representativos. No trabalho efetuado por Burke *et al.* [4], os autores avaliaram um conjunto de vigas reforçadas com sistemas NSM-CFRP, inicialmente carregadas de modo a atingir, à temperatura ambiente, 40% da extensão última do CFRP. Posteriormente foram submetidas a temperatura crescente até se atingir os 100 °C e 200 °C. Concluíram que o sistema de reforço resistiu durante um período de 40 e 30 min, às temperaturas de 100 °C e 200 °C, respetivamente. O modo de rotura observado foi descolamento na interface adesivo-betão para os casos das temperaturas de 100 °C e 200 °C, enquanto nas vigas ensaiadas à temperatura ambiente, a rotura ocorreu por destacamento do betão na zona adjacente da interface epóxi-betão. Aparentemente, o sistema de reforço nas condições previamente especificadas foi capaz de manter a sua capacidade estrutural por curtos períodos de tempo expostos a temperaturas mais altas que o  $T_g$  do adesivo epoxídico utilizado ( $T_g=69$  °C).

Firmo *et al.* [5] realizaram um programa experimental que contemplou ensaios de corte duplo com laminados de CFRP instalados de acordo com a técnica NSM, com temperaturas na interface variando entre os 20 e 150 °C. O  $T_g$  do adesivo epoxídico utilizado foi de aproximadamente 55 °C. No programa experimental, os provetes foram numa primeira fase aquecidos até uma temperatura pré-definida (20, 55, 90, 120 e 150 °C) e posteriormente foram carregados até à rotura. Nas curvas tensão de corte-deslizamento obtidas verificou-se uma redução da rigidez e da tensão máxima de corte em cerca de 16% a 55 °C quando comparadas com os resultados obtidos a 20 °C. Nos ensaios realizados a temperaturas bastante mais altas que a  $T_g$ , observou-se uma perda significativa da resistência da ligação quando comparado com o provete de referência de 60% para a temperatura de 90 °C e 67% para as temperaturas de 120 e 140 °C [5].

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de lajes de betão armado reforçadas com sistemas de NSM-CFRP quando submetidas a temperaturas até 80 °C, com o objetivo de compreender os mecanismos resistentes que se desenvolvem nestas situações. Para tal, desenvolveu-se um programa experimental constituído por 9 lajes com o seguinte protocolo de ensaios: (i) ensaios em regime estacionário; e, (ii) ensaios em regime transiente. Nos ensaios em regime estacionário, as lajes foram aquecidas até a uma temperatura predefinida e, de seguida, foram ensaiadas monotonicamente até à rotura. No caso dos ensaios em regime transiente, primeiro as lajes foram carregadas até 2/3 da capacidade última de carga e de seguida foram submetidas a um aumento progressivo de temperatura. Quando as lajes alcançaram a temperatura predefinida, foram descarregas e ensaiadas monotonicamente até à rotura. As temperaturas adotadas no presente programa de ensaios compreenderam valores inferiores e superiores ao  $T_g$  do adesivo epoxídico utilizado (55 °C).

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Protocolos de ensaios adotados

O programa experimental foi dividido em dois grupos principais: (i) ensaios em regime estacionário (RE); e, (ii) ensaios em regime transiente (TR). No primeiro grupo ensaiaram-se 6 lajes reforçadas com a técnica NSM-CFRP a diferentes temperaturas, nomeadamente: 20, 40, 50, 70 e 80 °C. No segundo grupo, ensaiou-se uma laje a 20 °C e duas a 80 °C. No caso dos ensaios em regime estacionário, as lajes foram previamente aquecidas até à temperatura predefinida, sem aplicação de carga, e posteriormente, após atingir essa mesma temperatura, foram ensaiadas até à rotura com carregamento monotonicamente crescente (ver Fig. 1a). Para o caso dos ensaios em regime transiente, duas lajes foram inicialmente submetidas a um carregamento constante, a 2/3 da carga última (aplicada de forma quase estática), e de seguida, mantendo o carregamento constante, as lajes foram submetidas a um aumento de temperatura até a um valor predefinido (ver Fig. 1b). Uma das lajes foi exposta a uma temperatura de 80 °C durante um período de 4 horas, enquanto a outra laje foi exposta durante um período de 12 horas, aproximadamente. Após esta fase, as lajes foram descarregadas e subsequentemente carregadas até à rotura. Também foi ensaiada uma laje de referência, em que o protocolo de carregamento aplicado foi igual ao anterior, mas a temperatura constante de 20 °C.

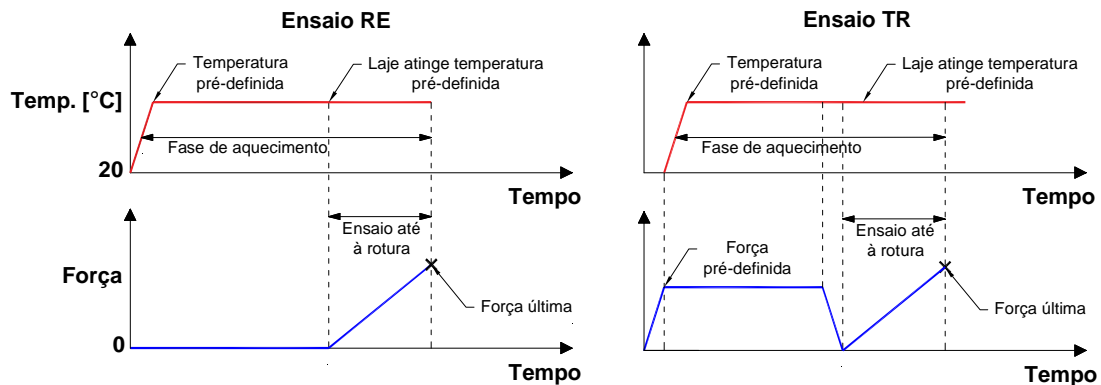


Figura 1. Protocolo de ensaios em regime estacionário (RE) e transiente (TR).

### 2.2. Geometria das lajes

As lajes utilizadas no presente programa experimental apresentam comprimento de 2000 mm, largura de 300 mm e espessura de 80 mm. A Fig. 2a representa a secção transversal da laje, onde se pode observar a armadura longitudinal de 4 varões de diâmetro de 6 mm e 3 laminados de CFRP, que correspondem a rácios de reforço longitudinal de 0.47% e reforço longitudinal equivalente de 0.68%, respetivamente. Na Fig. 2b encontra-se detalhada a geometria da ranhura e o correspondente reforço.

Foi utilizada configuração de ensaio de flexão em quatro pontos, com vãos de corte de 600 mm. Os deslocamentos foram monitorizados com recurso a 5 LVDT's, como se observa na Fig. 3a, e as extensões foram medidas através de 8 extensómetros. No CFRP foram aplicados extensómetros em 5 secções diferentes, S1-S5 (ver Fig. 3a), do tipo TML BFLA-5-3-3L (comprimento de medição: 5 mm; resistência: 120 Ω) enquanto que na armadura longitudinal foram utilizados 2 extensómetros do mesmo tipo em varões distintos, a meio vão (S5). A extensão do betão à compressão foi medida também na secção de meio vão na face superior, com um extensómetro do tipo TML PFL-30-11-3L (comprimento de medição: 30 mm; resistência: 120 Ω). Quanto à força aplicada, esta foi medida através de uma célula de carga, com uma capacidade de carga estática de 200 kN (com um erro de linearidade  $< \pm 0.05\%$  F.S.). Os ensaios monotónicos até à rotura realizaram-se por controlo deslocamento com velocidade de 0.02 mm/s. Para o caso dos ensaios TR, o carregamento de 2/3 da capacidade última laje foi aplicado através de controlo de força com velocidade de 14 N/s. O descarregamento realizou-se com velocidade de 0.1 mm/s.

Os ensaios RE e TR foram realizados numa câmara pré-fabricada a temperatura controlada com recurso a um sistema de aquecimento, como se pode observar na Fig. 3b. A câmara foi produzida com placas

de poliestireno extrudido com 50mm de espessura, preparada para funcionar até aos 100 °C. O sistema de aquecimento foi composto por dois aquecedores industriais, comandados por um controlador Arduino UNO [6] ligado a termopar tipo K. Para medir a temperatura do ar da câmara e em diferentes pontos da laje, utilizaram-se 25 termopares tipo K. Na Fig. 2a ilustram-se os termopares localizados na secção da laje. Para o efeito, realizaram-se alguns furos na laje com um diâmetro de 3 mm de modo a posicionar os sensores nos locais pretendidos. O número de termopares posicionado na secção de meio vão foi replicado numa outra secção a cerca de 5 cm do apoio e antes da extremidade do laminado de CFRP (S1 na Fig. 3a). Salienta-se o facto da velocidade de aquecimento dos materiais, principalmente do betão, ter dependido da potência do ventilador (6 kW), da temperatura definida no termostato e da difusividade térmica dos próprios materiais.

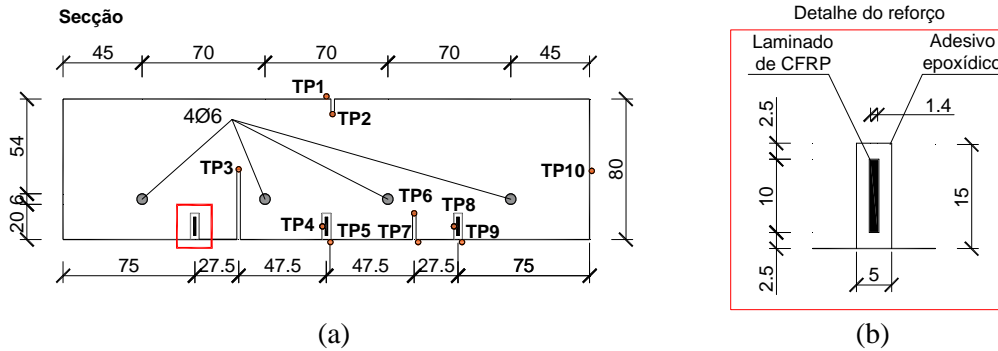


Figura 2. Geometria da laje: (a) secção; (b) detalhes do sistema de reforço. [Nota: todas as unidades estão em milímetros].

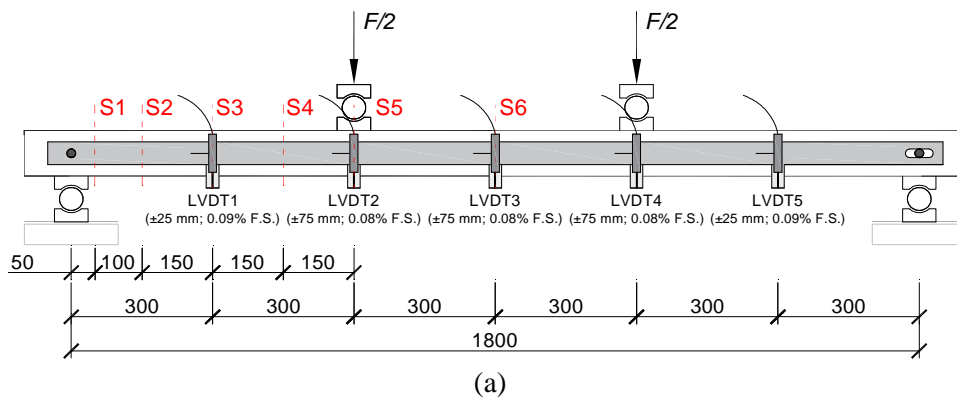


Figura 3. Configuração de ensaio: (a) Ensaio até à rotura; (b) vista geral da câmara.

### 2.3. Caracterização do material

Aquando do programa experimental, as lajes ensaiadas tinham aproximadamente 3 anos de idade e a resistência à compressão avaliou-se através de cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, de acordo com a NP EN 12390-3:2011. O módulo de elasticidade determinou-se através da recomendação LNEC E397-1993:1993. A resistência média à compressão foi de 51.9 MPa (cujo coeficiente de variação,

CoV=3.9%) e módulo de elasticidade obtido foi de 28.8 GPa (CoV=1.5%). As propriedades à tração do laminado de CFRP foram avaliadas em conformidade com a norma ISO 527-5:1997, obtendo-se resistência à tração de 2648.3 MPa (CoV=1.8%) e módulo de elasticidade de 169.5 GPa (CoV=2.5%). As propriedades à tração uniaxial do adesivo epóxi foram avaliadas de acordo com a norma ISO 527-2:1993, em que os valores médios obtidos foram de: 22 MPa (CoV=4.5%) para resistência máxima à tração; 7.2 GPa (CoV=3.7%) para o módulo de elasticidade; e, 0.36% (CoV=15.2%) extensão máxima. A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do epóxi usado é igual a 55 °C [1]. Relativamente ao aço, este foi avaliado segundo a norma NP EN 10002-1:1990: a média dos valores obtidos para o módulo de elasticidade, módulo após a cedência e resistência última foram, respectivamente, iguais a 212.2 GPa (CoV=6.3%), 0.7 GPa (CoV=6.6%) e 733.0 MPa (CoV=1.0%).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Ensaio em regime estacionário (RE)

Na Fig. 4a apresenta-se a evolução típica para a temperatura do ar dentro da câmara de ensaio e a temperatura média medida na face superior da laje – TP1, no epóxi (dentro da ranhura) – TP4/TP8 – e no centro da laje – TP3 – para a laje SL2\_SS\_80 (ver também Fig. 2a). A temperatura média foi calculada considerando a temperatura medida em dois termopares posicionados nas duas diferentes secções. Embora a temperatura predefinida fosse distinta para cada ensaio experimental, todas as lajes ensaiadas apresentaram uma evolução similar, em que, na primeira fase a evolução da temperatura foi aproximadamente linear com o tempo, durante aproximadamente uma hora, atingindo cerca de 60% da temperatura predefinida. A partir desta fase a evolução da temperatura é essencialmente não linear e assintótica. Na Fig. 4a apresenta-se também a extensão do CFRP e do betão medidas durante a fase de aquecimento na laje SL1\_SS\_80, sendo possível observar que: (i) na primeira hora, até cerca dos 60 °C, ambas as extensões do CFRP e do betão aumentaram devido à expansão da laje; (ii) posteriormente ao período de expansão inicial, a extensão do CFRP continuou a aumentar enquanto que a do betão começou a diminuir. Este comportamento poderá estar relacionado com o facto de durante o aquecimento, ocorrer a perda de rigidez do epóxi e perda da rigidez à flexão do betão, que devido ao peso próprio da laje e ao peso do perfil utilizado para transmitir a força aos pontos de carga, podem ter induzido alguma deformação. Contudo, estas justificações requerem suporte científico baseado, por exemplo, em modelações numéricas a desenvolver em trabalhos posteriores ao presente.

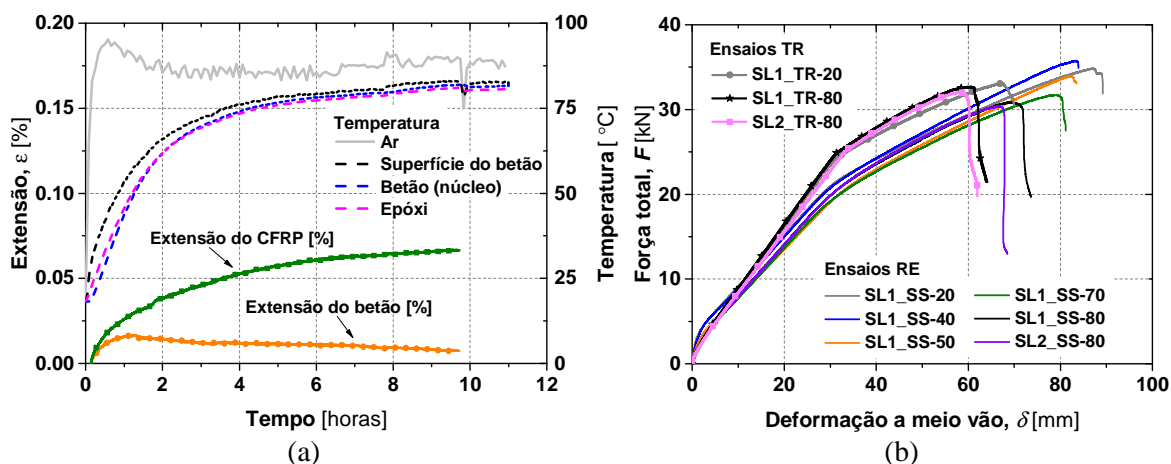


Figura 4. (a) Tempo *versus* extensão e temperatura da laje SL2\_SS-80; (b) força total *versus* deslocamento a meio vão.

Na Fig. 4b estão representadas as curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios monotónicos até à rotura. Os valores dos pontos notáveis destas curvas encontram-se na Tabela 1, compreendendo: força no início da fendilhação e correspondente deslocamento a meio vão ( $F_{cr}$ ,  $\delta_{cr}$ ), início da cedência das armadura longitudinais ( $F_y$ ,  $\delta_y$ ), carga última ( $F_p$ ,  $\delta_{max}$ ), e extensão última do betão e no CFRP ( $\epsilon_{CFRP}$  e

$\varepsilon_{conc}$ ). Na Fig. 5b estão representados os valores  $F_{cr}$ ,  $F_y$  and  $F_p$  e a respetiva variação em relação à laje de referência (SL1\_SS-20). A laje SL1\_SS\_40 apresentou uma maior capacidade de carga última, mesmo quando comparada com a laje de referência (SL1\_SS-20). O terceiro ramo da curva  $F$ - $\delta$  desta laje apresentou um maior declive (maior rigidez) quando comparado com o ramo homólogo nas restantes lajes. Embora a temperatura do ar se tivesse mantido constante durante as fases de aquecimento e do ensaio monotónico até à rotura, o melhor desempenho da laje SL1\_SS\_40 poderá estar relacionado com uma fase de pós-cura do epóxi que tenha ocorrido durante a fase de aquecimento, uma vez que o adesivo epoxídico foi exposto a uma temperatura mais elevada do que durante a primeira cura [7]. A pós-cura pode aumentar as propriedades mecânicas do material devido a um aumento das cadeias e da força molecular. Adicionalmente, os mecanismos de adesão entre betão e o epóxi e entre epóxi e CFRP podem ter melhorado. Também, na laje SL1\_SS\_50 é possível observar um aumento de rigidez no terceiro ramo, embora a capacidade última de carga não tenha sido superior à laje de referência. Neste caso, a laje foi submetida a uma temperatura muito próxima da  $T_g$  e, por isso, o desempenho da laje baixou ligeiramente. As lajes submetidas aos 70 e 80 °C, apresentaram redução de rigidez no primeiro e terceiro ramos, quando comparadas com a de referência. Este comportamento está relacionado com o efeito da temperatura no adesivo epóxi, uma vez que as temperaturas estudadas no presente trabalho apenas afectam marginalmente o comportamento do próprio betão [8, 9]. Para além disso, a capacidade de carga última começou a ser afectada, quando comparada com a da laje de referência. O decréscimo alcançado foi de 9.0%, 11.5% e 12.8% para as lajes SL1\_SS\_70, SL1\_SS\_80 e SL2\_SS\_80, respectivamente. Relativamente às extensões, as lajes SL1\_SS\_20 e SL1\_SS\_50 atingiram uma extensão máxima no betão de cerca de 0.4%, enquanto as extensões máximas no CFRP foram registadas nas lajes SL1\_SS\_20 e SL1\_SS\_40 (cerca de 1.4%). As lajes ensaiadas entre 20 °C e 70 °C romperam por esmagamento do betão na zona comprimida, enquanto que as lajes ensaiadas aos 80 °C verificou-se uma rotura coesiva no epóxi. Consequentemente, a extensão máxima no CFRP nas lajes submetidas aos 80 °C apresentou um decréscimo (cerca de 25%).

Quadro 1. Principais resultados obtidos nos ensaios experimentais.

Laje	$\delta_{cr}$ [mm]	$F_{cr}$ [kN]	$\delta_y$ [mm]	$F_y$ [kN]	$\delta_{max}$ [mm]	$F_{max}$ [kN]	$\varepsilon_{CFRP}$ [%]	$\varepsilon_{conc}$ [%]
SL1_SS-20	1.35	3.47	30.99	21.36	89.21	34.85	14.29	3.97
SL1_SS-40	1.67	3.64	30.47	20.97	83.92	35.74	13.71	3.27
SL1_SS-50	1.60	2.77	33.80	20.81	83.49	33.97	13.11	4.05
SL1_SS-70	2.08	2.78	31.61	19.84	81.16	31.73	12.11	3.69
SL1_SS-80	1.85	2.37	31.61	20.59	73.63	30.84	11.32(b)	2.97
SL2_SS-80	1.52	2.07	30.88	20.28	67.89	30.40	10.11(b)	2.99
SL1_TR-20	1.52 <sup>(a)</sup>	3.72 <sup>(a)</sup>	30.65 <sup>(c)</sup>	23.93 <sup>(c)</sup>	70.04	33.11	13.98(b)	4.12
SL1_TR-80	1.47 <sup>(a)</sup>	4.43 <sup>(a)</sup>	31.22 <sup>(c)</sup>	24.84 <sup>(c)</sup>	63.88	32.67	12.34	2.64
SL2_TR-80	1.62 <sup>(a)</sup>	4.43 <sup>(a)</sup>	33.47 <sup>(c)</sup>	25.21 <sup>(c)</sup>	61.97	32.03	12.71	2.36

Nota: <sup>(a)</sup> valores alcançados na fase de pré-carregamento; <sup>(b)</sup> extensões medidas na secção do ponto de aplicação de carga (secção S5); <sup>(c)</sup> cedência das armaduras após a fase de carregamento constante.

### 3.2. Ensaio em regime transiente (TR)

Na Fig. 5a está representada a evolução das deformações para as temperaturas predefinidas. A deformação da laje de referência (SL1\_TR\_20) foi cerca de 4.3 mm ao fim de 9 horas, enquanto que a deformação no caso das lajes SL1\_TR\_80 and SL2\_TR\_80 alcançou 11 mm e 14 mm ao fim de 4 e 12.5 horas, respectivamente. A deformação elevada nas lajes submetidas aos 80 °C pode estar relacionada com os efeitos de fluência em simultâneo com o decréscimo de rigidez do epóxi. No entanto, é bastante difícil quantificar a contribuição de cada efeito individualmente, uma vez que a deformação por fluência é bastante influenciada pela temperatura e a rigidez do epóxi decresce significativamente com o aumento da temperatura [1]. A título de exemplo refere-se que, de acordo com a literatura, a fluência do betão a 40 °C é maior em cerca de 25% do que a 20 °C [10].

Após a fase de aquecimento, as lajes foram descarregadas antes de serem ensaiadas monotonicamente até à rotura. Na Fig. 4b estão representadas as curvas força total *versus* deslocamento a meio vão, em que se observa uma resposta linear da laje até ao deslocamento alcançado durante a fase do seu



aquecimento. No Quadro 1 incluem-se os pontos notáveis destas curvas. A rigidez do primeiro ramo linear das lajes ensaiadas a 80 °C não foi afetado quando comparado com a laje de referência. No ramo após a cedência das armaduras longitudinais, as lajes submetidas às mesmas condições apresentaram também um comportamento similar, mas marginalmente mais rígido do que a laje de referência (SL1\_TR\_20). Em relação à capacidade última de carga, as lajes SL1\_TR\_80 e SL2\_TR\_80 apenas apresentaram um decréscimo de -1.3% e -3.2% comparativamente à referência (SL1\_TR\_20). A ligeira diferença entre a carga última das lajes SL1\_TR\_80 e SL2\_TR\_80 pode estar relacionada com o período de tempo que as lajes foram sujeitas às condições de carregamento, que foram 4 e 12 horas respetivamente. Em relação às extensões, a extensão máxima do CFRP atingida pela laje SL\_TR\_20 foi de 1.4% e no betão foi cerca de 0.4% e, conseqüentemente, o modo de rotura foi por esmagamento do betão. As restantes lajes (SL1\_TR\_80 e SL2\_TR\_80) romperam por rotura coesiva do epóxi. Deste modo as extensões alcançadas no CFRP foram de cerca de 1.27% e 1.23% na laje SL1\_TR\_80 e SL2\_TR\_80, respectivamente, aproximadamente 12% menos que a de referência.

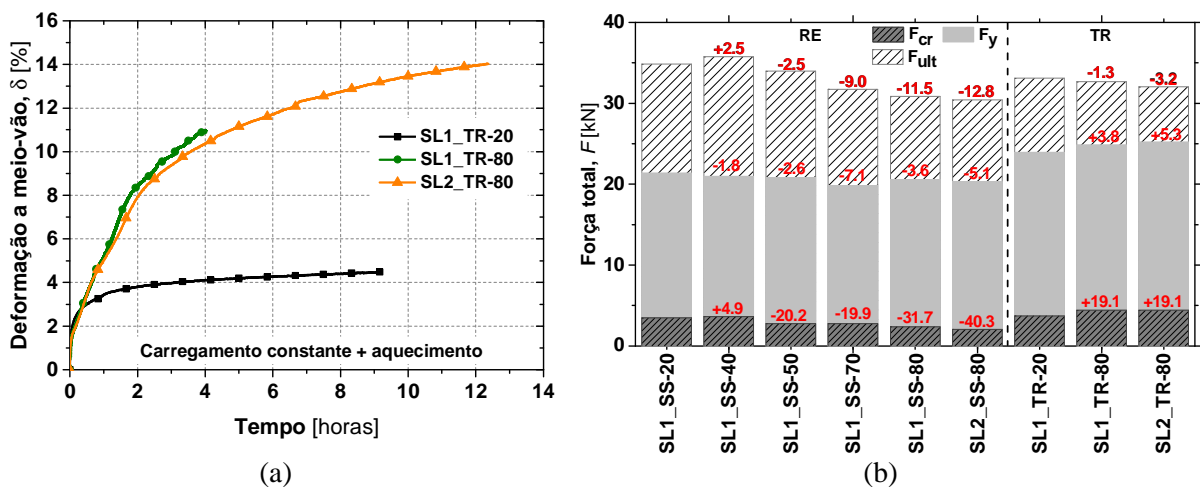


Figura 5. Ensaio experimental (a) Tempo *versus* deformação na fase de aquecimento com carregamento constante; (b) variação dos pontos notáveis.

Na Fig. 5b está representada a evolução da força de fendilhação, cedência e última para todas as lajes. Como se pode observar, as lajes submetidas aos 80 °C no regime estacionário apresentaram um maior decréscimo da carga última do que as lajes submetidas à mesma temperatura nos ensaios em regime transiente. Relativamente à carga de cedência, os ensaios TR apresentaram valores mais altos devido à fendilhação causada pela fase de carregamento e de aquecimento. Para além disso, as lajes nos ensaios TR apresentaram uma maior rigidez do que a carga última nas restantes lajes, como se pode observar na Fig. 4b. Nos ensaios em regime transiente, após a cedência das armaduras, o laminado não alcançou extensões tão elevadas como nas restantes lajes, talvez associado à deformação residual após o descarregamento e o dano causado pelo período de tempo que as lajes foram submetidas ao carregamento e aquecimento.

#### 4. CONCLUSÕES

O principal objetivo do presente trabalho foi estudar o comportamento de lajes reforçadas com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM quando submetidas a temperaturas elevadas. Para tal, realizaram-se dois tipos de ensaios experimentais, nomeadamente: (i) ensaios em regime estacionário (RE); e, (ii) ensaios em regime transiente (TR). No caso dos ensaios RE, a laje submetida a 40 °C apresentou uma capacidade de carga mais elevada comparativamente à laje de referência ensaiada a 20 °C, que poderá estar relacionada com a pós-cura do epóxi. As lajes submetidas a 80 °C foram aquelas em que a capacidade de carga foi mais afetada pelo efeito da temperatura tendo-se observado um decréscimo de 12% quando comparada com capacidade homóloga da laje de referência. Em relação aos ensaios TR, as lajes submetidas a temperaturas elevadas (80°C) apresentaram 3 vezes mais deformação que a laje a 20 °C durante a fase de aquecimento. Este aumento significativo da

deformação poderá estar relacionado com o decréscimo da rigidez do epóxi e com o aumento do efeito de fluência no betão a temperaturas elevadas. Contudo, nos ensaios monotónicos até à rotura observou-se um decréscimo máximo de 3% da capacidade última em comparação à de referência. Em ambos os tipos de ensaio, as lajes submetidas ao 80 °C romperam por rotura coesiva do epóxi, enquanto que as restantes o modo rotura foi esmagamento do betão na zona comprimida. Com base nestes resultados, é possível indicar que o comportamento de lajes de betão armado reforçadas com o sistema NSM CFRP quando submetidas a temperaturas elevadas (até aos 80 °C) não se altera significativamente. Contudo, deverá ser desenvolvido um estudo mais aprofundado neste âmbito, como por exemplo, através de modelações numéricas com o objetivo de obter uma melhor compreensão dos resultados obtidos.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado por fundos nacionais através da FCT e cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Fatores de Competitividade e internacionalização (POCI) e do Programa Regional de Lisboa no âmbito dos projetos FRPLongDur POCI-01-0145-FEDER-016900 (PTDC/ECM-EST/1282/2014) e POCI-01-0145-FEDER-007633. Os autores agradecem também as bolsas SFRH/BD/89768/2012, financiadas pela FCT. Por fim, os autores ainda agradecem também o apoio e a contribuição das seguintes empresas: S&P Clever Reinforcement, Hilti, Casais, Artecater, Tecnipor, Vialam, Novo Modelo Europa, Sika and Cachapuz.

## REFERÊNCIAS

- [1] Silva P, Fernandes P, Sena-Cruz J, Xavier J, Castro F, Soares D, Carneiro V. Effects of different environmental conditions on the mechanical characteristics of a structural epoxy. *Composites Part B: Engineering* 2016;88):55-63.
- [2] Michels J, Widmann R, Czaderski C, Allahvirdizadeh R, Motavalli M. Glass transition evaluation of commercially available epoxy resins used for civil engineering applications. *Composites Part B: Engineering* 2015;77(0):484-493.
- [3] Silveira A, "The influence of thermal actions in the behavior of reinforced concrete bridges (in Portuguese)," PhD Thesis, LNEC, Lisbon, 1996.
- [4] Burke PJ, Bisby LA, Green MF. Effects of elevated temperature on near surface mounted and externally bonded FRP strengthening systems for concrete. *Cement and Concrete Composites* 2013;35(1):190-199.
- [5] Firmo J, Correia J, Pitta D, Tiago C, Arruda M. Bond Behavior between Near-Surface-Mounted CFRP Strips and Concrete at High Temperatures. *Journal of Composites for Construction* 2014):04014071.
- [6] Arduino, <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>, ed.
- [7] Moussa O, Vassilopoulos AP, de Castro J, Keller T. Time-temperature dependence of thermomechanical recovery of cold-curing structural adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2012;35(0):94-101.
- [8] Neville AM, *Properties of concrete*, 1995.
- [9] Anderberg Y, Thelandersson S. Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures. 2. Experimental investigation and material behaviour model. *Bulletin of Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Bulletin 54* 1976.
- [10] 1992-1-1 CE:2004. European Standard Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings. 2004.