

FLUÊNCIA E DURABILIDADE DE ELEMENTOS DE BETÃO ARMADO REFORÇADOS COM LAMINADOS DE CFRP PELA TÉCNICA NSM

Patrícia Silva

Aluna Doutoramento
Univ. Minho / ISISE
Guimarães

Patricia.silva@civil.uminho.pt

Pedro Fernandes

Aluno Doutoramento
Univ. Minho / ISISE
Guimarães

pfernandes@civil.uminho.pt

José Sena-Cruz*

Prof. Associado Univ.
Minho / ISISE
Guimarães

jsena@civil.uminho.pt

Miguel Azenha

Prof. Auxiliar
Univ. Minho / ISISE
Guimarães

miguel.azenha@civil.uminho.pt

Joaquim Barros

Prof. Catedrático Univ.
Minho / ISISE
Guimarães

barros@civil.uminho.pt

SUMÁRIO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da fluência no comportamento a longo prazo e durabilidade de estruturas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM. Para tal foi desenvolvido um programa experimental constituído por lajes e ensaios de arranque em flexão, todos sujeitos a um carregamento constante e às seguintes condições ambientais: (i) ambiente de laboratório; (ii) imersão em água; (iii) imersão em água com NaCl; e, (iv) ciclos molhagem/secagem em água com NaCl. Nos ensaios de arranque verificou-se que o efeito de fluência na resistência mecânica foi praticamente negligenciável. As lajes apresentaram um efeito de fluência pronunciado, apesar de este ter sido desacelerado para os ambientes envolvendo submersão.

Palavras-chave: NSM CFRP; Durabilidade; Fluência; Envelhecimento acelerado; Betão.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de reforço NSM (*Near-Surface Mounted*) com polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*) é geralmente usada com o intuito de aumentar a capacidade de carga de estruturas de betão armado (BA). Ao longo dos anos, a investigação experimental, numérica e analítica realizada focou essencialmente a eficácia

desta [1]. No entanto, uma vez que a técnica NSM é emergente, alguns aspetos associados ao comportamento a longo prazo e durabilidade necessitam de mais investigação.

Atualmente, a informação disponível acerca dos efeitos de fluência de sistemas de reforço NSM com CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) é ainda muito limitada. Os trabalhos de investigação publicados reportam estudos dos efeitos da fluência no comportamento estrutural de elementos reforçados e nos seus componentes individuais, tais como, betão, aço, FRP e adesivo [2, 3]. No que concerne à durabilidade desta técnica de reforço, Derias *et al.* [4] realizaram ensaios de durabilidade com vigas em T reforçadas com técnica NSM com CFRP submetidas, simultaneamente, a temperaturas elevadas (+55°C), elevada concentração de sal (15% de cloreto de sódio) com ou sem carregamento constante (cerca de 40% da capacidade de carga da viga). Os resultados apontaram para um decréscimo da capacidade de carga de 40% e 11% quando as vigas tinham sido reforçadas com CFRP de superfície rugosa ou lisa, respetivamente. Concluíram que o decréscimo de capacidade de carga das vigas que tinham sido submetidas a um carregamento constante e a um ambiente agressivo não foi agravado por esse mesmo carregamento. O modo de rotura das vigas expostas aos diferentes ambientes foi deslizamento na interface betão/adesivo epóxi devido à significativa degradação desta, enquanto nas vigas de referência ocorreu rotura do CFRP. Apesar destes trabalhos experimentais terem sido realizados com um número limitado de provetes, foi claro que as ações ambientais conduziram a perdas não negligenciáveis da capacidade de carga última, quando comparados com os provetes de referência.

Com o objetivo de contribuir e avaliar o comportamento a longo prazo de estruturas reforçadas com CFRP segundo a técnica NSM, foi realizado um programa experimental que será descrito neste artigo. A secção seguinte descreve o programa experimental, configurações de ensaio e procedimentos. Foram usadas duas escalas diferentes: (i) uma meso-escala com recurso a ensaios de arrancamento em flexão em provetes de BA com o intuito de avaliar o comportamento da ligação; e (ii) uma macro-escala, em que se utilizaram lajes para avaliar o comportamento estrutural em flexão. As condições ambientais e de carregamento estudadas foram: imersão em água, efeito dos cloretos, ciclos molhagem e secagem e carregamento constante (fluência). Refere-se ainda que os resultados aqui reportados são relativos ao estudo/projeto ainda em curso.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Descrição Geral

O programa experimental é constituído por 10 lajes reforçadas à flexão (SL) e 10 vigas de BA para a realização de ensaios de arrancamento em flexão (BP). Os provetes estão distribuídos em 5 séries como se constata no Quadro 1. As séries S0 e S1 correspondem aos provetes sem qualquer carregamento (UN) e aos provetes apenas sujeitos a uma carga constante (REF), ambos em ambiente de laboratório, respetivamente. As restantes séries (S2 à S4), para além de estarem expostas a uma condição ambiental, os provetes também

JPEE 2014 – Fluência e durabilidade de elementos de betão armado reforçados com laminados de CFRP 2
pela técnica NSM

foram submetidos a um carregamento constante. As três condições ambientais consideradas foram as seguintes: (i) imersão num tanque com água a 20°C com 0% de cloretos (série S2 – PW); (ii) imersão num tanque com água a 20°C com 3.5% de cloretos (série 3 – CW); e, (iii) exposição a ciclos de molhagem e secagem com água a 20°C com 3.5% de cloretos (série S4 – WD). Foram ainda colocados em cada ambiente descrito, 6 cubos de betão, 12 laminados de CFRP e 12 provetes de adesivo epóxi. Metade dos provetes foram submetidos a estas condições ambientais durante 360 dias, enquanto os restantes provetes continuaram nas mesmas condições até se atingir um período de 720 dias. No fim de cada ensaio de envelhecimento, os provetes foram ensaiados monotonicamente até à rotura. A designação dada aos provetes é formada por caracteres alfanuméricos (ver Quadro 1). O primeiro conjunto indica o tipo de provete (BP e SL). O segundo conjunto define a ação ambiental (REF, PW, CW e WD). Por fim, o último conjunto de caracteres indica o número de dias que os provetes foram submetidos à ação ambiental (360 e 720).

Quadro 1. Programa experimental.

Séries	Ação ambiental	Vigas	Lajes
S0	Ambiente de laboratório	BP_UN360 BP_UN720	SL_UN360 SL_UN720*
S1	Ambiente de laboratório	BP_REF360 BP_REF720	SL_REF360 SL_REF720
S2	Provetes imersos em água a 20°C	BP_PW360 BP_PW720	SL_PW360 SL_PW720
S3	Provetes imersos em água a 20°C com 3.5% de cloretos	BP_CW360 BP_CW720	SL_CW360 SL_CW720
S4	Provetes submetidos a ciclos de molhagem e secagem em água a 20°C com 3.5% de cloretos	BP_WD360 BP_WD720	SL_WD360 SL_WD720

De forma a esclarecer alguns aspetos do programa experimental, a Fig. 1 descreve os principais eventos, e os respetivos instantes de tempo em que ocorreu cada etapa em relação ao primeiro evento. Através desta figura é possível identificar todos os passos do programa experimental até ao momento de redação deste artigo. O reforço de todos os provetes incluídos neste trabalho experimental foi realizado no laboratório a uma temperatura média de 25°C e a uma humidade relativa (RH) de 42%. Depois os provetes foram mantidos em laboratório até ao início dos ensaios de envelhecimento. Mais informações relacionadas com a preparação dos provetes podem ser consultadas em Sena-Cruz *et al.* [5]. O valor da carga aplicada nos provetes foi definida através dos resultados dos ensaios monotónicos realizados em provetes iguais aos submetidos às condições anteriormente referidas. A laje reforçada (STR) e o provete do ensaio de arrancamento em flexão alcançaram uma força máxima de 31.63 kN e 24.25 kN, respetivamente. Em cada laje

foi aplicada uma carga total de 10 kN, que corresponde aproximadamente a 1/3 da correspondente capacidade última. Em relação aos ensaios BP, a carga total aplicada para analisar a fluência foi aproximadamente 7 kN. Esta carga foi definida com o intuito de submeter a extensão do CFRP a um nível de extensão similar ao alcançado pelas lajes com o carregamento constante aplicado. O carregamento foi aplicado em 2 fases devido a limitações de disponibilidade da carga gravítica usada. Na primeira fase de carregamento (L1), foi aplicada cerca de 40% e 24% da carga total nas SL e nos BP, respetivamente. Na segunda fase de carregamento, foram realizados os necessários ajustes para se alcançar o nível de carregamento pré-definido. Aos 402 dias de idade, os provetes foram submetidos às ações ambientais mencionadas anteriormente (ver Quadro 1). Os ensaios de envelhecimento tiveram uma duração total de 241 dias.



Figura 1. Principais eventos do programa experimental.

2.2 Geometria dos provetes e configuração de ensaio

A geometria e a configuração do ensaio de arrancamento em flexão adotada estão representadas por intermédio de fotos na Fig. 2. O provete é constituído por dois blocos (A e B) de igual geometria, cujas dimensões são 150×200×385 mm³. De modo a evitar a rotura por corte, o reforço transversal em cada bloco é composto por cinco estribos com diâmetro 6 mm (Ø6). Adicionalmente, a armadura longitudinal inferior e superior foi composta por 4Ø8 (1Ø8 em cada canto). A espessura do betão de recobrimento foi cerca de 20 mm. Os dois blocos de betão encontram-se ligados entre si, na parte inferior através de um laminado de CFRP e superiormente através de uma rótula metálica. O estudo da aderência localizou-se no bloco A, com um comprimento de amarração (L_b) de 60 mm. O comprimento de amarração inicia-se a 100 mm de distância da face lateral do bloco A, para evitar o destacamento prematuro do betão na extremidade carregada da ligação. No bloco B, foi considerado um comprimento de amarração de 335 mm, assegurando desta forma, que o deslizamento do laminado fixado ao bloco B seria desprezável, garantindo assim que a rotura da ligação ocorreria no bloco A. Durante os ensaios de envelhecimento, as extensões foram medidas na superfície do CFRP através de um extensómetro localizado a meio vão, e os deslocamentos através de um transdutor de deslocamento (LVDT). O LVDT é usado para avaliar o deslizamento na zona carregada, s . Detalhes adicionais poderão ser consultados na publicação de Sena-Cruz *et al.* [5].

A configuração e instrumentação das lajes encontra-se também esquematizada na Fig. 2. As lajes têm 2000 mm de comprimento, 300 mm de largura e 80 mm de espessura. A armadura longitudinal é composta por 4Ø6, que corresponde a uma taxa de armaduras

longitudinais de 0.47%. A solução de reforço à flexão é composta por 3 laminados de CFRP, que corresponde a uma taxa de armaduras longitudinais equivalente de 0.68%. Neste estudo experimental, foi adotada uma configuração de ensaio à flexão de quatro pontos. O deslocamento de cada laje sujeita a um carregamento constante foi monitorizado com um LVDT a meio vão e um comparador mecânico na face lateral oposta (ver Fig. 2). Outros detalhes, bem como informações complementares sobre a configuração do ensaio monotónico até à rotura, encontram-se disponíveis na publicação de Sena-Cruz *et al.* [5].

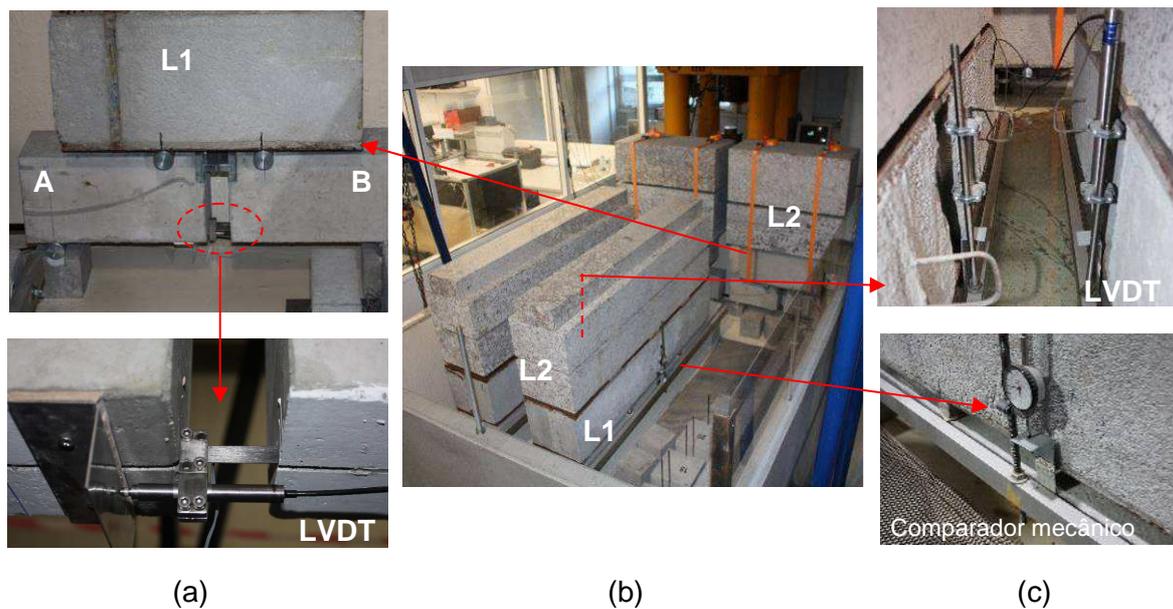


Figura 2. Configuração dos ensaios de fluência: (a) detalhes do ensaio de arranque em flexão; (b) vista geral de um tanque; (c) detalhes do sistema do sistema de monitorização do ensaio de fluência das lajes.

2.3 Caracterização dos materiais

No instante em que foram realizados os ensaios de referência referidos anteriormente, a resistência média à compressão do betão (em cilindros) foi de 49.7 MPa, com um coeficiente de variação (CoV) de 3.19% e o módulo de elasticidade foi de 28.81 GPa (CoV=1.47%).

As propriedades mecânicas dos restantes materiais intervenientes (aço, laminado de CFRP e adesivo epóxi) estão apresentadas no Quadro 2. Estes valores foram determinados a partir de 6 ensaios/amostras, estando os respetivos coeficientes de variação representados entre parênteses. O aço da armadura longitudinal foi caracterizado de acordo com a norma NP EN 10002-1:1990, enquanto os laminados de CFRP com secção transversal de $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$ 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 2. Propriedades mecânicas dos materiais.

	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à tração [MPa]
Aço	212.2 (6.3%)	733.0 (1.0%)
CFRP	169.5 (2.5%)	2648.3 (1.8%)
Epóxi	7.15 (3.71%)	22 (4.52%),

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de arranque em flexão

Como mencionado anteriormente, a carga total aplicada nos provetes de arranque em flexão foi aproximadamente de 7 kN. A evolução do deslizamento na zona carregada desses provetes ao longo do tempo encontra-se representada na Fig. 3. Para além disso, estão também representados nesses gráficos a evolução da temperatura ambiente do laboratório durante os ensaios de fluência. Pode observar-se que a evolução do deslizamento medido através do LVDT é claramente influenciada pela variação da temperatura no laboratório. Quando foi aplicada a primeira fase de carregamento (L1), aproximadamente 1.7 kN, registou-se um deslizamento instantâneo inferior a 0.1 mm. Esse valor é coerente com o deslizamento obtido nos ensaios monotónicos para o mesmo nível de carga [5]. Os provetes de referência, representados pela linha verde, posicionados fora dos tanques (ambiente de laboratório), parecem ser menos afetados por esse efeito. A razão para este efeito da temperatura ser menor nos provetes REF, pode estar relacionada com a localização destes provetes no laboratório.

Depois da aplicação do segundo nível de carga (~5.3kN), é possível observar que a evolução do deslizamento é também controlada pela temperatura, sendo o efeito de fluência muito reduzido. Comparando os resultados de fluência das séries S3 (PW) e S4 (WD) antes do ponto A (ver Fig. 3), o comportamento de ambas as séries é similar. Contudo, depois do ponto A, as séries exibem uma ligeira diferença em termos de evolução do deslizamento. Esta diferença pode estar relacionada com a ligeira diferença entre a temperatura da água pura e o ambiente envolvente.

Durante os ensaios de fluência, alguns LVDTs ficaram danificados devido à ação ambiental (cloretos). Por essa razão, a partir do ponto B, o s_l dos provetes BP_CW360 e BP_CW720 não foi medido. Até ao final da fase de carregamento dos provetes, o deslizamento máximo observado foi cerca de 0.47 mm para o provete imerso em água pura (BP_PW720). Depois da fase de descarregamento, todos os provetes descarregados (série 360) alcançaram recuperação praticamente total do deslizamento. O deslizamento residual foi aproximadamente 0.02 mm, que corresponde a 4.83% do deslizamento máximo observado nos provetes que foram descarregados (ver Fig. 3).

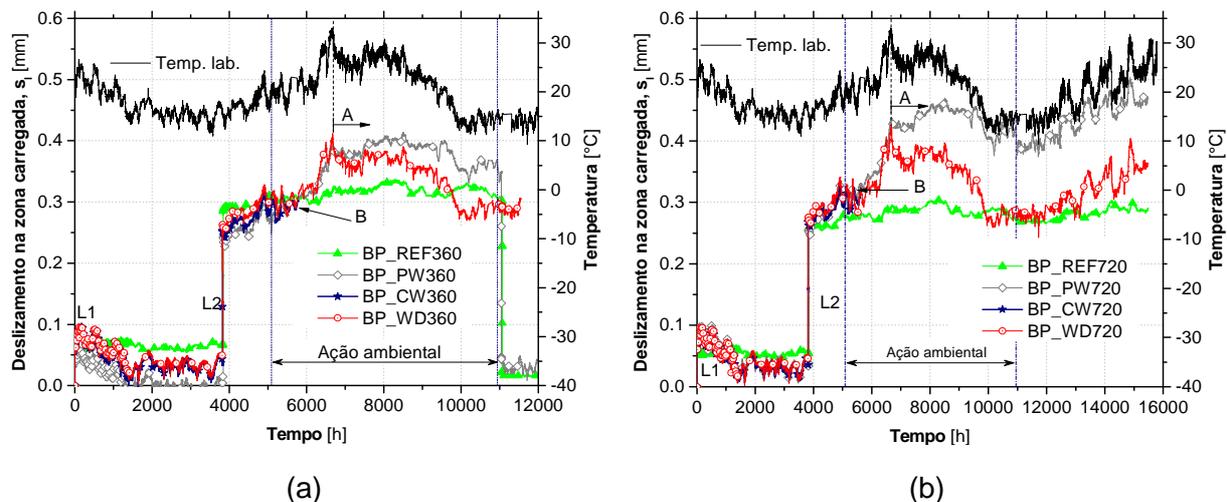


Figura 3. Deslizamento na zona carregada *versus* tempo dos ensaios de arranque em flexão: (a) série 360; e (b) série 720.

Refira-se que todos os resultados aqui reportados encontram-se ainda em fase de análise aprofundada. Um dos objetivos fundamentais é a avaliação do efeito da temperatura nas respostas obtidas.

Após ser retirada a carga de fluência e a respetiva condição ambiental os provetes foram submetidos a um ensaio monotónico à rotura. A Fig. 4 apresenta a relação entre a força de arranque e o deslizamento na zona carregada (F_T-s_l) para todos os provetes ensaiados. O Quadro 3 resume os principais resultados obtidos nos ensaios de arranque, incluindo os modos de rotura observados. Neste quadro o significado de cada parâmetro é o seguinte: F_{Tmax} é a força máxima de arranque; s_{lmax} é o deslizamento na zona carregada da ligação correspondente a F_{Tmax} ; s_{fmax} é o deslizamento na zona livre 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 L_b o comprimento da ligação; G_f é a energia dissipada ao longo do ensaio avaliada através área sob a curva força de arranque *versus* deslizamento apresentadas na Fig. 4, até um deslizamento de 5 mm. A força de arranque foi calculada com base nas extensões medidas no CFRP (ver secção 2.2).

Em geral, as respostas F_T-s_l são inicialmente caracterizadas por um pequeno ramo linear de elevada rigidez devido à ligação química entre no sistema betão/adeseivo/CFRP. Quando esta ligação começa a ficar danificada, a resposta torna-se essencialmente não-linear até ao pico de carga (F_{Tmax}), devido ao processo de degradação da ligação. Após ser atingido o pico de carga observa-se um ramo de amolecimento. Para todos os provetes ensaiados o comportamento observado é similar. No entanto, comparando os provetes sujeitos ao carregamento constante e às diferentes condições ambientais, com os provetes apenas carregados (BP_REF360), em termos de capacidade de carga, verificou-se um decréscimo máximo de 9.78% para o provete BP_WD360 (ver Fig. 4). Em termos de energia dissipada, verificou-se a mesma tendência, ou seja, uma ligeira diminuição de G_f nos provetes sujeitos

às condições ambientais comparativamente com os de referência. O modo de rotura em todos os ensaios ocorreu por deslizamento na interface adesivo/laminado.

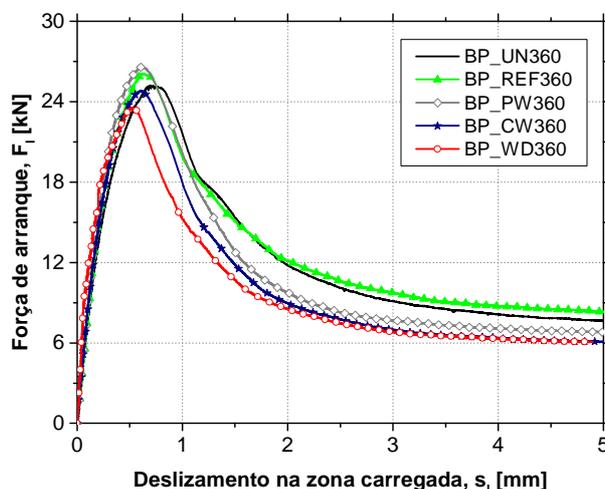


Figura 4: Ensaios monotónicos à rotura dos provetes BP.

Quadro 3. Principais resultados obtidos nos ensaios monotónicos dos provetes BP.

Vigas	F_{1max} [kN]	τ_{max} [MPa]	s_{1max} [mm]	s_{2max} [mm]	G_f [kN·mm]	Modo de rotura
BP_UN360	25.15	18.39	0.13	0.68	62.07	D
BP_REF360	26.09	19.07	0.08	0.62	63.74	D
BP_PW360	26.58	19.43	0.10	0.62	57.51	D
BP_CW360	24.80	18.13	0.09	0.60	52.07	D
BP_WD360	23.54	17.21	0.09	0.52	48.78	D

Nota: D=Deslizamento na interface adesivo/laminado.

3.2 Lajes

Os gráficos da Fig. 5 reportam a evolução dos deslocamentos a meio vão ao longo do tempo para as lajes ensaiadas. Na mesma figura, apresentam-se alguns eventos que se encontram referenciados, nomeadamente: I – o início do ensaio de fluência com um carregamento contante aplicado; II – o instante no qual os provetes foram submetidos às condições ambientais; III e IV – instantes imediatamente antes e depois do descarregamento, respetivamente; V – o estado atual. A evolução da temperatura registada no ambiente laboratorial também se representada nos gráficos da Fig. 5. O primeiro carregamento (L1) causou um deslocamento instantâneo de aproximadamente 2 mm. A magnitude deste deslocamento está em concordância com os resultados obtidos no ensaio monotónico da laje STR realizado previamente [5]. A diferença máxima da carga aplicada nas diferentes lajes foi cerca de 0.7 kN, explicando assim ligeira diferença nos deslocamentos observados em cada laje. Durante 78 dias, a deformação a meio vão devido

ao carregamento L1, aumentou de 2.0 mm para 3.2 mm (a variação foi cerca de 60%) devido ao efeito de fluência. Depois de aplicada a segunda fase de carregamento L2 (evento I), a deformação instantânea média total a meio vão foi cerca 14 mm (CoV=3.6%), contra os 11.5 mm obtidos no ensaio monotónico da laje STR para o mesmo nível de carregamento. No entanto, logo após a segunda fase de carregamento (ver evento I na Fig. 5) observou-se uma ligeira diferença no deslocamento a meio vão entre as lajes SL_REF360/PW360 e SL_CW360/WD360 (aproximadamente 0.7 mm). Mais detalhes até este estágio do ensaio de fluência podem ser encontrados em [5].

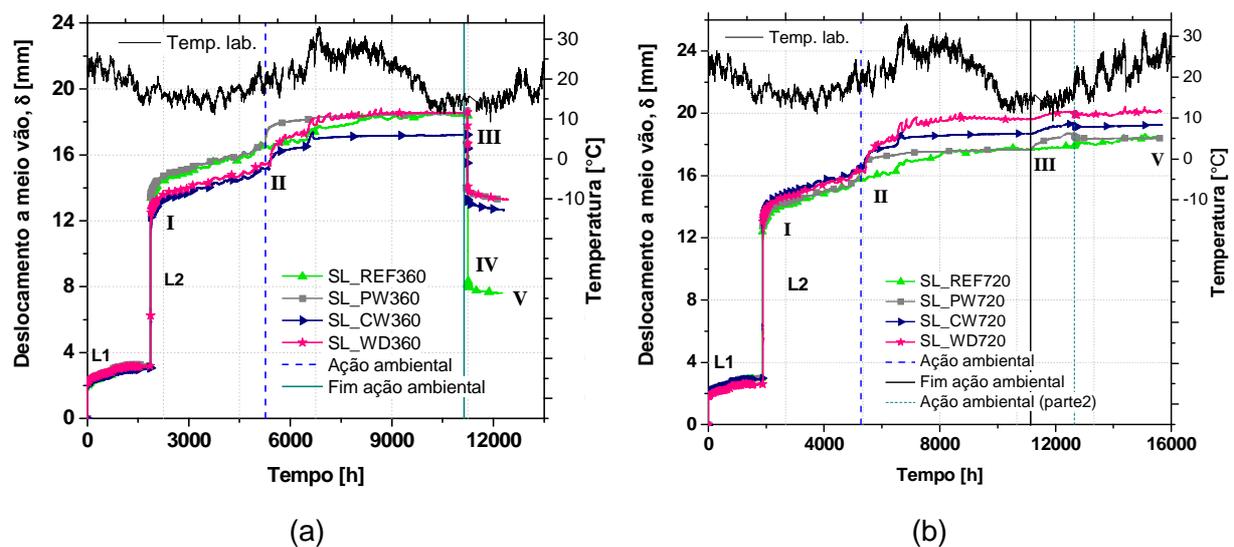


Figura 5. Deslocamento a meio vão versus tempo dos ensaios de fluência das lajes: (a) série 360; e (b) série 720.

Analisando a evolução das deformações a meio vão entre os instantes I e II devido ao fenómeno de fluência, observa-se que a deformação aumentou em termos médios cerca de 1.9 mm, que corresponde a uma variação de deformação de aproximadamente 13.2% durante 220 dias. Quando os provetes foram submetidos à ação ambiental, verificou-se um aumento quase instantâneo da deformação (durante aproximadamente 4 dias) cerca de 1.1 mm (média). Este fenómeno pode estar relacionado com uma possível combinação dos seguintes fatores: (i) a diferença de temperatura entre a água e a laje (efeito de choque térmico); (ii) absorção da água pelo betão (material poroso), mais precisamente a pressão interna nos poros causada pela ação da capilaridade; e (iii) difusão dos cloretos, nos casos em que estes estavam presentes [6]. Durante o período de tempo em que os provetes estavam sujeitos às ações ambientais e até à fase de descarregamento da série 360, verificou-se um claro decréscimo do efeito de fluência em todos os provetes expresso por um menor rácio de deformação. O fenómeno de fluência foi mais pronunciado nos provetes REF e WD, em que a deformação aumentou cerca de 11%, sem considerar o aumento instantâneo devido à colocação de água nos tanques. As lajes da série PW e CW apresentaram um menor aumento em termos de deformação, cerca de 5% e 7%, respetivamente. Este aspeto poderá estar relacionado com a temperatura da água uma vez

JPEE 2014 – Fluência e durabilidade de elementos de betão armado reforçados com laminados de CFRP 9 pela técnica NSM

que foi mantida praticamente constante enquanto os restantes provetes (REF e WD) foram diretamente sujeitos à temperatura ambiente do laboratório.

Logo após o descarregamento, a laje SL_REF360 recuperou cerca de 10.3 mm de deformação, cerca de duas vezes mais que as restantes lajes, como se observa na Fig. 5a. Assim, para esta laje a deformação elástica (que corresponde aproximadamente a 12 mm para L1+L2) foi quase recuperada na sua totalidade. Este comportamento não foi observado para as restantes lajes (PW360, CW360 e WD360). De facto, o processo de secagem dos provetes bem como a degradação devido à ação ambiental podem ter atrasado a recuperação de deformação elástica.

Depois das lajes terem permanecido cerca de um mês a recuperar parte da deformação (série 360), foram ensaiadas monotonicamente até à rotura. Na Fig. 6a está representada a resposta força total *versus* deslocamento a meio vão de cada uma das lajes, enquanto na Fig. 6b observa-se a resposta força total *versus* extensão do CFRP a meio vão. Adicionalmente, encontram-se detalhados no Quadro 4 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}) e ainda, extensão última do betão ($\epsilon_{betão}$) e do CFRP a meio vão (ϵ_{CFRP}).

Comparando os resultados obtidos na laje SL_UN360 e na laje SL_REF360, cuja diferença é apenas o carregamento constante a que a laje SL_REF360 foi submetida, verificou-se que em termos de capacidade última apenas existiu uma ligeira diferença de cerca de 5%. Através da Fig. 6a também se verifica que as lajes sujeitas a um carregamento e simultaneamente às condições ambientais em estudo, não foram afetadas ao nível da capacidade última. Relativamente à evolução das extensões do CFRP a meio vão durante os ensaios monotónicos, praticamente não existe diferença em termos de extensão última entre as lajes que foram sujeitas a um carregamento. Contudo, verifica-se uma ligeira diferença entre a laje SL_UN360 (não sujeita a qualquer condição), que alcançou uma extensão de 1.4%, e as restantes lajes, que atingiram uma extensão de cerca de 1.2%. Esta diferença na extensão está associada à extensão residual que permaneceu nas lajes após o descarregamento. Finalmente refere-se que o nível de extensões observados nos laminados de CFRP na iminência da rotura da laje foi de pelo menos 1.2%, revelando por isso, que apesar das ações e carregamentos impostos, as lajes apresentaram sempre um nível de eficácia residual muito significativo.

Tal como seria de esperar, na resposta global $F-\delta$ das lajes submetidas à ação da fluência (SL_REF360, SL_PW360, SL_CW360 e SL_WD360) observa-se um ramo linear até à força relativa à cedência das armaduras de flexão, devido à fendilhação causada pela carga gravítica aplicada (10 kN). Na Fig. 6 também se pode observar que a laje SL_REF360 apresenta uma menor rigidez até à força de cedência comparativamente às restantes lajes que foram sujeitas a um carregamento. Depois das armaduras atingirem a tensão de cedência, observa-se que a rigidez das 5 lajes manteve-se praticamente igual (ver Fig. 6a). Relativamente aos modos de rotura observados, todas as lajes romperam por esmagamento

do betão na zona de flexão pura. Através destes resultados poder-se-á concluir que o sistema de reforço em termos de capacidade última não foi afetado pelo efeito de fluência, nem pelas condições ambientais em estudo.

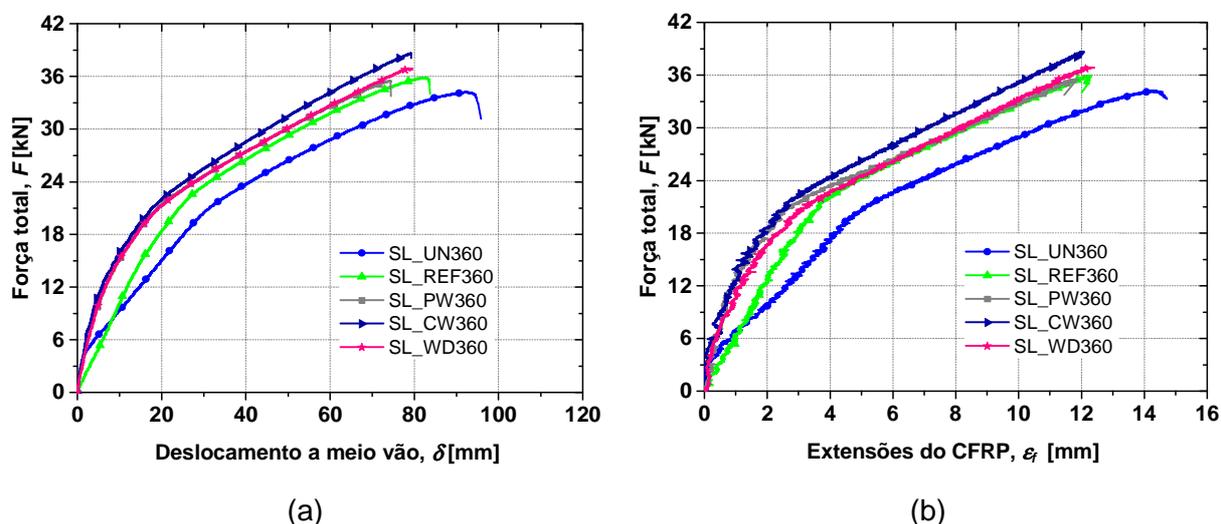


Figura 6. Ensaios monotónicos até à rotura das lajes submetidas às condições ambientais e a um carregamento constante: (a) força total *versus* deslocamento a meio vão; (b) força total *versus* extensões do CFRP a meio vão.

Quadro 4. Principais resultados dos ensaios monotónicos até à rotura.

Lajes	Fendilhação		Cedência		Rotura			
	δ_{cr} [mm]	F_{cr} [kN]	δ_y [mm]	F_y [kN]	δ_{max} [mm]	F_{max} [kN]	ϵ_{CFRP} [1/1000]	$\epsilon_{betão}$ [1/1000]
SL_UN360	1.6	4.29	30.51	20.71	95.80	34.23	14.73	3.39
SL_REF360	-	-	21.9	19.6	83.75	35.89	12.31	4.58
SL_PW360	-	-	9.07	15.48	74.53	35.49	11.88	3.67
SL_CW360	-	-	9.1	15.06	79.25	38.64	12.08	2.79
SI_WD360	-	-	9.78	14.96	79.39	36.91	12.40	2.95

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho focou os resultados de um estudo que visa avaliar a durabilidade e o comportamento a longo prazo de elementos reforçados com CFRP de acordo com a técnica NSM. Apesar de a investigação estar em curso, é possível extrair algumas conclusões preliminares.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento em flexão, verificou-se que o efeito de fluência é muito reduzido. Este poderá estar associado ao baixo nível de tensão aplicado ao sistema. A evolução do deslizamento na zona carregada foi praticamente controlado pela temperatura ambiente do laboratório. Comparando os resultados dos ensaios de arrancamento em flexão com os resultados obtidos nas lajes, o efeito da temperatura é mais pronunciado nos primeiros, uma vez que os laminados de CFRP nas lajes estão totalmente envolvidos pelo adesivo e o betão, reduzindo a exposição à temperatura.

Relativamente aos ensaios de fluência nas lajes, foi observado um pronunciado efeito de fluência, tendo sido decrementado aquando da submersão das lajes. Na fase de descarregamento, a laje de referência recuperou a deformação elástica praticamente na sua totalidade, enquanto nas lajes submetidas à ação ambiental apenas parte da deformação elástica foi recuperada (cerca de metade).

Relativamente aos ensaios monotónicos à rotura dos provetes de arranque em flexão, concluiu-se que o efeito da carga permanente e ambientes considerados não afetaram o comportamento global da ligação. Contudo, verificou-se que os provetes envelhecidos (PW, CW e WD) apresentaram uma ligeira diminuição da resistência da ligação.

Através dos ensaios monotónicos à rotura das lajes descarregadas verificou-se um aumento de rigidez comparativamente à laje não submetida a qualquer tipo de condição. Ainda se verificou que as lajes submetidas simultaneamente às condições ambientais e carregamento apresentaram um ligeiro aumento na rigidez inicial comparativamente com a laje submetida apenas ao carregamento. A capacidade última das lajes não foi afetada por nenhuma das condições ambientais nem carga impostas.

Assim, estes resultados preliminares sugerem que o efeito das condições ambientais nas estruturas de betão armado reforçadas com CFRP de acordo com a técnica NSM sobrepõe-se ao efeito da condição de carregamento. No entanto, salienta-se que os resultados a obter dos restantes provetes, cujo ensaio de fluência ainda se mantém em curso, serão fundamentais para reforçar as conclusões preliminares retiradas até ao momento.

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 fim, os autores ainda agradecem também o apoio e a contribuição das seguintes empresas: S&P Clever Reinforcement, Hilti, Casais, Artecarter, Tecnipor, Vialam, Novo Modelo Europa, Sika and Cachapuz.

REFERÊNCIAS

- [1] De Lorenzis, L. e Teng, J. G. – "Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures", *Composites Part B: Engineering*, 2007, Vol. 38, p. 119-143.
- [2] Ascione, F., *et al.* – "An experimental study on the long-term behavior of CFRP pultruded laminates suitable to concrete structures rehabilitation", *Composites Part B: Engineering*, 2008, Vol. 39, p. 1147-1150.
- [3] Costa, I. e Barros, J. A. O. – "Creep of structural adhesives : an overview" em *CICE 2012 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering* Ed. por 2012, p.
- [4] Derias, M., *et al.* 5th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-V):2008 – "Durability of various NSM FRP Strengthening Systems for RC Flexural Members" em *Winnipeg, Manitoba, Canada*
- [5] 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.
- [6] Bertolini, L., *et al.* Corrosion of Steel in Concrete:2013 – "Transport Processes in Concrete" *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*