COMPORTAMENTO À FADIGA DE ELEMENTOS DE BETÃO REFORÇADOS ATRAVÉS DE SISTEMAS NSM CFRP

Fernandes, Pedro[1], Silva, Patrícia[2], Sena-Cruz, José[3], Azenha, Miguel[4], Barros, Joaquim[5]

[1] Universidade do Minho, ISISE, Aluno Doutoramento, e-mail: pfernandes@civil.uminho.pt
[2] Universidade do Minho, ISISE, Aluna Doutoramento, e-mail: patricia.silva@civil.uminho.pt
[3] Universidade do Minho, ISISE, Prof. Associado, e-mail: jsena@civil.uminho.pt
[4] Universidade do Minho, ISISE, Prof. Auxiliar, e-mail: miguel.azenha@civil.uminho.pt
[5] Universidade do Minho, ISISE, Prof. Catedrático, e-mail: barros@civil.uminho.pt

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal contribuir para o conhecimento a longo prazo de estruturas de betão reforçadas de acordo com a técnica NSM (*Near-Surface Mounted*). O comportamento a longo prazo das estruturas reforçadas é afetado pelas condições ambientais, tais como gelo/degelo, ciclos térmicos, exposição a agentes químicos agressivos e radiação ultra violeta. Além disso, o comportamento da estrutura pode ser comprometido pela ações físicas, tais como o carregamento de fadiga. Desta ação pode resultar a deterioração e enfraquecimento individual dos componentes (aço, FRP, betão), ou perda das propriedades da ligação e ação compósita. Assim, foi desenvolvido um programa experimental composto por ensaios de arranque direto e lajes à flexão, com o objetivo de avaliar o comportamento da ligação (aderência) e o comportamento à flexão de sistemas de reforço NSM CFRP sob ação do carregamento de fadiga. Neste trabalho os principais parâmetros em estudo foram o nível de tensão aplicado e a amplitude do ciclo de fadiga.

Palavras chave: Técnica de reforço NSM; Laminado de CFRP; Comportamento à fadiga; Ensaios de arrancamento e flexão.

ABSTRACT

The present paper aims to contribute to the knowledge of the long-term performance of concrete structures strengthened with the Near-Surface Mounted (NSM) technique. The long-term behavior of strengthened structures is affected by environmental conditions, such as freeze-thaw and temperature cycling, exposure to aggressive chemical agents and ultraviolet light. Furthermore, the long-term performance of structures could be compromised by physical effects, such as fatigue loading. This action can cause the deterioration and weakness of individual components (steel, FRP, concrete), or loss of bond performance and composite action. Thus, an experimental program was performed, composing of direct pullout tests and slab specimens, in order to assess the bond and flexural behavior of NSM CFRP strengthening system under fatigue loading, respectively. In this work, the main investigated parameters were the stress level (or fatigue stress) and the amplitude of each cycle.

Keywords: NSM Strengthening technique; CFRP laminate; Fatigue behavior; Pullout and flexural tests.

1. INTRODUÇÃO

No contexto do reforço de estruturas de betão armado (BA), os polímeros reforçados com fibras (FRP) têm vindo a ter grande aplicação nas últimas décadas com o objetivo de prolongar a vida útil das infraestruturas de transporte existentes, como as vias de comunicação de tráfego pesado e, em especial, as pontes. Este tipo de estruturas é submetido a cargas de fadiga causadas pela passagem dos veículos, fundamentalmente, pesados. Portanto, é de extrema importância estudar o desempenho de estruturas de BA reforçadas com FRP quando submetidas a milhões de ciclos de fadiga durante a vida útil das mesmas.

A técnica baseada na inserção de laminados no betão de recobrimento (*Near Surface Mounted* – NSM da literatura inglesa) tem vindo a ser adotada no reforço de estruturas de betão. Esta técnica consiste na introdução de sistemas de FRP (sistemas de FRP pré-fabricados habitualmente sob a forma de varão ou laminado) em ranhuras pré-executadas no betão de recobrimento nos elementos a reforçar. Normalmente os FRP são fixos ao betão por intermédio de um adesivo epóxi. A técnica NSM surgiu como alternativa à EBR (*externally bonded reinforcement* da literatura inglesa) com o intuito de minimizar os efeitos da rotura prematura por descolagem do FRP, entre outros inconvenientes (De Lorenzis e Teng, 2007; Sena-Cruz *et al*., 2013; Barros *et al*., 2007).

Os níveis de carga típicos associados a estruturas sujeitas à ação de fadiga são consideravelmente menores do que a sua capacidade última de carga. Consequentemente, só a repetição do carregamento cíclico pode provocar a rotura por fadiga (Yun *et al*., 2008). Adicionalmente, a carga de fadiga apresenta uma influência significativa nas propriedades da interface FRP-betão, como é descrito num trabalho de investigação recente (Carloni e Subramaniam, 2013). Na literatura da especialidade, poucas publicações são encontradas que foquem o comportamento à fadiga de estruturas reforçadas através da técnica NSM, e.g. Sena-Cruz *et al*. (2012) e Badawi e Soudki (2009). Apesar destes estudos apresentarem um número reduzido de ensaios, eles revelaram uma excelente resposta de elementos reforçados com técnica NSM sob carregamento cíclico.

O presente trabalho tem como objetivo principal melhorar o conhecimento do comportamento da ligação/aderência e comportamento à flexão de estruturas de BA reforçadas com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM, quando submetidas ao carregamento de fadiga. Este objetivo é perseguido através de um programa experimental que compreende ensaios de arranque direto em provetes cúbicos (avaliação do comportamento da aderência/ligação) e ensaios de flexão em lajes (com vista à avaliação do comportamento estrutural global). Os parâmetros investigados foram o nível de tensão e amplitude do ciclo de fadiga.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi constituído por 9 ensaios de arranque direto (DPT) e 5 lajes (SL). Os ensaios de arranque direto foram divididos em três séries, cada uma composta por três provetes, enquanto que as lajes foram agrupadas em duas séries, conforme se apresenta na Tabela 1. A designação dada a cada série de provetes consistiu num conjunto de carateres alfanuméricos separado por *underscores*. Os primeiros carateres indicam o tipo de provete utilizado (DPT e SL). Os segundos carateres, especificam o número do provete no caso dos ensaios de arranque direto (ver também Figura 4), enquanto que no caso das lajes indicam se a laje é reforçada (STR) ou não (UN). Os terceiros carateres definem a configuração de carga (M – ensaio monotónico, F – ensaio de fadiga). Finalmente, nos ensaios de fadiga, os últimos carateres indicam percentualmente o rácio entre a força máxima aplicada, F_p, aplicada durante os ciclos de fadiga e a capacidade de carga última (resistência monotónica) do correspondente tipo de provete.

Tabela 1: Programa experimental (valores médios)

Provete tipo	Séries	Designação	F_p [kN]	F_{min} [kN]	F_{max} [kN]	S_{min} [%]	S_{max} [%]
Ensaios de arranque direto (DPT)	S1	DPT_M	30.36 (2.0%)	-	-	-	-
	S2	DPT_F50	28.67 (0.7%)	7.0	15.8	23	52
	S3	DPT_F60	-	7.8	17.7	26	58
Lajes (SL)	S4	SL_UN_M	12.03	-	-	-	-
		SL_STR_M	31.63	-	-	-	-
	S5	SL_UN_F75	-	5.1	9.0	42	75
		SL_STR_F50	-	8.3	15.1	26	48
		SL_STR_F70	-	16.2	22.5	51	71
		SL_STR_F80	-	19.6	26.3	62	83

Nota: F_p=força última obtida nos ensaios de monotónicos à rotura; F_{min} e F_{max}=força mínima e máxima aplicada durante os ciclos de fadiga, respetivamente; $S_{min} = F_{min} / F_p$; $S_{max} = F_{max} / F_p$; os valores entre parêntesis são os coeficientes de variação da respetiva série.

2.1 Provetes e configuração de ensaio

Na Figura 1a apresenta-se a geometria dos provetes e a configuração de ensaio adotada para os ensaios de arranque direto (DPT), quando sujeitos a carregamento monotónico ou de fadiga. Os ensaios de arranque direto foram realizados com recurso a provetes cúbicos de betão com 200 mm de aresta, no qual é embebido um laminado CFRP de acordo com a técnica NSM (ver Figura 1a e b). Para evitar a rotura prematura devido à formação de cone de betão na extremidade carregada, o comprimento de amarração foi iniciado a 100 mm a partir do topo do provete (ver Figura 1a). Foi aplicada uma chapa de aço com 20 mm de espessura

no topo dos cubos de betão de modo a garantir deslocamentos verticais desprezáveis durante os ensaios de arranque. Esta chapa de aço foi fixa à base por intermédio de 4 varões roscados M10. Foi aplicado nestes um momento de aperto de 30 N×m, que induz um estado inicial de compressão ao betão de cerca de 2.0 MPa. Os ensaios efetuaram-se num sistema servo-controlado, sendo monitorizada a força de arranque (F) por intermédio de uma célula de carga, com capacidade máxima de 200 kN e precisão de 0.05%, e o deslizamento no final da zona carregada (s_l) através de um LVDT com um campo de medida de ±1 mm e precisão de 0.05%.

Na Figura 2 apresenta-se a geometria das lajes em estudo. Estas lajes têm uma secção transversal de 300 mm de largura por 80 mm de altura. O comprimento entre apoios das lajes é de 1800 mm. A armadura longitudinal é constituída por quatro varões com 6 mm de diâmetro (Ø6) que corresponde a uma percentagem de armadura longitudinal de tração de 0.47%. Por outro lado nas lajes reforçadas, a solução de reforço à flexão é composta por 3 laminados de CFRP (10×1.4 mm^2) colados segundo a técnica NSM, que correspondem a uma percentagem total equivalente de armadura longitudinal de tração de 0.68%. A configuração de ensaio monotónicos à rotura e de fadiga das lajes encontra-se apresentada na Figura 3. Os ensaios realizaram-se por intermédio de um sistema servo-controlado sendo monitorizados os deslocamentos ao longo do eixo longitudinal da laje (LVDT1 a LVDT5), bem como a força aplicada (F) por intermédio de uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kN.

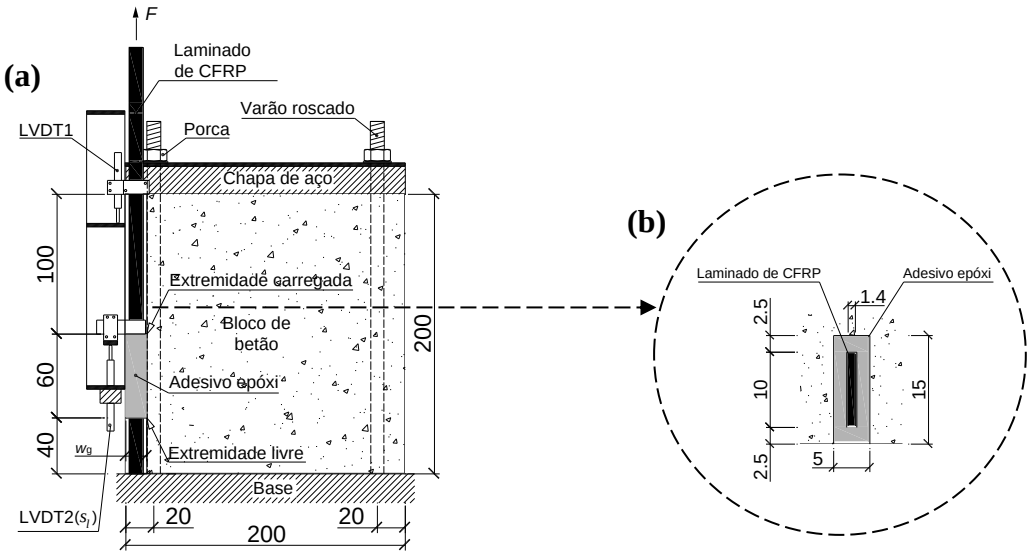

Figura 1: (a) Geometria do provete e configuração de ensaio de arranque direto; (b) Detalhe da geometria do reforço. Nota: todas as unidades estão em [mm].

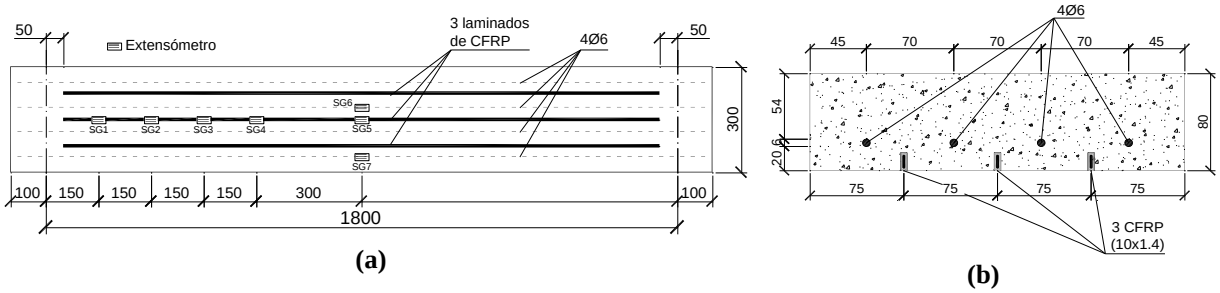

Figura 2: Geometria da laje: (a) vista inferior da laje; (b) secção da laje. Nota: todas as unidades estão em [mm].

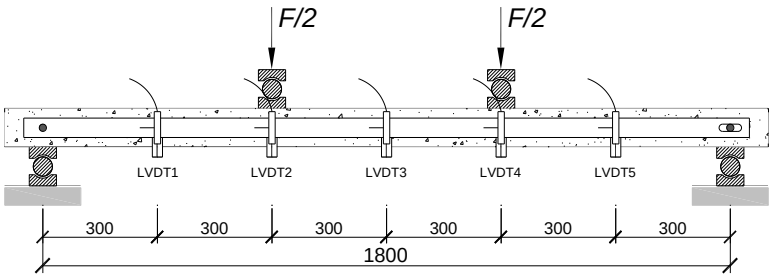

Figura 3: Configuração de ensaio à fadiga e à rotura. Nota: todas as unidades estão em [mm].

Os ensaios de fadiga foram compostos por três etapas principais: (i) inicialmente os provetes foram pré-carregados em controlo de força até se atingir o valor médio entre o nível máximo de carga aplicado, F_{max}, e mínimo, $F_{min,}$ do ciclo de fadiga; (ii) depois foram impostos 3 e 2 milhões de ciclos a uma frequência de 3 Hz e 2 Hz entre F_{min} e F_{max} para os ensaios DPT e SL, respetivamente; (iii) finalmente, os provetes que não atingiram a rotura devido à ação de fadiga foram submetidos a um ensaio monotónico até à rotura. Os ensaios monotónicos foram realizados sob controlo de deslocamento, a uma velocidade de 2 μm/s no caso dos provetes de DPT e a 20 μm/s no caso das lajes. Os níveis máximos e mínimos de fadiga adotados no presente trabalho estão apresentados na Tabela 1. Os ensaios de fadiga foram realizados em controlo de força. Informações adicionais relacionadas com a preparação/configuração dos provetes, assim como mais detalhes sobre a instrumentação adotada podem ser encontradas numa outra publicação (Sena-Cruz *et al*., 2013).

2.2 Caracterização dos materiais

Todos os provetes foram moldados de uma só vez a partir de uma única betonagem. À data dos ensaios de fadiga a idade do betão era de 1 ano para as lajes e cerca de 1.5 anos para os provetes de aderência. A caracterização mecânica do betão foi realizada através de ensaios de compressão em cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura de acordo com a recomendação NP EN 12390-3:2011. Os resultados indicaram uma resistência à compressão média de 48.2 MPa, com um coeficiente de variação (CoV) de 3.2%.

As propriedades à tração do laminado de CFRP foram determinadas com recurso a ensaios de tração de acordo com a ISO 527- 5:1997, adotando uma velocidade de ensaio de 2 mm/min. Da caraterização mecânica do laminado resultou um módulo de elasticidade longitudinal e resistência à tração igual a 169.5 GPa (CoV=2.5%) e 2648.3 MPa (CoV=1.8%), respetivamente.

As propriedades mecânicas à tração do adesivo epóxi utilizado para colar os laminados CFRP ao betão foram avaliadas de acordo com a ISO 527-2:1993. Nos ensaios realizados foram obtidos os seguintes valores médios: 22 MPa (CoV=4.5%) para resistência à tração, 7.2 GPa (CoV=3.7%) para o módulo de elasticidade e 0.36% (CoV=15.2%) para a extensão correspondente à tensão máxima.

De modo a obterem-se as propriedades mecânicas das armaduras longitudinais (Ø6), realizaram-se ensaios de tração uniaxial em conformidade com a norma NP EN 10002-1:1990. Dos ensaios realizados obteve-se um módulo de elasticidade médio e uma tensão de rotura média de 212.2 GPa (CoV=6.3%) e 733.0 MPa (CoV=1.0%).

2.3 Preparação dos provetes

Na preparação dos provetes reforçados foi necessário seguir diversas etapas das quais se destacam as seguintes: (i) abertura das ranhuras com uma máquina de corte; (ii) limpeza dos entalhes com ar comprimido e dos CFRP com acetona; (iii) preparação do adesivo de acordo com a respetiva ficha técnica; (iv) aplicação do adesivo na ranhura e na superfície do laminado; (v) inserção do CFRP no interior da ranhura; (vi) acabamento final através do alisamento da superfície. Depois da abertura das ranhuras realizaram-se algumas medições da geometria da mesma. A partir dessas medições verificou-se que as ranhuras nas lajes apresentavam uma largura e profundidade média de 5.47 mm (CoV=1.82%) e 15.59 mm (CoV=2.16%), respetivamente. Quanto aos provetes cúbicos utilizados nos ensaios de arranque direto, as ranhuras apresentavam uma largura média de 5.61 mm (CoV=1.91%) e uma profundidade de 15.70 mm (CoV=1.94%). O reforço dos provetes ocorreu cerca de 95 dias depois da betonagem dos provetes e foi realizado em ambiente de laboratório a uma temperatura de 25 ºC e a uma humidade relativa de 42%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios de arranque direto

Tal como foi referido anteriormente, foram realizados seis ensaios de arranque direto submetidos a duas amplitudes diferentes de fadiga: (i) 23%-52% (série S2), e (ii) 26%-58%

(série S3) do valor médio da máxima força de arranque, F_p, obtida nos três ensaios monotónicos (série S1) (ver Tabela 1).

Na Figura 4 apresenta-se a envolvente da relação entre a força de arranque e o deslizamento na extremidade carregada (F_l-s_l) para os três provetes ensaiados sob carregamento monotónico à rotura (DPT_M). As respostas F_l-s_l obtidas são coerentes com os resultados observados nos ensaios monotónicos pelos mesmos autores noutros trabalhos, e.g. Sena-Cruz *et al*. (2013). A resposta típica é caracterizada por uma relação iminentemente não linear entre a força de arranque (F_l) e o deslizamento (s_l) até à rotura.

Em relação aos ensaios de fadiga, na Figura 5 são apresentadas as variações do deslizamento na extremidade carregada (s_l) em função do número de ciclos de fadiga para os níveis de força mínima e máxima aplicada durante os ensaios de fadiga para as séries S2 e S3. Para os três ensaios de fadiga pertencentes à série S3, o número de ciclos até se atingir a rotura foram de 95 000, 561 000 e 376 000 para os provetes DPT1_F60, DPT2_F60 e DPT3_F60, respetivamente. Apesar destes provetes estarem sujeitos ao mesmo nível e amplitude de fadiga, os provetes apresentaram uma dispersão significativa quanto ao número de ciclos de fadiga até à ocorrência da rotura. No entanto, o modo de rotura observado nestes três provetes foi idêntico e correspondeu ao progressivo deslizamento do laminado de CFRP ao nível da interface adesivo/laminado até à completa separação entre ambos os materiais. Para os provetes da série S3, podem ser identificadas três regiões distintas (ver Figura 5): a região de rápido aumento do deslizamento nos primeiros ciclos, seguido de uma zona de crescimento progressivo do deslizamento, e finalmente a região onde o deslizamento aumenta bruscamente até o provete atingir a rotura. A magnitude do valor do deslizamento para o momento em que ocorre a rotura está de acordo com os valores obtidos nos ensaios monotónicos, i.e. aproximadamente 0.60 mm (ver Figura 4).

Na série S2, verifica-se um comportamento inicial similar quando comparado com a série S3. Contudo, depois da fase inicial, a velocidade do aumento do deslizamento com o número de ciclos foi menor na segunda região. Para esta série os provetes não atingiram a rotura depois de serem submetidos a três milhões de ciclos.

Na Tabela 1 é possível verificar que os níveis de tensão adotados para ambas as séries S2 e S3 são próximos. Apesar disso, a rotura por fadiga apenas se verifica na série S3. De notar que na série S2 os ensaios foram interrompidos após a aplicação de 3 milhões de ciclos de carga.

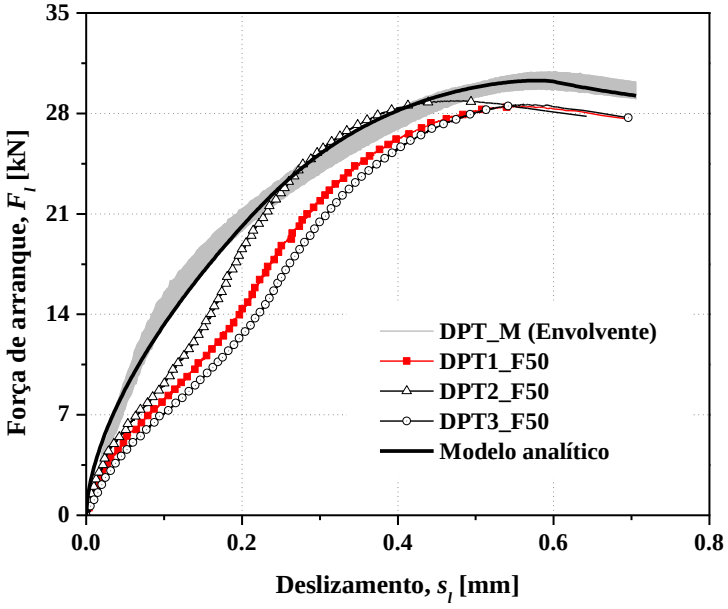

Figura 4: Força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada (F_l-s_l) sob carregamento monotónico e resposta do modelo numérico por análise inversa.

De modo a esclarecer e entender esta diferença de comportamento entre as duas séries, a relação local entre a tensão tangencial e o deslizamento ($\tau - s$) foi avaliada através da aplicação de uma estratégia analítico-numérica, tendo por base os resultados experimentais obtidos na série S1 proposto por (Sena-Cruz e Barros, 2004). Esta estratégia analítico-numérica foi desenvolvida com o objetivo de resolver a equação diferencial de segunda ordem (2) que rege o fenómeno do da aderência de sistema NSM, em que P_f é o perímetro de contacto entre o laminado de CFRP e o adesivo, E_f e A_f são, respetivamente o módulo de elasticidade e a área da secção transversal do laminado de CFRP e x é a abcissa ao longo do eixo longitudinal do laminado, contada a partir da extremidade livre. No âmbito deste trabalho foi usada a lei local descrita pela equação (2). Nesta lei τ_m e s_m são a tensão de corte máxima e correspondente deslizamento, enquanto que α e α' definem a forma da curva na fase de pré- e pós-pico. Para o presente caso, pela metodologia proposta por (Sena-Cruz e Barros, 2004), obtiveram os valores de τ_m=23.2 MPa, s_m=0.2 mm, α=0.18 e α'=0.11.

$$\frac{d^2 s}{dx^2} = \frac{P_f}{E_f A_f} \cdot \tau(x) \qquad (1)$$

$$\tau(s) = \tau_m \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha}, s \le s_m ; \tau(s) = \tau_m \left(\frac{s}{s_m}\right)^{-\alpha'}, s > s_m \qquad (2)$$

É possível observar que a estratégia implementada foi capaz de prever a resposta F_l-s_l com rigor suficiente (ver Figura 4). Tendo por base esta simulação, foi possível concluir que para um nível de força de arranque de 50% (S2) e 60% (S3) de F_p cerca de 74% e 84% do comprimento total de amarração é efetivo, respetivamente. Durante os ensaios de fadiga, como o comprimento de amarração efetivo (próximo da extremidade carregada) começa a ficar danificado devido aos sucessivos ciclos de fadiga, sendo que as tensões são transferidas para a zona não danificada do comprimento de amarração (próximo da extremidade livre da ligação). Embora o processo de transferência de tensões ocorra de forma idêntica para ambas as séries (S2 e S3), uma vez que o nível de tensão aplicado na série S3 foi maior do que na série S2, provavelmente levou a uma degradação mais rápida da ligação e, consequentemente à correspondente rotura.

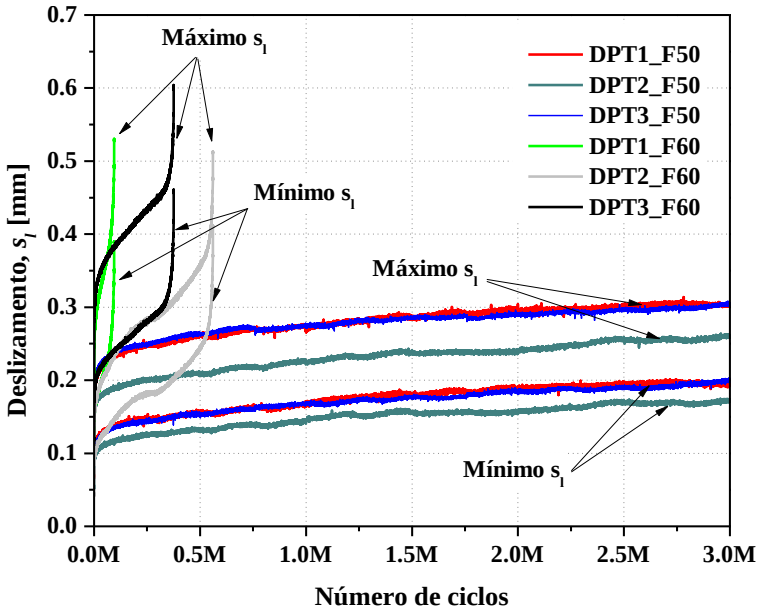

Figura 5: Deslizamento na extremidade carregada em função do número de ciclos.

Como foi acima mencionado, depois dos ensaios de fadiga, todos os provetes que não romperam por fadiga (série S2) foram submetidos a um ensaio monotónico até à rotura. As repostas F_l-s_l monotónicas pós-fadiga são apresentadas também na Figura 4. Na Tabela 1 também inclui a máxima força de arranque média, F_p obtida nos ensaios monotónicos pós-fadiga. Em termos de comportamento da ligação, tal como seria de esperar, o carregamento de fadiga provocou uma redução significativa na rigidez inicial da ligação, o que permite concluir que a fadiga danifica o sistema CFRP/adesivo/betão (ver Figura 4). Em comparação com a série S1, pode ser observado que em termos de força de arranque máxima verificou-se

um ligeiro decréscimo de cerca de 6% (em termos de valores médios), e que o deslizamento na extremidade carregada não foi influenciado pela ação de fadiga. Em geral, com exceção da redução inicial da rigidez da ligação, o comportamento global da ligação não foi muito afetado pelo nível de tensão aplicado na série S2.

Em todos os ensaios de arrancamento o modo de rotura caracterizou-se pelo deslizamento ao nível da interface CFRP/adesivo. Em muitos dos casos observou-se a existência de pequenas quantidades de adesivo aderidas ao laminado, conforme se ilustra na Figura 6.

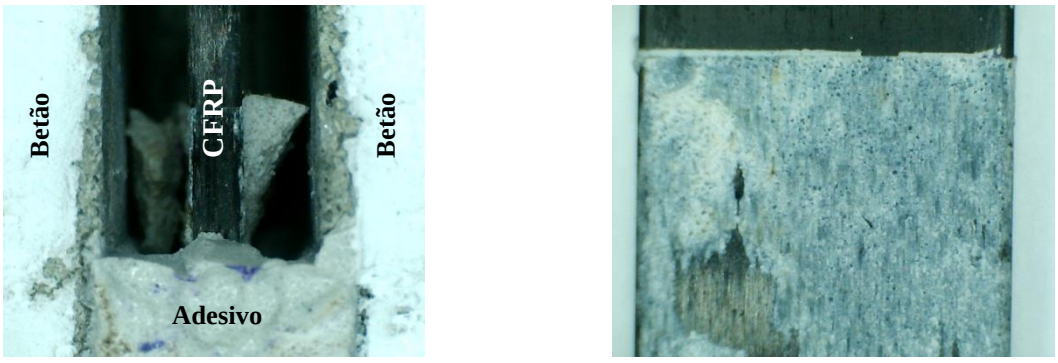

Figura 6: Modo de rotura observado nos ensaios de arrancamento direto (ampliação de 20×): (a) pormenor da zona do entalhe no final da zona carregada; (b) pormenor do laminado (vista lateral).

3.2 Lajes

Através da Figura 7 é possível observar a evolução do deslocamento a meio vão durante o carregamento cíclico do ensaio de fadiga. No entanto, devido a alguns problemas técnicos com o atuador utilizado, que obrigaram a suspender temporariamente os ensaios, conduziram a algumas descontinuidades na flecha medida a meio vão, mais precisamente nas lajes SL_STR_F70 e SL_STR_F80. Durante o carregamento cíclico a que as lajes foram submetidas, foi registado um aumento de deslocamento entre o primeiro e o último ciclo. Na laje não reforçada (SL_UN_F75) esse aumento correspondeu aproximadamente a 8%, enquanto que nas lajes reforçadas foi de 6%, apesar da laje SL_STR_F80 ter sido submetida a um nível de tensão mais elevado (ver também Tabela 2). Este aumento de deslocamento só pode ser justificado através da degradação da ligação entre o aço e o betão, assim como entre o CFRP e o betão.

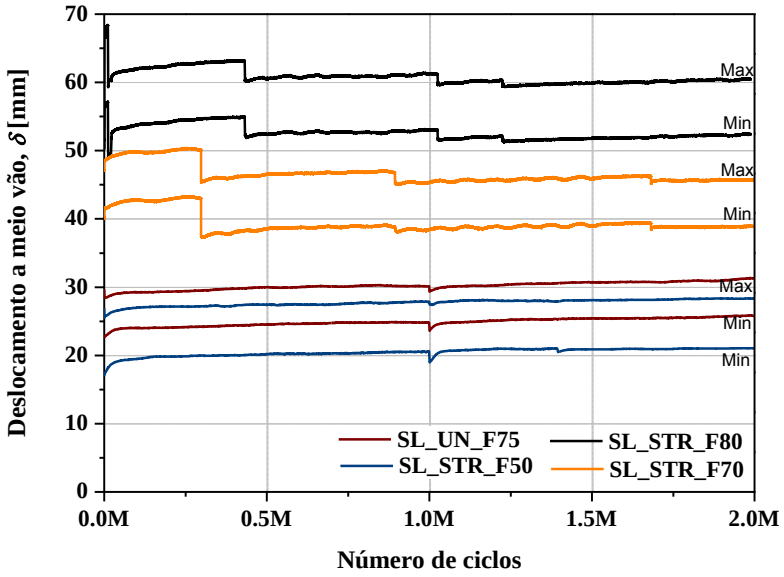

Figura 7: Deslocamento a meio vão *versus* número de ciclos.

Durante os ensaios de fadiga, foi também realizada uma avaliação da rigidez. A rigidez foi calculada pelo declive da reta que une o ponto inferior e o superior de um ciclo definido pela curva força-deslocamento. Na Tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos. Para as lajes reforçadas observa-se uma ligeira redução da rigidez entre o primeiro e o último ciclo do ensaio cíclico, sendo que a laje não reforçada (SL_UN_F75) apresentou uma maior degradação de rigidez (cerca de 14%). Também, como seria expectável, observou-se uma maior degradação de rigidez nas lajes reforçadas que foram sujeitas a níveis de tensão mais elevados.

Após terem sido submetidas a 2 milhões de ciclos nenhuma das lajes apresentou rotura por fadiga. Nos ensaios de arranque direto cuja rotura foi por fadiga, o laminado de CFRP foi submetido a um nível de extensão máximo de cerca de 0.79% (série DPT_F60), enquanto que a laje SL_STR_F80 (o pior caso) a extensão medida no laminado de CFRP por intermédio de extensómetros variou num intervalo entre 0.84% (a meio vão) e 0.04% (na extremidade). Como a extensão nos laminados de CFRP usados nas lajes junto das extremidades destes é bastante reduzida pode justificar o facto de a laje não ter rompido por fadiga.

Na Figura 8 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios monotónicos pós-fadiga, mais precisamente a relação entre a força aplicada e o deslocamento a meio vão. Comparando os resultados obtidos nas lajes que tinham sido submetidas ao ensaio cíclico (série S5) com as lajes de referência (SL_UN_M e SL_STR_M), observa-se um aumento da força máxima (F_{max}), assim como um aumento da rigidez na fase de fendilhação estabilizada (K_{II}). Este comportamento melhorado por parte das lajes submetidas à ação cíclica foi também

observado em outros trabalhos de investigação realizados por outros autores e.g. Yost *et al.* (2007) e Sena-Cruz *et al.* (2012). O aumento da rigidez K_{II} poderá ser explicado pelo endurecimento do aço durante o ensaio de fadiga.

Por fim, refere-se que os modos de rotura observados nas lajes nos ensaios monotónicos pós-fadiga foi esmagamento do betão comprimido a meio vão da laje, tal como nas lajes SL_UN_M e SL_STR_M.

Tabela 2: Resultados das lajes submetidas ao carregamento cíclico

	Ensaio de fadiga		Ensaio monotónico pós-fadiga	
Laje	$(\delta_f - \delta_i)/\delta_i$ [%]	$(K_f-K_1)/K_1$ [%]	F_{max} [kN]	K_{II} / K_M
SL_UN_F75	7.93	13.7%	12.41 (3.1%)	1.74
SL_STR_F50	6.58	2.0%	34.32 (8.5%)	1.42
SL_STR_F70	6.37	3.6%	34.06 (7.7%)	1.22
SL_STR_F80	6.05	7.2%	34.64 (9.5%)	1.11

Notas: δ_i = deslocamento máximo registado no primeiro ciclo; δ_f = deslocamento máximo registado no último ciclo do ensaio de fadiga; K_1 = rigidez no primeiro ciclo; K_f = rigidez último ciclo do ensaio de fadiga; K_{II} = rigidez na fase II no ensaio monotónico pós-fadiga; K_M = rigidez na fase II das lajes que não foram submetidas ao carregamento cíclico.

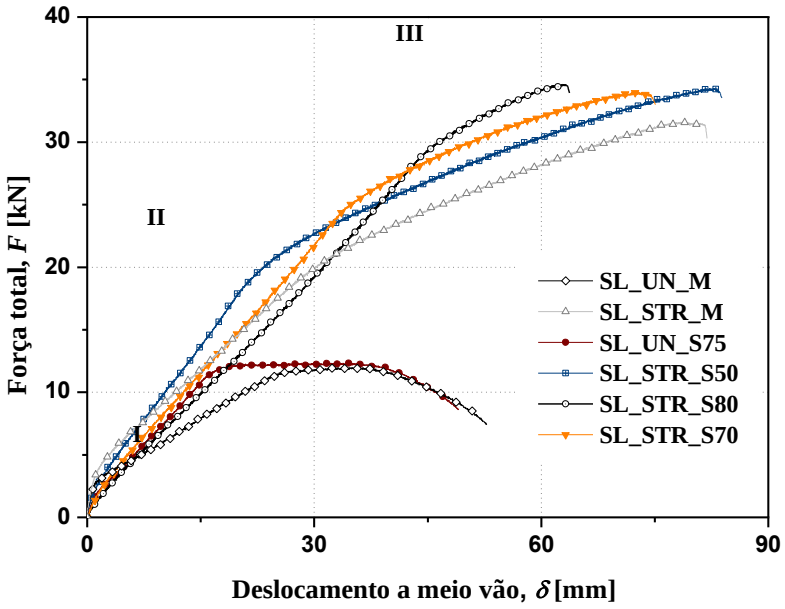

Figura 8: Relação força total *versus* deslocamento nos ensaios monotónicos à rotura após os ensaios de fadiga.

4. CONCLUSÕES

O trabalho experimental descrito foca o estudo da aderência e do comportamento à flexão de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM

submetidos a carregamento cíclico. Para alcançar esse objetivo foram utilizados provetes cúbicos para os ensaios de arranque direto (DPT) e lajes (SL) nos ensaios de flexão.

A partir dos ensaios de arranque direto, verificou-se que para níveis de tensão máximos de cerca de 60% da resistência última da ligação, a rotura ocorreu por deslizamento (*debonding*) do CFRP na interface adesivo/laminado. No entanto, para um nível máximo de tensão de cerca de 50%, não se observou a rotura após os provetes terem sido submetidos a três milhões de ciclos de fadiga. Para ambos os níveis de tensão estudados observou-se uma progressiva e continua degradação da rigidez da ligação.

Independentemente do nível de tensão aplicado durante os ensaios de fadiga (que variou entre os 50% e 80% da capacidade última obtida em ensaio monotónico à rotura), as lajes reforçadas apresentaram menor decréscimo nos deslocamentos a meio vão e na rigidez quando comparadas com a laje não reforçada ao fim de 2 milhões de ciclos aplicados. Após o carregamento cíclico, as lajes foram submetidas a ensaios monotónicos, através dos quais se verificou uma aumento de rigidez e capacidade de carga de aproximadamente de 8%, comparativamente com as lajes que não tinham sido submetidas à ação cíclica. Assim, no âmbito do presente estudo conclui-se que o dano acumulado devido ao carregamento cíclico não afetou a capacidade última das lajes reforçadas com laminados de CFRP.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é apoiado por fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto CutInDur - PTDC/ECM/112396/2009. O primeiro e segundo autores agradecem as bolsas SFRH/BD/80338/2011 e SFRH/BD/89768/2012, respetivamente, financiadas pela FCT. Os autores deste trabalho querem também agradecer a todas as empresas que apoiaram e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente, à S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda., Casais – Engenharia & Construção S.A., Artecanter - Indústria de Transformação de Granitos, Lda., Tecnipor - Gomes & Taveira Lda., Vialam – Indústrias Metalúrgicas e Metalomecânicas, Lda., Hilti Portugal-Produtos e Serviços, Lda., Novo Modelo Europa, S.A., Sika Portugal - Produtos Construção e Indústria, S.A., Cachapuz - Equipamentos para Pesagem, Lda.

6. REFERÊNCIAS

BADAWI, M.; SOUDKI, K. **Fatigue Behavior of RC Beams Strengthened with NSM CFRP Rods**. Journal of Composites for Construction, Vol. 13, No. 5, 2009, pp. 415-421.

BARROS, J., et al. **Nova abordagem no reforço de estruturas com materiais compósitos. Ingenium**, 2007, 98, pp. 84-90.

CARLONI, C.; SUBRAMANIAM, K. **Investigation of sub-critical fatigue crack growth in FRP/concrete cohesive interface using digital image analysis**. Composites Part B: Engineering, Vol. 51, 2013, pp. 35-43.

DE LORENZIS, L.; TENG, J.G. **Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures**. Composites Part B: Engineering, 2007. 38(2): pp. 119-143.

SENA-CRUZ, J., et al. **Advancements in retrofitting reinforced concrete structures by the use of CFRP materials.** Structural Rehabilitation of Old Buildings, London, ISBN 978-3-642-39686-1, 2013, pp. 259-284.

SENA-CRUZ, J., et al. Creep behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under different environmental conditions. **FRPRCS-11: 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures**, Guimarães, 2013, pp. 12.

SENA-CRUZ, J.; BARROS, J. **Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete**. Computers & Structures, Vol. 82, No. 17–19, 2004, pp. 1513-1521.

SENA-CRUZ, J., et al. **Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading**. Construction and Building Materials, Vol. 29, No. 0, 2012, pp. 175-182.

YOST, J., et al. Fatigue behavior of concrete beams strengthened in flexure with near surface mounted CFRP. **8th international symposium on fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures (FRPRCS-8)**, Patras, Greece, 2007, pp.

YUN, Y., et al. **Performance of FRP bonding systems under fatigue loading**. Engineering Structures, Vol. 30, No. 11, 2008, pp. 3129-3140.