

Diferentes métodos de avaliação do comportamento da ligação de laminados de CFRP ao betão de acordo com a técnica NSM

Pedro Fernandes¹

Patrícia Silva²

José Sena-Cruz³

José Xavier⁴

Mário Coelho⁵

Joaquim Barros⁶

RESUMO

O presente trabalho pretende contribuir para o conhecimento da durabilidade da técnica baseada na inserção de laminados de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) no betão de recobrimento (NSM, Near-Surface Mounted). Para isso, foram realizados trinta e cinco ensaios de arrancamento direto em provetes cúbicos previamente submetidos a ciclos de molhagem e secagem na presença de cloretos (NaCl). A monitorização dos ensaios realizou-se com recurso a equipamentos tradicionais (e.g. células de carga e LVDT) e ainda ao método de correlação digital de imagem. No presente trabalho, os ensaios realizados são descritos e os resultados mais significativos, experimentais e numéricos, são apresentados e analisados.

Palavras-chave: NSM, CFRP, Durabilidade, Correlação Digital de Imagem

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a técnica NSM (*Near-Surface Mounted*) tem sido adotada para aumentar a capacidade de carga de elementos de betão. Na maioria dos estudos, têm sido utilizados polímeros reforçados com fibras (FRP) de carbono (C) ou vidro (G) com diferentes formas (e.g., varões com secção transversal circular, quadrada, retangular ou oval, e ainda laminados). De acordo com esta técnica, os FRP são inseridos em ranhuras abertas no betão de recobrimento dos elementos a reforçar. Tipicamente, essas ranhuras são preenchidas com um adesivo epóxico, que funciona como elemento de ligação entre o FRP e o betão.

O conhecimento sobre a técnica NSM é ainda muito limitado quando comparado com outras técnicas de reforço, e.g. técnica da colagem externa (EBR, *Externally Bonded Reinforcement*). Até agora, a investigação esteve essencialmente focada nos aspetos estruturais do reforço por NSM, nomeadamente, no comportamento da ligação, reforço à flexão e/ou ao corte, reforço de nós viga-pilar [1]. Uma área crítica do conhecimento desta técnica é a sua durabilidade e o comportamento a longo prazo.

As condições ambientais mais comuns para o estudo da durabilidade são: os ciclos de molhagem-secagem na presença de cloretos, ciclos gelo-degelo, ciclos de temperatura e humidade [2].

¹ ISISE, Univ. do Minho, Escola de Engenharia, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães. pfernandes@civil.uminho.pt

² ISISE, Univ. do Minho, Escola de Engenharia, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães. patricia.silva@civil.uminho.pt

³ ISISE, Univ. do Minho, Escola de Engenharia, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães. jsena@civil.uminho.pt

⁴ CITAB, Univ. de Trás-os-Montes e Alto Douro, Dep. de Engenharia Civil, Vila Real. jxavier3@gmail.com

⁵ ISISE, Univ. do Minho, Escola de Engenharia, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães. mcoelho@civil.uminho.pt

⁶ ISISE, Univ. do Minho, Escola de Engenharia, Dep. de Engenharia Civil, Guimarães. barros@civil.uminho.pt

A literatura disponível sobre a durabilidade da técnica NSM é ainda muito escassa, sendo poucos os trabalhos publicados disponíveis.

Burke [3] realizou ensaios laboratoriais para investigar a performance de faixas de laje ($1520 \times 250 \times 100 \text{ mm}^3$) reforçadas à flexão com FRP aplicados segundo a técnica NSM. Os provetes foram ensaiados sob uma de três condições: temperatura ambiente constante ($21 \text{ }^\circ\text{C}$), temperatura baixa constante ($-26 \text{ }^\circ\text{C}$) e duas temperaturas elevadas crescentes até $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Duas lajes de referência não reforçadas foram utilizadas nos ensaios a $-26 \text{ }^\circ\text{C}$ e $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Os ensaios dos provetes sujeitos a estas temperaturas foram realizados com carregamento monotónico até à rotura. Os ensaios das lajes sujeitas a temperaturas elevadas foram testadas sob carregamento constante de 20 kN enquanto a temperatura aumentava aproximadamente $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ até ao máximo pré-definido (100 ou $200 \text{ }^\circ\text{C}$). Essas temperaturas foram depois mantidas constantes até à rotura. O modo de rotura típico foi o destacamento na interface epóxi/betão. As lajes sujeitas a 100 e $200 \text{ }^\circ\text{C}$ suportaram o carregamento durante 43 e 11 min, respetivamente.

Mitchell [4] realizou estudos de gelo-degelo em lajes reforçadas à flexão ($1524 \times 254 \times 102 \text{ mm}^3$) e em provetes para ensaios de arranque direto (*pullout*) com geometria idêntica à proposta por De Lorenzis *et al.* [5]. Todos os provetes foram reforçados com laminados de CFRP segundo a técnica NSM. As lajes e os provetes de *pullout* foram submetidos a 300 e 150 ciclos de gelo-degelo, respetivamente. Cada ciclo consistia em submeter o provete a $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 5 horas, seguido de um período de 70 minutos a $+20 \text{ }^\circ\text{C}$. Durante a fase de aquecimento (de $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+20 \text{ }^\circ\text{C}$), desde os 0 até aos $+20 \text{ }^\circ\text{C}$, os provetes foram molhados com água. As lajes submetidas a esses ciclos revelaram apenas uma redução de 2% na carga última quando comparadas com as de referência, enquanto nos provetes de *pullout* essa redução foi de 27%. O principal modo de rotura verificado nas lajes foi pela interface epóxi/betão. Nos provetes de *pullout* a rotura deu-se pelo destacamento do betão na zona da ligação. Da análise dos resultados, o autor desse trabalho concluiu que seria necessária mais investigação naquela matéria.

O principal objetivo do presente trabalho é contribuir para o conhecimento sobre a durabilidade de sistemas de NSM-CFRP sujeitos a ciclos de molhagem-secagem. Para isso, foram realizados ensaios de arranque direto em que as principais variáveis analisadas foram a largura e profundidade da ranhura e o número de ciclos molhagem-secagem. O deslizamento na extremidade carregada da ligação e a força de arranque foram registados com recurso a um LVDT e uma célula de carga, respetivamente. O sistema de correlação digital de imagem também foi utilizado como método de monitorização complementar nos ensaios de arranque. Neste trabalho, esses ensaios são descritos e os principais resultados obtidos são apresentados e discutidos.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Provetes e configuração de ensaio

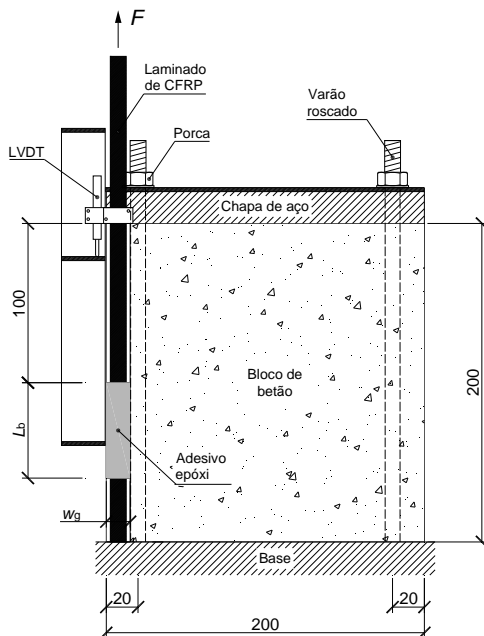
O programa experimental era constituído por 13 séries de dois ou três provetes cada. No contexto do presente trabalho foi analisada a influência dos seguintes parâmetros no comportamento da ligação: comprimento de amarração (L_b), largura (W_g) e profundidade (D_g) da ranhura, e o número de ciclos de molhagem-secagem. A designação dada a cada série de provetes consistiu num conjunto de caracteres alfanuméricos separado por *underscores* (ver Quadro 1). Os primeiros indicam o comprimento de amarração (Lb60 representa um comprimento de ligação de 60 mm). Os segundos, a largura da ranhura (W4 ou W8, respetivamente, 4 ou 8 mm). Os terceiros, a profundidade da ranhura (D15 ou D25, respetivamente, 15 ou 25 mm). Os últimos caracteres, indicam o número de ciclos molhagem-secagem (WD) aplicados a cada série. Os provetes de referência (REF), foram mantidos numa câmara climática a 20°C e 55% de humidade relativa, e foram testados na mesma altura que as correspondentes séries de provetes sujeitos a ciclos WD.

Cada ciclo WD durou 24 horas, sendo o provete sujeito a molhagem durante 12 horas em água com 3% de NaCl a 20 °C, seguido de 12 horas de secagem a 25 °C. O período de tempo decorrido entre o reforço e o início dos testes de envelhecimento, i.e. o período de cura do epóxi, foi de cerca de 150 e 600 dias para as séries D25 e D15, respetivamente. Durante esse período, os provetes foram mantidos à temperatura ambiente do laboratório.

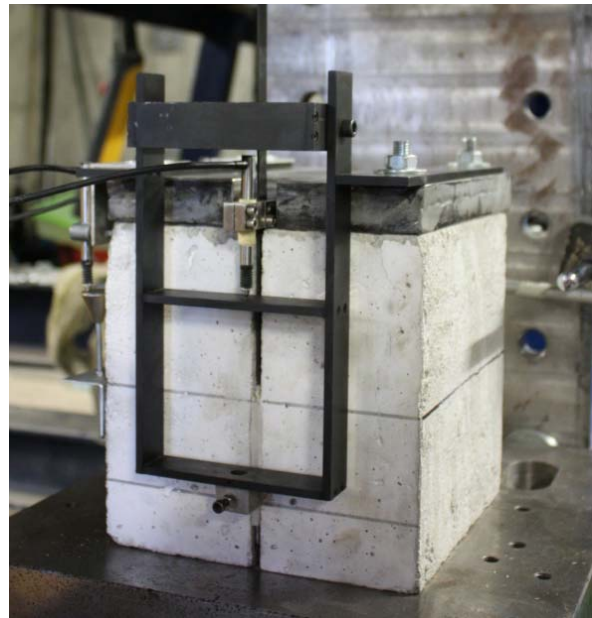
A Fig. 1 ilustra a geometria dos provetes e a configuração adotada nos ensaios de arranque, com recurso a provetes cúbicos de betão com 200 mm de aresta. Para evitar a rotura prematura devido à formação de cone de betão na extremidade carregada, o comprimento de amarração iniciava-se a 100 mm a partir do topo.

Quadro 1. Programa experimental.

Série	Comprimento ligação	Largura ranhura	Profundidade ranhura	N. de provetes
	$[L_b - \text{mm}]$	$[W_g - \text{mm}]$	$[D_g - \text{mm}]$	
Lb60_W4_D15_WD90	60	4	15	3
Lb60_W4_D15_REF90		4		3
Lb60_W8_D15_WD90		8		2
Lb60_W8_D15_REF90		8		2
Lb90_W4_D15_WD90	90	4		3
Lb90_W4_D15_REF90		4		3
Lb60_W4_D25_WD90	60	4	25	3
Lb60_W4_D25_REF90		4		3
Lb60_W8_D25_WD90		8		2
Lb60_W8_D25_REF90		8		2
Lb90_W4_D25_WD90	90	4		3
Lb90_W4_D25_REF90		4		3
Lb60_W4_D25_REF250	60	4	25	3



(a)



(b)

Figura 1. Geometria dos provetes e configuração de ensaio: (a) esquema em corte; (b) fotografia de um ensaio. Nota: todas as unidades em milímetros.

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 foi fixa à base por

intermédio de 4 varões roscados. Foi aplicado nestes um momento de aperto de 30 N×m, que induzia um estado inicial de compressão ao betão de cerca de 2.0 MPa.

A instrumentação dos provetes consistiu num transdutor de deslocamentos (LVDT) e numa célula de carga. O LVDT registava o deslocamento relativo entre o topo do provete de betão e o laminado de CFRP (100 mm afastado da extremidade carregada da ligação). Um outro LVDT, colocado entre o atuador e a amarra, controlava o ensaio a 5 µm/s. A força aplicada, F , era registada pela referida célula de carga.

2.2 Método da correlação digital de imagem

Adicionalmente à instrumentação referida anteriormente, três provetes (série Lb60_W4_S2_REF250) foram monitorizados usando o sistema de correlação digital de imagem (DIC). Este método permite obter campos de deslocamentos completos em objetos quase-planares através da maximização das semelhanças em imagens correspondentes a diferentes estados de deformação [6].

Convencionalmente, são definidos na imagem de referência (configuração indeformada), conjuntos de quadrados adjacentes através de um número definido de *pixels*. Através da correlação matemática do movimento desses pontos, antes e depois da deformação, determina-se um vetor de deslocamentos por subconjunto. Assim, a dimensão do subconjunto define a resolução espacial dos deslocamentos associados a essas medições, a qual deve ser escolhida com base nos erros das interpolações e das correlações.

A superfície alvo deve ter uma área cinzenta isotrópica capaz de permitir resolver o problema da correspondência no processamento das imagens. Neste trabalho, esse padrão foi conseguido através da pintura da superfície do betão. A superfície foi inicialmente regularizada com massa de ferro e polida depois com lixa de papel. Aplicou-se então uma camada de tinta branca de spray na área de interesse, seguida da aplicação de *spray* preto. A Fig. 2 mostra o aspeto final típico dos provetes preparados.

Foi usado o software GOM ARAMIS® DIC-2D v6.02 [7]. O sistema ótico estava equipado com uma câmara Baumer Optronic FWX20 (1624x1236 *pixel* de resolução, 4.4 µm de tamanho por pixel e um sensor de 1/1.8'') equipada com lentes Nikon Zoom Nikkor AF 28-105mm f/3.5-4.5D IF (ver Fig. 3). Foram registadas imagens com uma frequência de 0.2 Hz. A abertura das lentes foi definida para $f/11$ para melhorar a profundidade do campo e evitar os efeitos da difração (aberturas menores). A intensidade da luz e o tempo do obturador foram ajustados de modo a obter uma iluminação uniforme, evitar a saturação dos *pixels* e evitar manchas de movimentos nas imagens durante a exposição. Os componentes do sistema ótico e os parâmetros de medição usados neste trabalho são apresentados no Quadro 2. O tamanho da faceta (número de *pixels* por subgrupo) e o passo da faceta (distância entre facetas adjacentes) foram ajustados para 15×15 *pixels*². Este tamanho de subgrupo foi assumido como razoável, atendendo à dimensão da região de interesse, ao sistema ótico (ampliação) e qualidade do padrão obtido pela pintura com *spray*. Os deslocamentos no plano foram depois diferenciados numericamente de modo a determinar o campo de extensões usando um tamanho de computação de 7 subgrupos (Quadro 2). A resolução dos deslocamentos e das extensões associados às medições do DIC foram, respetivamente, cerca de 2×10^{-2} *pixel* e 0.02% [7,8].

2.3 Caracterização dos materiais

Antes da realização dos ensaios de envelhecimento foi realizada a caracterização mecânica dos materiais, nomeadamente, betão, laminado de CFRP e adesivo epóxi. A caracterização mecânica do betão foi realizada através de ensaios de compressão. Para esse efeito foram ensaiados provetes de betão cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura aos 28 dias para avaliar a resistência à compressão do betão de acordo com a NP EN 12390-3:2009. Os resultados revelaram uma resistência à compressão média de 26.37 MPa, com um coeficiente de variação (CoV) de 4.0%. Foi usado uma única betonagem para todo o programa experimental.

O laminado de CFRP utilizado no presente trabalho, com secção transversal de 1.4 mm de espessura e 10 mm de largura, designação comercial CFK 150/2000, foi fornecido em rolos de 100 metros cada, pela S&P® Clever Reinforcement Ibérica. Este laminado é constituído por fibras de carbono unidireccionais solidarizadas por um adesivo epóxico, e tem uma superfície lisa. As propriedades à tração do 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. Para avaliar o módulo de elasticidade, foi acoplado um *clip gauge* na região central do laminado. Da caracterização mecânica do laminado, resultaram um módulo de elasticidade, resistência à tração e extensão máxima de 158 GPa (CoV=0.9%), 2435 MPa (CoV=5.8%) e 1.50% (CoV=4.7%), respetivamente. Praticamente todos os provetes romperam de forma explosiva a meia altura através da rotura progressiva das fibras.

Também foram realizados ensaios de tração para caracterizar o adesivo epóxi de acordo com a ISO 527-2:1993. Foi igualmente colocado um *clip gauge* a meia altura dos provetes para determinar o módulo de elasticidade do adesivo epóxi. Dos ensaios, resultou uma resistência à tração de 17.33 MPa (CoV=5.8%) e um módulo de elasticidade de 6.35 GPa (CoV=5.8%).

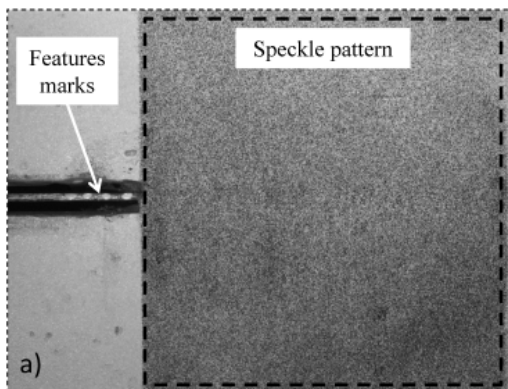


Figura 2. Características do provete e padrão da área de interesse.

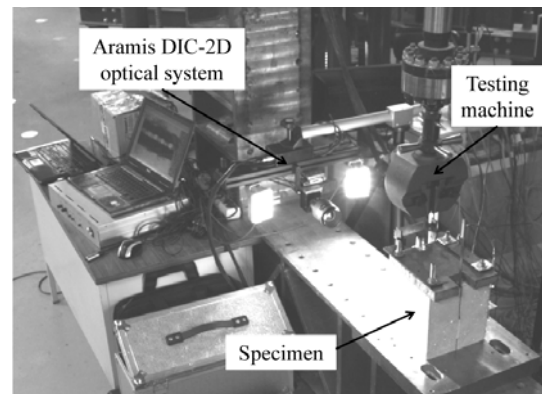


Figura 3. Setup foto-mecânico experimental.

Quadro 2. Componentes do sistema ótico e parâmetros de medição.

Cameras CCD		
Modelo	Baumer Optronic FWX20 (8 bits, 1624×1236 pixels)	
Tempo do obturador	3 ms	
Frequência	0.2 Hz	
Lentes:		
Modelo	Nikon Zoom Nikkor AF 28-105mm f/3.5-4.5D IF	
Abertura	f/11	
Iluminação	Raylux 25 white-light LED	
Distância de trabalho	470 mm	
Fator de conversão	0.033 mm/pixel	
ARAMIS DIC-2D		
Tamanho da faceta	15×15 pixels ²	
Tamanho do passo	15×15 pixels ²	
Tamanho da deformação	7 subsets	
Pontos de medição	15×15 pixels ²	

2.4 Preparação dos provetes

A preparação dos provetes reforçados incluiu várias etapas, essencialmente, o corte das ranhuras, a limpeza das ranhuras e da superfície dos laminados, a preparação do adesivo epóxi e a aplicação do reforço. Em ambas as séries (D15 e D25) o laminado de CFRP estava localizado no centro da ranhura.

3. RESULTADOS

3.1 Materiais

As propriedades mecânicas do laminado de CFRP e do adesivo epóxi foram determinadas após 90 ciclos de molhagem-secagem nas mesmas condições que os provetes de *pullout*. Foi obtida uma resistência à tração de 2281.71 MPa (CoV=5.81%) e um módulo de elasticidade de 154.66 GPa (CoV=4.05%), para o laminado. Quando comparados estes valores com os de referência, observa-se um decréscimo de 6.3% e 2.1% na resistência à tração e no módulo de elasticidade, respetivamente. Por outro lado, no caso do adesivo epóxi, obteve-se uma resistência à tração de 15.65 MPa (CoV=22.2%) e um módulo de elasticidade de 5.87 GPa (CoV=17.1%). Comparando com os valores de referência, observa-se um decréscimo de 9.7% e 7.6% na resistência à tração e no módulo de elasticidade, respetivamente, e um aumento do CoV considerável em ambas as propriedades.

3.2 Ensaios de arranque

O Quadro 3 apresenta os principais resultados obtidos nos ensaios de arranque em termos de força de arranque máxima, F_{lmax} , correspondente deslizamento na extremidade carregada da ligação, s_{lmax} , tensões médias na ligação, $\tau_{max,av1}$ e $\tau_{max,av2}$, e modos de rotura.

O deslizamento na extremidade carregada foi determinado a partir dos valores registados pelo LVDT (ver Fig. 1). Esses registos incluem o deslizamento na extremidade carregada, s_l , e a deformação elástica do laminado entre a extremidade carregada e o topo do cubo de betão (100 mm de distância). Na presente análise, a deformação elástica foi excluída, pelo que apenas s_l é considerado. Para isso foi utilizado o módulo de elasticidade de 158 GPa (ver secção 2.3). Os valores das tensões médias na interface CFRP-epóxi, $\tau_{max,av1}$, e na interface betão-epóxi, $\tau_{max,av2}$, foram calculados como $F_{fmax}/(P_f L_b)$ e $F_{fmax}/(P_g L_b)$, respetivamente, sendo P_f o perímetro da secção transversal do CFRP e P_g o perímetro da secção transversal da ranhura em contacto com o adesivo epóxi.

Verificaram-se 3 modos de rotura distintos (ver Fig. 4): destacamento do betão (C), rotura do CFRP (F) e deslizamento na interface adesivo/laminado (D). O destacamento do betão foi caracterizado pela mobilização de uma grande área de betão na zona da ligação. Este tipo de rotura foi verificado sobretudo nas séries D15, i.e., com o laminado mais perto da superfície exterior do betão. O deslizamento na interface adesivo/laminado foi essencialmente observado nas séries D25. Este modo de rotura, em geral, não originou qualquer tipo de fissuração no betão e/ou no adesivo epóxi. O modo de rotura pelo laminado ocorreu na extremidade carregada e caracterizou-se pela rotura parcial ou total do laminado de CFRP.

Para melhor entender a evolução da máxima força de arranque no programa experimental, apresenta-se a Fig. 5. Nesta, a variação da resistência é definida como o rácio entre $F_{lmax,WD} - F_{lmax,REF}$ e $F_{lmax,REF}$ sendo “WD” e “REF” séries genéricas submetidas a ciclos de molhagem-secagem e respetivas séries de referência, respetivamente.

A Fig. 5 mostra que nas séries D15 o efeito do envelhecimento diminui F_{lmax} , independentemente do comprimento de amarração e da largura da ranhura, enquanto nas séries D25, à exceção da série W8, F_{lmax} aumentou com o envelhecimento. Este comportamento paradoxal pode estar associado ao tempo de cura de ambas as séries. Tal como referido anteriormente, o tempo de cura das séries D15 e D25 foi de cerca de 600 e 150 dias, respetivamente. O tempo de cura nas séries D25 pode ter sido insuficiente para garantir a cura completa antes dos ensaios de envelhecimento, resultando assim num balanço positivo em termos de comportamento da ligação devido à cura e ao efeito do envelhecimento providenciados pelas condições de envelhecimento. Este aspeto pode também ter contribuído para os modos de rotura observados, uma vez que para as séries D15 o mais comum foi a fendilhação do betão enquanto nas séries D25 foi o destacamento na interface adesivo/laminado (ver também Fig. 4).

Aparentemente, as séries com uma largura de ranhura de 8 mm (W8) não foram afetadas pelo período de cura do epóxi nem pelos ciclos de secagem-molhagem. Tal como referido anteriormente, para as séries D25 o adesivo tem um papel muito importante, sendo maior nos casos W8 comparativamente a W4. Devido aos efeitos do envelhecimento, a performance das primeiras foi significativamente afetada pelos agentes de degradação. Nas séries D15 o modo de rotura mudou de C (séries W4) para D (séries W8) devido a P_g .

Tal como esperado, a força de arranque aumentou com o aumento do comprimento de amarração. Por outro lado, as tensões médias de corte ($\tau_{max,av1}$ e $\tau_{max,av2}$) diminuíram com o aumento de L_b , (ver colunas de $\tau_{max,av1}$ e $\tau_{max,av2}$) devido ao facto da tensão tangencial ser não constante ao longo do comprimento de amarração [9]. Igualmente, era previsível que $\tau_{max,av1}$ desse valores maiores que $\tau_{max,av2}$, uma vez que a área de contacto no segundo caso é maior.

A Fig. 6 mostra a resposta típica em termos de força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada (F_{T-S}), que é iminente não linear até à rotura.

Quadro 3. Resultados experimentais (valores médios).

Série	F_{lmax} kN	S_{lmax} mm	$\tau_{max,av1}$ MPa	$\tau_{max,av2}$ MPa	Modo de rotura
Lb60_W4_D15_WD90	25.34 (5.88%)	0.37 (23.56%)	18.52	12.42	C(3)*
Lb60_W4_D15_REF90	29.00 (2.67%)	0.61 (23.10%)	21.20	14.22	C(3)*
Lb60_W8_D15_WD90	26.08 (0.81%)	0.81 (1.75%)	19.06	11.44	D+C(2)*
Lb60_W8_D15_REF90	26.83 (0.55%)	0.88 (25.05%)	19.61	11.77	D(2)*
Lb90_W4_D15_WD90	32.44 (10.10%)	0.79 (51.93%)	15.81	10.60	C(2)*; F(1)*
Lb90_W4_D15_REF90	36.39 (5.31%)	1.06 (8.71%)	17.73	11.89	C(2)*
Lb60_W4_D25_WD90	31.14 (3.16%)	0.54 (15.85%)	22.76	9.61	D(3)*
Lb60_W4_D25_REF90	28.04 (8.63%)	0.47 (7.67%)	20.50	8.65	D(3)*
Lb60_W8_D25_WD90	30.24 (2.97%)	0.74 (34.40%)	22.11	8.69	D(2)*
Lb60_W8_D25_REF90	30.63 (0.35%)	0.71 (9.96%)	22.39	8.80	D(2)*
Lb90_W4_D25_WD90	35.10 (18.68%)	0.91 (18.40%)	17.11	7.22	C(3)*
Lb90_W4_D25_REF90	32.60 (16.77%)	0.70 (57.99%)	15.89	6.71	F(1)*; D(1)*
Lb60_W4_D25_REF250	25.64 (9.91%)	0.73 (12.94%)	18.74	7.91	D(1)*; F(2)*

Nota: os valores dentro de parêntesis são os respetivos coeficientes de variação; Modos de rotura: D=Deslizamento na interface adesivo/laminado; F=rotura do CFRP; C=destamento do betão; *o valor dentro de parentesis é o numero de provetes com esse modo de rotura.

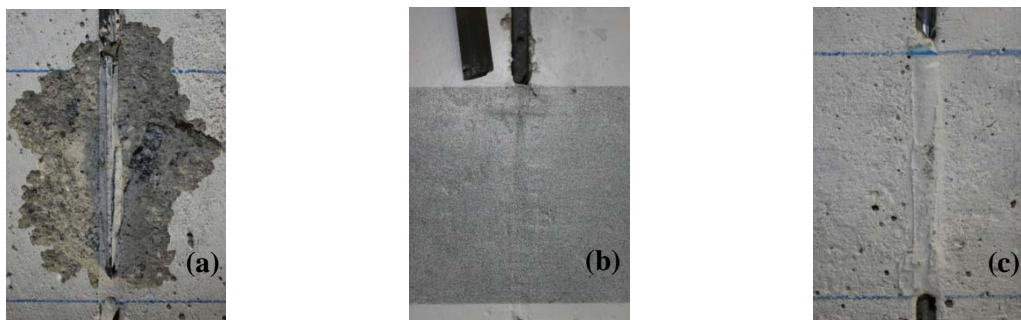


Figura 4. Modos de rotura: (a) destacamento do betão; (b) rotura do CFRP; (c) deslizamento na interface adesivo/laminado.

3.2 Método da correlação digital de imagem

Tal como referido anteriormente, no âmbito do presente trabalho experimental, foi testado o uso do método da correlação digital de imagem como alternativa/complemento na monitorização de ensaios de arranque com NSM. Para isso, foi utilizada a série Lb60_W4_D25_REF250. A Fig. 7 apresenta,

para diferentes níveis de força de arranque, os seguintes parâmetros: deformada; deslocamentos U_x e U_y na direção x e y, respetivamente; campo de extensões na direção x e y (ε_x e ε_y); e, o campo da distorção xy (γ_{xy}). Nas imagens obtidas pelo DIC a secção carregada do laminado corresponde à extremidade esquerda dessas figuras. O eixo do x foi admitido como paralelo ao eixo do laminado, i.e. na direcção da força de arranque.

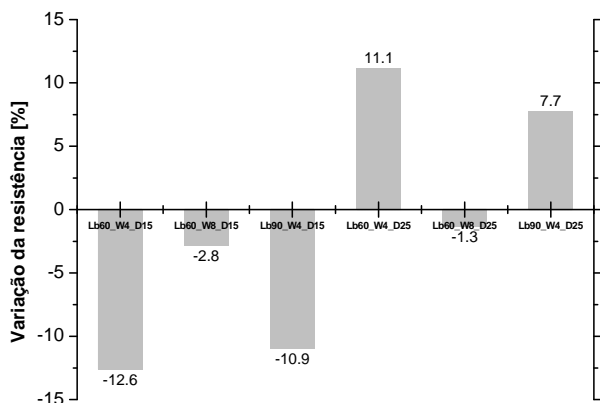


Figura 5. Variação da resistência.

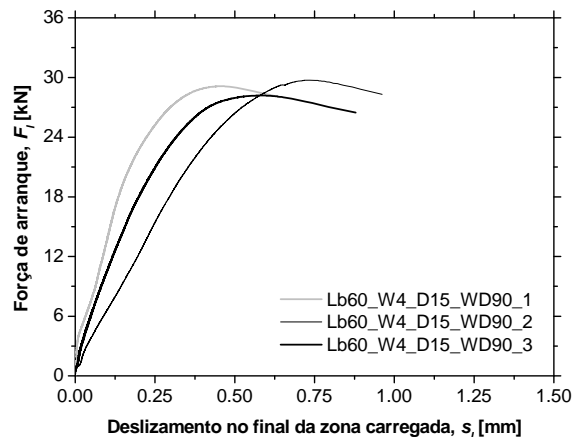


Figura 6. Força de arranque versus deslocamento para a série Lb60_W4_D15_WD90.

Na Fig. 8 apresenta-se uma comparação entre os resultados obtidos pela medição com LVDT e com o DIC. Devido a algum desalinhamento do laminado, numa primeira fase do deslizamento, este também rodou de modo a ficar alinhado com a direção do carregamento, resultando num deslizamento negativo que é a principal causa da diferença nas curvas F_l-s_l obtidas com os dois métodos. Este comportamento foi claramente capturado pelo LVDT com um deslizamento inicial negativo. O método DIC não captou este comportamento, uma vez que a versão usada neste trabalho apenas mede deformações 2D. Apesar disso, o comportamento global é muito similar.

A evolução do máximo deslocamento U_x em cada nível é claramente observada pelo método DIC. Para o nível máximo de força de arranque, o deslocamento máximo U_x foi de 0.035 mm na região do destacamento. Tal como esperado, deslocamentos maiores verificaram-se na zona da ranhura. Tal como U_x , os deslocamentos U_y foram simétricos em relação ao eixo longitudinal do laminado, sendo o máximo nível de deformação de 0.015 mm para a carga máxima. Quando comparada a magnitude dos deslocamentos U_x e U_y , os primeiros são aproximadamente 10 vezes superiores. As extensões registadas pelo método DIC põem em evidência o mecanismo resistente reportado na literatura [9]. Forças de compressão diagonais (bielas de compressão) desenvolvem-se no adesivo e são depois transferidas para o betão. Este comportamento foi claramente registado pelo DIC., bem como pelo padrão de fendilhação tipo “espinha de peixe” que se observa no adesivo epóxi (ver Figs 4a e 7). Outro aspeto interessante é o facto de a máxima extensão ocorrer para F_{lmax} na proximidade da extremidade livre, com um nível de extensão ε_x semelhante a ε_y .

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta os principais resultados obtidos de um programa experimental de ensaios de arranque em elementos de betão, reforçados com laminados de CFRP segundo a técnica NSM, após serem submetidos a 90 ciclos de molhagem-secagem. Foi estudada a influência de duas profundidades de ranhura diferentes (15 e 25 mm), comprimentos de ligação (60 e 90 mm) e idades de aplicação do reforço (150 e 600 dias).

Dos resultados obtidos, verificou-se um decréscimo na força de arranque, F_{lmax} , de cerca de 11% nas séries com ranhura de 15 mm de profundidade e 4 mm de largura, quando comparados com os provetes de referência. Por outro lado, verificou-se um acréscimo de cerca de 10% para F_{lmax} nas

séries com ranhuras de 25 mm de profundidade e 4 mm de largura. Nas séries com ranhura de 8 mm de largura, foram verificadas variações desprezáveis para F_{lmax} , quando comparado com os respectivos provetes de referência.

Apesar de os presentes resultados serem credivéis e contribuirem para o conhecimento nesta área, mais investigação é necessária para melhor entender o fenómeno observado. No âmbito do presente trabalho foi usada com sucesso a correlação digital de imagem como método de monitorização alternativo/complementar neste tipo de ensaios.

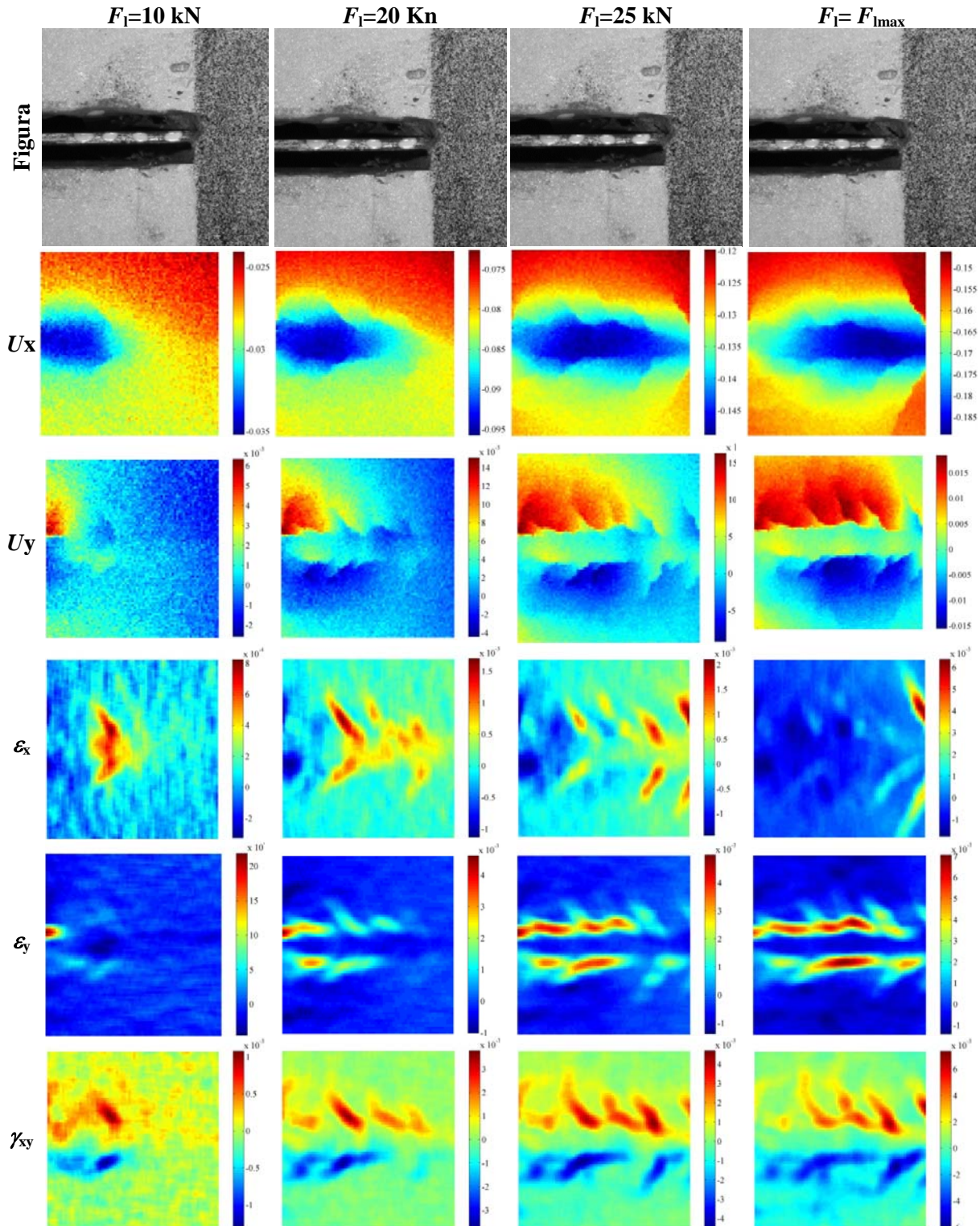


Figura 7. Resultados obtidos pelo DIC para níveis de força de arranque distintos.

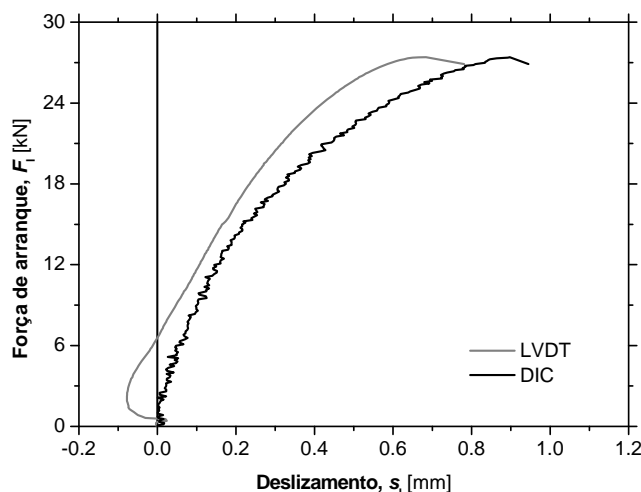


Figura 8. Força de arranque *versus* deslizamento usando LVDT e o método DIC.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado por fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT - Fundação Português de Ciência e Tecnologia no âmbito do projecto CutInDur PTDC/ECM/112396/2009. Os autores deste trabalho também querem agradecer a todas as empresas que gentilmente forneceram os materiais, nomeadamente, à S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda. e à SECIL.

REFERÊNCIAS

- [1] De Lorenzis, L. & Teng, J.G. 2007. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering* 38 (2): 119-143.
- [2] fib 2007. FRP reinforcement in RC structures. Bulletin No. 40. The International Federation for Structural Concrete (FIB). Report prepared by Task Group 9.3, ISBN: 978-2-88394-080-2. 160 pp. Lausanne, Switzerland.
- [3] Burke, P.J. 2008. Low and High Temperature Performance of Near Surface Mounted FRP Strengthened Concrete Slabs. Master of Science, Queen's University.
- [4] Mitchell, P.A. 2010. Freeze-Thaw and Sustained Load Durability of Near Surface Mounted FRP Strengthened Concrete. Master Thesis, Queen's University.
- [5] De Lorenzis, L., Rizzo, A. & La Tegola, A. 2002. A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering* 33 (8): 589-603.
- [6] Pan, B., Qian, K., Xie, H. & Asundi, A. 2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology* 20(6), 062001.
- [7] ARAMIS commercial software. GOM (<http://www.gom.com/>). <2012-01-26>
- [8] Xavier, J., de Jesus, A.M.P., Morais, J.J.L. & Pinto, J.M.T. 2012. Stereovision measurements on evaluating the modulus of elasticity of wood by compression tests parallel to the grain. *Construction and Building Materials*, 26 (1): 207-215.
- [9] Sena Cruz, J.M. & Barros, J.A.O. 2004. Bond Between Near-Surface Mounted Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminate Strips and Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 8 (6): 519-527.