

Análise Experimental de Pilares de Betão Armado Reforçados com Laminados de Carbono sob Acções Cíclicas

Joaquim Barros

Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

José Sena Cruz

Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Débora Ferreira

Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal

Paulo Lourenço

Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

Palavras Chave: Reforço, Laminados de fibras de carbono, Acções Cíclicas

RESUMO

Na última década convencionais sistemas de reforço de pilares têm vindo a ser substituídos por sistemas constituídos por materiais compósitos de fibras de carbono e de vidro, devido à resistência elevada, leveza, durabilidade, resistência à corrosão e facilidade de aplicação destes últimos sistemas.

Recentemente foi proposto um sistema constituído por laminados de fibras de carbono com secção transversal de $10 \times 1.5 \text{ mm}^2$ embutidos no betão de recobrimento das faces do elemento do pilar ortogonais ao plano de actuação das cargas. Por intermédio de ensaios experimentais constatou-se que este sistema de reforço permite aumentar significativamente a capacidade de carga de pilares com modos de rotura por flexão. Aliando a este facto a rapidez de execução e a economia de material, conclui-se ser uma alternativa eficaz às convencionais técnicas de reforço para pilares com modos de rotura por flexão.

Neste trabalho apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos numa campanha de ensaios experimentais em pilares de betão armado reforçados com o sistema de reforço referido e submetidos a acções cíclicas, dando-se especial relevo aos parâmetros que permitem avaliar a capacidade dissipativa de energia dos elementos ensaiados.

Ensaio preliminares de arranque com o sistema de reforço proposto foram efectuados, sendo os resultados obtidos analisados.

1. INTRODUÇÃO

Durante a vida de uma estrutura os materiais que a constituem ficam sujeitos à actuação de diversos agentes que contribuem para a degradação das suas propriedades. A actuação de acções superiores às adoptadas em fase de projecto e a alteração da funcionalidade e configuração geométrica de determinada estrutura exigem também a intervenção do projectista de forma a adaptar a estrutura à sua nova realidade. Qualquer destes cenários se enquadra na disciplina de reabilitação e reforço de estruturas. No que se refere ao reforço de estruturas, os materiais mais utilizados têm sido o aço e o betão. Nos últimos anos tem-se assistido a um decréscimo

significativo do preço de fabrico dos materiais compósitos, principalmente dos constituídos por fibras de carbono embebidos em matrizes poliméricas (CFRP). O incremento significativo de investigação na área do reforço de estruturas de betão armado com sistemas em materiais compósitos que se tem assistido na última década está relacionado com este facto (ACI, 1993). Estas duas valências deram suporte à realização prática de reforço de estruturas com sistemas em materiais compósitos, em que o ainda maior preço destes materiais foi compensado pelas melhores propriedades de resistência (material e física) e menor custos de aplicação.

No nosso País a acção sísmica não foi tida em conta no dimensionamento de parte considerável das estruturas projectadas nas décadas de 60 e 70. Este facto aliado à baixa classe de resistência do betão empregue na maior parte dessas estruturas (e maior massa, consequentemente) e tendo ainda em conta o pouco cuidado que existia com as questões da ductilidade revela que algumas destas estruturas devam ser submetidas a processo de levantamento e diagnóstico das suas deficiências estruturais, de forma a definir-se um plano de reforço e reabilitação apropriado.

A maior parte das técnicas de reforço baseadas em sistemas de CFRP recorrem à colagem de laminados ou de tecidos na face dos elementos a reforçar. A investigação desenvolvida com estas técnicas tem revelado que a reduzida resistência do betão à tracção e ao corte estão na base de não ser possível mobilizar as elevadas resistências à tracção dos CFRP, ocorrendo o que geralmente se designa por “peeling”, isto é, o sistema de reforço descola da superfície do elemento a reforçar, ou arranca uma camada deste elemento (geralmente a camada de recobrimento das armaduras). O posicionamento dos CFRP nas faces dos elementos a reforçar tem ainda como inconveniente a necessidade de os proteger da acção do fogo, dada a sua elevada toxicidade e reduzida resistência ao fogo (Rostasy, 1998; Juvandes, 1999).

Por estes factos, no subgrupo de estruturas do Dep. de Eng^a Civil da Universidade do Minho foi iniciado um projecto de investigação que tem como objectivo desenvolver e caracterizar sistemas de reforço que permitam mobilizar, com maior eficácia, as elevadas resistências à tracção dos sistemas compósitos, que garantam maior protecção ao fogo e que sejam mais fáceis de aplicar, minimizando material de reforço e tempo da sua aplicação. Este projecto é dirigido fundamentalmente para pilares, dado serem os elementos que merecem especial cuidado sempre que se pretenda garantir uma maior segurança da estrutura quando sujeita à acção sísmica. A fig. 1c ilustra o sistema de reforço que se pretende desenvolver. Os laminados em fibras de carbono são embutidos no betão da peça a reforçar, de forma a aumentar a sua resistência à flexão. Por sua vez, as faixas em tecido de carbono pretendem aumentar a resistência ao corte e aumentar a ductilidade do betão. A área das faixas e o seu afastamento são determinados em função do incremento da resistência ao corte e de confinamento que se pretende. Caso apenas se queira aumentar a resistência ao corte, estas faixas poderão ser substituídas por laminados embutidos em ranhuras executadas no recobrimento do betão, desde que este tenha profundidade para tal e que o comprimento de selagem destes laminados seja reduzido (ver fig. 2). Ensaios preliminares de arranque com laminados embutidos em ranhuras revelaram ser necessário um reduzido comprimento de selagem do laminado para mobilizar a sua resistência à tracção. Na secção 4 estes ensaios são descritos e os resultados são apresentados e analisados.

Assim, o projecto de investigação é composto por três fases. A primeira refere-se ao estudo do comportamento de pilares com modos de rotura por flexão, apenas reforçados com laminados de CFRP, ver fig. 1a, (Barros et al., 2000a; Barros et al., 2000b). A segunda fase, que se encontra em realização, é dedicada ao reforço de pilares com modos de rotura por corte pelo que o sistema de reforço é o representado na fig. 1b. Na terceira fase do projecto o sistema de reforço é a associação dos dois anteriores, pelo que é o ilustrado na fig. 1c. Tendo em conta os objectivos pretendidos, todos os pilares são submetidos a carregamentos cíclicos, sob uma carga axial de compressão constante.

O presente trabalho tem como objectivo fundamental apresentar os resultados obtidos na primeira fase do projecto, dando-se especial relevo aos parâmetros que traduzem a capacidade de dissipação de energia dos elementos ensaiados. Note-se que, naturalmente, a dissipação de energia não é significativamente afectada pelo sistema de reforço aplicado na primeira fase do projecto de investigação, dado que para esta fase pretende-se apenas aumentar a resistência à flexão de pilares com modos de rotura por flexão. Contudo, os resultados obtidos nesta fase

serão essenciais quando for efectuada uma análise comparativa dos resultados obtidos nas três fases do projecto.

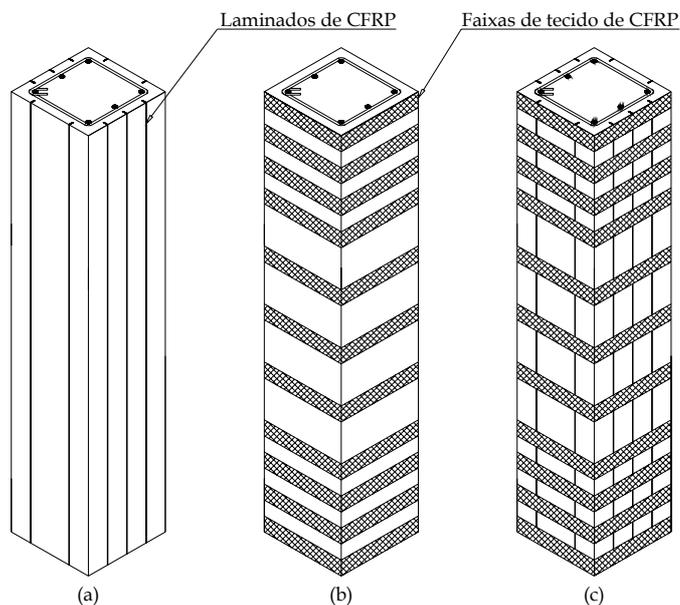


Fig. 1 – Sistemas de reforço para flexão (a), corte (b) e flexão/corte (c).

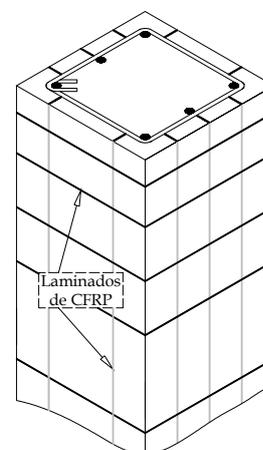


Fig. 2 – Laminados de CFRP no reforço ao corte.

2. ELEMENTOS DE PILAR, SISTEMA DE REFORÇO, MATERIAIS E METODOLOGIA DE ENSAIO

2.1 Elementos de pilar a ensaiar

A campanha de ensaios experimentais realizada é constituída por três conjuntos de três pilares, de secção transversal $0.20 \times 0.20 \text{m}^2$ e 1.0m de altura, armados com varões longitudinais de 10, 12 e 16mm de diâmetro (ver fig. 3). O espaçamento adoptado para os varões da armadura transversal foi igual a 12 vezes o diâmetro dos varões da armadura longitudinal. Estes pilares encontram-se solidarizados a sapatas de fundação de 400mm de largura, 800mm de comprimento e 300mm de altura. No Quadro I refere-se a nomenclatura atribuída aos ensaios efectuados. Assim, para os ensaios sobre pilares não reforçados utilizou-se a sigla “SR”. Aos ensaios sobre pilares reforçados, cujo reforço foi aplicado após os pilares sem reforço terem sido ensaiados, atribuí-se a designação “CR”. Finalmente, atribuí-se a sigla “PR” aos ensaios com pilares previamente reforçados, pelo que moldaram-se 18 pilares e efectuaram-se 27 ensaios.

2.2 Sistema de reforço

A fig. 3 ilustra o sistema de reforço aplicado nos elementos de pilar ensaiados. Dado tratar-se de reforço para pilares com modos de rotura por flexão, o sistema de reforço é constituído por três laminados em fibras de carbono embutidos em ranhuras abertas nas faces solicitadas do pilar e fixados por intermédio de um composto epóxico. Para “ancorar” os laminados à sapata foram efectuados uns orifícios, o que obrigou a desmontar o betão de recobrimento numa altura de aproximadamente 100mm acima da ligação do pilar à sapata. Quer esta zona quer os orifícios da sapata foram preenchidos por uma argamassa epóxida. Ensaios realizados (Barros et al., 2000b) revelaram que esta argamassa desenvolveu aos 28 dias uma resistência à compressão de 52MPa, uma resistência à tracção em flexão de 35MPa, um módulo de elasticidade em flexão de 5GPa e uma energia de fractura de 1530Nm/m^2 . A descrição detalhada deste sistema de reforço e sua aplicação encontra-se em outro trabalho (Ferreira, 2001).

Quadro I – Nomenclatura utilizada nos ensaios realizados

Armadura longitudinal	Modelo	Ensaio tipo		
		SR ⁽¹⁾	CR ⁽²⁾	PR ⁽³⁾
4φ10	Pilar a	P10a_SR	P10a_CR	P10a_PR
	Pilar b	P10b_SR	P10b_CR	P10b_PR
	Pilar c	P10c_SR		
4φ12	Pilar a	P12a_SR	P12a_CR	P12a_PR
	Pilar b	P12b_SR	P12b_CR	P12b_PR
	Pilar c	P12c_SR		
4φ16	Pilar a	P16a_SR	P16a_CR	P16a_PR
	Pilar b	P16b_SR	P16b_CR	P16b_PR
	Pilar c	P16c_SR		

(1) – sem reforço; (2) – com reforço; (3) – previamente reforçado

2.3 Materiais

Betão

Dando cumprimento aos objectivos assinalados na introdução deste trabalho, o betão dos pilares ensaiados foi da classe C12/20. Contudo, registou-se uma variação significativa na resistência à compressão, consequência de um deficiente controlo da humidade dos inertes. A composição, os ensaios de caracterização do betão e os resultados obtidos estão noutra publicação (Ferreira, 2001).

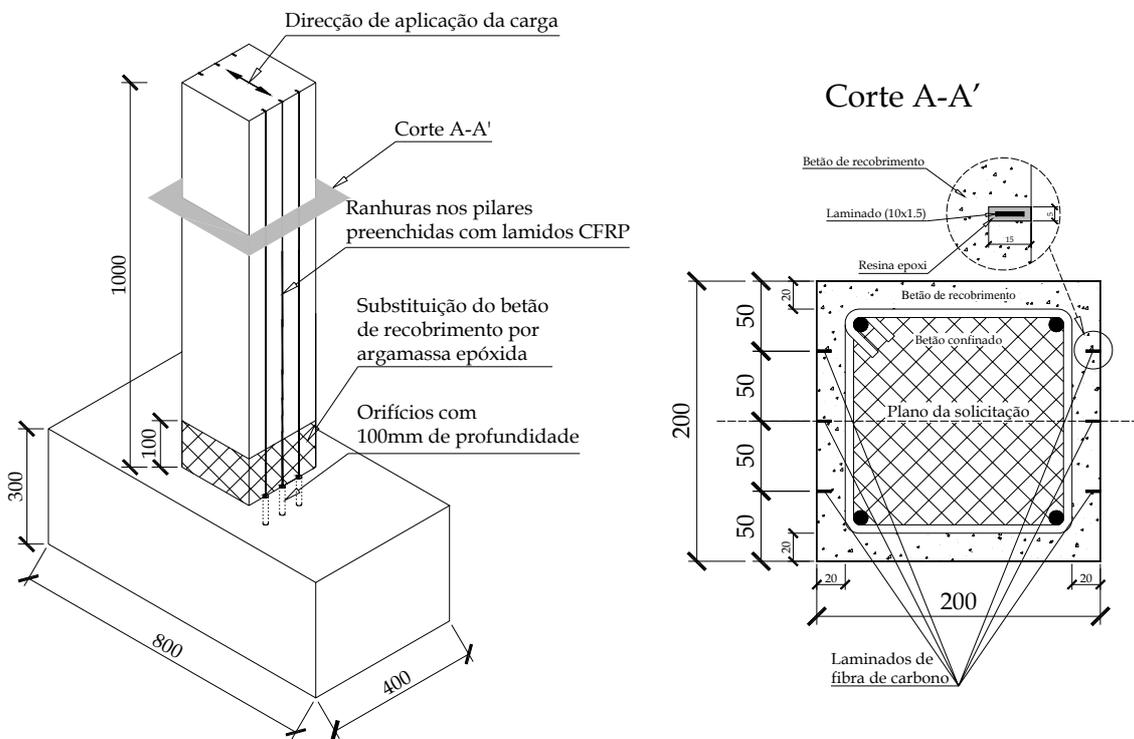


Fig. 3 – Técnica de reforço aplicada.

Aço das armaduras convencionais

Para armaduras convencionais utilizaram-se varões lisos de propriedades similares aos utilizados nas construções das décadas de 60 e 70 (Ferreira, 2001). Tratam-se de varões em aço macio que apresentaram módulos de elasticidade ligeiramente superiores a 200GPa, tensão de cedência próxima dos 357MPa e tensão de rotura entre 353MPa a 519MPa.

Laminados de fibras de carbono

No reforço dos pilares utilizaram-se laminados de fibras de carbono com secção transversal rectangular de 10mm de largura e 1.5mm de espessura. Este material desenvolveu comportamento essencialmente elástico até à rotura, tendo, nos ensaios efectuados, apresentado um módulo de elasticidade de valor médio igual a 159GPa e um valor médio de tensão de rotura de 1573MPa (Barros et al., 2000a). Contudo, será de referir que segundo o fornecedor este material desenvolve uma tensão de rotura próxima dos 2000MPa (Rostásy, 1998).

2.4 Metodologia de ensaio

Os elementos de pilar foram ensaiados no sistema de reacção representado na fig. 4, tendo sido solicitados por carregamentos simétricos e alternados de três ciclos cada com amplitude de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40mm.

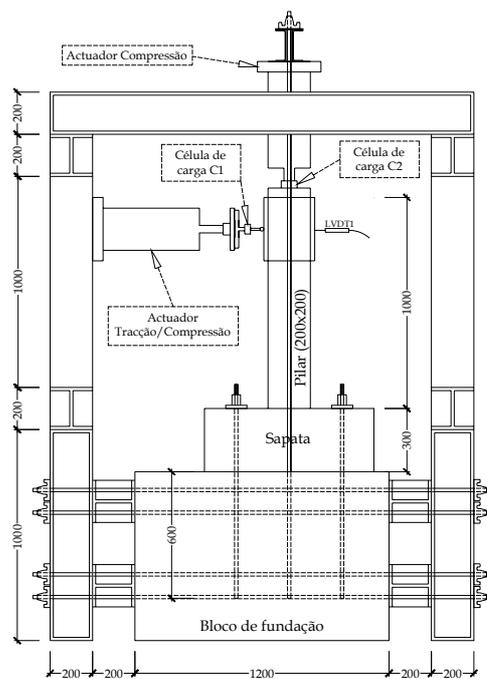


Fig. 4 – Sistema de ensaio.

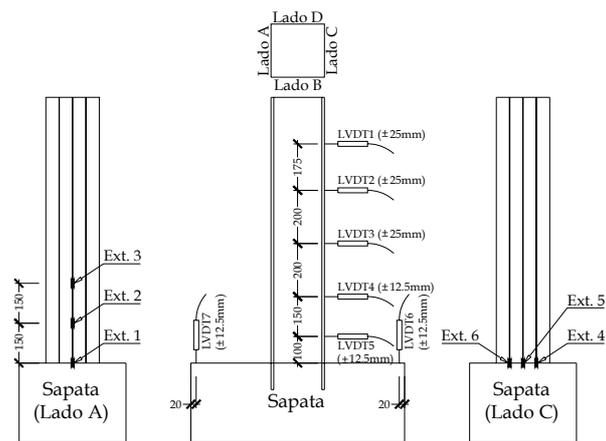


Fig. 5 – Transdutores de deslocamento e extensómetros aplicados.

A velocidade de deformação foi de 9mm por minuto, tendo o ensaio sido controlado pelo transdutor disposto no alinhamento do actuador horizontal (LVDT1 – ver fig. 5). A deformação do pilar foi avaliada por intermédio de transdutores de deslocamento, as extensões nos laminados foram registadas em extensómetros colados nas secções indicadas na fig. 5 e as forças aplicadas foram lidas em células de carga. Todos os pilares foram submetidos a uma força de compressão próxima de 150kN, introduzindo uma tensão de compressão no betão de 3.75MPa.

3. RESULTADOS

Para cada modelo obtiveram-se as relações força horizontal vs deslocamento correspondente, energia total vs deslocamento acumulado a partir da relação anterior, força horizontal vs extensão no laminado e força máxima nos três ciclos que constituem cada um dos carregamentos aplicados. A título ilustrativo, da fig. 6 à fig. 9 apresentam-se as referidas relações para o pilar P10b_CR.

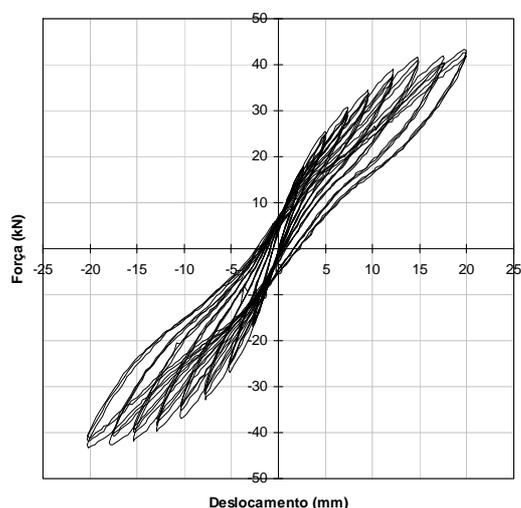


Fig. 6 – Relação força horizontal vs deslocamento correspondente para o pilar P10b_CR.

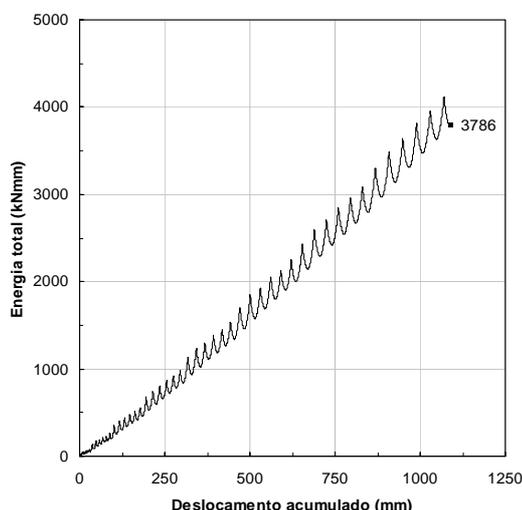


Fig. 7 – Relação energia total vs deslocamento acumulado da gráfico da fig. 8.

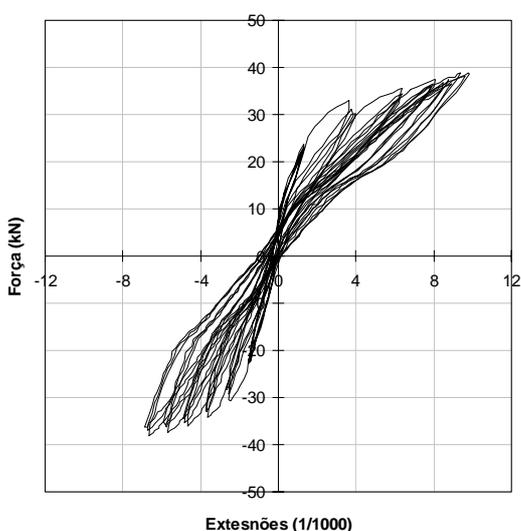


Fig. 8 – Relação força horizontal vs extensão no extensômetro 4 do P10b_CR.

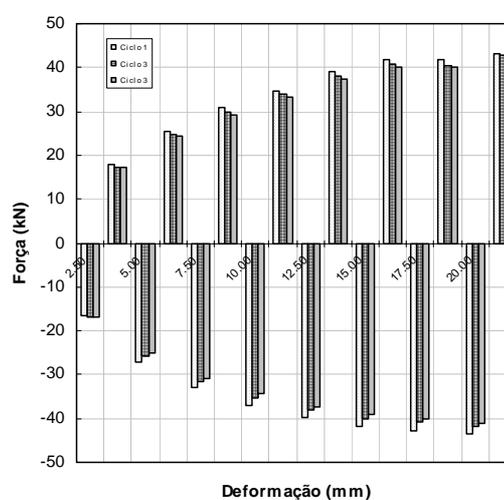


Fig. 9 – Força máxima registada para cada nível de deformação imposto para o P10b_CR.

Em trabalhos anteriores (Barros et al., 2001b; Ferreira, 2001) sobre a análise dos resultados obtidos tinha-se apontado as seguintes principais observações:

- a técnica de reforço desenvolvida permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga dos elementos de pilar (ver Quadro II);
- o aumento da capacidade de carga nos pilares pré-reforçados (“PR”) e pós-reforçados (“CR”) foi similar. Este aumento é mais significativo nos pilares com menor percentagem de armadura longitudinal;
- a aplicação do reforço conduziu a uma melhor distribuição da fendilhação, com maior número de fendas, mas de menor abertura (ver figuras 10 e 11 a título exemplificativo);
- a extensão nos laminados foi próxima da de rotura, nunca tendo ocorrido a delaminação dos

laminados. Em alguns ensaios os laminados alcançaram a sua extensão de rotura, revelando que esta técnica permite aproveitar toda a capacidade de reforço dos laminados.

- para que a técnica de reforço proposta seja efectiva, será necessário selar as fendas existentes nos elementos a reforçar. Os casos de insucesso registados na série P16 estão associados à não selagem das macro-fendas.

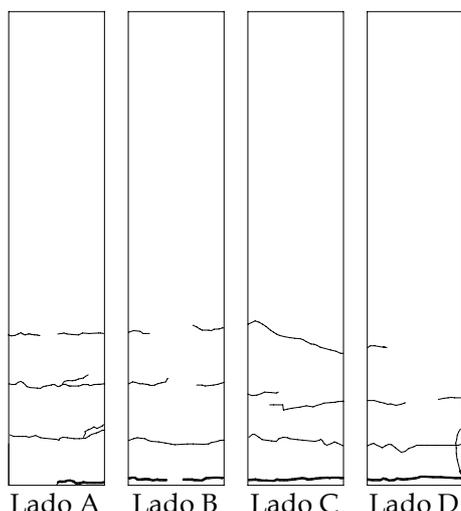


Fig. 10 – Padrão de fendilhação do elemento de pilar P10b_SR.

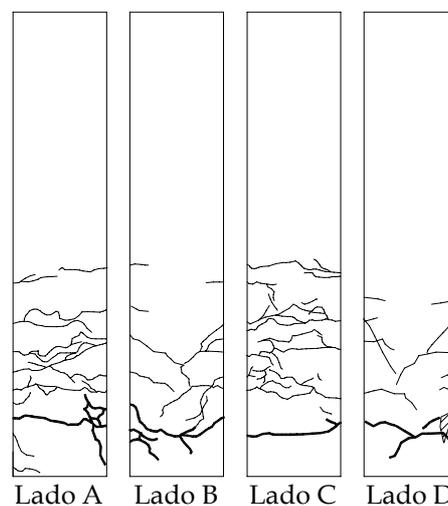


Fig. 11 – Padrão de fendilhação do elemento de pilar P10b_PR.

A partir dos diagramas força horizontal vs deslocamento corresponde foi possível ainda concluir que:

- se verificam os principais fenómenos que ocorrem neste tipo de elementos estruturais sujeitos a acções cíclicas, nomeadamente, degradação de resistência e rigidez, estreitamento do diagrama histerético, degradação da resistência para o mesmo nível de deformação;
- de um modo geral, os modelos apresentam um pronunciado estreitamento dos diagramas histeréticos, levando a concluir que se tratam de estruturas pouco dissipativas. Esta ocorrência está relacionada com o facto de ser elevado o factor que resulta da divisão entre a tensão de compressão axial (3.75MPa) e a resistência à compressão (13-20MPa);
- nos modelos reforçados com laminados de carbono (“CR” e “PR”) constatou-se que o fenómeno do estreitamento dos diagramas histeréticos é ainda mais acentuado, revelando que, como já tinha sido afirmado, esta técnica não foi concebida para aumentar a capacidade dissipativa do elemento, mas tão somente aumentar a capacidade de carga de elementos de pilar com rotura por flexão.

No Quadro II apresenta-se a variação da capacidade de carga máxima registada nos elementos reforçados com armadura longitudinal $4\phi 10$ e $4\phi 12$. Não são incluídos os resultados afectos à série reforçada com $4\phi 16$ dado terem ocorrido as anomalias já anteriormente apontadas. Da análise deste quadro constata-se o afirmado anteriormente, i.e., o incremento de capacidade de carga foi mais significativo nos pilares reforçados com menor percentagem de armadura longitudinal. Dentro da mesma série, o incremento de capacidade de carga está relacionado com a maior resistência do betão que constitui o pilar.

No Quadro III incluem-se os valores da energia dissipada nos ensaios efectuados nas séries P10 e P12. Verifica-se que a energia dissipada é maior nos pilares da série P10, i.e., nos pilares com menor percentagem de armadura longitudinal. O reduzido número de ensaios não permite concluir acerca do incremento de capacidade de dissipação de energia com a resistência à compressão do betão.

Quadro II – Força máxima obtida para cada ensaio

Pilar	Ciclo	d ⁻ (mm)	F ⁻ (kN)	ΔF (%)	Ciclo	d ⁺ (mm)	F ⁺ (kN)	ΔF (%)
P10a_SR	16	-14.64	-17.21		16	14.99	9.76	
P10a_CR	16	-15.23	-37.96	121	16	14.88	34.11	73
P10a_PR	19	-17.90	-37.14	–	19	17.03	38.54	–
P10b_SR	19	-16.63	-21.92		16	14.70	24.07	
P10b_CR	22	-20.15	-43.39	98	22	19.69	43.25	80
P10b_PR	13	-12.86	-38.77	–	16	14.37	38.19	–
P10c_SR	13	-10.97	-24.07	–	13	12.55	25.45	–
P12a_SR	22	-19.04	-26.49		16	14.98	30.52	
P12a_CR	22	-20.51	-34.44	30	22	19.69	37.03	21
P12a_PR	22	-20.35	-44.13	–	22	19.50	43.66	–
P12b_SR	13	-12.28	-29.31		16	14.53	32.27	
P12b_CR	22	-20.97	-45.54	55	22	19.18	41.58	29
P12b_PR	13	-13.01	-40.60	–	13	12.14	36.75	–
P12c_SR	19	-16.94	-28.41	–	19	17.80	31.62	–

Quadro III – Energia dissipada

Pilar	Deslocamento acumulado (mm)	Energia dissipada (kNmm)	Acréscimo de energia (%)
P10a_SR	1139	2013	
P10a_CR	1081	3457	71.7
P10a_PR	1081	3732	–
P10b_SR	1083	2627	
P10b_CR	1090	3786	44.1
P10b_PR	1082	3436	–
P10c_SR	1086	2905	–
P12a_SR	1078	2552	
P12a_CR	1089	3216	26.0
P12a_PR	1082	3436	–
P12b_SR	1077	3344	
P12b_CR	1094	3777	13.0
P12b_PR	1090	3560	–
P12c_SR	1087	2694	–

4. ENSAIOS DE FORÇA vs DESLIZAMENTO

Na sequência do projecto de investigação em causa está a decorrer uma campanha de ensaios experimentais com vista a caracterizar a ligação entre os laminados de fibras de carbono e o betão do elemento a reforçar. A ligação destes dos materiais é efectuada por intermédio do composto epóxico utilizado nos pilares ensaiados. Assim, tendo por base o ensaio-de-viga proposto pela RILEM (RILEM, 1982), procurou efectuar-se um ensaio que permitisse avaliar os dois seguintes pontos: i) o comprimento mínimo de fixação do laminado que mobiliza a resistência deste; ii) avaliar a relação tensão tangencial-deslizamento, para comprimentos de

considerável, a técnica de reforço que se propõe só é eficaz se essas fendas forem seladas. Verificou-se que a capacidade de dissipação de energia não teve um aumento considerável.

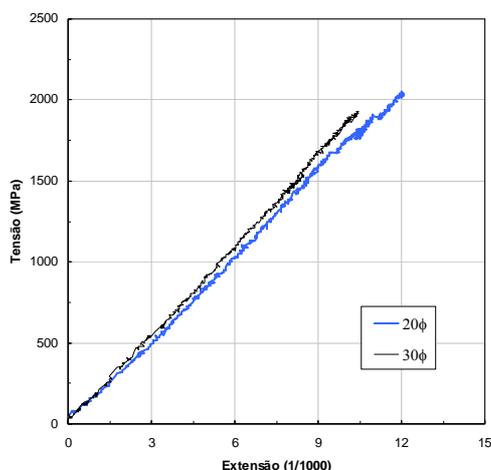


Fig. 14 – Relação tensão normal no laminado vs extensão.

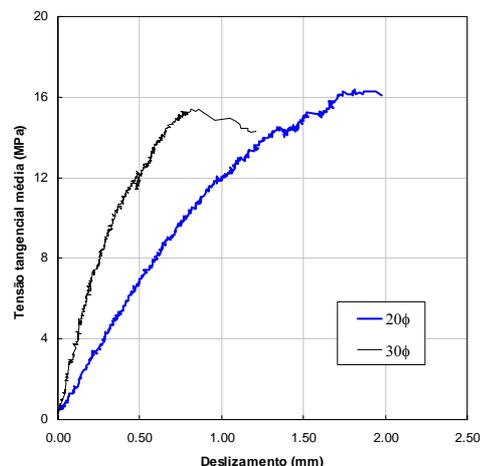


Fig. 15 – Relação tensão tangencial média vs deslizamento.

Os bons resultados obtidos com o sistema de reforço proposto incentivou a realização de uma campanha de ensaios que permitam determinar, numa primeira fase, o comprimento mínimo de selagem do laminado, e numa segunda fase, a relação tensão tangencial vs deslizamento, na zona de selagem do laminado. Os resultados obtidos até ao momento revelam ser necessário um comprimento inferior a 20 vezes o diâmetro equivalente do laminado para se mobilizar a resistência à tracção deste.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem a colaboração prestada pelas empresas: Biu Internacional (Eng^o Erik Ulrix); Nordesfer (Eng^o Mendes Marques), Ferseque (Eng^{os} Hélio Igrejas e Hugo Mota), Casais (Eng^{os} Emanuel Martins e António Carlos), Secil (Eng^a Raquel Figueira), Solusel (Eng^o Fernandes), VSL e UBI (Prof. João Paulo e Eng^o Jorge Andrade).

8. REFERÊNCIAS

- ACI, Committee 440, (1993), *State of the art report on application of FRP composites*. American Concrete Institute.
- Rostásy, F.S., (1998), *Assessment of the suitability of CRP plates from the S&P CRP system for use as adhesive-bonded reinforcement to strengthen concrete constructional elements and bases of assessment for their general approval by the construction supervisory authorities, expert opinion n^o 98/0322*, S&P Reinforcement, TU Braunschweig, 46 pp.
- Juvandes, L.F.P., (1999), *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”*, Tese de Doutoramento, FEUP.
- Barros, J.A.O. Ferreira, D.R.S.M., Lourenço, P.B., (2000a), *Pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono*, REPAR 2000, Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, LNEC, pp. 547-556, 14-17 Junho.
- Barros, J.A.O., Débora Ferreira, P.B. Lourenço, (2000b), *Comportamento de pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono*, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2000, Porto, pp. 393-402, 22-24 Novembro.
- Ferreira, Débora R.S.M. (2001), *Pilares de Betão Armado Reforçados com Laminados de Fibras de Carbono*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho.
- RILEM/CEB/FIP, (1982), *RC5 - Bond test for reinforcement steel. Beam test*, TC9-RC.