

Avaliação experimental da resposta cíclica uniaxial e biaxial de pilares de betão armado reforçados com CFRP

José Melo

Construct-Lese, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, josemelo@fe.up.pt

António Arêde

Construct-Lese, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, aarede@fe.up.pt

Humberto Varum

Construct-Lese, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, hvarum@fe.up.pt

Patrício Rocha

Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, Portugal, procha@estg.ipv.pt

RESUMO

Da observação de danos provocados por sismos recentes em estruturas existentes de betão armado é verificado que os pilares são dos elementos que mais danos sofrem e que pode levar ao colapso da estrutura. A necessidade de reparação e/ou reforço de pilares de betão armado em estruturas existentes localizadas em zonas de elevada perigosidade sísmica é muitas vezes necessário. Existem várias técnicas de reparação e reforço de pilares que visam o aumento da capacidade e/ou ductilidade para solicitações laterais cíclicas. Neste trabalho estudou-se a eficiência do encamisamento com CFRP de pilares sujeitos a solicitações uniaxiais e biaxiais. O encamisamento estudado com CFRP tem a particularidade de a manta de carbono estar localizada junto da armadura, ou seja, por baixo da camada de recobrimento.

O artigo apresenta os resultados experimentais de seis pilares de betão armado que foram ensaiados com dois tipos de carga (uniaxial ou biaxial). Para cada tipo de carga ensaiou-se um pilar de controlo, um pilar reforçado com encamisamento de CFRP e um pilar reparado e reforçado (pilar de controlo após ensaio) com encamisamento de CFRP. O reforço é efetuado através de cintagem do pilar com tiras de manta de carbono localizadas por baixo do recobrimento, sendo o recobrimento reposto com reboco estrutural. A reparação dos pilares de controlo foi realizada com remoção do betão danificado e as armaduras longitudinais encurvadas foram cortadas e emendadas através de processo de soldadura. De seguida betonou-se a zona da rótula plástica do pilar com betão auto-compactável. Os resultados obtidos são comparados de forma a evidenciar a eficiência das técnicas de reforço e reparação utilizadas em pilares ensaiados uniaxialmente e biaxialmente com esforço axial constante.

PALAVRAS-CHAVE:

Pilares de betão armado; Reparação e reforço; Ensaio cíclicos uniaxiais e biaxiais

1 INTRODUÇÃO

Danos provocados por sismos em estruturas de betão armado (BA) têm demonstrado que os pilares são elementos que frequentemente condicionam o comportamento global da estrutura. Os pilares podem ser considerados elementos potencialmente vulneráveis quando existem irregularidades estruturais em altura ou planta ou quando o mecanismo pilar forte-viga fraca não está assegurado. O comportamento cíclico dos pilares pode ser melhorado através do seu reforço. Existem várias técnicas de reforço validadas na literatura como o encamisamento com betão armado, chapas metálicas ou mantas de compósitos, que visam aumentar o confinamento do betão e/ou a capacidade ao corte e/ou flexão. Nos últimos anos, mantas de CFRP têm sido vastamente usadas para o encamisamento de pilares de BA com a intenção principal de aumentar a sua capacidade de deformação (ductilidade) e promover também a sua capacidade em flexão e em corte. Vários estudos têm sido desenvolvidos para avaliar o comportamento cíclico de pilares de BA encamisados com CFRP sujeitos a carga lateral uniaxial [1, 2] ou outros elementos como nós viga-pilar [3, 4]. O encamisamento com mantas de CFRP não acarreta aumento das dimensões dos elementos, mas tem um mau comportamento em caso de altas temperaturas desenvolvidas em caso de incêndio. A técnica de encamisar junto da armadura longitudinal visa o melhoramento da sua eficácia em impedir a encurvadura dos varões longitudinais e aumento da resistência em compressão do betão, mas também numa possível proteção das mantas de CFRP a altas temperaturas conferida pela camada de recobrimento com argamassa de reparação.

2 CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 Características geométricas dos pilares e propriedades dos materiais

Os provetes são representativos de pilares de estruturas de betão armado com armadura nervurada e sem dimensionamento sísmico. Os pilares têm uma secção de 30x30cm², recobrimento de 2,5cm e são armados com 8 varões de 12mm na longitudinal e estribos de 6mm espaçados a 20cm e com ganchos de ancoragem a 90°. Os pilares têm um bloco de fundação rígido com dimensões 44x44x50cm³ que fica encastrado numa caixa metálica durante o ensaio e apesar de terem um comprimento de 1,70m, a carga lateral é aplicada à cota de 1,50m. A Figura 1 apresenta as dimensões e detalhes da armadura.

O betão utilizado na produção dos pilares tem uma resistência média à compressão f_{cm} de 18.8MPa (provetes cilíndricos Ø150x300mm). A armadura longitudinal tem uma tensão de cedência média f_{ym} de 410MPa e uma tensão de rotura f_{um} de 534MPa. A armadura transversal é da classe A400NR.

O microbetão de reparação utilizado para restituir o núcleo da zona previamente saneada do pilar consiste numa mistura de argamassa de reparação estrutural, MasterEmaco S 5450 PG, com uma gravilha 4-16 mm, numa dosagem de 7.5 kg de gravilha por cada saco de 25 kg de argamassa. A resistência média à compressão, obtida por três provetes cilíndricos de microbetão, foi de 70,5MPa e um módulo de elasticidade obtido foi de 30,8GPa. No processo de reforço, foi usada argamassa de reparação, *Master Emaco S488*, para restituir o recobrimento. A resistência anunciada pelo fabricante após dois dias de cura é de 55 MPa.

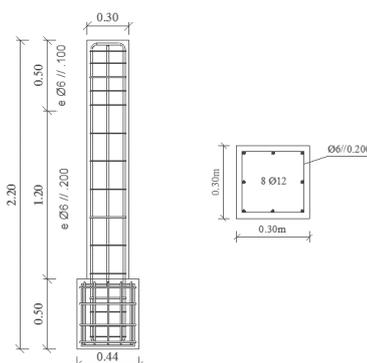


Figura 1. Dimensões e pormenores da armadura dos pilares (dimensões em metros).

A Tabela 1 resume a campanha de ensaios composta por 6 ensaios, sendo 3 com carregamento lateral uniaxial e 3 com biaxial. Para cada tipo de carregamento foi ensaiado um pilar de referência (original), um pilar reforçado com manta de CFRP e outro (pilar de referência após ensaio) reparado e reforçado.

Tabela 1. Resumo dos pilares ensaiados.

Pilar	Descrição	Carregamento lateral
PD01-N01	Original	
PD01-N04-S	Original - reforçado	Uniaxial
PD01-N01-RS	Reparado e reforçado	
PD12-N03	Original	
PD12-N05-S	Original - reforçado	Biaxial
PD12-N03-RS	Reparado e reforçado	

Segundo o fabricante, as mantas de carbono usadas no encamisamento têm uma resistência característica à tração de 4300MPa, extensão de rutura de 1,8%, módulo de elasticidade de 340GPa e espessura de 0.131mm.

2.2 Reparação e reforço dos pilares

O processo de reparação centrou-se na zona da rótula plástica (junto à fundação) e foram efetuadas as seguintes operações: i) remoção do betão danificado (com mínimo de 50cm a partir da base); ii) corte das armaduras longitudinais plastificadas e encurvadas e substituição por novos varões da classe A400NR por um processo de soldadura; iii) colocação da cofragem junto às armaduras e betonagem com microbetão. Nos dois pilares reparados, a armadura longitudinal plastificada e encurvada foi substituída de acordo com [5].

O reforço com encamisamento de mantas de CFRP passou por: i) arredondar os vértices dos pilares com um raio de 25mm; ii) lixar e limpar a superfície; iii) colagem das mantas de CFRP com resina epóxi e aplicação de areia (granulometria média) por cima da resina fresca após aplicação das mantas para aumentar a aderência com a argamassa de reparação; iv) aplicação de argamassa de reparação. As tiras de CFRP foram colocadas estrategicamente a meio do espaçamento entre estribos, zona onde normalmente ocorre o fenómeno de encurvadura, estando assim a armadura restrita tanto pelos estribos como também pelo CFRP numa extensão de 50cm a partir da base do pilar (zona previsível da formação da rótula plástica). Assim, o encamisamento foi realizado em 3 níveis: a) junto à base do pilar (nível 1) foram aplicadas 3 camadas de manta de CFRP com uma largura de 17cm; b) o segundo nível ficou espaçado de 12cm do primeiro nível e foi formado por 2 camadas de CFRP com uma largura de 8cm; c) o terceiro nível ficou distanciada de 8cm do segundo nível e consistiu numa única camada de CFRP com 5cm de largura. A Figura 2 apresenta de forma resumida as etapas do processo de reparação e reforço dos pilares.

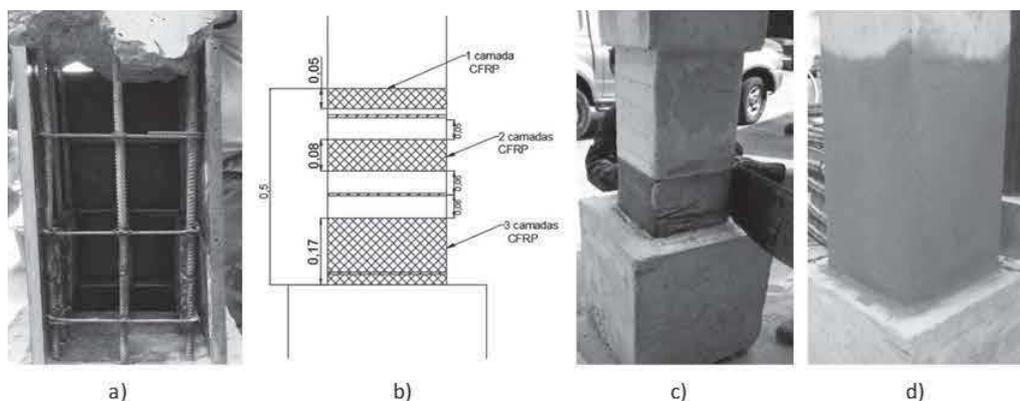


Figura 2. Processo de reparação e reforço: a) emenda de varões e cofragem para microbetão; b) detalhes do encamisamento com CFRP; c) execução do encamisamento; d) aplicação de argamassa de reparação.

O fator de confinamento do encamisamento com CFRP foi calculado de acordo a norma Italiana CNR-DT200/2004 [6] e o Eurocódigo 8-3 [7]. Apesar da norma Italiana possibilitar o dimensionamento do encamisamento por faixas e uma vez que o Eurocódigo 8-3 apenas contempla encamisamento contínuo, calculou-se uma espessura equivalente para os 50cm de altura do pilar e considerou-se essa espessura equivalente para os dois métodos de encamisamento contínuo. Assim, é possível comparar diretamente o coeficiente de confinamento de 1,27 determinado segundo a norma Italiana com o valor de 1,33 obtido pelo Eurocódigo 8-3. Ambos os valores são semelhantes e aumentam a capacidade em compressão do betão em cerca de 30%.

2.3 Setup de ensaio e leis de carga

O setup utilizado na campanha experimental pode ser observado esquematicamente na Figura 3-a. Consiste em dois atuadores horizontais que aplicam cargas laterais (um com +/- 500kN e +/- 150mm de curso na direção X e outro com +/- 200kN e +/- 100mm de curso na direção Y), assim como um atuador vertical com 750kN de capacidade para aplicação do esforço axial. Os atuadores horizontais fazem reação em sistemas rígidos e o atuador vertical faz reação num pórtico metálico. A aplicação das cargas laterais localiza-se à cota de 1,50m a partir da base do pilar. No topo do pilar existe um sistema de placas metálicas que deslizam entre si e permitem que o atuador vertical permaneça na mesma posição durante o ensaio. Existem dois células de carga (uma em cada direção) ligadas à chapa superior para medir as forças de atrito existentes entre as placas que posteriormente são descontadas nas leituras das células de carga dos respetivos atuadores. Com este sistema de aplicação de carga axial, uma vez que o atuador vertical está sempre centrado com a base do pilar, não são considerados efeitos de segunda ordem. A mesma plataforma de ensaio é usada para ensaios uniaxiais e biaxiais, diferindo apenas no número de atuadores laterais ligados ao pilar. A base do pilar é encastrada dentro de uma caixa metálica rígida. As leis de deslocamento lateral (Figura 3-b,c) correspondem às já adotadas por [8] para ensaios uniaxiais e biaxiais com órbita em losango.

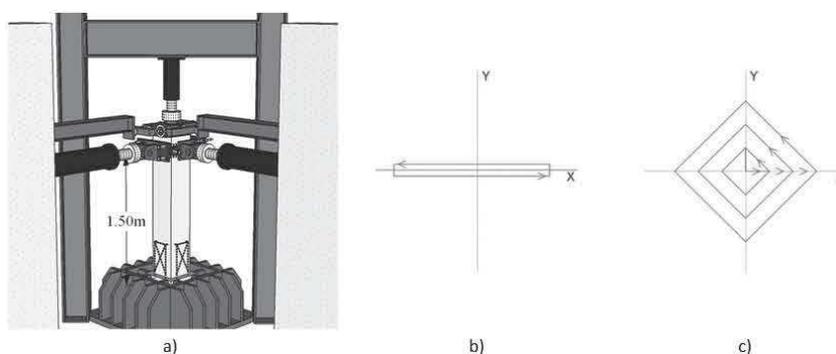


Figura 3. a) setup de ensaio de pilares com carregamento biaxial e esforço axial; b) lei de deslocamentos uniaxial; e c) lei de deslocamentos biaxial (losango) [8].

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Relação força-deslocamento

A relação força-deslocamento uniaxial obtida para o pilar original (PD01-N01) é comparada com os resultados do pilar reforçado (PD01-N04-S) e com os do pilar reparado e reforçado (PD01-N01-RS) na Figura 4. Da análise dos resultados verifica-se que o encamisamento, como expectável, não aumenta a capacidade em flexão, mas aumenta significativamente a capacidade de deformação (ductilidade).

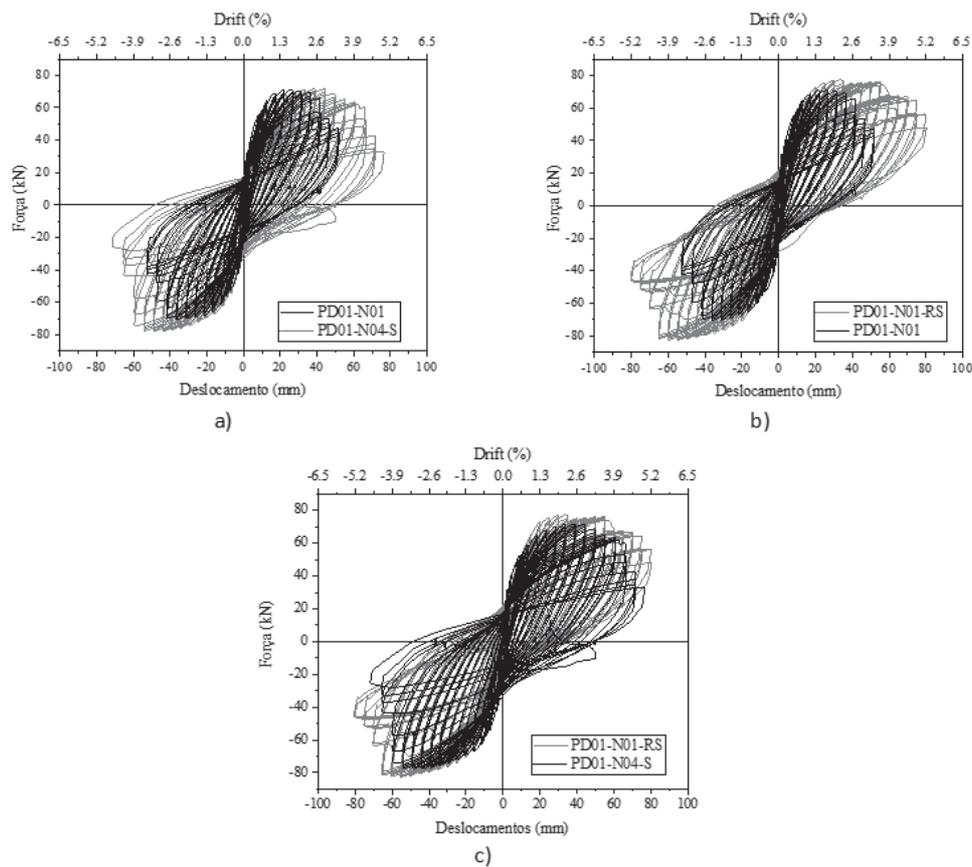


Figura 4. Resultados dos ensaios uniaxiais: a) original Vs reforçado; b) original Vs reparado e reforçado; e c) reforçado Vs reparado e reforçado.

A Figura 5 exibe a relação força-deslocamento obtida nos ensaios biaxiais de forma independente para cada direção (direção X e Y). É feita a comparação entre os resultados obtidos para o pilar original e os pilares reforçado e reparado e reforçado. Também nos ensaios biaxiais é notório o aumento da capacidade de deformação dos pilares reforçados e a técnica de reparação utilizada permitiu repor a capacidade original de flexão. A Tabela 2 faz o resumo dos principais resultados obtidos para todos os ensaios, nomeadamente: força máxima $F_{m\acute{a}x}$ (média dos máximos no sentido positivo e negativo), força e deslocamento de cedência (F_y e Δ_y), deslocamento correspondente ao ponto último Δ_u (descolamento correspondente à redução de 20% da força máxima), ductilidade em deslocamento μ_Δ e variação da ductilidade em deslocamento em relação ao pilar de referência $\Delta\mu_\Delta$. A força e deslocamento de cedência foram determinados de acordo com o método presente em [9].

Pela Tabela 2 constata-se que o aumento da ductilidade dos pilares reforçados é mais acentuado nos pilares ensaiados biaxialmente. Assim, o efeito do encamisamento é mais efetivo para pilares sujeitos a cargas laterais nas duas direções, podendo chegar a um aumento de 57%. No caso dos ensaios uniaxiais, o aumento da ductilidade foi no máximo de 29%.

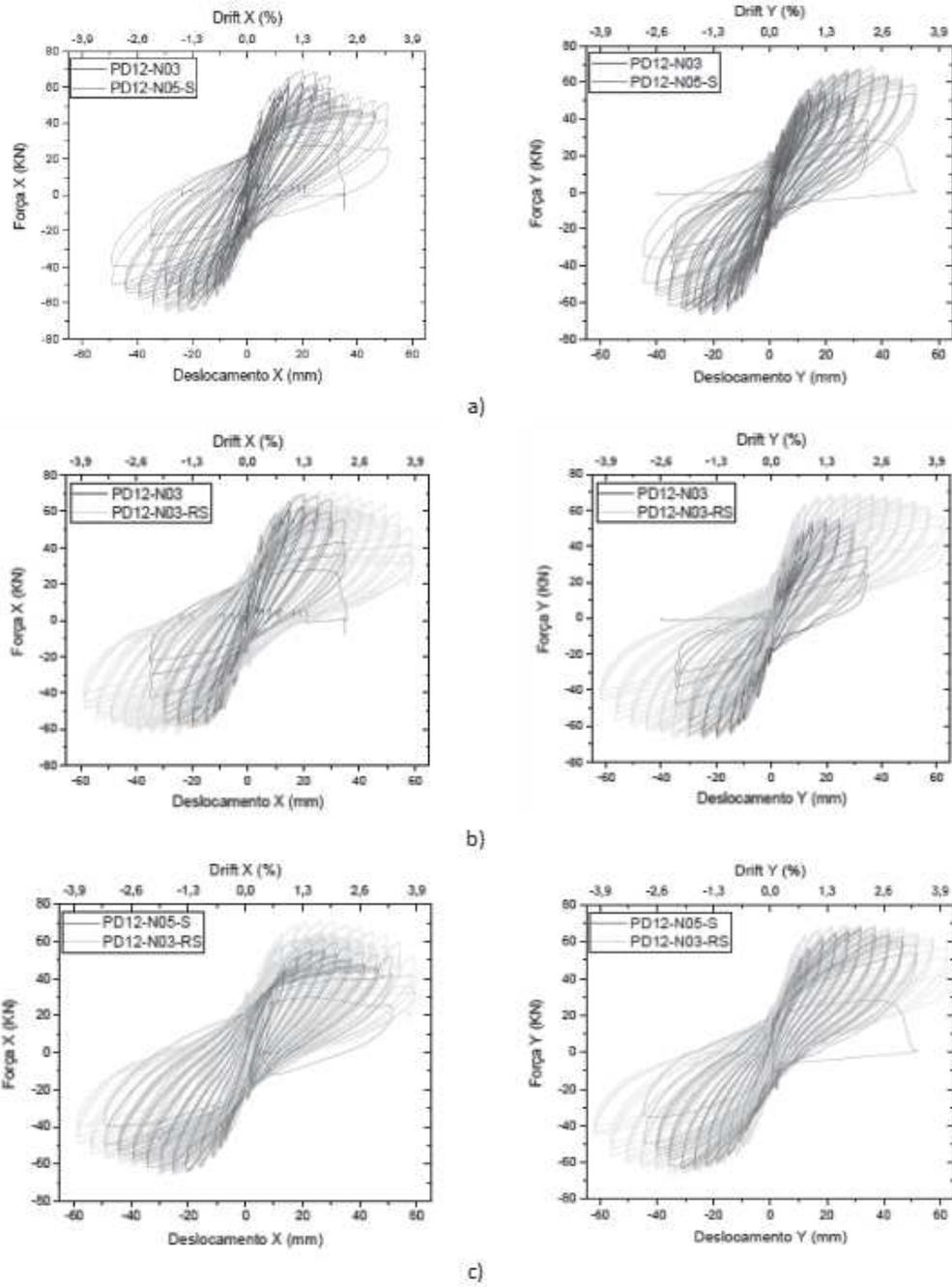


Figura 5. Resultados dos ensaios biaxiais: a) original Vs reforçado; b) original Vs reparado e reforçado; e c) reforçado Vs reparado e reforçado.

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios.

Pilar	Direção	$F_{m\acute{a}x}$ [kN]	F_y [kN]	Δ_y [mm]	Δ_u [mm]	μ_Δ	$\Delta\mu_\Delta$
PD01-N01	X	70,7	54,6	7,9	46,6	6,0	-
PD01-N04-S	X	74,8	55,9	9,7	63,4	6,5	+9,6
PD01-N01-RS	X	80,3	53,0	8,9	68,7	7,7	+29,3
PD12-N03	X	64,3	46,5	7,6	33,7	4,4	-
	Y	61,1	49,8	7,2	32,4	4,5	-
PD12-N05-S	X	60,9	38,2	9,0	51,7	5,7	+29,7
	Y	65,7	44,4	8,2	51,3	5,8	+28,0
PD12-N03-RS	X	65,9	49,5	8,2	56,4	6,9	+55,6
	Y	67,9	56,3	8,4	59,7	7,1	+57,1

Em termos de energia dissipada, os pilares reforçados dissipam mais do dobro de energia até ao final do ensaio do que o pilar de controlo PD01-N01. O pilar PD01-N01-RS ainda dissipou mais cerca de 20% que o pilar PD01-N04-S. Nos ensaios biaxiais, considerando a soma das energias dissipadas nas duas direções, o pilar PD12-N03-RS dissipou mais 160% que o pilar PD12-N05-S e mais 622% que o pilar PD12-N03. A maior capacidade de dissipação de energia dos pilares reparados e reforçados reflete a sua maior ductilidade e resistência.

3.2 Danos observados

A solicitação biaxial resulta num dano de maior magnitude na base do pilar para o mesmo nível de deslocamento, em comparação com uma solicitação uniaxial. O dano observado no pilar PD01-N01-RS é menor quando comparado com os outros ensaios uniaxiais, pois além da contribuição do CFRP, a elevada resistência do betão de reparação (3,5 vezes superior ao betão original) aumenta a capacidade na zona reparada e conseqüentemente uma maior distribuição dos danos. As mantas de carbono entraram em rutura no caso dos pilares reforçados (PD01-N04-S e PD12-N05-S) indiciando que possivelmente seria necessária uma maior quantidade de CRFP para estes pilares. No caso dos pilares reparados e reforçados, não foi observada rutura completa das mantas devido à elevada resistência à compressão do microbetão de reparação. Nos ensaios biaxiais, exceto no pilar PD12-N03-RS, foi observado esmagamento do betão na zona da rótula plástica. A Figura 6 apresenta o dano observado no final de cada ensaio.

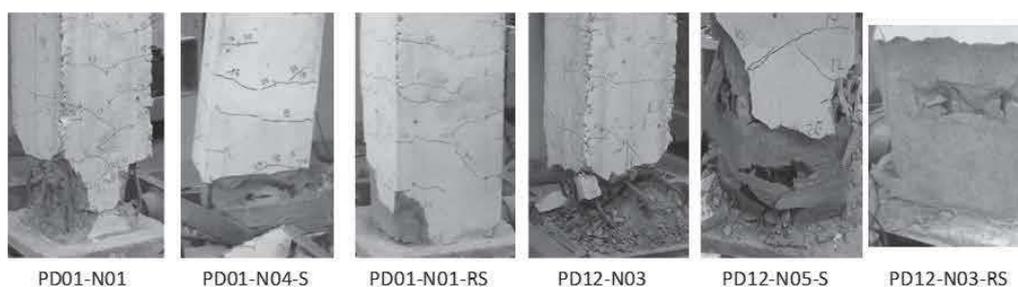


Figura 6. Dano observado no final de cada ensaio.

4 CONCLUSÕES

A campanha de ensaios realizada demonstra a elevada eficiência do encamisamento de pilares de betão armado com mantas de CFRP no aumento da ductilidade dos pilares quando carregados axialmente ou biaxialmente. As principais conclusões alcançadas com este estudo podem ser sumarizadas da seguinte forma:

- A técnica de reparação utilizada mostrou-se viável, uma vez que os pilares reparados e reforçados tiveram um comportamento cíclico semelhante ou melhor que os pilares apenas reforçados;
- O encamisamento com CFRP junto das armaduras foi eficiente para melhorar a capacidade de deformação dos pilares, especialmente no caso dos pilares ensaiados biaxialmente, onde o aumento de ductilidade chegou aos 57% comparativamente com o pilar de referência;
- O carregamento biaxial acelera a degradação de resistência e diminui a resistência máxima em flexão do pilar;
- A alta resistência do microbetão de reparação evitou a rutura das mantas de carbono que foi observada nos pilares apenas reforçados;
- Os pilares reparados e reforçados demonstraram uma maior capacidade de dissipar energia que os pilares apenas reforçados.

A técnica de encamisar os pilares de betão armado junto das armaduras longitudinais, poderá ter vantagens na proteção do reforço numa eventual situação de incêndio, pelo que ainda falta estudar o possível efeito de elevadas temperaturas em pilares encamisados com a técnica aqui apresentada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). O primeiro autor é financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através de bolsa de pós-doutoramento com referência SFRH/BPD/115352/2016. Agradece-se ao mestre Pedro Jardim Pereira pelos trabalhos desenvolvidos neste tópico no âmbito da sua dissertação de mestrado. Agrade-se também aos colaboradores do LESE - Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da FEUP.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Rocha, "Reforço e reparação de pilares de edifícios de betão armado em zonas sísmicas," Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [2] C. Pantelides and D. Moran, "Design of FRP jackets for plastic hinge confinement of RC columns," *Journal of composites for construction* vol. 17, pp. 433-442, 2013.
- [3] E. Esmaeeli, J. A. O. Barros, J. Sena-Cruz, L. Fasan, F. R. Li Prizzi, J. Melo, et al., "Retrofitting of interior RC beam-column joints using CFRP strengthened SHCC: Cast-in-place solution," *Composite Structures*, vol. 122, pp. 456-467, 2015/04/01/ 2015.
- [4] D. A. Pohoryles, J. Melo, T. Rossetto, D. D'Ayala, and H. Varum, "Experimental Comparison of Novel CFRP Retrofit Schemes for Realistic Full-Scale RC Beam-Column Joints," *Journal of Composites for Construction*, vol. 22, p. 04018027, 2018.
- [5] H. Rodrigues, A. Furtado, A. Arêde, N. Vila-Pouca, and H. Varum, "Experimental study of repaired RC columns subjected to uniaxial and biaxial horizontal loading and variable axial load with longitudinal reinforcement welded steel bars solutions," *Engineering Structures*, vol. 155, pp. 371-386, 2018/01/15/ 2018.
- [6] N. R. Council, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures—Materials, RC and PC structures, masonry structures. DT 200.R1/2013," ed. Rome: CNR, 2013.
- [7] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Strengthening and repair of buildings, B. European Committee for Standardization, Belgium, 2005.
- [8] H. Rodrigues, A. Arêde, A. Furtado, and P. Rocha, "Seismic behavior of strengthened RC columns under biaxial loading: An experimental characterization," *Construction and Building Materials*, vol. 95, pp. 393-405, 2015/10/01/ 2015.
- [9] H. Rodrigues, A. Arêde, H. Varum, and A. G. Costa, "Experimental evaluation of rectangular reinforced concrete column behaviour under biaxial cyclic loading," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 42, pp. 239-259, 2013.