

Resposta biaxial de pilares de betão armado com armadura lisa

J. Melo¹

H. Varum²

A. Arêde³

T. Rossetto⁴

RESUMO

Uma parte significativa do parque edificado de betão armado em Portugal e na Europa foi construída antes dos anos 70. Um grande número desses edifícios foi dimensionado apenas para cargas gravíticas e sem considerar os deslocamentos horizontais impostos pela ação sísmica. Por outro lado, até aos anos 70, a armadura tinha superfície lisa e consequentemente o fenómeno do escorregamento da mesma é acelerado para cargas cíclicas. Assim, o uso de armadura lisa pode tornar os elementos principais da estrutura mais vulneráveis às ações horizontais devido ao fenómeno do escorregamento dos varões de aço.

Foi idealizada e desenvolvida uma campanha experimental com cinco pilares de betão armado, um com armadura nervurada e quatro iguais com armadura lisa. Todos os pilares foram betonados em simultâneo e com o mesmo betão. Após 6 meses de cura, estes pilares foram submetidos a deslocamentos horizontais cíclicos uniaxiais ou biaxiais com esforço axial constante. Os pilares têm um bloco de fundação que é totalmente fixo e as cargas horizontais e vertical são aplicadas a meia altura do pilar. Os resultados experimentais demonstram que a ação biaxial acelera a degradação de resistência, diminui a capacidade de deformação e de dissipação de energia. O efeito do escorregamento da armadura lisa é também evidenciado por comparação direta com os resultados obtidos para o pilar de controlo com armadura nervurada.

Palavras-chave: Pilares de betão armado; Armadura lisa; Ensaios experimentais; Carregamento biaxial

1. INTRODUÇÃO

Os eventos sísmicos impõem cargas laterais em várias direções nos membros estruturais verticais das estruturas, como pilares e paredes. No entanto, as atuais metodologias para avaliação de estruturas existentes baseadas em deslocamentos adotam limites de deformação que foram obtidos através da análise dos resultados de ensaios cíclicos uniaxiais que podem não representar adequadamente a faixa de resposta dos pilares com diferentes pormenorizações quando sujeitos a carregamento sísmico.

A literatura ainda tem défice de estudos experimentais sobre a resposta cíclica biaxial de pilares de betão armado (BA), particularmente para pilares com armadura lisa, que foi amplamente usada até aos anos setenta. Um dos primeiros estudos experimentais sobre o comportamento biaxial de pilares foi desenvolvido por Low e Moehle [1] em 1987. Bousias et al. [2] também considerou o efeito do esforço axial ter um valor constante ou variável na resposta cíclica biaxial de pilares de BA. Nos últimos anos

¹ CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. josemelo@fe.up.pt

² CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. hvarum@fe.up.pt

³ CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. aarede@fe.up.pt

⁴ University College London, Londres, Reino Unido. t.rossetto@ucl.ac.uk

outros autores [3-5] também investigaram o comportamento cíclico de pilares de BA com carregamento nas duas direções horizontais em simultâneo e que demonstram a relevância de considerar-se a flexão composta desviada em pilares de BA. Além disso, as estruturas existentes de betão armado com armadura lisa apresentam muitas vezes falta de ductilidade devido ao escorregamento dos varões pois a aderência aço-betão é baixa [6-8].

As estruturas de edifícios que foram dimensionadas de acordo com códigos antigos, podem ter danos severos aquando da ocorrência de um sismo. Estes danos podem ter várias causas como: consideração de uma ação sísmica menor que a atualmente considerada; uso de armadura lisa; falta de pormenorização para cargas sísmicas; dimensionamento apenas para cargas verticais; empalme dos varões nas regiões críticas; comprimento de amarração insuficiente dos varões longitudinais; betão com baixa resistência; e falta de confinamento do betão. As cargas cíclicas induzem degradação da aderência entre o aço e o betão e conseqüentemente o escorregamento dos varões pode ocorrer. Assim, a capacidade máxima resistente pode não ser atingida e as deformações dos elementos podem aumentar levando a colapso parcial ou total da estrutura. Alguns estudos [9, 10] indicam que o fenómeno do escorregamento das armaduras tem um impacto significativo na rotação das extremidades dos elementos representando até cerca de 80%-90% da deformação total de pilares construídos com armadura lisa.

Este artigo apresenta os resultados experimentais de cinco pilares de betão armado, representativos de estruturas existentes sem pormenorização para cargas sísmicas, construídos à escala real. Quatro pilares foram realizados com armadura lisa e um com armadura nervurada. Os ensaios foram conduzidos com esforço axial constante e diferentes leis de carga uniaxial e biaxial. Todos os pilares têm seção quadrada 30cmx30cm e altura de 1.5m (meia altura do pilar). As relações força-drift, evolução da energia dissipada e danos finais são mostrados e comparados para evidenciar a influencia do uso da armadura lisa e do carregamento biaxial.

2. DETALHES DOS PILARES, MATERIAIS E PLATAFORMA DE ENSAIO

2.1 Características dos pilares e propriedades dos materiais

Os cinco pilares foram construídos em simultâneo com a mesma seção transversal e a mesma quantidade de armadura. Foram dimensionados de acordo com o regulamento antigo REBA de 1967 [11] sem qualquer pormenorização sísmico. A geometria e a pormenorização da armadura lisa dos pilares são apresentadas na Figura 1. A ancoragem da armadura longitudinal do pilar com armadura nervurada usa dobras de 90° em vez de 180° como nos pilares com armadura lisa (única diferença entre os pilares com armadura lisa e o pilar com nervurada). Cada provete representa metade da altura de um pilar com 3.0m de altura, ao nível da fundação, de uma estrutura com 3 ou 4 pisos. Apesar de o provete ter uma altura de 1.65m (ver Figura 1), o ponto de aplicação das cargas laterais localiza-se à cota de 1.5m a partir do topo da fundação. A seção quadrada dos pilares tem a dimensão de 30cmx30cm e o bloco rígido de fundação tem a dimensão de 44cmx44cmx50cm. A armadura longitudinal dos pilares é constituída por 8 varões com diâmetro de 12mm e estribos com diâmetro de 8mm espaçados de 20cm com ganchos de ancoragem de 90°. A espessura do recobrimento adotado de 25mm e todos os pilares foram betonados numa só fase e testados após 28 dias de cura.

O Quadro 1 sumariza os valores médios das propriedades mecânicas do betão e do aço usados na construção dos pilares bem como a designação de cada pilar e corresponde tipo de aço (liso ou nervurado) e lei de carga lateral implementada (uniaxial monotónica ou cíclica e biaxial circular ou elíptica). A resistência em compressão do betão, f_{cm} , foi determinada em provetes cilíndricos (Ø150mmx300mm) de acordo com a norma NP EN 206-1 [12]. A tensão média de cedência do aço é designada por f_{ym} , a tensão última por f_{um} e o módulo de elasticidade por E . A tensão de cedência da armadura nervurada é 15% superior à da armadura lisa e a resistência em compressão do betão é de 27MPa para todos os pilares. A nomenclatura adotada para identificar cada pilar é: P – superfície lisa (plain); D – superfície nervurada (deformed); UM – carregamento uniaxial monotónico; UC - carregamento uniaxial cíclico; BC – carregamento biaxial circular; e BE – carregamento biaxial elíptico.

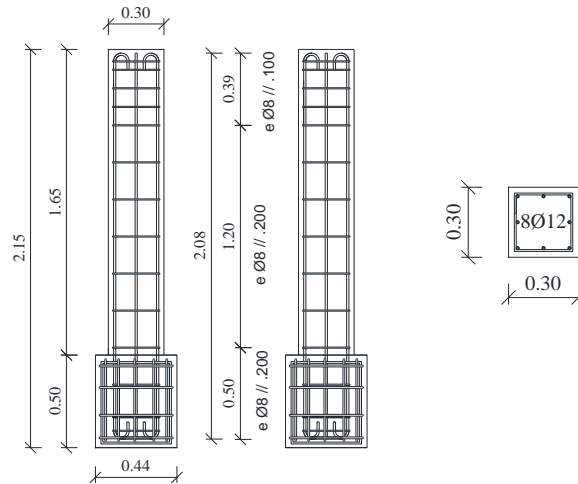


Figura 1. Dimensões e pormenorização das armaduras nos pilares com armadura lisa.

Quadro 1. Nomenclatura adotada, propriedades mecânicas dos materiais e tipo de carregamento.

Pilar	Betão		Aço				Superfície	Carga Lateral	
	f_{cm} [MPa]	f_{ym} [MPa]	Ø8mm f_{um} [MPa]	E [GPa]	Ø12mm f_{ym} [MPa]	f_{um} [MPa]			E [GPa]
PUM	27	410	495	198	405	470	199	Lisa	
PUC									
PBC									
PBE									
DBC		470	605	198	465	585	199	Nervurada	Bi. circular

2.2 Características da plataforma de ensaio

Os ensaios foram realizados numa plataforma existente no laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto que permite a aplicação em simultâneo de duas cargas ortogonais horizontais e uma vertical com valor constante ou variável) em pilares de betão armado (Figura 2). O esforço axial é controlado em força e a carga lateral é controlada em deslocamentos. O esforço axial constante adotado foi de 300kN (esforço axial reduzido de $\nu=12.3\%$). A lei de deslocamentos laterais (d_c), imposta à cota de 1.5m do pilar, repete cada amplitude de ciclo três vezes. Os níveis de deslocamentos impostos correspondem aos picos de 3, 5, 10, 4, 12, 15, 7, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 e 80 (em mm) e têm a forma apresentada na Figura 3 (uniaxial, biaxial circular e biaxial elíptica). No caso da lei de carga elíptica, os picos do eixo maior correspondem aos valores acima mencionados e os valores correspondentes no eixo menor são metade desses valores. Nesta plataforma de ensaios o atuador vertical é fixo e não se move, por isso a aplicação do carregamento axial está sempre alinhado com o centro da base do pilar e, conseqüentemente os efeitos de segunda ordem são desprezados. No topo do pilar existem duas chapas rígidas revestidas com materiais de baixo atrito, sendo uma solidária com o topo do pilar e outra solidária com o atuador vertical. As reações horizontais que se formam no atuador vertical correspondem ao atrito entre as duas chapas e são medidas durante o ensaio nas duas direções de aplicação da carga e descontadas no valor da força lida nos atuadores horizontais. A rotação do bloco de fundação também é medida durante o ensaio para posterior correção dos deslocamentos aplicados no topo do pilar.

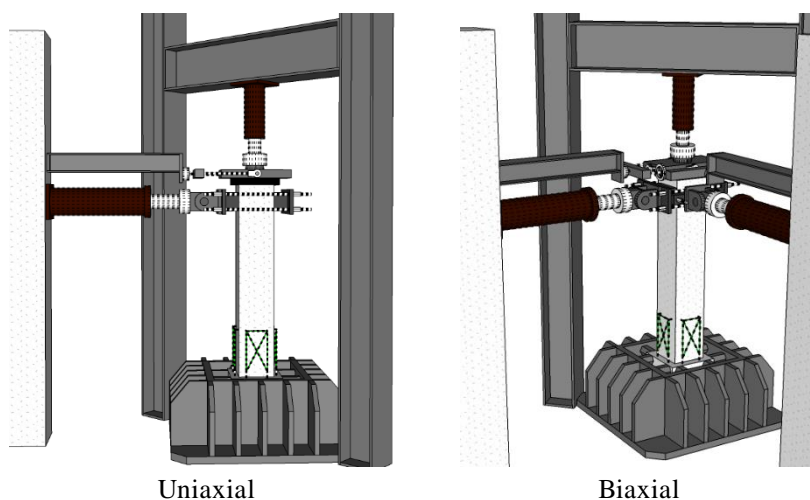


Figura 2. Plataforma de ensaios.

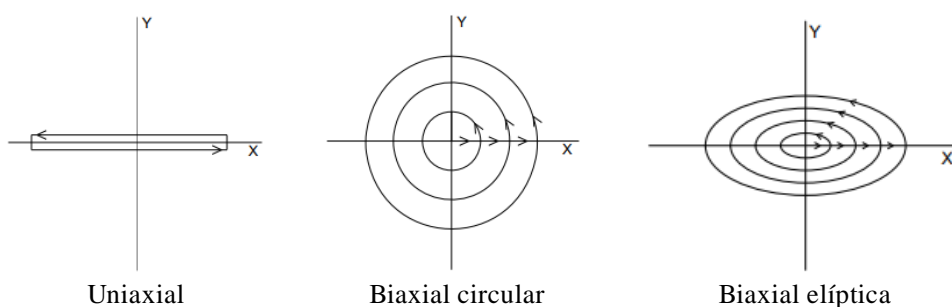


Figura 3. Leis de deslocamento lateral adotadas.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Relação força-drift

A relação força-drift obtida em cada ensaio e para cada direção (x e y) são apresentadas na Figura 4. Os valores de drift correspondem aos valores do deslocamento no topo do pilar dividido pela altura de imposição desse deslocamento (1.5m). Nos ensaios biaxiais, quando se passa para a seguinte amplitude de deslocamento, o primeiro incremento de deslocamento é feito no sentido positivo do eixo x, originando que no primeiro ciclo de cada amplitude a força seja maior no sentido positivo do eixo x.

A resposta obtida no ensaio monotónico, do pilar PUM é praticamente coincidente com a envolvente obtida para o ensaio uniaxial cíclico demonstrando que a carga cíclica não teve influência na capacidade máxima atingida e na rigidez inicial dos pilares com armadura lisa. Por outro lado, o carregamento biaxial afeta de forma significativa a resposta cíclica após a cedência do elemento, nomeadamente em termos de degradação de resistência e efeito pinching, como observado nos pilares PUM e PBC presentes na Figura 4a. A resposta dos pilares PBC e DBC é semelhante nas duas direções. O pilar PBE apresenta menor força na direção y devido ao deslocamento imposto na direção y ser metade do deslocamento imposto na direção x.

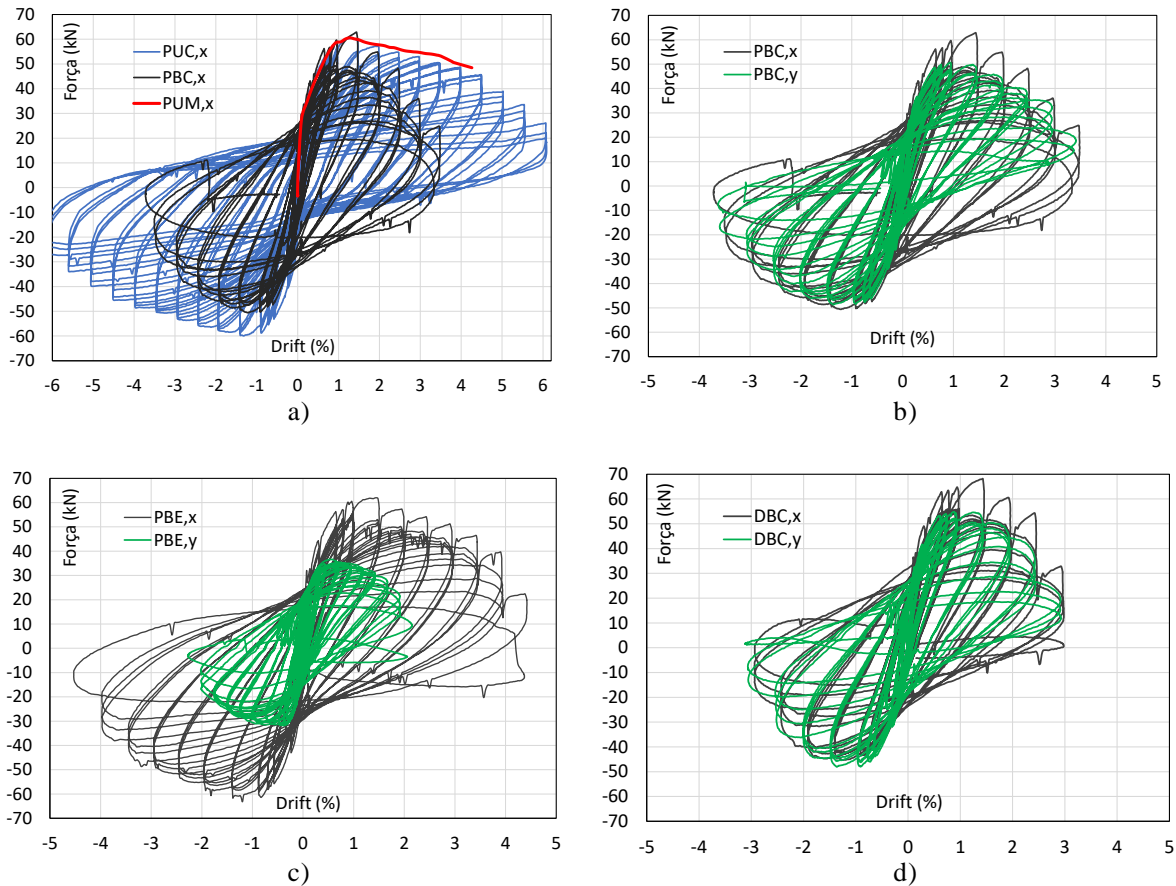


Figura 4. Relação força-drift: a) PUC, PUM e PBC na direção x; b) PBC; c) PBE; e d) DBC.

O Quadro 2 apresenta, para cada pilar, a força máxima (F_{max}) obtida durante o ensaio e correspondente drift ($Drift_{F_{max}}$), Força última (F_{ult}) e correspondente drift ($Drift_{F_{ult}}$) e a ductilidade de deslocamento correspondente ao ponto último ($\mu_{\Delta,ult}$). O ponto último é alcançado quando se regista uma perda de 20% da força máxima e a ductilidade no ponto último é determinada como o rácio entre o deslocamento do ponto último e o deslocamento de cedência. O deslocamento de cedência é calculado pela aproximação de uma curva bilinear à envolvente força-deslocamento com o critério de igualdade de energia dissipada conforme explicado em [7].

Quadro 2. Força máxima, drift na força máxima, força última, drift na força última e ductilidade de deslocamento.

Column	Direction	F_{max} [kN]	$Drift_{F_{max}}$ [%]	F_{ult} [kN]	$Drift_{F_{ult}}$ [%]	$\mu_{\Delta,ult}$
PUM	x	60.6	1.3	48.5	4.3	8.8
PUC	x	60.0	1.4	48.0	4.1	8.0
PBC	x	62.8	1.4	50.2	2.3	5.0
	y	50.7	0.9	40.6	2.3	
PBE	x	61.7	1.5	49.4	3.1	4.8
	y	36.6	0.6	29.3	1.6	
DBC	x	68.1	1.4	54.5	2.4	6.0
	y	54.8	0.9	43.8	2.1	

A força máxima é semelhante em todos os pilares com armadura lisa e cerca de 11% menor que a do pilar com armadura nervurada DBC justificada pela tensão de cedência do aço nervurado ser superior ao aço liso. A força máxima ocorre para um nível de drift semelhante em todos os pilares, como expectável uma vez que a seção transversal é a mesma para todos os pilares. No entanto, o drift no ponto

último é consideravelmente maior nos ensaios uniaxiais do que nos biaxiais. A ductilidade de deslocamento registada no pilar PUM, testado monotonicamente, é 10% e 76% maior do que a obtida nos pilares PUC e PBC, respetivamente. O pilar com armadura nervurada DBC apresenta uma ductilidade 20% maior que o pilar com armadura lisa PBC testado com o mesmo carregamento. Assim, a fraca aderência da armadura lisa diminui a capacidade de deformação e ductilidade dos pilares de betão armado.

A Figura 5 compara, de forma direta, a relação força-drift dos pilares DBC e PBC para as direções x e y. A rigidez inicial, força máxima e perda de resistência com o aumento da deformação lateral são semelhantes em ambos os pilares, embora a resistência máxima seja ligeiramente superior no pilar DBC devido à maior tensão de cedência do aço nervurado. Por outro lado, o pilar PBC apresenta efeito de pinching mais pronunciado. A resposta na direção x não é simétrica, uma vez que na mudança de amplitude de deslocamento imposto na lateral do pilar, primeiramente existe um pequeno incremento uniaxial na direção x. Globalmente, as respostas histeréticas dos pilares DBC e PBC demonstram poucas diferenças.

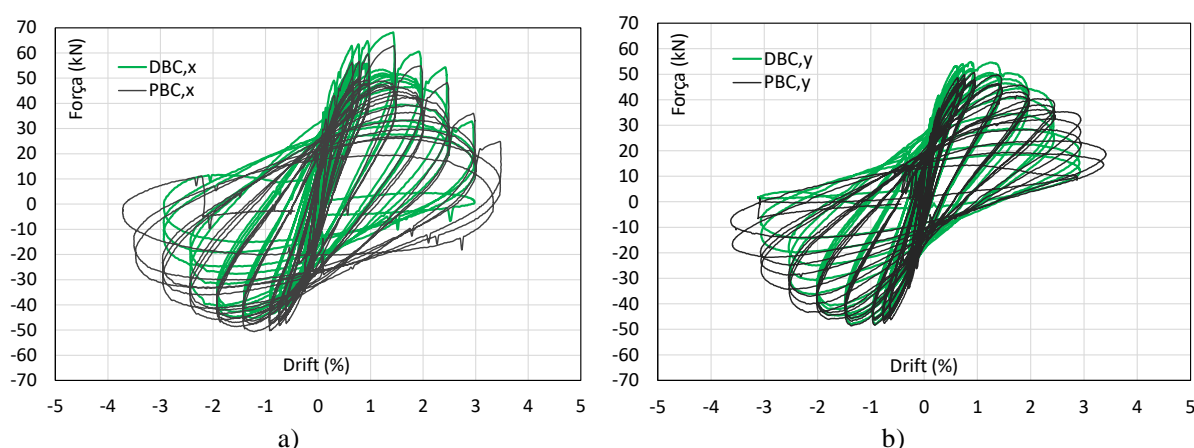


Figura 5. Relação força-drift dos pilares PBC e DBC: a) direção x; b) direção y.

As envolventes da relação força-drift para todos os pilares e para as duas direções são apresentadas na Figura 6. As envolventes seguem uma tendência semelhante até à força lateral máxima ser atingida. Depois da força de pico ser atingida, os ensaios biaxiais apresentam maior perda de resistência com o aumento da deformação. O pilar com PBE, com lei de carga elíptica, atingiu menor força máxima na direção y uma vez que o deslocamento imposto é o dobro na direção x em relação à direção y, e consequentemente, os danos ocorridos e acumulados previamente na direção x condicionam a resistência na direção y.

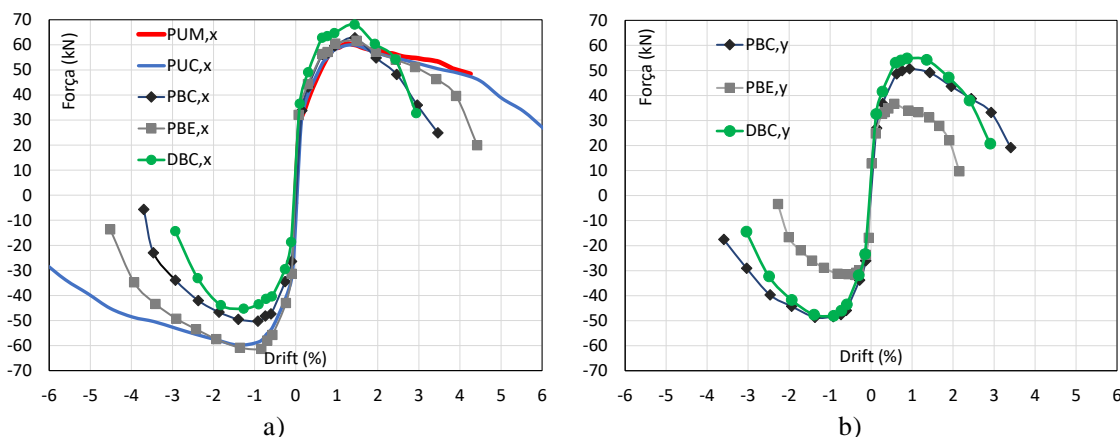


Figura 6. Envolventes da relação força-drift: a) direção x; b) direção y.

3.2 Evolução da energia dissipada

A relação entre a energia dissipada acumulada histerética e o drift obtida para cada pilar ensaiado ciclicamente é mostrada na Figura 7. O ponto último de cada pilar é identificado com uma marca preta. Para os pilares ensaiados biaxialmente a energia dissipada é determinada como a soma da energia dissipada na direção x e y. Até ao ponto último, os pilares PUC, PBE e DBC dissiparam mais 107%, 53% e 27% que o pilar PBC, respetivamente. Assim, como o pilar PUC dissipou cerca do dobro de energia que o pilar PBC, demonstra que o carregamento biaxial reduz significativamente a capacidade de dissipar energia porque o drift correspondente ao ponto último é consideravelmente menor. No entanto, para níveis de drift iguais, o pilar PUC dissipa menos energia que os restantes e o pilar DBC é o que dissipa mais energia demonstrando que a utilização de armadura nervurada conduz a uma maior capacidade de dissipar energia comparativamente ao uso de armadura lisa.

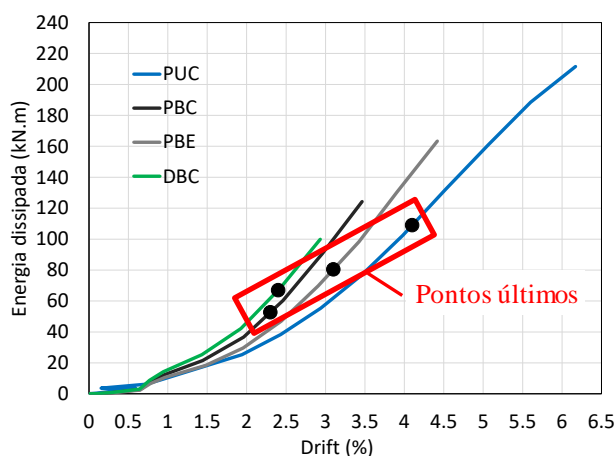


Figura 7. Evolução da energia dissipada acumulada.

3.3 Danos observados no final dos ensaios

A Figura 8 apresenta o dano observado no final de cada ensaio. O pilar ensaiado monotonicamente, PUM, apenas apresenta duas fissuras horizontais na zona de tração e algum descolamento do betão na zona comprimida junto da fundação. Os pilares ensaiados ciclicamente apresentam fissuras de flexão, descolamento do betão de recobrimento e encurvadura dos varões longitudinais. Foi também observada rotura de varões longitudinais apenas no pilar PUC. Foi registado descolamento do betão nos pilares PUM, PBC, PBE e DBC ao longo de um comprimento de 17cm, 25cm, 25cm e 37cm a partir do topo do bloco de fundação, respetivamente. O descolamento de betão nos pilares com carregamento biaxial foi maior que o do pilar PUM e no pilar DBC foi 48% maior do que no pilar correspondente com armadura lisa PBC, demonstrando que elementos de betão armado com armadura nervurada conseguem distribuir o dano por um maior comprimento.

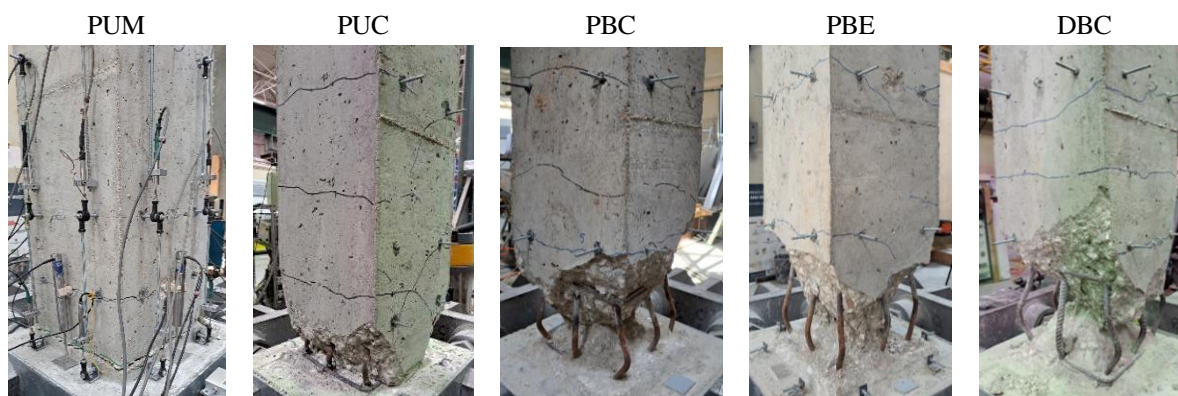


Figura 8. Dano observado no final de cada teste.

A profundidade de destacamento do betão é cerca do dobro nos ensaios biaxiais em comparação com o uniaxial. Assim, o carregamento biaxial acelera os danos e provoca danos mais severos que o carregamento cíclico uniaxial. Não foi observada rotura dos estribos em nenhum pilar e todos os provetes tiveram rotura por flexão.

4. CONCLUSÕES

Cinco pilares, representativos de estruturas existentes de betão armado, foram ensaiados com carregamento lateral monotónico ou cíclico e esforço axial constante até ao colapso. Este tipo de ensaio tem caráter inovar, uma vez que na literatura o número de resultados de ensaios biaxiais em pilares de BA com armadura lisa é muito escasso. Carregamento lateral uniaxial ou biaxial foi adotado para os ensaios cíclicos. Quatro pilares foram construídos com armadura lisa e um com armadura nervurada para comparação e demonstração da influência do uso de armadura lisa no comportamento cíclico de pilares. De modo global, a ação biaxial acelera a degradação de resistência, diminui a capacidade de deformação e de dissipação de energia. Baseado nos resultados obtidos conclui-se, de forma mais pormenorizada, o seguinte:

- O tipo de carregamento não afetou de forma significativa a resistência máxima. No entanto, o ponto último é obtido para níveis de drift consideravelmente mais baixo nos ensaios cíclicos do que nos ensaios uniaxiais e a ductilidade é também menor nos ensaios biaxiais. Assim, o carregamento biaxial acelera a degradação de resistência e softening.
- O pilar DBC, com armadura nervurada, dissipou mais 27% de energia que o correspondente pilar construído com armadura lisa, PBC, demonstrando a menor capacidade de dissipação de energia dos pilares com armadura lisa.
- O comprimento do destacamento de betão no pilar PBC foi 48% menor do que o obtido no pilar com armadura nervurada DBC, que está de acordo com os resultados de outros estudos que indicam que o dano é mais concentrado nos elementos com armadura lisa.
- O carregamento biaxial cíclico acelera o aparecimento dos danos e agrava-os em comparação com o carregamento uniaxial cíclico.
- O carregamento biaxial do pilar PBE fez diminuir a força de pico em 60% no eixo menor da elipse (direção y) devido ao dano prévio provocado pelo carregamento na direção x.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020>) e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 DOI 10.54499/UIDP/04708/2020 (<https://doi.org/10.54499/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). Este trabalho foi também financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), no âmbito do projeto 2022.05721.PTDC.



6. REFERÊNCIAS

- [1] S. Low and J. P. Moehle, "Experimental study of reinforced concrete columns subject to multiaxial cyclic loading," *Earthq. Engrg. Res. Center*, vol. Rep. No UCB/EERC 87-14, Univ. of California, Berkeley, Ca., 1987.
- [2] S. N. Bousias, G. Verzeletti, M. N. Fardis, and E. Gutierrez, "Load path effects in column biaxial bending with axial force," *J. Eng. Mech.*, vol. 121, p. 596, 1995.

- [3] M. D. Ludovico, G. M. Verderame, A. Prota, G. Manfredi, and E. Cosenza, "Experimental Behavior of Nonconforming RC Columns with Plain Bars under Constant Axial Load and Biaxial Bending," *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, no. 6, pp. 897-914, 2013, doi: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000703.
- [4] M. D. Zoppo, M. D. Ludovico, G. M. Verderame, and A. Prota, "Experimental Behavior of Nonconforming RC Columns with Deformed Bars under Constant Axial Load and Fixed Biaxial Bending," *Journal of Structural Engineering*, vol. 143, no. 11, p. 04017153, 2017, doi: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001892.
- [5] A. Lucchini, J. Melo, A. Arêde, H. Varum, P. Franchin, and T. Rossetto, "Load Path Effect on the Response of Slender Lightly Reinforced Square RC Columns under Biaxial Bending," *Journal of Structural Engineering*, vol. 148, no. 3, p. 04021278, 2022, doi: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003231.
- [6] J. Melo, H. Varum, and T. Rossetto, "Cyclic behaviour of interior beam–column joints reinforced with plain bars," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 44, no. 9, pp. 1351-1371, 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/eqe.2521>.
- [7] J. Melo, H. Varum, and T. Rossetto, "Experimental cyclic behaviour of RC columns with plain bars and proposal for Eurocode 8 formula improvement," *Engineering Structures*, vol. 88, pp. 22-36, 2015/04/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.033>.
- [8] J. Melo, T. Rossetto, and H. Varum, "Experimental study of bond–slip in RC structural elements with plain bars," *Materials and Structures*, vol. 48, no. 8, pp. 2367-2381, 2015/08/01 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0320-9.
- [9] J. Melo, C. Fernandes, H. Varum, H. Rodrigues, A. Costa, and A. Arêde, "Numerical modelling of the cyclic behaviour of RC elements built with plain reinforcing bars," *Engineering Structures*, vol. 33, no. 2, pp. 273-286, 2011/02/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.005>.
- [10] G. M. Verderame, G. Fabbrocino, and G. Manfredi, "Seismic response of r.c. columns with smooth reinforcement. Part II: Cyclic tests," *Engineering Structures*, vol. 30, no. 9, pp. 2289-2300, 2008/09/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.024>.
- [11] *Decreto 47723 - Regulamento de Estruturas de Betão Armado*, I Série - número 119, 1967.
- [12] *Concrete - Specification, performance, production and conformity (Portuguese Version)*, IPQ NP-EN206, 2000.