

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO BIAIXIAL DE PILARES DE BA COM ARMADURA LISA

José Melo

Investigador Doutorado
CONSTRUCT-LESE
Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto

Humberto Varum

Professor Catedrático
CONSTRUCT-LESE
Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto

António Arêde

Professor Associado
CONSTRUCT-LESE
Faculdade de Engenharia da
Universidade do Porto

Tiziana Rossetto

Full Professor
University College London

SUMÁRIO

Muitas construções de betão armado existentes em Portugal e na Europa foram construídas antes dos anos 70/80. Muitas destas construções de betão armado foram dimensionadas sem considerar a ação sísmica e com armadura lisa. O uso de armadura lisa pode tornar os elementos mais vulneráveis às ações horizontais devido ao fenómeno do escorregamento dos varões de aço.

Foi desenvolvida uma campanha experimental de ensaios com cinco provetes semelhantes de betão armado, um com armadura nervurada e os restantes com armadura lisa. Estes pilares foram submetidos a ações horizontais uniaxiais ou biaxiais com esforço axial constante. 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.

ABSTRACT

Many existing reinforced concrete buildings in Portugal and Europe were built until 70/80s. Many of these RC structures were designed without considering seismic action and with plain reinforcing bars. The use of plain reinforcement can make the elements more vulnerable to horizontal actions due to the phenomenon of the steel bars slippage. An experimental campaign was carried out on five similar reinforced concrete columns, one built with deformed reinforcing bars and the other four with plain bars. These columns were tested under constant axial load and uniaxial or biaxial lateral loading. The experimental results show that the biaxial loading accelerate the strength degradation, decreases the deformation capacity and the dissipated energy capacity. The effect of slippage of the plain reinforcing bars is also evidenced by direct comparison with the results obtained for the control column with deformed reinforcing bars.

PALAVRAS-CHAVE: pilares de betão armado, armadura lisa, carregamento cíclico biaxial, ensaios experimentais, escorregamento.

1. INTRODUÇÃO

Sismos impõem deformações em várias direções nos membros estruturais verticais como pilares e paredes. No entanto, as abordagens atuais para a avaliação de estruturas existentes baseada em deslocamentos adotam limites de deformação que são baseados em ensaios cíclicos uniaxiais que não representam adequadamente a faixa de resposta de pilares com diferentes detalhamentos sob carregamento sísmico. Estudos experimentais sobre a resposta cíclica biaxial de pilares de betão armado são ainda limitados, particularmente para pilares com armadura lisa. Um dos primeiros estudos experimentais sobre o comportamento biaxial de pilares foi desenvolvido por Low e Moehle [1] em 1987. Mais tarde Bousias et al. [2] também considerou o efeito do esforço axial ter valor constante ou variável na resposta cíclica biaxial de pilares de BA. Mais recentemente outros autores [3-5] também investigaram o comportamento cíclico de pilares de BA carregados nas duas direções horizontais em simultâneo e que demonstram a relevância de considerar-se a flexão composta desviada de pilares de BA. Além disso, as estruturas existentes de betão armado com armadura lisa apresentam falta de ductilidade devido às fracas propriedades de aderência e deslizamento da armadura [6-8].

Estruturas de edifícios dimensionadas de acordo com códigos antigos podem ser propícias a desenvolver danos severos aquando da ocorrência de um sismo. Esta limitação poderá ter a ver com a consideração de uma ação sísmica menor que a atualmente considerada, uso de armadura lisa, falta de detalhamento, empalme dos varões nas regiões críticas, comprimento de amarração insuficiente dos varões longitudinais e falta de confinamento do betão. As cargas cíclicas induzem degradação da aderência entre o aço e o betão e consequentemente 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 que pode representar até cerca de 80%-90% da deformação total de pilares construídos com armadura lisa. Além dos problemas associados com o escorregamento, as estruturas existentes de betão armado podem ter outros problemas tais como: inadequado detalhamento para cargas sísmicas; nível baixo de confinamento; betão com baixa resistência; e dimensionamento apenas para cargas verticais.

Este artigo apresenta os resultados experimentais de cinco pilares de betão armado construídos à escala real e são representativos de estruturas existentes sem detalhamento para cargas sísmicas. Quatro desses pilares foram realizados com armadura lisa e um com armadura nervurada. Os ensaios foram conduzidos com esforço axial constante e diferente leis de carga uniaxial e biaxial. Todos os pilares têm seção de 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 têm a mesma secção transversal, a mesma quantidade de armadura e foram construídos em simultâneo. Foram dimensionados de acordo com o regulamento antigo REBA de 1967 [11] sem qualquer detalhamento sísmico. A geometria e a pormenorização da armadura lisa dos pilares são apresentadas na Figura 1. A ancoragem da armadura longitudinal no pilar com armadura nervura usa dobras de 90° em vez de 180° como nos pilares com armadura lisa. Cada pilar 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, o ponto de aplicação das cargas laterais localiza-se à cota de 1.5m a partir do topo da fundação. A seção quadrado 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 de 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 depois de 28 dias de cura.

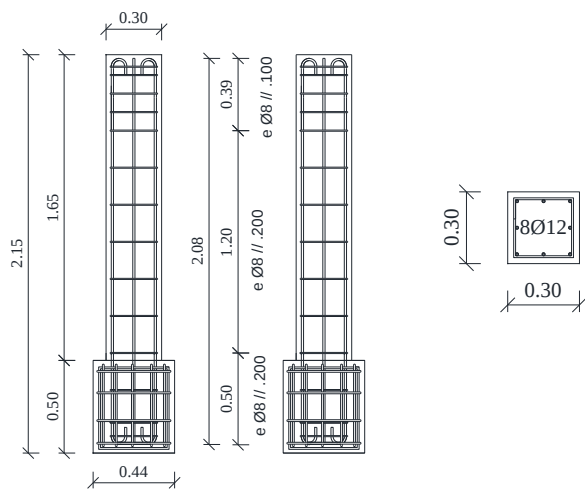


Fig. 1 - Geometria e pormenores da armadura dos pilares com armadura lisa.

A Tabela 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 – uniaxial monotónico; UC; uniaxial cíclico; BC – biaxial circular; e BE – biaxial elíptico.

Tabela 1- Propriedades mecânicas dos materiais e nomenclatura adotada.

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

2.2. Plataforma de ensaios utilizada

Os ensaios foram realizados numa plataforma existente no laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto que permite a aplicação de duas cargas ortogonais horizontais e uma vertical, em simultâneo, em pilares de betão armado com esforço axial constante ou variável (Figura 2). O esforço axial adotado foi

de 300kN (esforço axial reduzido de $\nu=12.3\%$). O esforço axial é controlado em força e a carga lateral é controlada em deslocamentos. A lei de deslocamentos laterais (d_c), imposta à cota do pilar de 1.5m, 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. No caso da lei de carga elíptica, o eixo maior adapta aos valores dos picos acima mencionados e o eixo menor corresponde a metade desses valores. Nesta plataforma de ensaios o atuador vertical não se move, por isso 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 especiais revestidas com dois materiais de baixo atrito, sendo uma solidária com o topo do pilar e outra solidária com o atuador vertical. As reações horizontais do atuador vertical correspondem ao atrito entre as chapas e são medidas durante o ensaio nas duas direções de aplicação da carga e descontadas no valor da força atingida nos atuadores horizontais. A rotação do bloco de fundação também é medida durante o ensaio para posteriormente corrigir-se os deslocamentos aplicados no topo do pilar.

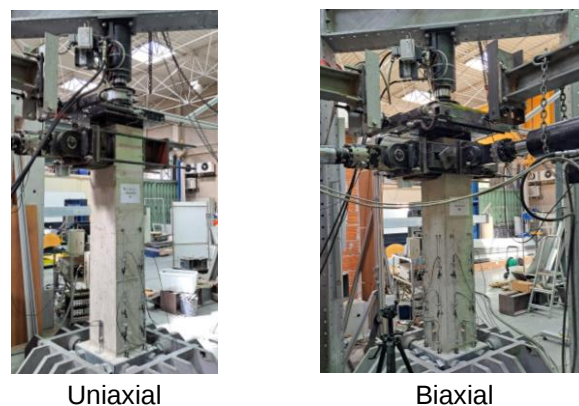


Fig. 2 – Plataforma de ensaios utilizada.

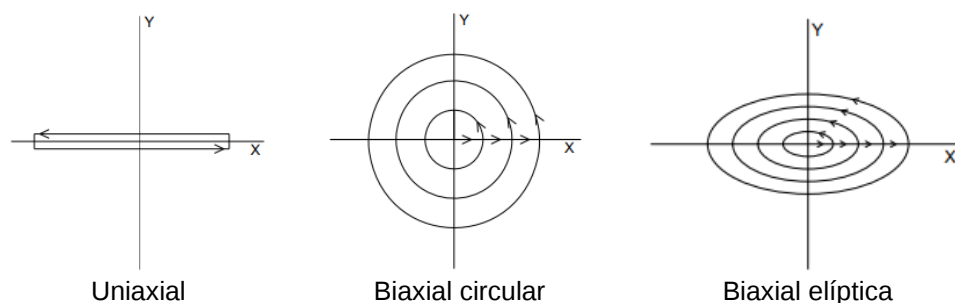


Fig. 3 – Leis de deslocamento adotadas.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. Comportamento histerético

As relações força-drift obtidas, nas duas direções (x e y), para todos os pilares são apresentadas na Figura 4. Os valores de drift correspondem aos valores do deslocamento dividido pela altura de aplicação desse deslocamento (1.5m). Nos ensaios biaxiais, quando se passa para uma nova 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 monotônico, do pilar PUM é praticamente coincidente com a envolvente obtida para o ensaio uniaxial cíclico demonstrando que a carga cíclica não teve influência na força máxima atingida e na rigidez inicial dos pilares com armadura lisa. Já o carregamento biaxial afeta significante 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 da direção x.

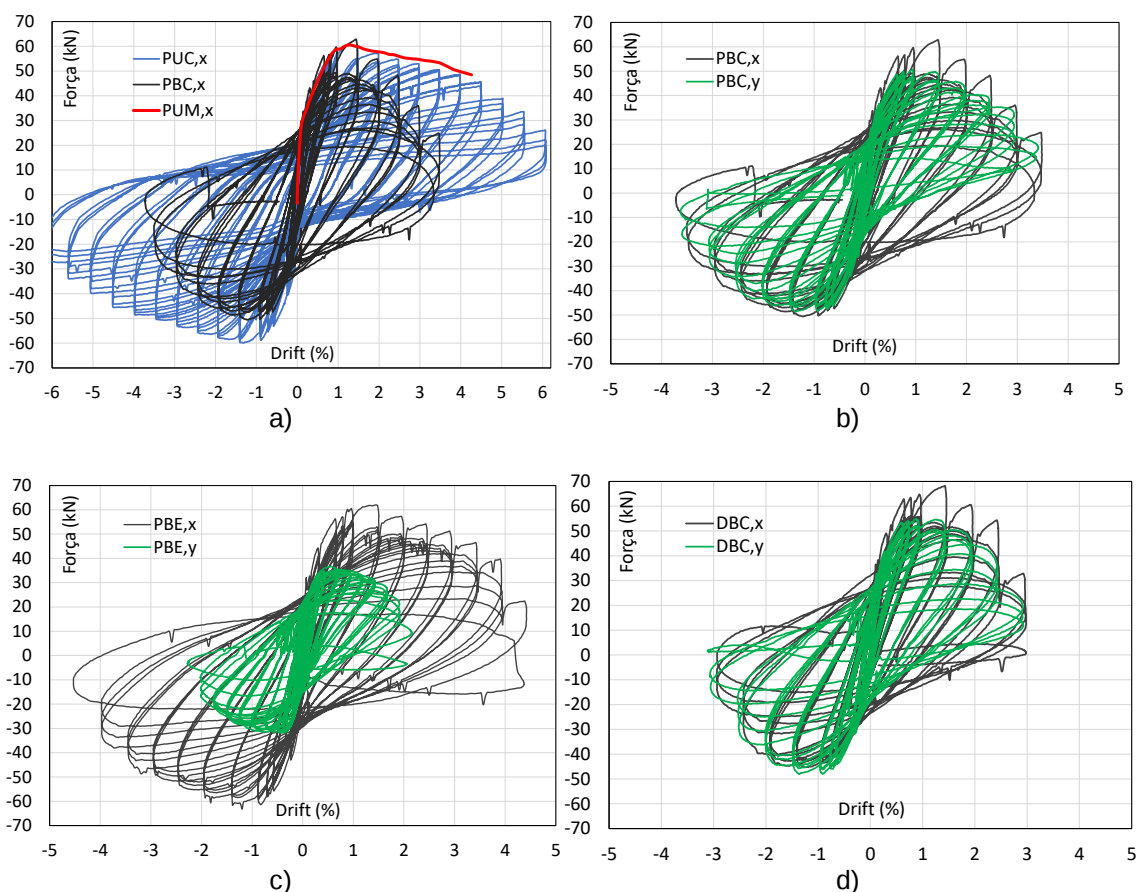


Fig. 4 – Relação força-drift: a) PUC, PUM e PBC na direção x; b) PBC; c) PBE; e d) DBC.

A Tabela 2 apresenta a força máxima (F_{max}) obtida durante o ensaio e correspondente drift ($Drift_{Fmax}$), Força última (F_{ult}) e correspondente drift ($Drift_{Fult}$) e a ductilidade de deslocamento correspondente ao ponto último ($\mu_{\Delta,ult}$). A força última corresponde ao ponto onde a existe uma redução 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 com o critério de igualdade de energia dissipada conforme explicado em [7]. A força máxima atingida é semelhante nos pilares com armadura lisa e cerca de 11% menor que o pilar com armadura nervurada DBC cuja tensão de cedência do aço é superior à do aço de armadura lisa. O drift correspondente à força máxima é semelhante em todos os pilares, mas o drift do 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 observada nos pilares PUC e PBC, respetivamente. Já o pilar com armadura nervurada DBC apresenta uma ductilidade 20% maior que o pilar com armadura lisa PBC e testado com a mesma lei de carga. Assim, a fraca aderência da armadura lisa diminui a capacidade de deformação e ductilidade dos pilares de betão armado.

Tabela 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 Figura 5 mostra a comparação direta da relação força-drift dos pilares DBC e PBC para ambas as direções. 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 resistência 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.

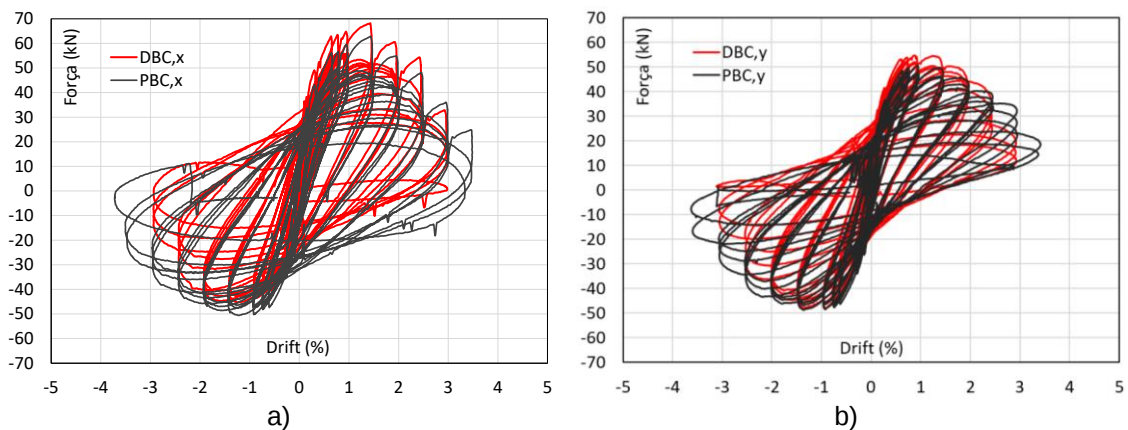


Fig. 5 – Relação força-drift obtida para os pilares PBC e DBC: a) direção x; b) direção y.

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, 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 como o deslocamento imposto é o dobro na direção x em relação à direção y, os danos ocorridos e acumulados na direção x condicionam a resistência na direção y.

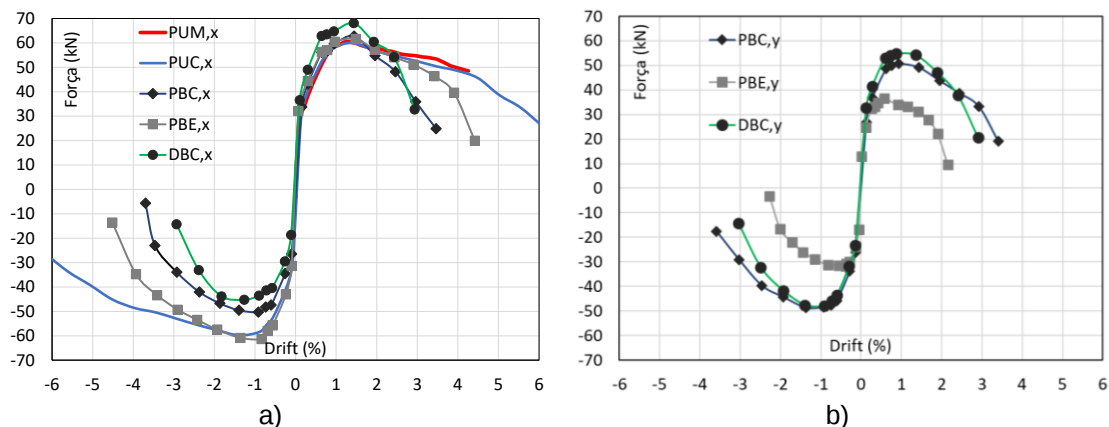


Fig. 6 – Envolventes da relação força-drift: a) direção x; b) direção y.

3.2. Evolução da energia dissipada

As relações entre a energia dissipada acumulada histerética e o drift dos pilares ensaiados ciclicamente são mostradas na Figura 7. O ponto último de cada pilar é identificado com uma marca preta. Nos pilares ensaiados biaxialmente 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 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.

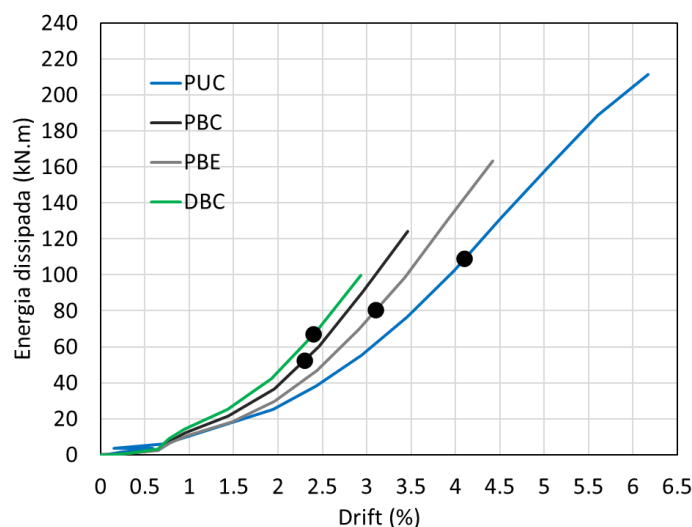


Fig. 7 – Evolução da energia dissipada acumulada.

3.3. Danos observados no final dos ensaios

O dano observado no final dos ensaios é apresentado na Figura 8. O pilar ensaiado monotonicamente, PUM, apenas apresenta duas fissuras horizontais na zona de tração e algum destacamento do betão na zona comprimida junto da fundação. Os pilares ensaiados ciclicamente apresentam fissuras de flexão, destacamento do betão de

recobrimento, encurvadura dos varões longitudinais e rotura de varões longitudinais (apenas no PUC). A altura do pilar onde houve destacamento do betão nos pilares PUM, PBC, PBE e DBC foi de 17cm, 25cm, 25cm e 37cm, respetivamente. O destacamento de betão nos pilares com carregamento biaxial foi maior que o do pilar PUM e o do pilar DBC foi 48% maior que o correspondente pilar com armadura lisa PBC, demonstrando que elementos de betão armado com armadura nervurada conseguem distribuir o dano por um maior comprimento. 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. Todos os pilares tiveram rotura por flexão baseado na orientação das fissuras e não foi observada rutura dos estribos.

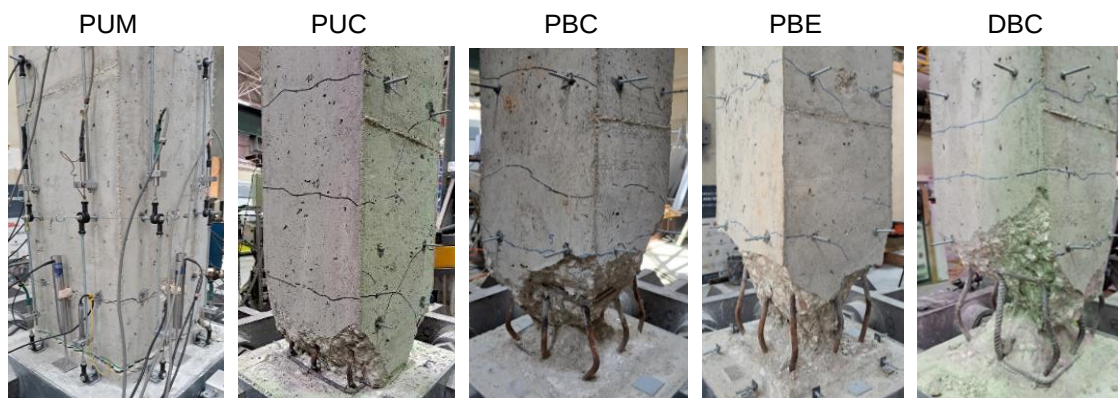


Fig. 8 – Dano final observado no final dos testes.

4. CONCLUSÕES

Cinco pilares de betão armado foram testados com carregamento lateral monotónico ou cíclico e constante esforço axial até ser atingido o colapso. Leis de carga uniaxial e biaxial foram adotadas 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. Baseado nos resultados obtidos conclui-se o seguinte:

- A resistência máxima não é significativamente afetada pelo tipo de carregamento lateral. No entanto, os valores de drift último e ductilidade obtidos nos ensaios cíclicos são consideravelmente menores do que nos ensaios uniaxiais. Assim, o carregamento biaxial acelera a degradação de resistência e softening.
- O pilar DBC, com armadura nervurada, dissipou mais 27% de energia que o pilar semelhante com armadura lisa, PBC, demonstrando a menor capacidade de dissipação de energia dos pilares com armadura lisa.
- O comprimento de destacamento de betão no pilar PBC foi 48% menor do que o obtido no pilar semelhante com armadura nervurada DBC, justificando a teoria do dano mais concentrado nos elementos com armadura lisa.
- Os danos observados nos pilares com carregamento biaxial ocorreram para valores de drift menores do que nos pilares testados uniaxialmente e o destacamento de betão foi mais profundo nos ensaios biaxiais.
- O carregamento biaxial do pilar PBE fez diminuir a força de pico em 60% no eixo menor da elipse (direção y).

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.