

## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PILARES RECTANGULARES DE BETÃO ARMADO SUJEITOS A SOLICITAÇÕES BIDIRECCIONAIS

**H. RODRIGUES**

Bolseiro  
U. Aveiro  
Aveiro, Portugal

**A. ARÊDE**

Prof. Associado  
FEUP  
Aveiro, Portugal

**H. VARUM**

Prof. Associado  
U. Aveiro  
Aveiro, Portugal

**A. G. COSTA**

Prof. Catedrático  
U. Aveiro  
Aveiro, Portugal

### SUMÁRIO

O comportamento de pilares de betão armado sujeitos a esforços de flexão biaxial combinado com carga axial é reconhecido como um assunto não suficientemente estudado encontrando-se na bibliográfica um reduzido número de trabalhos experimentais neste domínio. Se por um lado a resposta tridimensional dos edifícios de betão armado produz este tipo de solicitação nos pilares, por outro é reconhecido que as solicitações bidireccionais cíclicas em elementos de betão armado tendem a agravar a degradação de rigidez e a reduzir a sua capacidade resistente.

No presente estudo apresentam-se os resultados de uma campanha experimental realizada sobre 4 séries de pilares rectangulares, com diferentes características geométricas e distribuição de armadura longitudinal, sujeitos a esforço axial constante e combinado com flexão cíclica, uniaxial e biaxial, com diferentes histórias de carregamento. Apresenta-se a análise comparativa do comportamento uniaxial e biaxial, assim como da influência das histórias de carregamento na resposta global dos pilares particularmente em termos de força-deslocamento, evolução do dano, e da evolução da dissipação de energia

### 1. INTRODUÇÃO

O estudo da resposta de elementos estruturais de betão armado sujeitos a cargas axiais em combinação com flexão biaxial cíclica é reconhecido como um tópico importante para a definição do comportamento sísmico das estruturas de BA em zonas de moderado/alto risco sísmico. A importância deste tópico justifica-se pelo facto da acção sísmica actuante sobre os edifícios não ocorrer numa única direcção, e por outro lado, porque a própria resposta dos edifícios é tridimensional quer pela sua orientação face à acção sísmica, quer pelas suas irregularidades estruturais. Assim, o efeito da acção biaxial aplicada sobre um elemento de betão armado conduz a uma aceleração da degradação de rigidez e resistência durante a acção cíclica.

Os resultados experimentais disponíveis sobre o comportamento de pilares de betão armado sujeitos a carga axial e esforços de flexão biaxiais são muito limitados, continuando a existir muitas incertezas no que se refere à relação e combinação das histórias de carga a aplicar nas duas direcções principais. Como consequência desta lacuna, o actual conhecimento sobre a resposta não-linear de elementos de betão armado sujeitos à flexão biaxial é muito limitado quando comparado com o conhecimento para a flexão unidireccional [1-3].

Apesar da quantidade de resultados experimentais ser claramente insuficiente, durante os últimos 30 anos diversos investigadores tem dado contributos importantes para o avanço do conhecimento nesta matéria, em particular: Takizawa e Aoyama, 1976 [4]; Otani et al., 1980 [5]; [6]; Bousias et al., 1992 [7]; Kim e Lee (2000) [8]; Qiu et al., 2002 [9], Tsuno e Park, 2004 [10], Nishida e Unjoh, 2004 [11], Umemura e Ichinose, 2004 [12], Kawashima et al., 2006 [13], Li et al., 2008 [14], Acun, 2010 [15] e Rodrigues, 2010 [16].

### 2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

O trabalho experimental apresentado neste artigo é parte do trabalho que tem vindo a ser desenvolvido ao longo dos últimos anos no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estruturas (LESE), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), para o estudo de pilares de betão armado, de edifícios e pontes, sob acções horizontais cíclicas [17, 18]. O principal objectivo da campanha experimental deste trabalho é o estudo do comportamento cíclico uniaxial e biaxial de pilares de betão armado e esforço axial constante. Assim, 4 séries de pilares rectangulares de betão armado foram construídas com diferentes características geométricas, e diferente quantidade de armadura longitudinal, testadas para diferentes histórias de carga. Para cada série de pilares foram realizados ensaios com imposição de deslocamentos horizontais uniaxiais (nas duas direcções principais) e biaxiais. Todos os ensaios foram realizados com carga axial constante e os deslocamentos horizontais foram aplicados em ensaios controlados em deslocamento. Todos os pilares têm 1,70m de altura e uma sapata rígida

com dimensões de 1,30x1,30m<sup>2</sup> em planta e 0,50m de altura. As sapatas têm 4 furos que permitem a sua fixação à laje de reacção do laboratório. As dimensões das secções transversais e os pormenores da distribuição da armadura longitudinal são apresentados na Figura 1.

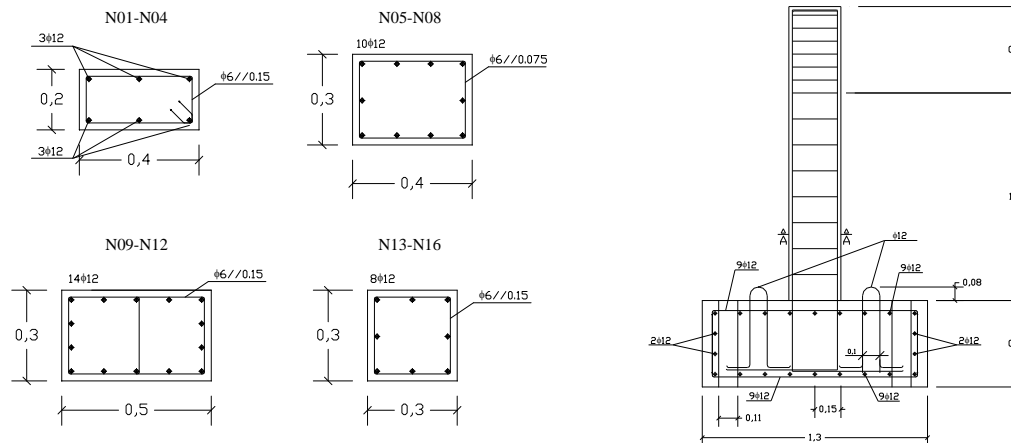


Figura 1: Pilares: geometria e pormenorização da armadura

Na fase de planeamento do estudo experimental foi definido um betão da classe C35/45 para os pilares N01 a N04 e da classe C30/35 para os pilares N05 a N18. Para todos os pilares considerou-se um aço da classe A400NR-SD. Foram realizados ensaios para a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados na construção dos pilares (aço e betão). Os resultados médios obtidos para a resistência à compressão do betão para cada série de pilares construídos são apresentados na Tabela 1, e na Tabela 2 apresentam-se os resultados dos ensaios de tracção de amostras de aço.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de compressão dos provetes de betão

Pilares	Resistência de compressão (MPa)
Pilar N01-N04*	48,35
Pilar N05-N08**	21,40
Pilar N09-N12**	24,39
Pilar N09-N12**	21,70

\* Provede cúbico 15x15x15

\*\* Provede cilíndrico 15x30

Neste estudo considera-se que a direcção N-S (ou direcção X) corresponde à direcção da acção que mobiliza a maior inércia da secção, e a direcção O-E (ou direcção Y) para a direcção de menor inércia, como representado na Figura 2.

Na Figura 3 apresenta-se uma vista geral do setup de ensaio utilizado na campanha experimental. O sistema inclui dois actuadores horizontais independentes para imposição dos deslocamentos horizontais. O actuador utilizado na direcção de maior inércia possui uma capacidade de 500kN e um curso de +/-150mm, e o outro actuador, orientado para aplicação dos deslocamentos na direcção de menor inércia, possui uma capacidade de 200kN e um curso de +/-100mm. Para a aplicação do esforço axial é utilizado um actuador com uma capacidade de 700kN. A sapata dos pilares e as estruturas de reacção estão fixas à laje de reacção do laboratório com varões de aço pré-esforçados, para evitar o escorregamento ou rotação do pilar, e o escorregamento do sistema de reacção.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de tracção dos provetes de aço

Pilares	Módulo de Young E (GPa)	Tensão de cedência $f_{sv}$ (MPa)	Tensão de ruptura $f_{su}$ (MPa)	Extensão na ruptura $\epsilon_{su}$ (%)
Pilar N01-N04	194,66	432,63	544,66	20,32
Pilar N05-N16	203,46	429,69	551,08	24,17

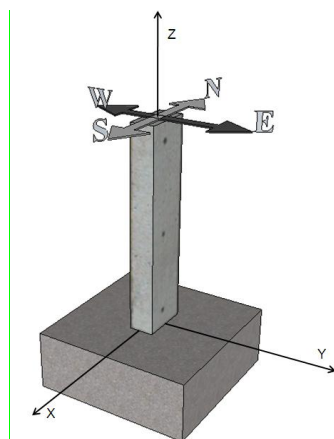


Figura 2: Esquema geral dos pilares e convenção das direcções de ensaio

Como referido anteriormente, em todos os ensaios foi imposto um esforço axial constante, cujos valores são apresentados na Tabela 3. Uma vez que o actuador vertical permanece na mesma posição durante o ensaio enquanto o pilar acomoda o deslocamento horizontal imposto, um sistema de deslizamento foi desenvolvido e colocado entre o topo do pilar e o actuador vertical, minimizando assim o atrito. O esforço axial foi monitorizado em todos os ensaios, e foi verificada uma variação máximo de cerca de 3%. O nível de esforço axial normalizado considerado em todos os ensaios representa valores típicos para pilares de edifícios de betão armado com 3 a 4 pisos, em particular pilares de canto com valores inferiores de esforço axial. A opção por estes pilares é justificada pelo facto de serem tipicamente estes pilares onde a flexão biaxial assume uma maior importância para estruturas de edifícios.

Para a caracterização da resposta cíclica dos pilares foram impostos deslocamentos cíclicos no topo dos pilares com níveis crescentes de deslocamento. Foram aplicados 3 ciclos repetidos para cada nível de deslocamento considerado. A repetição dos ciclos para nível de deslocamento permite obter informação sobre a degradação de rigidez e resistência para o mesmo nível de deslocamento, Este procedimento permite um melhor entendimento do comportamento não-linear dos elementos, e fornece informação fundamental para a calibração de modelos numéricos.

As leis de deslocamento adoptadas nos ensaios estão resumidas na Tabela 4. Foram considerados os seguintes níveis de deslocamento máximo: 3, 5, 10, 4, 12, 15, 7, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 mm. Em cada ensaio adoptou-se como critério de paragem a ruptura do primeiro varão da armadura longitudinal, ou a obtenção da ruptura convencional (redução de 20% do valor do pico).

Tabela 3 - Esforço axial imposto nos pilares

Pilares	Esforço axial [kN]	$v = N/(A_c \cdot f_c)$
N01-N04	170	0,04
N05-N08, N17	300	0,12
N09-N12, N18	300	0,08
N13-N16	210	0,10

Tabela 4 - Leis de deslocamento horizontais

Pilares	PB01-N01 PB01-N05 PB01-N09 PB01-N13	PB02-N02 PB02-N06 PB02-N10	PB12-N03	PB12-N04 PB12-N07 PB12-N11 PB12-N14	PB12-N08 PB12-N12 PB12-N15	PB12-N16 PB12-N17 PB12-N18
Leis de deslocamento						

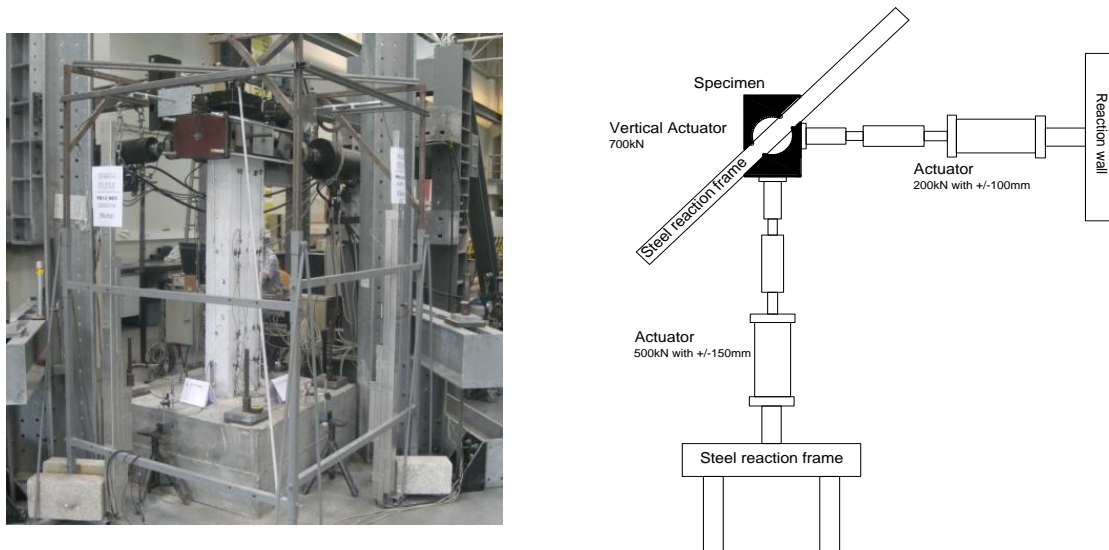


Figura 3: Esquema de ensaio: a) vista geral e b) esquema em planta do setup de ensaio

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As curvas força-drift obtidas nos ensaios experimentais são apresentadas nas Figuras 4 a 7. Na Figura 8 são apresentados os resultados para os ensaios biaxiais em termos de força na direcção X vs. Força na direcção Y. Da análise das curvas força-drift é notável a diferença verificada na rigidez de recarga comparando os ensaios uniaxiais com os ensaios biaxiais. Um efeito claro de pinching foi observado para a lei de deslocamentos em losango, em especial para as curvas histeréticas na direcção de menor inércia (Y).

O primeiro ciclo de cada nível de deslocamento tem sempre uma componente de deslocamento uniaxial, em todos os ensaios biaxiais, de facto, a lei de deslocamentos adoptada na campanha experimental inicia o primeiro ciclo (de cada nível de deslocamento) sempre na mesma direcção (X, negativo), pelo que se observa sempre uma pequena diferença na resposta neste primeiro ciclo. Este efeito é no entanto eliminado nos ciclos seguintes para a mesma amplitude de deslocamento.

Da análise dos padrões de força medidos e das leis de deslocamentos impostos, verifica-se uma rotação do padrão de forças quando comparado com o padrão de deslocamentos. Este facto foi já observado por outros autores, nomeadamente Takizawa e Aoyama [4], Otani [5] e Bousias et al. [7], que referem uma rotação entre  $10^\circ$  e  $20^\circ$  para pilares com secção quadrada. Esta rotação é consequência da imposição biaxial de forças para níveis de deslocamento zero numa das direcções em simultâneo com um valor específico de deslocamento da direcção perpendicular. Para a lei de deslocamentos quadrada, quando ocorre uma variação na direcção do deslocamento, o deslocamento na direcção perpendicular é mantida praticamente constante, obtendo-se no entanto uma redução no nível de força. Esta redução está associada à força necessária para manter o deslocamento constante. Esta interacção resulta numa descarga brusca, que se pode observar nos gráficos força-drift. Dos resultados obtidos para o pilar com secção quadrada ensaiado biaxialmente, com a lei em losango e quadrada, foi observada uma rotação do padrão de forças próxima dos valores observados e reportados por outros autores. No entanto, para os restantes ensaios em pilares rectangulares foi verificada que esta rotação depende da geometria secção. Para os pilares ensaiados foi verificada para a lei em losango uma rotação de  $30^\circ$ ~ $35^\circ$  na direcção de maior inércia e de  $7^\circ$ ~ $10^\circ$  na direcção de menor inércia. Na lei de deslocamentos quadrada foi verificada uma rotação de cerca de  $40^\circ$ ~ $50^\circ$  para a direcção de maior inércia e de  $3^\circ$ ~ $6^\circ$  para a outra direcção. Da análise e discussão dos resultados experimentais em termos de curvas força-drift, degradação de rigidez e resistência, dissipação de energia e evolução de dano é desenvolvida nas secções seguintes.

#### 3.1. Degradação de rigidez e resistência

As envolventes das curvas força-drift para cada ensaio são apresentadas na Figura 9-a. Da análise destas envolventes é possível verificar que a rigidez inicial dos pilares não é afectada significativamente pelas leis biaxiais de deslocamentos impostos. No entanto, da comparação das curvas uniaxiais e biaxiais nota-se uma redução da resistência para as leis de deslocamento biaxiais. Este efeito é mais acentuado para a direcção de maior inércia. A maior redução da resistência é verificada para os pilares testados com a lei quadrada de

deslocamentos impostos. Para a lei de deslocamentos cruciforme, a envolvente obtida é similar à obtida com os resultados uniaxiais.

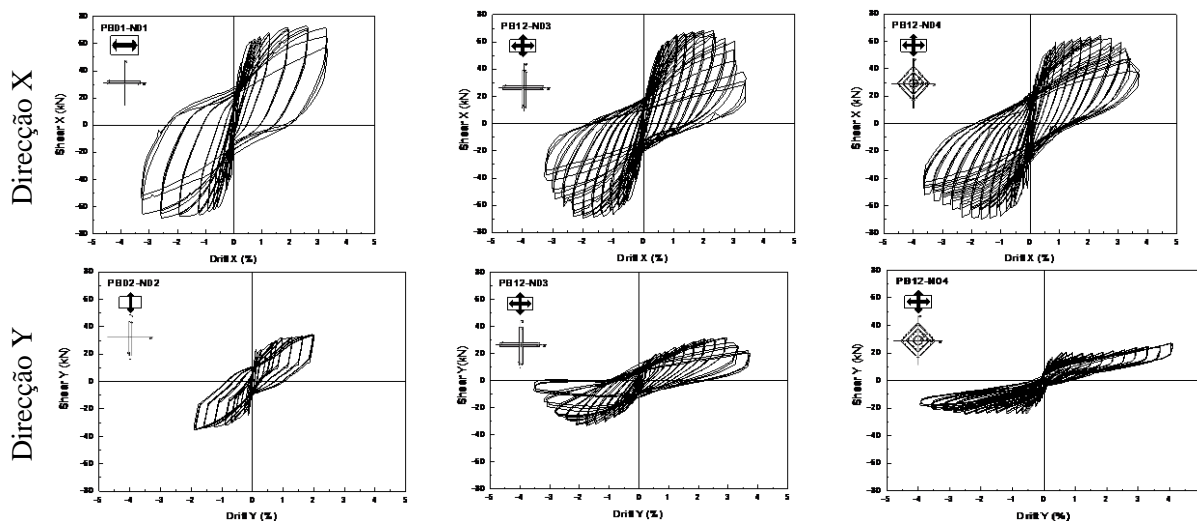


Figura 4: Curvas Força-Drift para os pilares N01 a N04 (0.20x0.40)

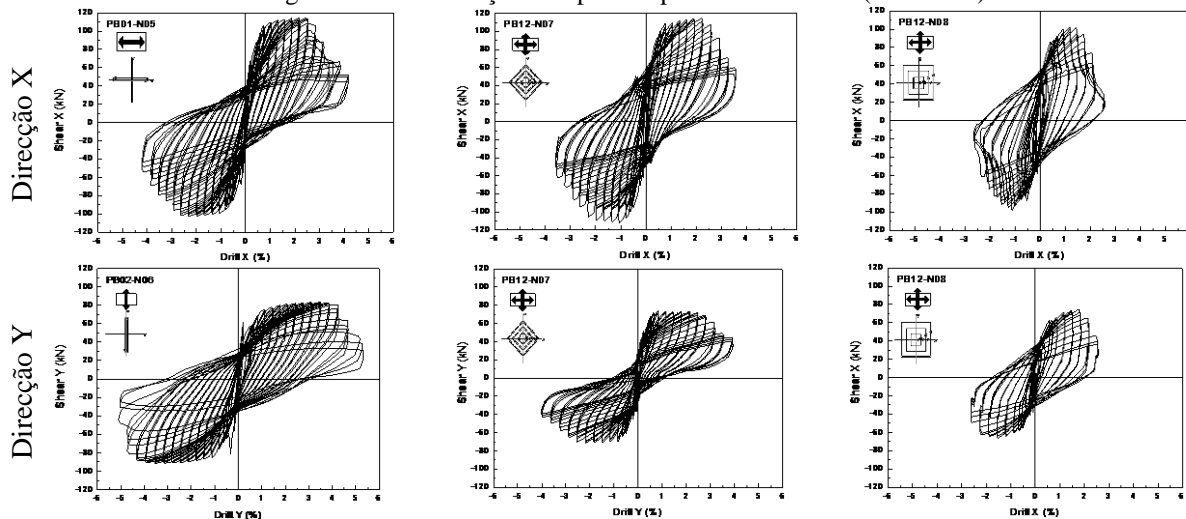


Figura 5: Curvas Força-Drift para os pilares N05 a N08 (0.30x0.40)

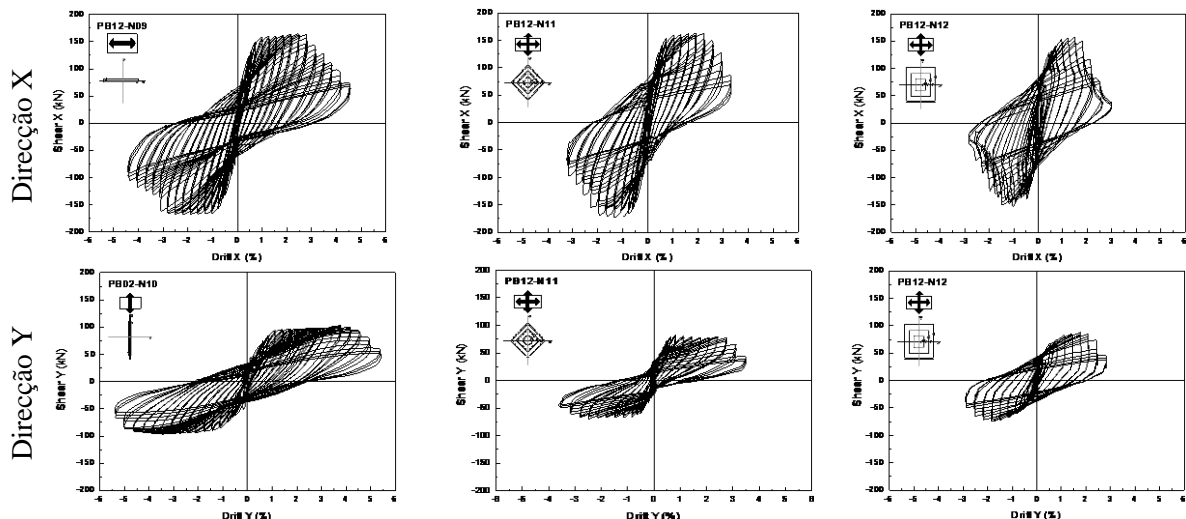


Figura 6: Curvas Força-Drift para os pilares N09 a N12 (0.30x0.50)

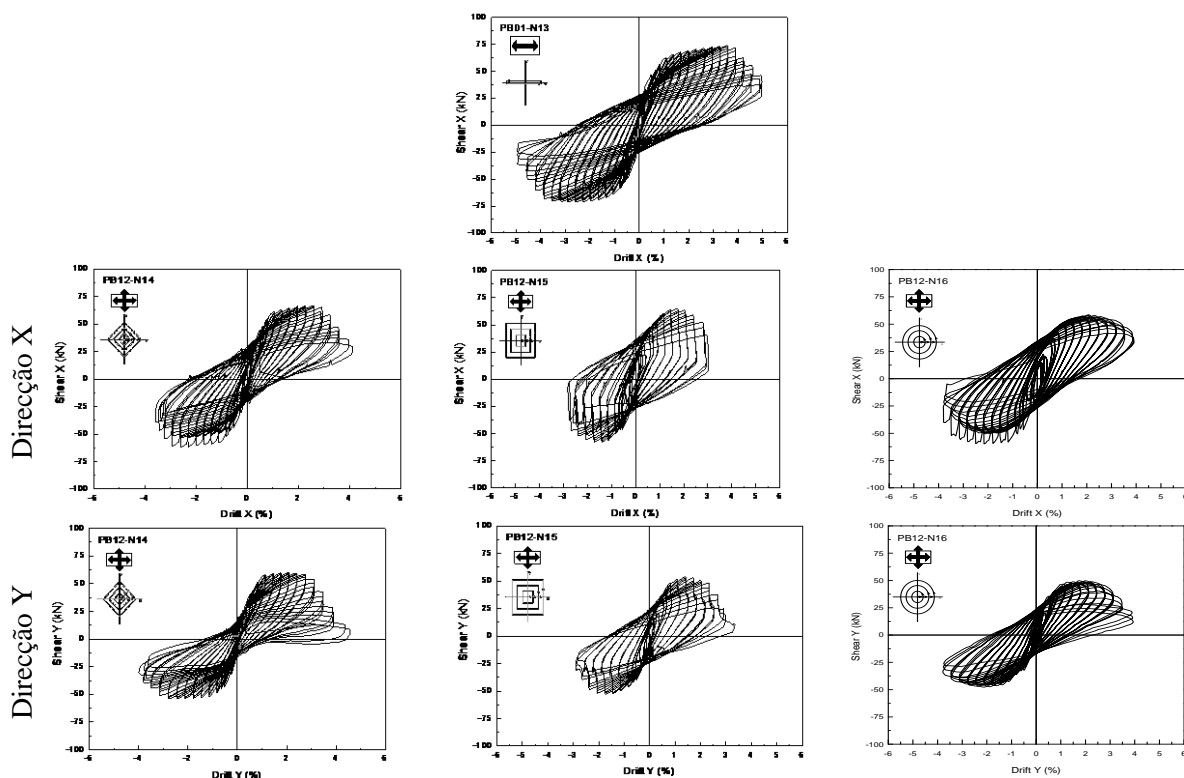


Figura 7: Curvas Força-Drift para os pilares N13 a N16 (0.30x0.30)

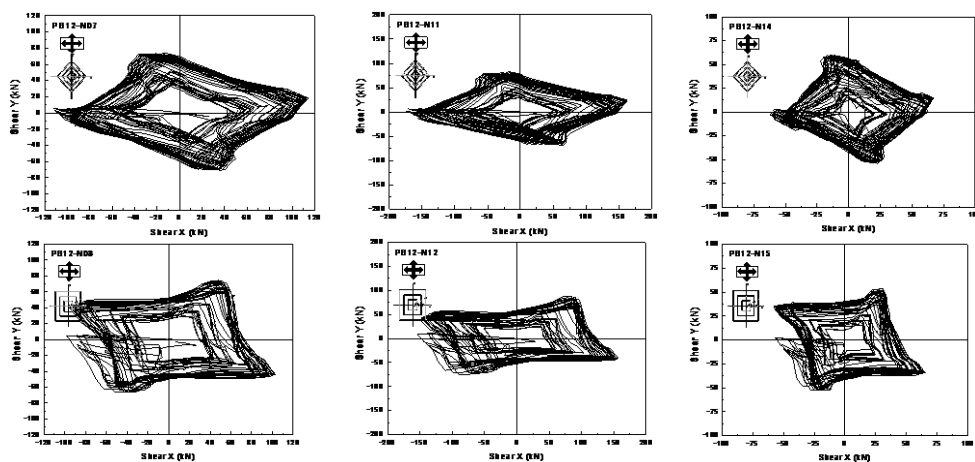


Figura 8: Curvas Força X vs Força Y para os pilares com padrão de deslocamentos em losango e quadrado

### 3.3. Evolução do dano

Para compreender as consequências da acção biaxial na evolução do dano nos pilares, foram comparados os valores de drift para os diferentes níveis de dano, nomeadamente: fissuração, destacamento do betão, encurvadura dos varões e ruptura do primeiro varão longitudinal. Adicionalmente foi identificado o ponto correspondente à ruptura convencional do pilar, ou seja o ponto onde se verifica uma redução de 20% da resistência máxima, de acordo com o adoptado por Park & Ang [19].

Em todos os ensaios as fissuras observadas foram maioritariamente horizontais, associadas a um comportamento dominado pela flexão. De uma forma clara, as acções biaxiais tendem a causar mais dano nos pilares que as uniaxiais para um mesmo nível de drift máximo imposto.

Nos ensaios biaxiais o dano tende a iniciar-se nos cantos da secção da base dos pilares. Nos ensaios uniaxiais isto também tende a acontecer, mas o dano distribui-se imediatamente a seguir ao longo de todo o lado da secção

dos pilares perpendicular à direcção de ensaio. Nos ensaios biaxiais a ruptura do primeiro varão corresponde sempre a um varão de canto. Os resultados obtidos em termos de evolução do dano são apresentados na Figura 9-b, onde é possível verificar que para os ensaios biaxiais, cada estado de dano ocorre para níveis inferiores de drift, quando comparado com os correspondentes ensaios uniaxiais.

As acções biaxiais causam uma redução de até 40% do deslocamento/drift para o qual ocorre a fissuração. O destacamento do betão ocorre para níveis de drift entre 50% a 75% inferiores dos observados nos correspondentes ensaios uniaxiais, encurvadura dos varões ocorre para níveis de drift entre os 65% e os 75% dos observados nos ensaios uniaxiais. Assim, é claro o efeito das acções biaxiais na evolução dos danos nos elementos estruturais, agravando o estado de dano para o mesmo nível de drift quando comparado com os ensaios uniaxiais.

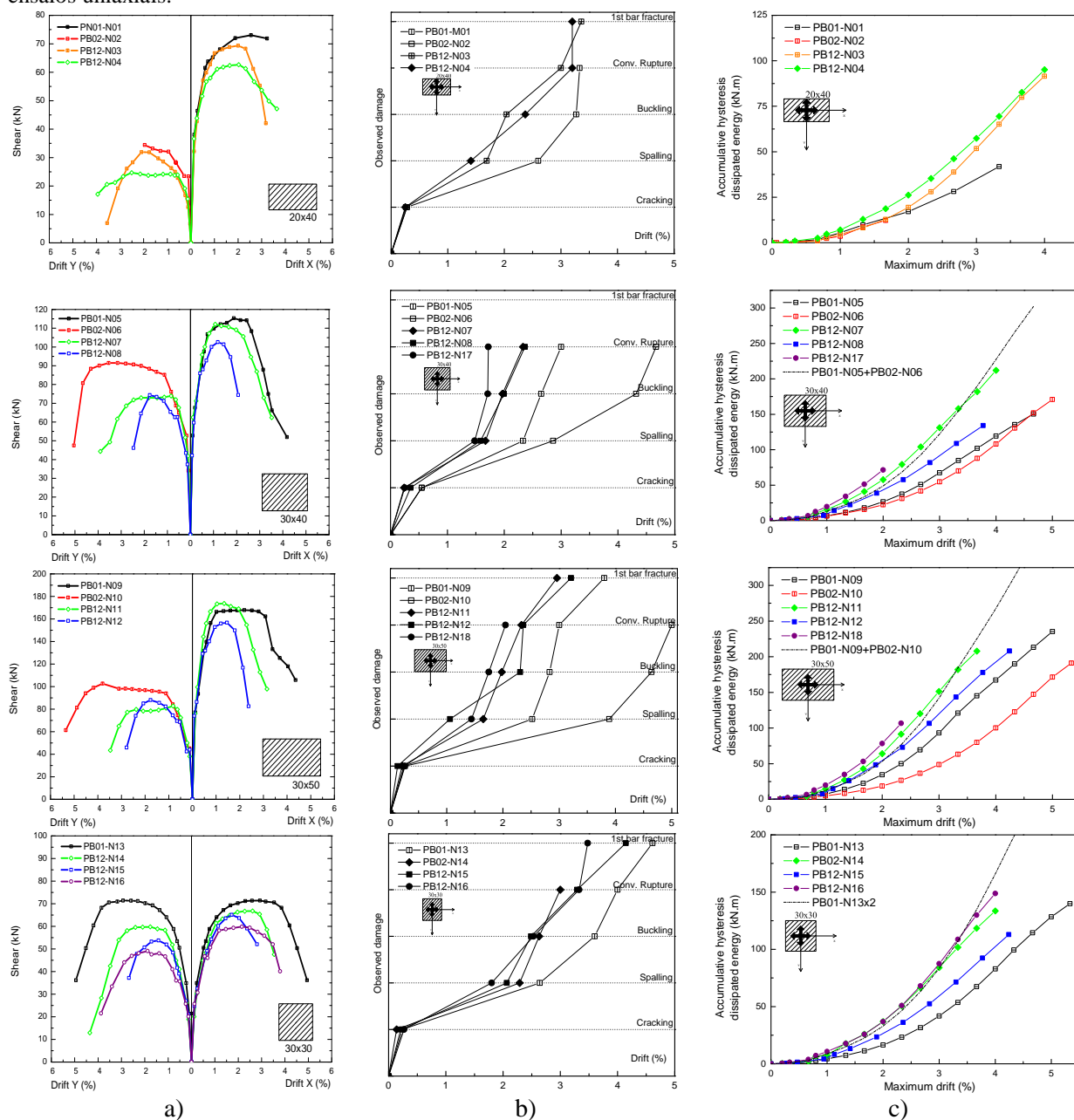


Figura 9: a) Envelopes força-drift; b) evolução do dano; c) energia dissipada acumulada

### 3.2. Dissipação de energia

A energia dissipada acumulada foi obtida para todos os ensaios, calculando os resultados para cada uma das duas direcções, sendo a energia total obtida pela soma dos valores obtidos para cada direcção. Os resultados em

termos de evolução da energia dissipada acumulada são apresentados na Figura 9-c. Como esperado, comparando a energia dissipada entre os ensaios uniaxiais independentes para um dado pilar, verifica-se uma menor dissipação de energia no ensaio para a direcção de menor inércia, associado a uma menor resistência do pilar nessa direcção. Os ensaios biaxiais mostram um maior nível de energia dissipada, em particular o ensaio com o padrão de deslocamentos impostos quadrado.

Comparando os ensaios com trajectórias de deslocamentos diferentes para um deslocamento total semelhante (pilares N03 e N04, ou pilares N14 e N16), os resultados em termos de energia dissipada são próximos. Foi também verificado que a soma da energia dissipada nos dois ensaios unidireccionais independentes está muito próxima da curva correspondente do ensaio biaxial com o padrão de deslocamentos em losango.

#### 4. COMENTÁRIOS FINAIS

O objectivo principal da campanha de ensaios realizada focou-se no estudo de pilares de betão armado sujeitos a acções horizontais cíclicas, uniaxiais e biaxiais, com esforço axial constante. Foram ensaiados 16 pilares. Os resultados mostraram os efeitos da interacção entre as duas direcções da solicitação, evidenciando que a acção biaxial induz uma redução da rigidez e resistência quando comparadas com os valores obtidos dos ensaios uniaxiais correspondentes.

Os padrões de forças biaxiais medidos apresentam uma rotação quando comparados com os padrões de deslocamentos horizontais impostos nos ensaios. Neste estudo foi possível verificar que esta rotação depende da geometria da secção.

Em correspondência com a redução de rigidez e resistência, devido à interacção entre as duas direcções horizontais de solicitação, também foi verificado um aumento da energia total dissipada para os ensaios biaxiais face a cada um dos ensaios uniaxiais, embora para a soma da energia destes os resultados não sejam muito diferentes. A análise do dano observado em todos os ensaios (fissuração, destacamento do betão, encurvadura e ruptura dos varões) confirma que as acções biaxiais têm uma influência significativa na evolução dos danos. Foram verificadas reduções sempre superiores a 50% em termos de nível de deformação associada aos estados de dano mais avançados nos ensaios biaxiais, quando comparados com os ensaios uniaxiais na direcção de maior inércia.

No que respeita ao comportamento biaxial de pilares de betão armado, continuam a existir muitas questões em aberto, em especial no que diz respeito à importância da escolha das leis de deslocamento a impor e da sua influência na resposta. Assim, um maior número de ensaios deve ser desenvolvido neste domínio, e com outro tipo de leis de deslocamento. No entanto, os resultados obtidos são mais um contributo para a compreensão do comportamento biaxial e disponibilizam informação adicional para a calibração de modelos numéricos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores de agradecem à equipa do laboratório LESE, em especial ao Sr. Valdemar Luís, Sr. André Martins e Eng. Luís Noites, por todo o apoio na preparação dos ensaios. Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da "FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia", Portugal, que os autores reconhecidamente agradecem, nomeadamente pela Bolsa de Doutoramento do primeiro autor (SFRH/BD/63032/2009).

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] CEB, "RC frames under earthquake loading," Lausanne Bulletin 220, 1996.
- [2] M. E. Marante e J. Flórez-López, "Model of damage for RC elements subjected to biaxial bending," *Engrg Structures*, No. 24, 2002.
- [3] T. Paulay e M. J. N. Priestley, *Seismic design of RC and masonry buildings* - John Wiley - ISBN 0-471-54915-0, 1992.
- [4] H. Takizawa, M. Aoyama. "Biaxial effects in modelling earthquake response of RC structures," *Earthq. Engrg and Struct. Dynamics*, V. 4, pp. 523-552, 1976.
- [5] S. Otani, V. W. T. Cheung, e S. S. Lai, "Reinforced concrete columns subjected to biaxial lateral load reversals," in *7th World Conf. on Earthq. Engrg* V. 6, 525-532., 1980.
- [6] M. Saatcioglu e G. Ozcebe, "Response of reinforced concrete columns to simulated seismic loading," *ACI Structural Journal*, V. 86-S1, 1989.
- [7] S. N. Bousias, G. Verzelletti, M. N. Fardis, e G. Magonette, "RC columns in cyclic biaxial bending and axial load," in *10th World Conf. on Earthq. Engrg*, 3041-3046 Madrid, 1992.



- [8] J.-K. Kim e S.-S. Lee, "The behaviour of reinforced concrete columns subjected to axial force and biaxial bending," *Engineering Structures*, V. 23, pp. 1518-1528, 2000.
- [9] F. Qiu, W. Li, P. Pan, e J. Qian, "Experimental tests on RC columns under biaxial quasi-static loading," *Engrg Structures*, vol. 24, pp. 419-428, 2002.
- [10] K. Tsuno e R. Park, "Experimental study of reinforced concrete bridge piers subjected to bi-directional quasi-static loading," *Struct. Engrg Structures, JSCE*, VI. 21, No 1 11s-26s, 2004.
- [11] H. Nishida e S. Unjoh, "Dynamic response characteristic of reinforced concrete column subjected to bilateral earthquake ground motions," in *13th World Conf. on Earthq. Engrg*, paper 576, 2004.
- [12] H. Umemura e T. Ichinose, "Experimental study on the effects of loading history on the ductility capacity of reinforced concrete members " in *13th World Conf. on Earthq. Engrg*, paper 1301, 2004.
- [13] K. Kawashima, H. Ogimoto, R. Hayakawa, e G. Watanabe, "Effect of bilateral excitation on the seismic performance of reinforced concrete bridge columns," in *8th U.S. National Conf. on Earthq. Engrg*, paper 567, 2006.
- [14] L. Li, J. B. Mander, e R. P. Dhakal, "Bidirectional Cyclic Loading Experiment on a 3D Beam-Column Joint Designed for Damage Avoidance," *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 134, 11, pp. 1733-1742, 2008.
- [15] B. Acun, "Energy Based Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Columns " in *Civil Engineering Department: Middle East Technical University*, PhD Thesis, 2010.
- [16] H. Rodrigues, A. Arêde, H. Varum and A. Costa, "Experimental study on the biaxial bending cyclic behaviour of RC columns," *14th European Conference on Earthquake Engineering*, September 2010.
- [17] R. Delgado, P. Delgado, N. Vila-Pouca, A. Arêde, P. Rocha, e A. Costa, "Shear effects on hollow section piers under seismic actions: experimental and numerical analysis," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 7, pp. 377-389, 2009.
- [18] P. Delgado, V. Rodrigues, P. Rocha, M. Santos, A. Arêde, N. Vila Pouca, A. Costa, e R. Delgado, "Experimental Tests on Seismic Retrofit of RC Piers," in *8 NCEE – 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, 2006.
- [19] Y. J. Park, A. H. S. Ang, e Y. K. Wen, "Damage-limiting aseismic design of buildings," *Earthquake Spectra*, vol. 3, No. 1 1987.