

Estudo experimental do comportamento sísmico de pilares de betão armado sujeitos à flexão biaxial

Experimental study of the seismic behaviour of RC columns subjected to biaxial loadings

Hugo Rodrigues

André Furtado

António Arêde

Humberto Varum

Resumo

O estudo do comportamento de pilares de betão armado sujeitos a esforços de flexão biaxial cíclica combinados com carga axial é uma temática ainda pouco aprofundada como se comprova pelo número limitado de trabalhos experimentais que se podem encontrar na literatura. A importância destes estudos é particularmente relevante dado que na resposta tridimensional dos edifícios se verifica este tipo de solicitações nos pilares, sendo reconhecido que esforços de flexão biaxial cíclica tendem a reduzir a capacidade resistente e a aumentar a degradação de rigidez dos pilares de betão armado. Neste estudo é apresentada uma vasta campanha experimental de pilares de betão armado, de diferentes secções geométricas e diferentes armaduras longitudinais, sujeitos a flexão uniaxial e biaxial cíclica combinada com esforço axial constante e/ou variável com diferentes histórias de carregamento. Será apresentada ao longo do estudo uma análise comparativa do comportamento dos pilares sujeitos a flexão uniaxial e biaxial e a influência da história de carregamento, em termos da resposta força-deslocamento, degradação da rigidez e evolução da dissipação de energia.

Abstract

The study of the reinforced concrete columns behaviour subjected to biaxial cyclic loading and axial load is a subject still little depth studied, as evidenced by the reduced number of experimental studies available in the literature. This topic is of full importance since the tridimensional response of the buildings it is observed this type of loading solicitation, and furthermore it is recognized that the biaxial loading reduce the capacity of the reinforced concrete columns and increase the stiffness degradation. In this study a large experimental campaign of reinforced concrete columns, with different geometric section and reinforcement detailing, subjected to uniaxial and biaxial bending combined with axial and variable axial load is presented. The evaluation between the uniaxial and the biaxial response, and the influence of the load path will be performed in terms of hysteretic force-displacement curves, stiffness degradation and energy dissipation.

Palavras-chave: Pilares de BA / Flexão biaxial cíclica / Estudo experimental

Keywords: RC columns / Biaxial cyclic loading / Experimental study

Hugo Rodrigues

Professor Adjunto
RISCO – ESTG, Instituto Politécnico de Leiria
Leiria, Portugal
hugo.f.rodrigues@ipleiria.pt

André Furtado

Investigador
CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
afurtado@fe.up.pt

António Arêde

Professor Associado
CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
aarede@fe.up.pt

Humberto Varum

Professor Catedrático
CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
hvarum@fe.up.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

RODRIGUES, H. [et al.] – Estudo experimental do comportamento sísmico de pilares de betão armado sujeitos à flexão biaxial. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 1. ISSN 2183-8488 (julho 2016) 91-98.

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 de a ação sísmica atuante sobre os edifícios não ocorrer numa única direção e, por outro lado, porque a própria resposta dos edifícios é tridimensional quer pela sua orientação face à ação sísmica, quer pelas suas irregularidades estruturais. O efeito da ação biaxial aplicada sobre um elemento de betão armado conduz a uma aceleração da degradação de rigidez e resistência durante a ação 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 direções principais. Como consequência desta lacuna, o atual 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 unidirecional [1-3].

Apesar de a quantidade de resultados experimentais ser claramente insuficiente, durante os últimos 30 anos diversos investigadores têm dado contributos importantes para o avanço do conhecimento nesta matéria, em particular: Takizawa e Aoyama, 1976 [4], Otani *et al.*, 1980 [5], Saatcioglu *et al.* [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, 2012 [17].

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 ações horizontais cíclicas [17-23]. O principal objetivo da campanha experimental deste trabalho é o estudo do comportamento cíclico uniaxial e biaxial de pilares de betão armado e esforço axial constante. Os resultados serão apresentados em termos da resposta histerética força-deslocamento, degradação da rigidez e dissipação da energia.

2 Estudo experimental de pilares de betão armado

2.1 Descrição das amostras e do *setup* experimental

A presente campanha experimental é composta por quatro séries de pilares de BA construídos com três secções geométricas e disposições de armaduras diferentes, que foram sujeitas a diferentes histórias de carregamentos. Um total de dezasseis pilares com 1,70 m de altura, encastrados numa sapata quadrada de dimensões 1,30 × 1,30 m² em planta com altura de 0,50 m foram divididos em

3 tipos de secções, como ilustra a Figura 1: $0,20 \times 0,40 \text{ m}^2$ (série 1), $0,30 \times 0,40 \text{ m}^2$ (série 2) e $0,30 \times 0,50 \text{ m}^2$ (série 3 e 4). É assumido que o ponto de inflexão de um pilar de 3 m se situa a meia altura deste ($\approx 1,5 \text{ m}$), representando assim o comportamento de um pilar da base de um edifício típico de betão armado quando sujeito a ações sísmicas.

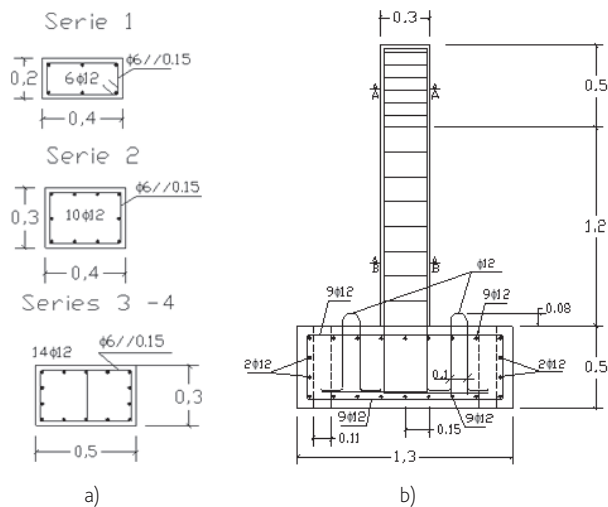


Figura 1 Pilares de betão armado em estudo a) secção transversal e detalhes de armaduras para cada série; b) dimensões gerais e c) *setup* experimental

O *setup* experimental é composto por dois atuadores horizontais (um com capacidade de 500 kN com $\pm 150 \text{ mm}$ de amplitude e outro com capacidade de 200 kN com $\pm 100 \text{ mm}$ de amplitude) e um atuador vertical para aplicação do esforço axial com capacidade para 700 kN, como ilustra a Figura 2. O sistema de reação é composto por 2 estruturas metálicas e uma parede resistente de betão armado. Os pórticos de reação metálicos e as sapatas dos pilares ensaiados foram fixados à laje de reação do laboratório através de varões pré-esforçados de forma a impedir

escorregamentos e/ou fenómenos de derrubamento. Durante os ensaios experimentais garantiu-se que o atuador vertical permanece na mesma posição durante o ensaio enquanto o pilar acomoda o deslocamento horizontal imposto, através de um sistema de deslizamento desenvolvido e colocado entre o topo do pilar e o atuador vertical, minimizando assim o atrito. A transmissão da carga vertical é realizada através de um dispositivo constituído por duas placas com as superfícies de contacto concebidas para minimizar o atrito que ocorre quando se impõem os deslocamentos horizontais. A placa inferior está pousada sobre o provete, enquanto que a placa superior está ligada ao atuador vertical, através de uma rótula que permite as rotações do topo do pilar que ocorrem durante o ensaio quando são impostos os deslocamentos horizontais, e a uma barra rígida à qual está acoplada uma célula de carga que mede a força de atrito que ocorre entre as duas placas [17].

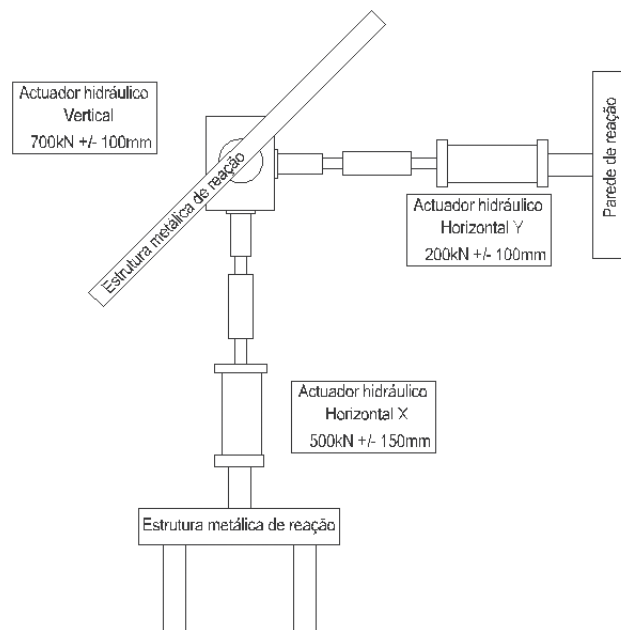


Figura 2 Esquema em planta do *setup* de ensaio de pilares de betão armado sujeitos a flexão biaxial com carga axial desenvolvido no Laboratório LESE

2.2 História de carregamento

Com o objetivo de estudar e caracterizar a resposta de pilares de betão armado sujeitos a flexão biaxial combinada com esforço axial constante e/ou variável, foram aplicados deslocamentos laterais cíclicos com um aumento constante dos níveis de exigência. Cinco histórias de deslocamento foram adotadas para o carregamento horizontal biaxial, ilustrado na Figura 3, e são considerados os seguintes deslocamentos de pico (em mm): 3, 5, 10, 4, 12, 15, 7, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 e 80 mm. Para as séries 1, 2 e 3 foi aplicado esforço axial constante durante o ensaio, tendo a série de pilares 4 sido sujeita a esforço axial variável. Antes dos testes com variação do esforço axial, as capacidades de pico em termos de deslocamento e resistência correspondentes à primeira

Quadro 1 Descrição da campanha experimental e das características das séries de pilares

Séries	Pilares	Geometria [cm × cm]	f_{cm} [MPa]	f_{yk} [MPa]	Esforço axial [kN]	$\frac{v}{N/(A_c f_{cm})}$	Lei de carregamento horizontal
1	PB01-N01	20 × 40	48,35	432,63	170	0,04	Uniaxial – Maior inércia
	PB02-N02						Uniaxial – Menor inércia
	PB12-N03						Cruz
	PB12-N04						Losango
2	PB01-N05	30 × 40	21,40	429,69	300	0,12	Uniaxial – Maior inércia
	PB02-N06						Uniaxial – Menor inércia
	PB12-N07						Losango
	PB12-N08						Quadrado
3	PB01-N09	30 × 50	24,39	429,69	300	0,08	Uniaxial – Maior inércia
	PB02-N10						Uniaxial – Menor inércia
	PB12-N11						Losango
	PB12-N12						Quadrado
4	PC01-NV19	30 × 50	27,92	575,6	300 (± 150)	0,07 (± 0,03)	Uniaxial – Maior inércia
	PC02-NV20						Uniaxial – Menor inércia
	PC12-NV21						Losango
	PC12-NV23						Quadrado

cedência foram avaliadas baseadas em simulações numéricas dos testes uniaxiais. Com esta informação o esforço axial dos pilares foi considerado variável e proporcional aos deslocamentos impostos até ao deslocamento de cedência numericamente estimado. Nos testes biaxiais, a variação do esforço axial é relativa ao deslocamento observado na direção de maior inércia. Depois de atingido o deslocamento de cedência, d_y , o valor do esforço axial foi mantido constante. O valor do esforço axial inicial foi definido em 300 kN com uma variação de ± 150 kN, como se pode observar na Figura 4.

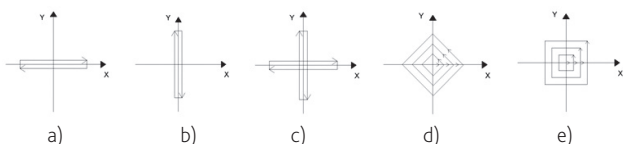


Figura 3 Histórias de deslocamento horizontal: a) uniaxial – maior inércia; b) uniaxial – menor inércia; c) cruz; d) losango e e) quadrado

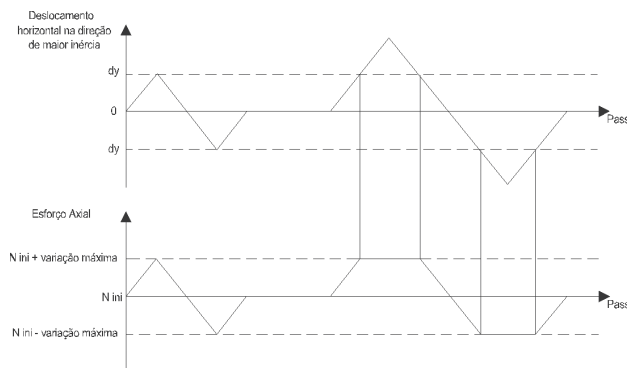


Figura 4 Variação da história de carregamento para os testes com esforço axial variável

Na Quadro 1 são apresentadas as quatro séries de pilares que constituem a presente campanha experimental e respetivas histórias de carregamento, geometria, esforço axial e características mecânicas.

3 Resultados experimentais

Com o objetivo de avaliar o efeito das histórias de carregamento biaxiais na resposta dos pilares de betão armado de cada uma das séries apresentadas em termos de rigidez inicial, resistência máxima, degradação da rigidez e da resistência, foram determinados os seguintes parâmetros: i) força-deslocamento; ii) envoltentes força-deslocamento; iii) degradação da rigidez; iv) rácios entre a força máxima e a ductilidade obtidos pelos ensaios biaxiais e os ensaios uniaxiais, e por fim v) evolução da dissipação de energia.

3.1 Envoltentes força-deslocamento

Através da análise das curvas histeréticas força-deslocamento de todos os pilares ensaiados foi possível retirar algumas conclusões relativas aos seguintes tópicos: i) comparação e identificação das principais diferenças na forma das envoltentes força-deslocamento dos ensaios uniaxiais e biaxiais; ii) avaliação da menor ductilidade observada nos ensaios biaxiais quando comparada com o verificado nos ensaios uniaxiais; iii) interpretação da forte relação entre as respostas nas duas direções do pilar nos ensaios biaxiais; e finalmente iv) caracterização da correlação entre a máxima resistência e a força de cedência observada em cada ensaio. Na Figura 5 é apresentada a resposta histerética força-deslocamento de um pilar sujeito a um ensaio uniaxial *versus* a resposta de um ensaio biaxial, sendo apresentadas na Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9 as envoltentes força-deslocamento das séries 1, 2, 3 e 4 respetivamente. Da análise destes resultados podem-se fazer as seguintes observações:

- A rigidez inicial não é significativamente afetada pela história de carregamento biaxial em ambas as direções do pilar.
- Para cada ciclo dos testes biaxiais, a máxima resistência dos pilares obtida na direção de menor inércia Y é cerca de 30% a 40% inferior quando comparada com os valores obtidos nos testes uniaxiais, como já observado em estudos realizados por outros autores [24, 25]. É observada uma redução entre 15-30% da resistência máxima na direção de maior inércia X entre os testes biaxiais e os uniaxiais. Verificou-se maior redução da capacidade resistente máxima dos pilares de betão armado com a secção 30x50 (Séries 3 e 4), tendo-se observado as mesmas tendências de redução da resistência máxima nos testes com esforço axial constante (Série 3) e variável (Série 4). Estes resultados podem ser comparados com a cláusula 5.4.3.2.1 do Eurocódigo 8 [26] onde é dito que para pilares de betão armado em flexão se deve ter em conta uma redução de 30% da sua resistência em cada direção. Trabalhos anteriores desenvolvidos em pilares de betão armado sujeitos a histórias de deslocamento diagonais obtiveram reduções da capacidade resistente superiores a 30% [21, 22]. Face a estes resultados experimentais o fator de redução da capacidade resistente para pilares de betão armado em flexão desviada deve ser revisto com base nos trabalhos experimentais desenvolvidos até ao momento e disponíveis na literatura.
- Nos pilares das séries 1, 2 e 3 é possível observar que a ductilidade de cedência é reduzida em cerca de 50 a 75% na direção de menor inércia Y, nos ensaios biaxiais comparativamente com os respetivos ensaios uniaxiais, enquanto na direção forte se observa uma redução em cerca de 35%.

- Comparando os resultados dos pilares sujeitos a flexão uniaxial e biaxial, estes demonstram uma relação entre a força máxima e a força de cedência, tendo-se verificado que esta última corresponde a 70% da primeira.
- É possível observar que a história de carregamento biaxial combinada com o esforço axial variável, série 4, reduziu consideravelmente a ductilidade dos pilares em cerca de 20% e 50% na direção de menor inércia Y e maior inércia X, respetivamente. Verificou-se que a história de carregamento horizontal quadrangular conduziu à maior redução de ductilidade nos pilares.
- Como expectável, observou-se uma degradação da resistência mais acentuada nos ensaios biaxiais do que nos ensaios uniaxiais.

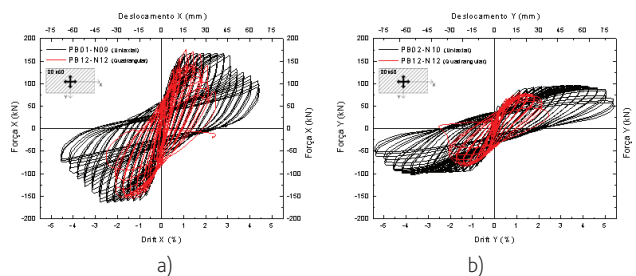


Figura 5 Resposta histerética força-deslocamento de um pilar sujeito a flexão uniaxial vs. flexão biaxial: a) direção X e b) direção Y

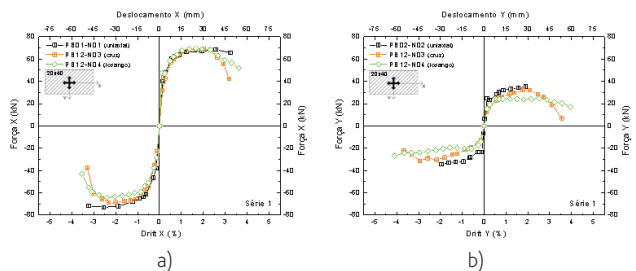


Figura 6 Envoltentes força-deslocamento dos pilares da série 1: a) direção X e b) direção Y

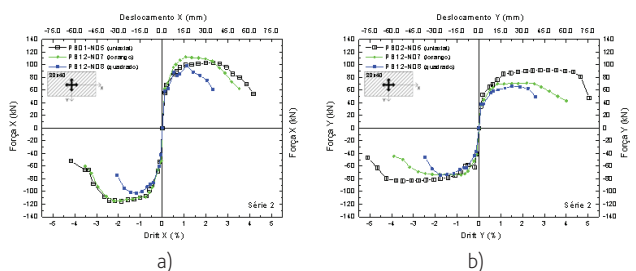


Figura 7 Envoltentes força-deslocamento dos pilares da série 2: a) direção X e b) direção Y

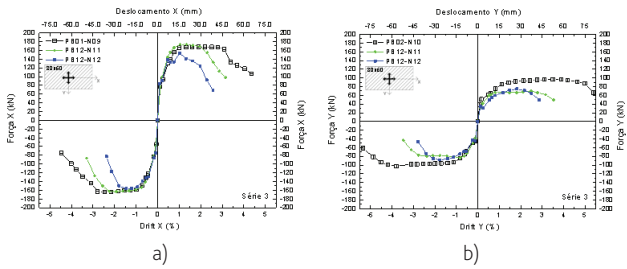


Figura 8 Envolventes força-deslocamento dos pilares da série 3: a) direção X e b) direção Y

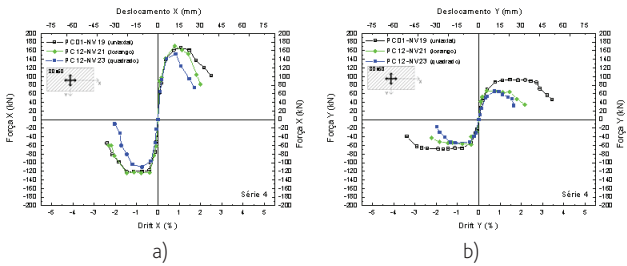


Figura 9 Envolventes força-deslocamento dos pilares da série 4: a) direção X e b) direção Y

3.2 Rácio entre resistência máxima e ductilidade da resposta biaxial vs. uniaxial

A relação entre os resultados dos pilares sujeitos a flexão uniaxial e biaxial está ilustrada na Figura 10a para a resistência máxima e na Figura 10b para a ductilidade μ . Da análise dos resultados pode-se afirmar que as histórias de carregamento biaxiais reduzem em cerca de 30%-40% a resistência máxima dos pilares na direção de menor inércia Y, e cerca de 15-30% na direção de maior inércia X quando comparadas com os resultados obtidos nos testes uniaxiais. A redução da resistência máxima é sempre superior na direção de menor inércia entre 10-15%, isto porque, para pilares retangulares, a resposta dos pilares retangulares na direção de maior inércia X é menos afetada pelo dano prévio na direção de menor inércia do que o observado na resposta dos pilares na direção de menor inércia quando sujeitos a dano prévio na direção de maior inércia.

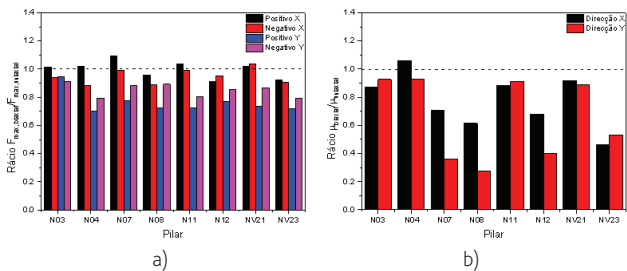


Figura 10 Rácio entre resposta de pilar sujeito a flexão biaxial e uniaxial: a) força máxima e b) ductilidade

Relativamente à ductilidade pode-se observar que a história de carregamento horizontal em quadrado reduz significativamente a

ductilidade dos pilares, particularmente na direção de menor inércia Y. Pode-se observar que os pilares que compõem a série 1 são os sujeitos a menor redução da ductilidade (5-15%), seguidos dos pilares das séries 3 e 4 com uma perda de ductilidade entre 10-55% na direção de maior inércia até 10-65% na direção de menor inércia.

3.3 Degradação da rigidez

A degradação da rigidez ao longo dos ensaios foi avaliada comparando a rigidez secante pico a pico resultante desde o primeiro ciclo de cada deslocamento de pico imposto. Na Figura 11, Figura 12, Figura 13 e Figura 14 estão ilustrados os gráficos da degradação da rigidez para os pilares das séries 1, 2, 3 e 4 nas direções de maior inércia X e direção de menor inércia Y. Dos resultados pode-se observar que a degradação da rigidez apresenta envolventes similares tanto para pilares sujeitos a flexão uniaxial como para pilares sujeitos a flexão biaxial. Pode-se observar igualmente que a história de carregamento não afeta significativamente a evolução da degradação de rigidez.

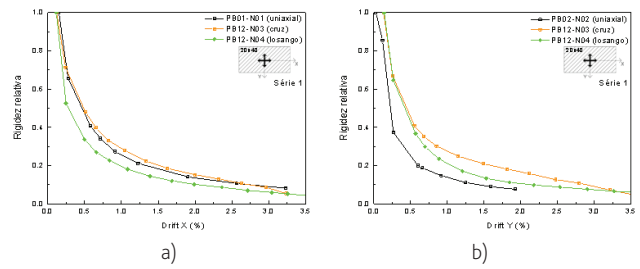


Figura 11 Rigidez relativa dos pilares da série 1: a) direção X e b) direção Y

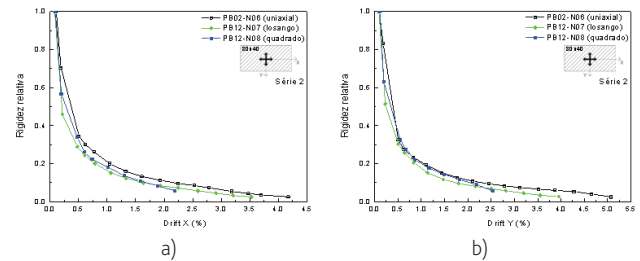


Figura 12 Rigidez relativa dos pilares da série 2: a) direção X e b) direção Y

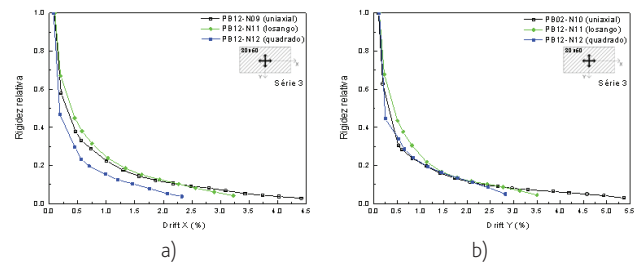


Figura 13 Rigidez relativa dos pilares da série 3: a) direção X e b) direção Y

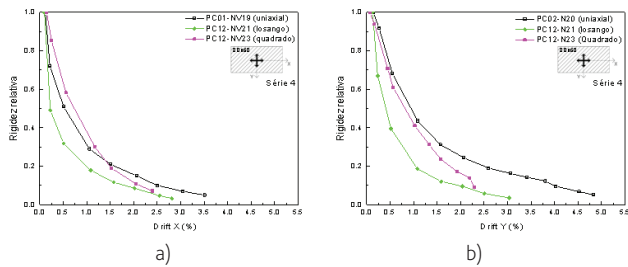


Figura 14 Rigidez relativa dos pilares da série 4: a) direção X e b) direção Y

Pode-se observar igualmente uma diferença entre a resposta dos pilares sujeitos a esforço axial constante (séries 1, 2 e 3) e a resposta dos pilares sujeitos a esforço axial variável, sendo estes últimos alvo de uma redução de rigidez mais pronunciada nos pilares sujeitos a flexão biaxial. A história de carregamento horizontal em quadrado é a que afeta mais significativamente a degradação da rigidez.

3.4 Energia dissipada acumulada

Os resultados relativos à energia dissipada acumulada estão apresentados na Figura 15 e Figura 16, sendo determinada para cada pico de deslocamento a energia dissipada acumulada correspondente ao seu terceiro ciclo. Verificou-se que os pilares sujeitos a flexão biaxial com história de carregamento horizontal composta em losango dissiparam mais energia (cerca de 30%) para menores valores de *drift* máximo. A história de carregamento quadrangular dissipa menos energia que qualquer outra lei biaxial. É importante referir que o *drift* máximo nesta história de carregamento é atingido no deslocamento de canto, correspondente a $\sqrt{2}$ vezes o *drift* atingido ao longo dos eixos de maior e menor inércia. Os pilares sujeitos a esta história de carregamento dissiparam 30 a 45% menos energia que os sujeitos a lei em losango. Os pilares sujeitos a flexão uniaxial foram os que dissiparam menos energia, nomeadamente os pilares testados apenas na direção de menor inércia. As mesmas observações foram feitas aos pilares da série 4 sujeitos ao esforço axial variável.

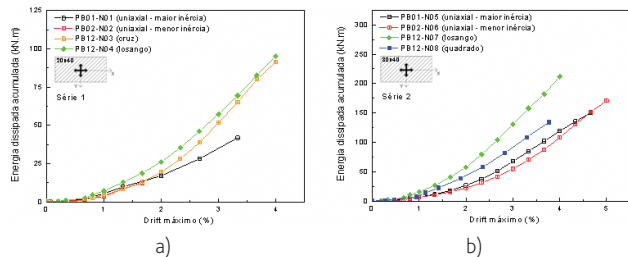


Figura 15 Energia dissipada acumulada: a) série 1 e b) série 2

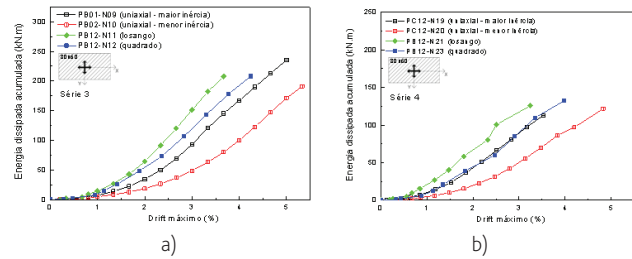


Figura 16 Energia dissipada acumulada: a) série 3 e b) série 4

4 Conclusões

Foi apresentada uma campanha experimental composta por 16 pilares de betão armado, divididos em 4 séries diferentes de acordo com as dimensões geométricas, detalhes de armaduras e tipo de carregamento axial. O objetivo principal foi comparar a resposta de pilares sujeitos a flexão uniaxial com pilares sujeitos a flexão biaxial (com três histórias de carregamento horizontal diferentes). Adicionalmente, foi ainda comparada a resposta de pilares sujeitos a flexão uniaxial e biaxial combinada com esforço axial constante e variável.

Através dos resultados foi observado que a rigidez inicial não é significativamente afetada por histórias de carregamento biaxial. No entanto, observou-se também que a flexão biaxial tende a reduzir a resistência máxima dos pilares em 8% na direção de maior inércia e de 20% na direção de menor inércia.

Verificou-se que a degradação da rigidez é afetada pela variação do esforço axial combinado com histórias de carregamento biaxial. De facto, quando sujeitos a esforço axial constante a degradação da rigidez é suave quando comparada com a dos pilares sujeitos a esforço axial variável.

A ductilidade dos pilares testados foi reduzida, quando comparada a resposta dos pilares sujeitos a flexão uniaxial e biaxial. De facto a flexão biaxial reduziu a ductilidade dos pilares em aproximadamente 35% na direção de maior inércia e em 50 a 75% na direção de menor inércia.

Por fim, pode-se concluir que os pilares sujeitos a flexão biaxial permitiram uma maior dissipação de energia, comparando com o resultado obtido pelos pilares sujeitos a flexão uniaxial, como reconhecido por outros autores. Verificou-se que as histórias de carregamento horizontal quadrangular e em losango são as que dissipam menos e mais energia respetivamente.

Referências

- [1] CEB – "RC frames under earthquake loading", *Lausanne Bulletin* 220, 1996.
- [2] M. E. Marante; J. Flórez-López – "Model of damage for RC elements subjected to biaxial bending", *Engng Structures*, vol. V. no. 24, 2002.
- [3] T. Paulay; 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. Engng and Struct. Dynamics*, vol. V. 4, pp. 523–552, 1976.
- [5] S. Otani; V. W. T. Cheung; S. S. Lai – "Reinforced concrete columns subjected to biaxial lateral load reversals", presented at the 7th World Conf. on Earthq. Engng V. 6, 525–532, 1980.
- [6] M. Saatcioglu; G. Ozcebe – "Response of reinforced concrete columns to simulated seismic loading", *ACI Structural Journal*, vol. no. 86–51, 1989.
- [7] S. N. Bousias; G. Verzelletti; M. N. Fardis; G. Magonette – "RC columns in cyclic biaxial bending and axial load", presented at the 10th World Conf. on Earthq. Engng, 3041–3046, Madrid, 1992.
- [8] J.-K. Kim; S.-S. Lee – "The behaviour of reinforced concrete columns subjected to axial force and biaxial bending", *Engineering Structures*, vol. no. 23, pp. 1518–1528, 2000.
- [9] F. Qiu; W. Li; P. Pan; J. Qian – "Experimental tests on RC columns under biaxial quasi-static loading", *Engng Structures*, vol. 24, pp. 419–428, 2002.
- [10] K. Tsuno; R. Park – "Experimental study of reinforced concrete bridge piers subjected to bi-directional quasi-static loading", *Struct. Engng Structures, JSCE*, vol. 21, no. 1 11s–26s, 2004.
- [11] H. Nishida; S. Unjoh – "Dynamic response characteristic of reinforced concrete column subjected to bilateral earthquake ground motions", presented at the 13th World Conf. on Earthq. Engng, paper 576, 2004.
- [12] H. Umemura; T. Ichinose – "Experimental study on the effects of loading history on the ductility capacity of reinforced concrete members", presented at the 13th World Conf. on Earthq. Engng, paper 1301, 2004.
- [13] K. Kawashima; H. Ogimoto; R. Hayakawa; G. Watanabe – "Effect of bilateral excitation on the seismic performance of reinforced concrete bridge columns", presented at the 8th U.S. National Conf. on Earthq. Engng, paper 567, 2006.
- [14] L. Li; J. B. Mander; R. P. Dhakal – "Bidirectional Cyclic Loading Experiment on a 3D Beam-Column Joint Designed for Damage Avoidance", *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 134, no. 11, pp. 1733–1742, 2008.
- [15] B. Acun – "Energy Based Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Columns", PhD Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, PhD Thesis, 2010.
- [16] S.-Y. Chang – "Experimental Studies of Reinforced Concrete Bridge Columns under Axial Load Plus Biaxial Bending", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, pp. 12–25, January 2010.
- [17] H. Rodrigues – "Biaxial seismic behaviour of reinforced concrete columns", PhD Thesis, Departamento de Engenharia, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012.
- [18] H. Rodrigues; A. Arêde; H. Varum; A. G. Costa – "Experimental evaluation of rectangular reinforced concrete column behaviour under biaxial cyclic loading", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2012.
- [19] H. Rodrigues; H. Varum; A. Arêde; A. Costa – "A comparative analysis of energy dissipation and equivalent viscous damping of RC columns subjected to uniaxial and biaxial loading", *Engineering Structures*, vol. 35, pp. 149–164, 2012.
- [20] H. Rodrigues; A. Arêde; H. Varum; A. G. Costa – "Damage evolution in reinforced concrete columns subjected to biaxial loading", *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 11, pp. 1517–1540, 2013.
- [21] H. Rodrigues; A. Arêde; A. Furtado; P. Rocha – "Seismic behavior of strengthened RC columns under biaxial loading: An experimental characterization", *Construction and Building Materials*, vol. 95, pp. 393–405, 2015.
- [22] H. Rodrigues; A. Arêde; A. Furtado; P. Rocha – "Seismic Rehabilitation of RC Columns Under Biaxial Loading: An Experimental Characterization", *Structures*, vol. 3, pp. 43–56, 2015.
- [23] H. Rodrigues; A. Furtado; A. Arêde – "Behavior of Rectangular Reinforced-Concrete Columns under Biaxial Cyclic Loading and Variable Axial Loads", *Journal of Structural Engineering*, 2015.
- [24] K. Tsuno; R. Park – "Experimental study of reinforced concrete bridge piers subjected to bi-directional quasi-static loading", *Struct. Engng Structures, JSCE*, vol. 21, no 1 11s–26s, 2004.
- [25] H. Mutsuyoshi; A. Machida; W. Tanzo; N. Mashiko – "Inelastic seismic response of RC bridge pier using pseudodynamic test method", *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol. 16, pp. 265–272, 1994.
- [26] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1-1: General rules, seismic actions and rules for buildings, B. European Committee for Standardization, Belgium, 2003.