CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PILARES DE BETÃO REPARADOS E REFORÇADOS SUJEITOS À FLEXÃO BIAXIAL

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF REPAIRED AND/OR STRENGTHENED RC COLUMNS SUBJECTED TO BIAXIAL LOAD

H. Rodrigues[1], A. Arêde[2], A. Furtado[2], P. Rocha[3]

[1] RISCO, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria
[2] CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto
[3] CONSTRUCT-LESE, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viana do Castelo

RESUMO

A resposta dos elementos de betão armado quando sujeitos a flexão biaxial cíclica é reconhecida como um tópico de extrema importância para edifícios construídos em zonas sismicamente ativas, mas o estado da arte demonstra que apenas um número reduzido de ensaios foram conduzidos no sentido de caracterizar este comportamento. Ensaios experimentais de pilares reforçados ou reparados sujeitos a flexão biaxial são ainda mais reduzidos. Deste modo, foi realizada uma campanha de ensaios experimentais de pilares de betão armado previamente ensaiados e/ou originais, sujeitos a um processo de reparação e reforço através das técnicas de encamisamento com bandas de aço e de mantas e bandas de CFRP, com o objetivo de avaliar o seu efeito/eficiência na degradação da rigidez, ductilidade e dissipação de energia.

ABSTRACT

The response of reinforced concrete (RC) elements under biaxial (2D) cyclic bending moment is recognized as a very important research topic for building structures in earthquake prone regions, but experimental research work on the inelastic response of RC members under compression axial force and 2D lateral cyclic bending loading conditions is currently very limited. Experimental tests of RC repaired and/or strengthened columns subjected to biaxial load are further reduced. Thus, in order to analyze and assess different strategies for the seismic repairing and retrofitting of RC columns, an experimental campaign was performed using the CFRP jacketing and steel technique, with the main purpose of evaluate the effect/efficiency in the stiffness degradation, ductility and energy dissipation.

1. INTRODUÇÃO

O estudo experimental sobre a resposta inelástica de pilares de betão armado sujeitos a esforços de compressão e flexão biaxial cíclica é ainda muito limitado. Dificuldades associadas à complexidade dos *setups* experimentais justificam esta lacuna. Recentemente. Rodrigues (Rodrigues 2012) realizou uma campanha experimental composta por 24 pilares sujeitos a flexão biaxial, demonstrando a influência que os diversos tipos de configuração de carregamento têm na resposta do elemento. Neste trabalho é apresentada uma campanha experimental de 14 pilares

reparados e/ou reforçados sujeitos a flexão biaxial e esforço axial variável.

2. REPARAÇÃO E REFORÇO DE PILARES DE BETÃO ARMADO

2.1 Considerações gerais

Considerando os resultados de trabalhos anteriores (Priestley, Seible et al. 1996; Monti, Nisticó et al. 2001; Rodrigues, Arêde et al. 2013; Rodrigues, Arêde et al. 2014) realizou-se uma extensa campanha experimental composta por 14 pilares de betão armado divididos em 2 grupos:

1) 5 Pilares construídos com as mesmas características geométricas e detalhes de armaduras foram ensaiados biaxialmente para diferentes histórias de carregamento. Após ensaiados, 4 destes pilares foram reparados e ensaiados com diferentes estratégias: aumento da armadura transversal, encamisamento com bandas (EB-CFRP) e mantas (EM-CFRP) de CFRP e com bandas de aço (EB-S) (Fig. 1);
2) 9 Pilares construídos com as mesmas características geométricas e detalhe de armaduras foram reforçados com a 2 das técnicas anteriormente mencionadas e foram ensaiados biaxialmente para diferentes histórias de carregamento.

2.2 Processo de reforço/reparação

Na presente campanha experimental foram estudados pilares de betão armado previamente ensaiados e/ou originais que foram submetidos às técnicas de reforço mencionadas anteriormente. O processo de reparação e/ou reforço a que foram sujeitos envolveu os seguintes procedimentos:

a) b) c)

Fig. 1 – Pilar de betão armado reforçado a) encamisamento com manta de CFRP b) encamisamento de bandas de CFRP e c) de aço.

Reparação:

a) Delimitação da área a reparar (a região crítica onde se forma a rótula plástica), tipicamente desde a base do pilar até 50 cm de altura;
b) Remoção e limpeza do betão danificado;
c) Alinhamento e reposição de armaduras longitudinais, que requerem o corte e soldadura de pequenos pedaços de varões fraturados e encurvados por forma a garantir o seu alinhamento (Fig. 2a);
d) Reposição das armaduras transversais com menor espaçamento (Fig. 2b);
e) Aplicação de um novo betão, com aditivos para aceleração de presa;

Reforço:

f) Aplicação da técnica de reforço exterior com o auxílio de resina epoxy para uma melhor aderência e solidarização dos materiais (Fig. 2c)

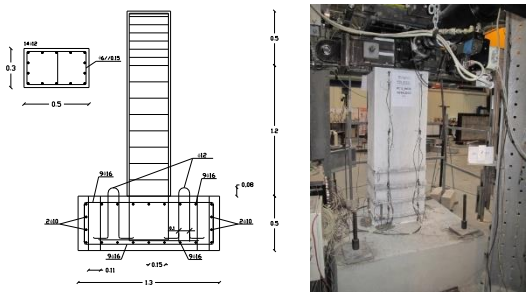
a) b) c)

Fig. 2 – Processo de reparação/reforço de pilares de betão armado.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Descrição da amostra e do setup experimental

Os pilares têm uma secção transversal de 30x50cm^2 e 1,70m de altura encontrando-se en-castrados a uma sapata quadrada de dimensões 1,30x1,30m^2 em plano com 0,50m de altura. A secção transversal e a disposição das armaduras são apresentadas na Fig. 3a.



a) b)

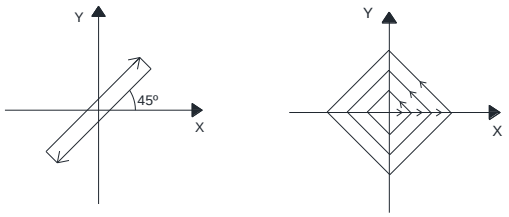
Fig. 3 – a) Dimensões e detalhes de armaduras b) Visão geral do setup experimental.

É assumido que o ponto de inflexão de um pilar de 3m de altura está localizado a meia altura (1,5m), representando assim o comportamento de um pilar da base de um edifício típico quando submetido a ações sísmicas.

Pode-se observar no Setup experimental o sistema de aplicação de carga. Para que a força vertical se mantenha na mesma posição durante o ensaio foi usado um dispositivo de deslizamento (situado entre o atuador e o topo do pilar), construído para minimizar os efeitos de deslizamento.

3.2 Histórias de carregamento

A presente campanha experimental é composta, como já foi dito anteriormente, por 2 grupos de pilares: i) pilares previamente ensaiados que foram reparados e reforçados e ii) pilares sem qualquer dano mas reforçados. Quatro dos pilares referentes ao grupo i) foram previamente ensaiados e submetidos a processos reparação e reforço. Na Tabela 1 ilustra-se a técnica de reforço a que foram sujeitos e igualmente a sua história de carregamento, mais precisamente o tipo de carregamento biaxial. Os pilares do grupo ii) foram reforçados, sem qualquer dano prévio, com recurso a 2 técnicas de encamisamento como se pode observar na Tabela 2 e foram submetidos a diferentes histórias de carregamento biaxial. Para a presente campanha de ensaios foi adotado esforço axial constante igual a 300kN, com as trajetórias biaxiais de deslocamentos horizontais impostos ilustrados na Fig. 4.



Diagonal 45º Losango

Fig. 4 – Histórias de carregamento horizontal.

Tabela 1 – Grupo i) Pilares reparados e reforçados.

Pilar	f_{cm} (MPa)	Trajetória deslocam. horizontal	Técnica de Reforço Exterior
PC_N05	23,3	Diagonal 45º	Original
PC_N03R			*
PC_N04R			EB-CFRP
PC_N05R			EM-CFRP
PC_N06R			EB-S

*Reforçado apenas com aumento do número de estribos

Tabela 2 – Grupo ii) Pilares reforçados.

Pilar	f_{cm} (MPa)	Trajetória deslocam. horizontal	Técnica de Reforço Exterior
PC_N10S	8,4	Diagonal 45º	EB-CFRP
PC_N11S		Diagonal 45º	EB-S
PC_N12S		Diagonal 45º	EB-CFRP
PC_N13	14,8	Losango	Originais
PC_N14		Diagonal 45º	Originais
PC_N15S	14,8	Losango	EB-S
PC_N16S		Diagonal 45º	EB-S
PC_N17S		Losango	EB-CFRP
PC_N18S		Diagonal 45º	EB-CFRP

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Envolventes Força-Deslocamento

4.1.1 Grupo i)

Através das envolventes força-deslocamento dos pilares ensaiados pode-se observar que, após serem reforçados, têm tendência a possuir um patamar de cedência maior. Verifica-se igualmente que a rigidez inicial nos pilares reforçados é semelhante quando comparada com a resposta do pilar original, como se pode observar na Fig. 5.

Observa-se também que o pilar reforçado apenas por aumento da armadura transversal

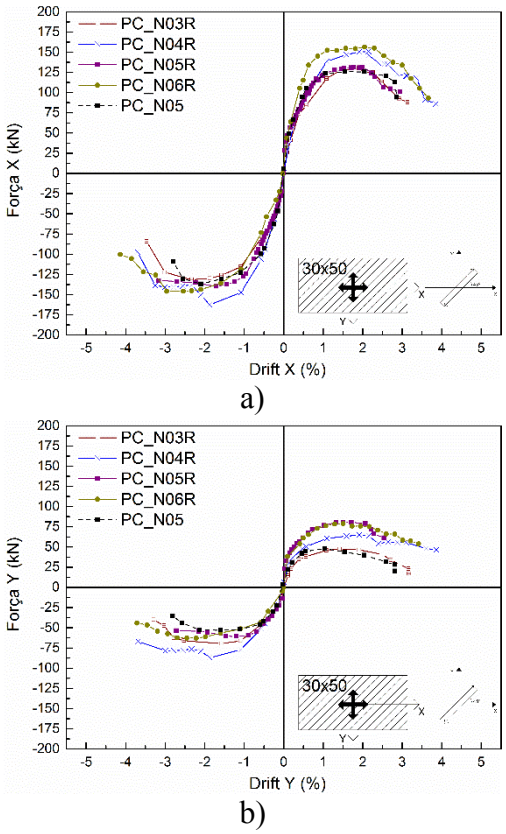


Fig. 5 – Envolventes força-deslocamento para os pilares do grupo i a) Maior b) Menor inércia.

(PC_N03R) possui idêntico valor de resistência máxima que o pilar original PC_N05. Os restantes 3 pilares reforçados possuem cerca de 20-50% mais resistência máxima na direção de menor inércia (Fig. 5b) e cerca de 5-15% (Fig. 5a) na direção de maior inércia.

4.1.2 Grupo ii)

A fim de estudar a influência da história de carregamento biaxial em pilares de betão armado reforçados, sem dano prévio, apresenta-se as envolventes para cada técnica de reforço independentemente.

Através da observação das envolventes força-deslocamento dos pilares reforçados do Grupo ii) pode-se observar igualmente a tendência para a existência de maiores patamares cedência. A rigidez inicial dos pilares reforçados é semelhante para as duas técnicas de reforço e para as duas histórias de carregamento biaxial. Comparando a resistência máxima em cada direção dos pilares reforçados com o original verificou-se que são encontrados valores superiores para os pilares sujeitos ao carregamento horizontal em losango (aumento em cerca de 5-25% da resistência máxima na direção de maior inércia e 5-10% na direção de menor inércia). Nos testes com o carregamento horizontal diagonal - 45º os valores da resistência máxima são inferiores ao carregamento em losango, como ilustrado na Fig. 6 e Fig. 7.

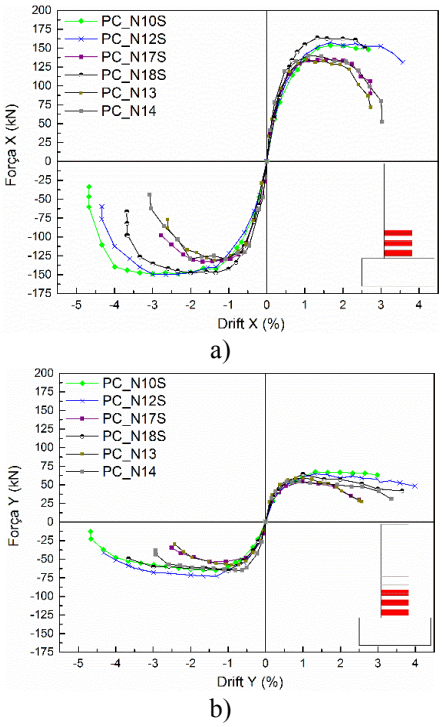


Fig. 6 – Envolventes força-deslocamento para os pilares do grupo ii) EB-CFRP: a) Maior b) Menor inércia.

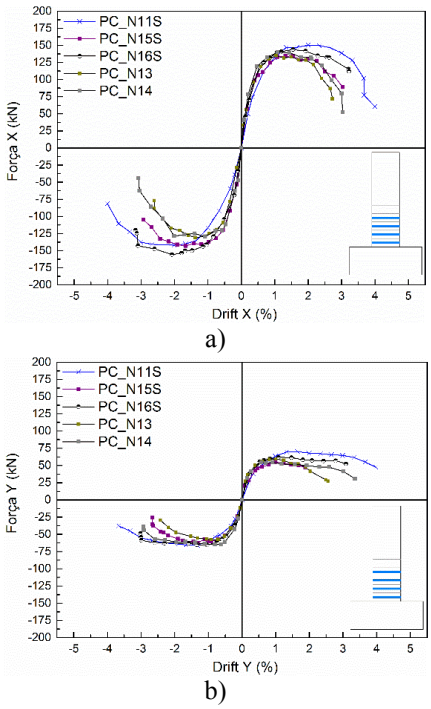


Fig. 7 – Envolventes força-deslocamento para os pilares do grupo ii): EB-S a) Maior b) Menor inércia.

Os pilares reforçados apresentam maior ductilidade do que os pilares originais, principalmente na direção de menor inércia.

4.2 Degradação de rigidez

4.2.1 Grupo i)

A avaliação da degradação de rigidez foi realizada comparando a rigidez secante pico após pico do primeiro ciclo para cada deslocamento imposto. Estudos recentes demonstram que a história de carga tem pouca influência na evolução da degradação da rigidez de um pilar de betão armado quando solicitado biaxialmente (Rodrigues, 2012).

Verifica-se para os pilares do grupo i) que a degradação da rigidez é muito diferente comparativamente com o pilar original, como se pode observar na Fig. 8. A maioria dos pilares reforçados apresentam mais degradação de rigidez do que o pilar PC_N05 e o pilar PC_N03R. A degradação da rigidez é superior para menores valores de deslocamento nos pilares reforçados do que o observado no pilar original.

Assim pode-se concluir que a introdução de soluções de reforço externo implicou uma maior degradação da rigidez durante os ensaios experimentais, como se pode observar na Fig. 8.

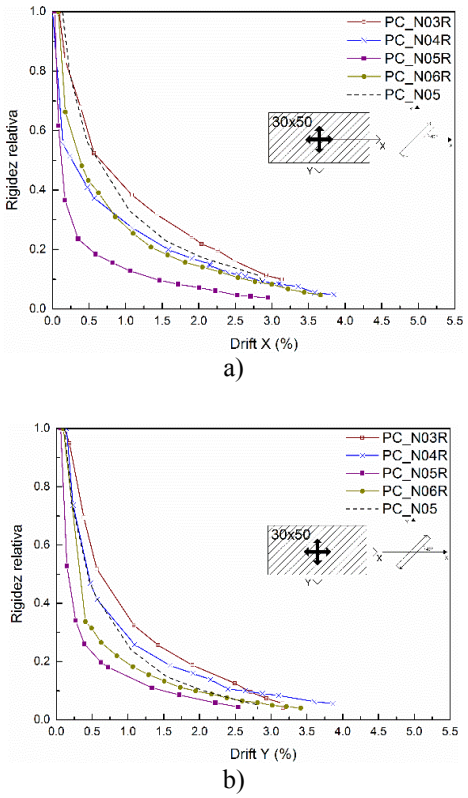


Fig. 8 – Degradação da rigidez para os pilares do grupo i: a) Maior, b) Menor inércia.

4.2.2 Grupo ii)

Os pilares reforçados do Grupo ii) apresentam uma degradação de rigidez inferior à observada nos pilares originas, tanto no caso dos reforços com bandas de CFRP como de aço (Fig. 9 e Fig. 10).

Os pilares apresentam maior degradação de rigidez na direção de maior inércia para menores valores de deslocamento quando comparado com os mesmos na direção de menor inércia.

Observa-se ainda que os pilares reforçados possuem uma menor degradação da rigidez para a história de deslocamentos biaxial em losango do que a diagonal 45º, como se pode observar nas Fig. 9 e Fig. 10.

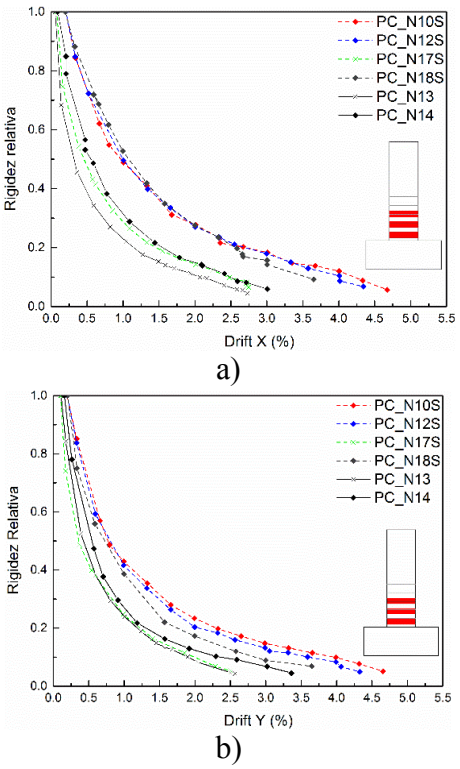
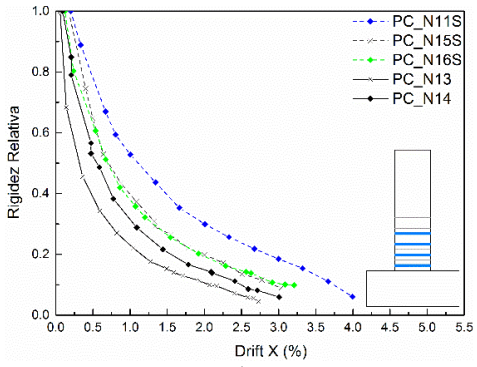


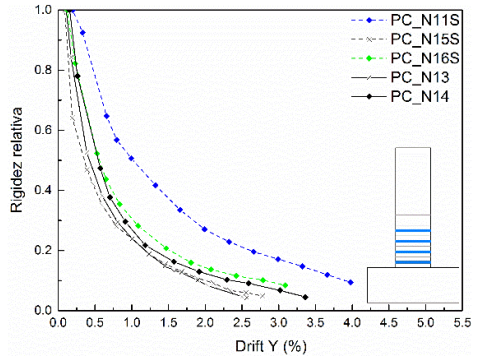
Fig. 9 – Degradação da rigidez para os pilares do grupo ii): a) Maior, b) Menor inércia – EB-CFRP.

4.3 Energia dissipada

Para a presente campanha são apresentados igualmente os resultados em termos de energia dissipada acumulada para os dois grupos. Para cada deslocamento imposto é



a)



b)

Fig. 10 – Degradação da rigidez para os pilares do grupo ii): a) Maior, b) Menor inércia – EB-S.

ilustrado o valor da energia dissipada correspondente ao seu terceiro ciclo.

4.3.1 – Grupo i)

Os pilares PC_N04R e PC_N05R exibem uma dissipação de energia semelhante entre si, enquanto o pilar PC_N06R apresenta ligeiramente mais dissipação de energia. Por sua vez o pilar PC_N03R possui valores semelhantes ao pilar original como se pode observar na **Fig. 11**. Em suma, os pilares reparados e reforçados externamente apresentam maior capacidade de dissipação de energia comparativamente com o pilar original e o apenas reforçado internamente através do aumento da armadura transversal.

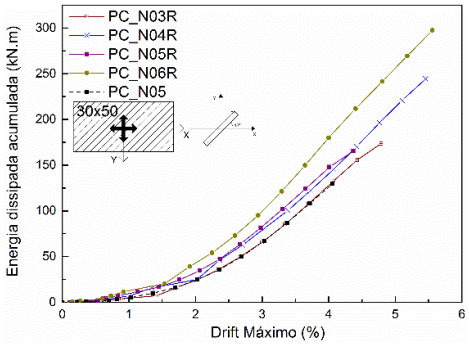


Fig. 11 – Energia dissipada acumulada – Grupo i).

4.3.2 – Grupo ii)

Os pilares reforçados por ambas as técnicas de reforço apresentam valores semelhantes ou superiores de dissipação de energia quando comparados com os pilares originais. Os pilares reforçados submetidos à história de carregamento biaxial em losango apresentam a maior capacidade de dissipação de energia. Por fim, observa-se que os pilares reforçados com bandas de CFRP apresentam 5-20% mais capacidade de dissipação de energia que a técnica de reforço com bandas de aço como se pode observar nas Fig. 12e Fig. 13.

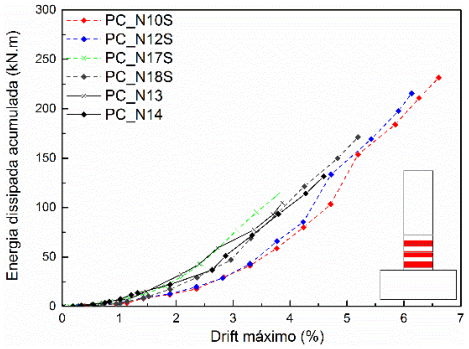


Fig. 12 – Energia dissipada acumulada – Grupo ii) EB-CFRP.

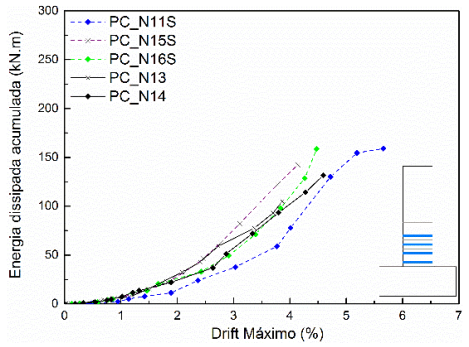


Fig. 13 – Energia dissipada acumulada - Grupo ii) EB-S.

5. CONCLUSÕES

Foi realizada uma campanha experimental composta por 14 pilares de betão armado (3 originais, 4 reparados/reforçados e 7 reforçados), sujeitos a flexão biaxial cíclica, com o objetivo de estudar a eficiência de diferentes soluções de reforço e a influência das histórias de carga em pilares reforçados.

Os resultados experimentais dos pilares do grupo i), sujeitos a um processo de

reparação e reforço, apresentam valores de rigidez inicial iguais ou ligeiramente inferiores ao observados no pilar original. Verifica-se que estes apresentam maior resistência máxima e maior ductilidade do que o pilar original.

A reparação e introdução de soluções de reforço externo implicaram uma maior degradação da rigidez durante os ensaios experimentais dos pilares do grupo i), e ao mesmo tempo aumento a sua capacidade dissipativa de energia.

Relativamente aos pilares do grupo ii), verificou-se que os pilares reforçados apresentam igualmente valores semelhantes em termos de rigidez inicial e valores superiores em termos de resistência máxima (principalmente para a lei de deslocamentos em losango e para a técnica de reforço de encamisamento com bandas de CFRP. Todos os pilares reforçados apresentam menor degradação de rigidez que os pilares originais e maior capacidade dissipativa de energia. Os pilares submetidos à lei de deslocamento biaxial diagonal a 45º tem tendência a maior degradação de rigidez e menor dissipação de energia que a lei em losango.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o financiamento da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal, nomeadamente através do projeto de investigação PTDC/ECM/102221/2008 – "Structural assessment and strengthening of reinforced concrete columns under horizontal bi-axial cyclic loading".

REFERÊNCIAS

Monti, G., N. Nisticó, et al. (2001). "Design of FRP jackets for upgrade of circular bridge piers." J. Compos. Constr. **5**: 94-101.

Priestley, M., F. Seible, et al. (1996). Seismic design and retrofit of bridges.

Rodrigues, H. (2012). Biaxial seismic behaviour of reinforced concrete columns. PhD Thesis, Universidade de Aveiro.

Rodrigues, H., A. Arêde, et al. (2014). Experimental study on repaired and retrofitted of RC columns under biaxial cyclic loading. Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Turkey.

Rodrigues, H., A. Arêde, et al. (2013). "Damage evolution in reinforced concrete columns subjected to biaxial loading " Earthquake Engineering and Structural Vibration **42**: 239-259.