

**CÓDIGO: 3.3.03****ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE DIFERENTES TÉCNICAS DE REFORÇO EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO COM R/C VAZADO****Furtado, André<sup>1</sup>, Rodrigues, Hugo<sup>1,2</sup>, Varum, Humberto<sup>1</sup>, Costa, Aníbal<sup>1</sup>**1: Departamento de Engenharia Civil  
Universidade de Aveiro, Portugal[andrefurtado@ua.pt](mailto:andrefurtado@ua.pt); [hrodrigues@ua.pt](mailto:hrodrigues@ua.pt); [hvarum@ua.pt](mailto:hvarum@ua.pt); [agc@ua.pt](mailto:agc@ua.pt)2: Departamento de Engenharia Civil  
ESTG, Instituto Politécnico de Leiria**PALABRAS CLAVE:** Edifícios de betão armado, paredes de alvenaria de enchimento, rés-do-chão vazado, *soft-storey*, vulnerabilidade sísmica, técnicas de reforço.**RESUMO**

A avaliação e o reforço de edifícios existentes de betão armado, por forma garantir a sua segurança face a uma dada ação sísmica, é um tópico de elevada importância e premência, tal como comprovado nos recentes sismos ocorridos por todo o mundo, e particularmente em países do sul da Europa. Assim, reconhece-se que deve dar-se atenção à investigação na área da análise e reforço das construções existentes. Algumas soluções arquitetónicas adotadas até aos anos 70, combinadas com a prática naquele período do projeto estrutural, particularmente no simplificado ou inexistente cálculo sísmico, fizeram com que muitas dessas estruturas tenham associada uma vulnerabilidade elevada, podendo sofrer danos consideráveis se solicitadas por um sismo.

O objetivo principal deste trabalho é o estudo da eficiência de diferentes técnicas de reforço aplicadas a um edifício existente de betão armado com paredes de alvenaria de enchimento com comportamento potencialmente condicionado pelo mecanismo tipo *soft-storey*. Numa primeira fase foi também analisada a influência, já comprovada em trabalhos anteriores, da presença dos painéis de alvenaria de enchimento na resposta dos edifícios face a uma ação sísmica, sendo avaliado de seguida a sua vulnerabilidade sísmica. Após avaliada a sua vulnerabilidade foram adotadas no modelo numérico diferentes técnicas de reforço, nomeadamente: o encamisamento de pilares recorrendo ao betão armado, a adição de paredes resistentes de betão armado, a introdução de contraventamentos metálicos com e sem elementos dissipadores de energia. Os resultados das análises da resposta do edifício reforçado com as várias técnicas são confrontados com os respetivos resultados da estrutura original, deduzindo-se sobre a melhoria do desempenho estrutural com cada tipo de reforço estudado.

**1. INTRODUÇÃO**

A qualidade do património construído assume um papel fundamental na qualidade da vida das pessoas dado que estas interagem continuamente com espaços construídos quer no trabalho ou em lazer. Em particular a segurança dos edifícios é uma exigência funcional da sociedade civil e permanece uma grande preocupação em zonas sísmicamente ativas. Sismos recentes como os de Sichuan (República Popular da China) em 2008, o de Áquila (Itália) em 2009, o de Porto Príncipe (Haiti) em 2010 e o de Lorca (Espanha) em 2011 têm demonstrado que alguns edifícios de betão armado com paredes de alvenaria de enchimento possuem uma elevada vulnerabilidade face a ações sísmicas.

No dimensionamento estrutural deste tipo de edifícios a presença das paredes de alvenaria de enchimento não é considerada em termos de resistência mas unicamente como ação. De facto esta opção em conjunto com a distribuição irregular quer em altura quer em planta poderá introduzir no edifício quando mecanismos de comportamento imprevistos, alterando assim a resposta estrutural prevista [1]. Um mecanismo muito comum que se tem verificado em sismos recentes é o mecanismo de piso flexível ou *soft-storey*.

## 2. DANOS EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO COM PAREDES DE ALVENARIA FACE A AÇÕES SÍSMICAS

Tem-se verificado que a regulamentação para o dimensionamento e verificação da segurança às ações sísmicas das estruturas é fundamental para a redução do risco sísmico dos edifícios, mas não é suficiente. Se a regulamentação para o cálculo estrutural não for corretamente aplicada na conceção do projeto, ou se não existir um apropriado controlo durante a execução da construção podem-se conceber estruturas vulneráveis face a este tipo de ações. Por forma a garantir uma boa resposta estrutural face às ações sísmicas é necessário garantir a qualidade quer do projeto quer da construção. Sismos recentes têm comprovado que a qualidade destas duas vertentes, em especial da qualidade da construção é altamente condicionante do desempenho global da estrutura face a estas ações.

Os edifícios em Portugal possuem na sua maioria paredes de alvenaria de enchimento e mesmo sendo um elemento relativamente frágil, desprezar a sua contribuição na resposta estrutural quando solicitada por uma ação sísmica poderá não ser uma medida pelo lado da segurança, podendo reduzir drasticamente o período da estrutura agravando assim a solicitação esperada, assim como podem introduzir mecanismos no edifício inesperados [2].

Irregularidades de rigidez, massa ou resistência quer em planta quer em altura podem resultar numa distribuição das forças e da deformação muito diferentes daquelas que surgem em edifícios regulares quando sujeitos a ações sísmicas [3]. Um tipo de irregularidade muito comum nos edifícios é a existência de pisos vazados (nomeadamente o piso térreo) para a localização de estacionamento, lojas ou simplesmente por opções arquitetónicas. Os pisos onde se verifica este tipo de irregularidade assumem-se como os pisos mais vulneráveis do edifício onde ocorre o mecanismo de *soft-storey*. Os pilares destes pisos quando sujeitos a uma ação sísmica sofrem um deslocamento muito elevado podendo originar levar mesmo originar o seu colapso [4]. O mecanismo de *soft-storey* é caracterizado pela concentração do deslocamento num determinado piso onde se verifique irregularidade a nível de rigidez (quer seja de elementos estruturais ou não estruturais) podendo dar origem ao colapso do mesmo.

## 3. TÉCNICAS DE REFORÇO SÍSMICO EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO

A definição da técnica de reforço sísmico e do tipo de intervenção a adotar por forma a garantir o comportamento eficiente de um edifício é um processo bastante complexo pois existem fatores que condicionam este processo tais como: questões socioeconómicas, o binómio custo-importância do edifício, a duração do trabalho/interrupção da utilização do edifício, a funcionalidade e compatibilidade estética e arquitetónica da intervenção com o projeto inicial [5].

Em qualquer caso a seleção da estratégia de reforço a adotar para um edifício e a sua implementação, deve ser desenvolvida com base nos resultados de uma prévia avaliação estrutural rigorosa. As estratégias de reforço sísmico das estruturas podem ser classificadas em dois grandes grupos [6]:

- Reabilitação e/ou melhoramento do sistema estrutural global;
- Reabilitação e/ou reforço do sistema local ou dos elementos estruturais.

A estratégia de reforço do sistema global é adequada se a maioria dos elementos não forem frágeis e tiverem um bom comportamento face a solicitações sísmicas na estrutura reabilitada. No caso das estruturas em que muitos dos seus elementos possuam um deficiente comportamento face a uma ação sísmica, dificilmente apenas as estratégias de reforço local serão suficientes por forma a garantir uma boa

resposta estrutural. Na maioria dos casos a melhor solução de melhoramento do comportamento sísmico da estrutura passa pela combinação de soluções pertencentes a estas duas famílias de estratégias [7]. Qualquer que seja a estratégia adotada, esta não deverá prejudicar a resposta estrutural e respetivamente a segurança de nenhum elemento estrutural em nenhuma característica [8].

### 3.1 Técnicas de reforço global da estrutura

As técnicas de reforço associadas a uma estratégia de reforço global da estrutura são na grande maioria das situações menos custosas que o reforço de todos os elementos estruturais, especialmente se este tipo de intervenção obrigar à interdição temporária do edifício, demolição e reconstrução de elementos não estruturais tais como paredes de alvenaria de enchimento ou tetos falsos. Algumas técnicas de reforço global económicas e eficientes são: adição de paredes resistentes de betão armado e de contraventamentos metálicos com e sem elementos dissipadores de energia para correção da distribuição da rigidez e resistência nos pisos do edifício; demolição parcial do edifício (este tipo de técnica poderá implicar um elevado condicionalismo na utilização do edifício); introdução de juntas de dilatação no edifício irregular transformando-o em várias estruturas regulares e utilização de sistemas de isolamento de base.

### 3.2 Técnicas de reforço local da estrutura

Tem-se observado que alguns edifícios existentes possuem características de rigidez e resistência apropriadas. No entanto, alguns dos seus elementos estruturais não possuem a adequada resistência, rigidez e/ou capacidade de deformação por forma a satisfazer os objetivos de desempenho impostos à estrutura. Este tipo de deficiências estruturais locais podem ser corrigidas/eliminadas recorrendo a vários tipos de técnicas. Assim este tipo de técnicas revela-se importante na reparação e/ou reforço de edifícios para os quais existe apenas um número de elementos apresenta deficiências estruturais. Modificações a nível local dos elementos resistentes podem ser realizadas sem no entanto modificar a configuração do sistema global resistente às ações sísmicas. Este tipo de técnicas de reforço poderá ser a solução economicamente mais vantajosa, em situação de deficiências de apenas alguns elementos de um edifício. Técnicas como o encamisamento de elementos resistentes são consideradas técnicas de reforço local da estrutura.

## 4. CASO DE ESTUDO

### 4.1 Apresentação do edifício e sua modelação numérica

O caso de estudo corresponde a um edifício existente de habitação situado em Lisboa com 9 pisos, construído na década de 50 (Figura A). A estrutura do edifício é composta por doze pórticos planos de betão armado na sua direção transversal. Uma característica particular que condiciona o comportamento estrutural deste edifício trata-se da ausência de paredes de alvenaria de enchimento ao nível do rés-do-chão estando assim o edifício “suspenso” sobre os pilares neste piso [9]. A geometria, dimensões, localização e características dos elementos de betão armado e das paredes de alvenaria foram obtidas com base no projeto e confirmadas *in-situ*.



Figura A – Caso de Estudo - Edifício Lisboa.

Para simular o comportamento estrutural do edifício em estudo foi utilizado o programa SeismoStruct. Este programa utiliza o modelo de fibras baseado em elementos finitos, com elementos de barra planos. A não linearidade material está explicitamente representada nesta formulação através este modelo que permite a extensão da inelasticidade não só ao longo do desenvolvimento do elemento mas também pela sua secção transversal e assim como a precisa definição da distribuição do dano estrutural.

Por forma a representar o comportamento não linear do betão utilizou-se a lei de comportamento de Mander e para o aço a lei de comportamento não linear Menegotto-Pinto. Na modelação numérica das paredes de alvenaria de enchimento foi utilizado o macro-modelo da dupla biela diagonal equivalente proposto por Crisafulli [10]. O edifício foi analisado nas suas direções principais através de um modelo tridimensional. A validação do modelo numérico foi efetuada através da comparação das medidas das frequências naturais *in-situ* e dos valores das frequências obtidas com os modelos numéricos. Os resultados apresentados são todos referentes à direção mais vulnerável do edifício – direção longitudinal.

#### 4.2 Influência da presença das paredes de alvenaria de enchimento na resposta estrutural do edifício

A influência da presença das paredes de alvenaria de enchimento na resposta estrutural do edifício face a uma dada ação sísmica foi avaliada através comparação do valor das frequências fundamentais do edifício e da realização de análises não lineares estáticas *pushover* com e sem a presença destes mesmos elementos.

Observou-se que as frequências fundamentais do edifício sofrem um aumento considerável com a introdução das paredes de alvenaria. Na direção longitudinal do edifício registou-se o maior aumento. A não consideração da presença deste tipo de elementos pode conduzir à não consideração da solicitação sísmica esperada. Na Figura B-1 está ilustrada a envolvente de drifts máximos resultantes das análises *pushover* do edifício com e sem paredes de alvenaria na direção longitudinal. A presença das paredes de alvenaria de enchimento introduziu no edifício um drift concentrado no piso 1 sendo os restantes bastante reduzidos comparativamente com este. Sem a presença das paredes de alvenaria de enchimento verifica-se que os pisos mais vulneráveis são os pisos 1, 2 e 7 na direção longitudinal e os pisos 3 e 8 na direção transversal. Este facto permite afirmar que caso as paredes de alvenaria não fossem tidas em conta na modelação do edifício este tipo de mecanismo não seria verificado, o que vem comprovar que a não consideração da presença estes elementos nem sempre é uma opção conservativa. Assim, uma avaliação correta da segurança de um edifício só se consegue considerando a presença das paredes de alvenaria. Foram analisadas igualmente as curvas de capacidade resultantes das análises *pushover* (Figura B-2) que mostram que a introdução das paredes de alvenaria conferiram ao edifício uma superior rigidez inicial, um ligeiro aumento do corte basal máximo e uma redução da sua ductilidade.

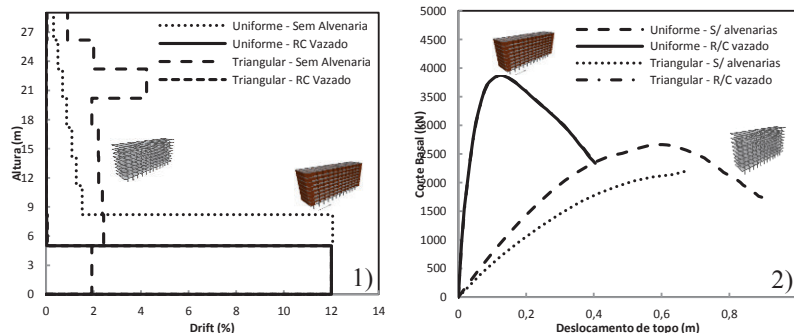


Figura B – 1) Envolvente de drifts máximos 2) Curvas de capacidade do edifício Lisboa com e sem paredes de alvenaria.

### 4.3 Avaliação da vulnerabilidade sísmica

A avaliação da vulnerabilidade sísmica foi realizada recorrendo a análises não lineares dinâmicas, através da colocação de acelerogramas que impunham ao edifício acelerações relativas a uma série de sismos escalados para cada período de retorno relativos a um cenário de médio/alto risco europeu. Na Figura C está ilustrado o registo da ação sísmica para o período de retorno adotado como referência, o de 2000 anos.

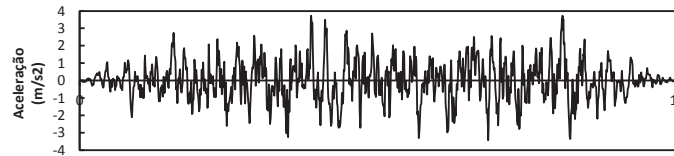


Figura C - Registo da ação sísmica para um período de retorno de 2000 anos.

A avaliação da resposta global de uma estrutura face a uma dada ação sísmica engloba diversos parâmetros, quer sejam de controlo das características dos materiais, dos elementos quer em termos de controlo da estrutura no geral. Normalmente esta avaliação é feita estabelecendo um conjunto de relações entre limites pré-definidos e características para um dado nível de ação sísmica. Foram utilizados como referência os valores de drift limite sugeridos pelas normas internacionais VISION 2000 [11] e Fema 356 [12].

As análises não lineares dinâmicas permitiram confirmar que a ausência de paredes de alvenaria no rés-do-chão o tornou mais vulnerável, concentrando-se toda a deformação neste piso. A envolvente de drifts máximos (Figura D-2) para o período de retorno de referência ilustra a ocorrência do mecanismo de *soft-storey* já observado nas análises *pushover*. Observou-se através da evolução do drift máximo do piso 1 (Figura D-1) que a direção mais vulnerável do edifício é a longitudinal (justificado pelas disposições das secções dos pilares) Nesta direção os valores limite de drifts são ultrapassados para o período de retorno de referência. Por outro lado na direção transversal verifica-se que o valor do corte basal máximo é superior (Figura D-3).

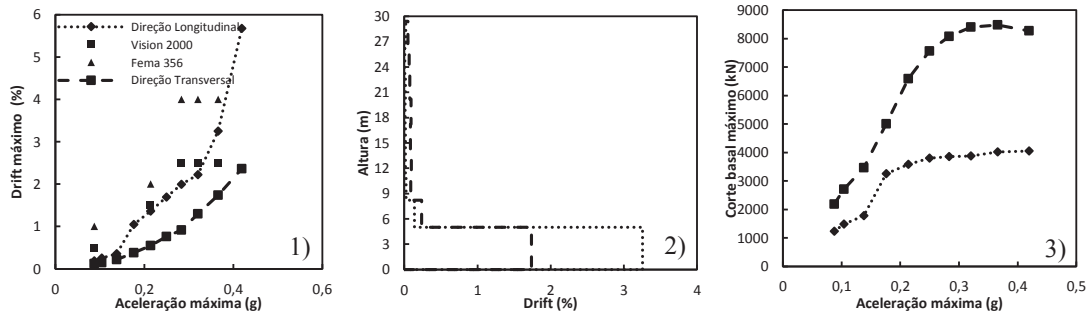


Figura D - 1) Evolução do drift máximo 2) Perfil de drifts máximos 3) Corte basal máximo do edifício Lisboa.

### 4.4 Técnicas de reforço

As técnicas de reforço foram adotadas com o objetivo de corrigir/eliminar a irregularidade em altura de rigidez verificada devido à existência do piso vazado, o que origina o mecanismo de *soft-storey*. Assim foram testados 4 tipos de técnicas de reforço: encamisamento de pilares de betão armado, adição de paredes resistentes de betão armado e adição de contraventamentos metálicos com e sem elementos dissipadores de energia.

#### 4.4.1 Encamisamento de pilares de betão armado

O edifício Lisboa foi reforçado através de um encamisamento fechado dos pilares do rés-do-chão. Para estas novas secções (Figura E) foram dimensionadas armaduras longitudinais e transversais respeitando os requisitos mínimos exigidos pelo Eurocódigo 2 [13].

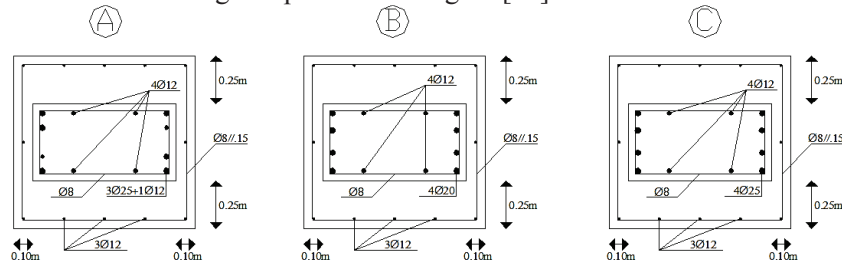


Figura E - Secção transversal dos pilares do r/c do edifício Lisboa após reforço através da técnica de encamisamento de pilares.

#### 4.4.2 Adição de paredes resistentes de betão armado

O edifício Lisboa foi reforçado através de 4 paredes resistentes na direção longitudinal e 2 na direção transversal. A espessura das paredes e respetivas armaduras foram determinadas de acordo com os requisitos mínimos exigidos pelos eurocódigos 2 [13] e 8 [14] e as suas secções transversais encontram-se ilustradas nas figuras F e G.

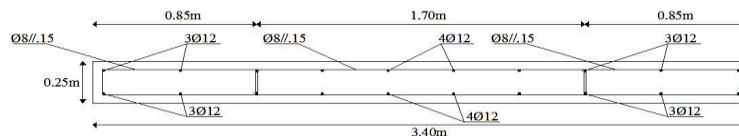


Figura F – Secção transversal das paredes resistentes de betão armado adicionadas na direção longitudinal.

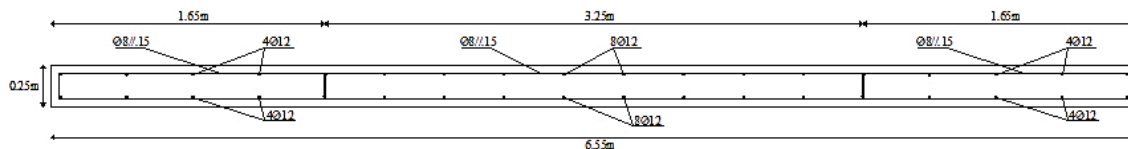


Figura G - Secção transversal das paredes resistentes de betão armado adicionadas na direção transversal.

#### 4.4.3 Adição de contraventamentos metálicos com e sem elementos dissipadores de energia

O edifício Lisboa foi reforçado através 4 pares de perfis HEA 650 e de 2 pares de perfis HEB 650 nas direções longitudinal e transversal respetivamente.

Foi adotado em outro modelo numérico a técnica de reforço baseada na aplicação de um sistema dúctil de contraventamento em aço, onde é associado um elemento capaz de dissipar a energia por deformações em corte denominado de k-bracing. Este tipo de reforço foi inspirado no modelo desenvolvido por Varum [6].

O sistema de contraventamento metálico foi modelado com 4 bielas rígidas de comportamento linear uniaxial elástico bilinear, não possuindo resistência à flexão. O dispositivo dissipador de energia tem um comportamento não linear baseado no modelo de Menegotto-Pinto. Após a sua conceção o modelo foi calibrado com base em resultados experimentais de um sistema de dissipação de energia semelhante que foi testado num ensaio experimental cíclico de reforço de um edifício à escala real [6]. Os resultados da calibração encontram-se nas Figuras H- 1 e H-2.

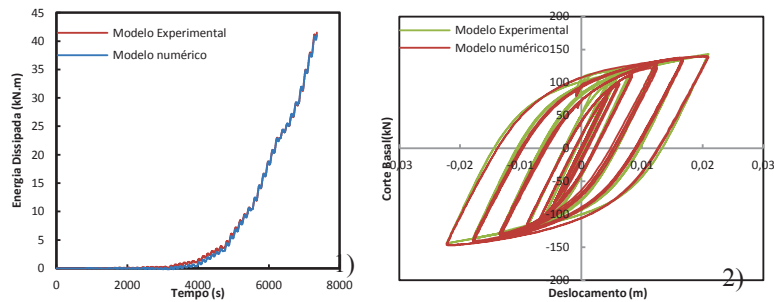


Figura H - 1) evolução da dissipação de energia. 2) Corte basal vs deslocamento do dispositivo de dissipação de energia.

#### 4.5 Eficiência das soluções de reforço

Foram analisados e comparados os resultados em termos de drift máximo, corte basal máximo e drift máximo nos pisos com alvenarias relativos à direção mais vulnerável estando os resultados apresentados nas figuras I-1 e I-2. Paralelamente foi estudado de que forma é que a introdução das várias técnicas de reforço no edifício agravaram os drifts máximos dos pisos com paredes de alvenaria com o objetivo de quantificar o possível dano caso este exista (Figura I-3). A definição de estados limites para as paredes de alvenaria podem ser diretamente relacionados com os drifts máximos que ocorrem durante uma ação sísmica nos pisos de um edifício [15]. As normas internacionais Fema 306 [16] e Fema 307 [17] fornecem igualmente valores limite de drift máximo entre pisos para edifícios com paredes de alvenaria de enchimento. Nestes dois documentos pode-se encontrar também o valor de 0.25% como o valor definido para o início da fissuração diagonal da parede de alvenaria de enchimento [18].

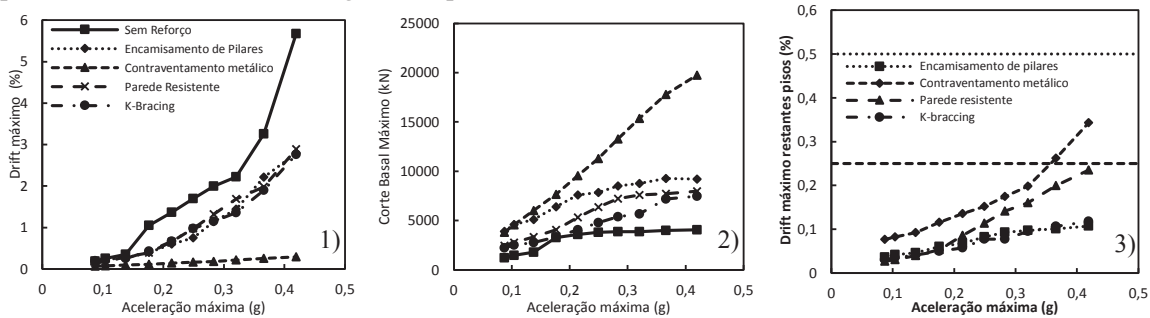


Figura I – 1) Evolução do drift máximo 2) Corte basal máximo 3) Drift máximo verificado nos pisos com alvenaria do edifício Lisboa com e sem soluções de reforço.

As várias técnicas de reforço implementadas no edifício Lisboa conseguiram melhorar o comportamento estrutural através de uma redução significativa do drift máximo ao nível do rés-do-chão, cumprindo assim o objetivo de eliminar a irregularidade que a estrutura original do edifício apresenta. Verificou-se que a técnica mais eficiente na redução do drift máximo é a solução de reforço com contraventamentos metálicos, destacando-se claramente das restantes soluções de reforço que registaram um resultado semelhante. Porém, esta técnica foi a que originou o maior aumento do valor das forças de corte sendo mesmo 4 vezes superiores às verificadas na estrutura original para períodos de retorno maiores podendo este implicar o reforço das fundações do edifício. O edifício Lisboa viu a sua capacidade de dissipação de energia sofrer o maior aumento com a técnica de contraventamentos metálicos sendo quase o dobro do valor registado com as outras técnicas de reforço. Através de evolução do drift máximo verificado nos pisos com paredes de alvenaria observou -se que apenas a técnica de contraventamentos metálicos introduziu dano ligeiro nas paredes de alvenaria no piso 2 do edifício nomeadamente fissuração diagonal.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se o estudo da vulnerabilidade sísmica de um edifício com rés-do-chão vazado sujeito ao mecanismo de *soft-storey* quando sujeito a um sismo e foram avaliadas várias soluções de reforço. Observou-se que sem paredes de alvenaria os pisos mais vulneráveis são diferentes dos observados numa situação de presença destes elementos. Verificou-se que a direção mais vulnerável do edifício estudado era a direção longitudinal. Foram adotadas 4 soluções de reforço sendo a técnica de reforço mais eficiente na redução do drift máximo a técnica de contraventamentos metálicos, eliminando mesmo o mecanismo de *soft-storey*. Todas as soluções de reforço introduziam um grande aumento das forças de corte basal em especial a introdução de contraventamentos metálicos. Por último foi avaliado o dano introduzido nas paredes de alvenaria do edifício devido à introdução das várias soluções de reforço. Apenas se registou um dano ligeiro proporcionado pela técnica de adição de contraventamentos metálicos.

## 6. AGRADECIMENTO

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da "FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia", Portugal, especificamente no âmbito do projeto com referência PTDC/ATP-AQI/3934/2012, que os autores reconhecidamente agradecem.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] *Eurocode 6: EN 1996-1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*, 2005.
- [2] G. Manfredi, P. Ricci, and G. Verderame, "Influence of Infill Panels and their Distribution on Seismic Behavior of Existing Reinforced Concrete Buildings," *The Open Construction and Building Technology Journal*, vol. 6, pp. (Suppl 1-M15) 236-253, 2012.
- [3] N. Neves, A. Arêde, and A. Costa, "Seismic analysis of a building block," *Bull Earthquake Eng*, vol. 10, no. 1, pp. 235-267, February 2012, 2011.
- [4] M. Dolsek, and P. Fajfar, "Soft Storey Effects in Uniformly Infilled Reinforced Concrete Frames," *Journal of Earthquake Engineering*, no. 5:1, pp. 1-12, 2001.
- [5] G. Thermou, and A. Elnashai, "Seismic retrofit schemes for for RC structures and local-global consequences," *Structural Engineering and Materials*, vol. 8, no. 1, pp. 1-15, 2006.
- [6] H. Varum, "Avaliação, reparação e reforço sísmico de edifícios de edifícios existentes," Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2003.
- [7] H. Varum, "Avaliação da segurança e reforço sísmico de edifícios de concreto armado," in *Jornadas de Engenharia - Tecnologia do concreto e patologia das estruturas*, Fortaleza - CE (Brasil), 2009.
- [8] M. N. Fardis, "Seismic assessment and retrofit of RC structures," in 11th ECEE, Paris, 1998.
- [9] H. Rodrigues, "Desenvolvimento e Calibração de Modelos Numéricos para a Análise Sísmica de Edifícios," Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2005.
- [10] E. Smyrou, "Implementation and Verification of a Masonry Panel Model for Nonlinear Dynamic Analysis of Infilled RC Frames," Rose School, 2006.
- [11] SEAOC-Vision2000, "Performance based seismic engineering of buildings," 1995.
- [12] FEMA, "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings," 2000.
- [13] *Eurocode 2: Design of concrete structure, part 1-1: general rules and rules for buildings EN 1992-1-1*, 2004.
- [14] *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*, 2010.
- [15] G. Magenes, and S. Pampanin, "Seismic response for gravity-load designed frame systems with masonry infills," in 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE), Vancouver, BC, Canada, 2004.

- [16] *Evaluation of Earthquake Damage Concrete and Masonry Wall Buildings - Basic Procedures Manual Federal Emergency Management Agency, 1999.*
- [17] *Evaluation of Earthquake Damage Concrete and Masonry Wall Buildings - Technical Resources Federal Emergency Management Agency, 1999.*
- [18] R. Vicente, H. Rodrigues, H. Varum *et al.*, “Performance of masonry enclosure walls: lesson learned from recent earthquakes,” *Earthquake Engineering and Vibration*, vol. 11, no. 1, pp. 23-34, 2012.