REFORÇO ESTRUTURAL DE EDIFÍCIOS: CASOS CONCRETOS E CUSTOS

ANÍBAL COSTA, Prof. Catedrático, UA, Aveiro-Portugal

CARLOS SOUSA OLIVEIRA, Prof. Catedrático, IST, Lisboa,-Portugal

ANTÓNIO ARÊDE, Prof. Auxiliar, FEUP, Porto-Portugal

HUMBERTO VARUM, Prof. Associado, UA, Porto-Portugal

ALEXANDRE COSTA, Prof. Adjunto, ISEP, Porto-Portugal

HUGO RODRIGUES, Prof. Auxiliar, ULP, Porto-Portugal

FILIPE NEVES, Eng. Civil, UA

ANDRÉ FURTADO, Eng. Civil, FEUP, Porto-Portugal

1. INTRODUÇÃO

Compreender o comportamento das construções quando são sujeitas à ação de um sismo é fundamental para o desenvolvimento de técnicas de reforço que permitam evitar o colapso das mesmas aquando da ocorrência de um sismo, que sabemos que será um acontecimento inevitável. A mensagem que é transmitida à sociedade de que o investimento no reforço sísmico é desproporcionado em relação ao preço final da construção é uma mentira que precisa de ser aclarada e desmitificada, uma vez que se demonstra que algumas técnicas de reforço custam menos que o material de revestimento de uma casa de banho no preço final da construção. Para isto é fundamental que se apresentem soluções de reforço e custos associados que possam ser implementadas nas construções no nosso país aquando da realização das denominadas obras de "reabilitação".

2. SISMOS RECENTES NA EUROPA

Grande parte dos edifícios existentes, dimensionados e construídos até finais dos anos 70, sem características sismo-resistentes, constituem um elevado risco potencial (económico e social). Os últimos sismos na europa são uma prova evidente disso. Apresenta-se a lista dos últimos sismos na Europa [1]:

- **Bucareste, Roménia, 1977**
- **Açores, Portugal, 1980**
- **Kalamata, Grécia, 1986**
- **Umbria-Marche, Itália, 1997 (este também foi muito importante)**
- **Açores, Portugal, 1998**
- **Izmit, Turquia, 1999**
- **Atenas, Grécia, 1999**
- **Molise, Itália, 2002**
- **Abruzzo, Itália, 2009**
- **Lorca, Espanha, 2011**
- **Emilia-Romagna, Itália, 2012**

Estes sismos distribuem-se por toda a europa, mas salienta-se o facto dos últimos dois serem relativamente perto de Portugal. Embora, moderados, causaram grandes danos no parque construído, conduzindo ao colapso de alguns, Figura 1, e provocaram imensos danos não estruturais, Figura 2, o que levou à demolição de grande parte desses edifícios, devido ao custo associado à sua reabilitação e/ou reforço [2-5].

Fig. 1. Colapso de edifícios.

Fig. 2. Danos não estruturais e estruturais em edifícios.

3. CONSEQUÊNCIA DOS SISMOS

A atuação pós sismo é muito complicada e envolve meios diversos que não são fáceis de articular. Em Itália a intervenção passou pelo reforço de alguns edifícios de betão armado usando técnicas de reforço correntes nestes casos (encamisamento metálico ou em betão armado; reforço de nós com fibras; introdução de paredes de betão armado; introdução, em alguns casos, de isolamento sísmico), Figura 3, enquanto nos edifícios de alvenaria a atuação foi deixar ficar as aldeias abandonadas, depois de algumas obras mínimas de consolidação e construir novos centros urbanos, perto dos aglomerados antigos. A construção nova foi realizada com estruturas de madeira assentes numa plataforma que era isolada sismicamente, Figura 4.

Fig. 3. Técnicas de reforço usada em Áquila - Itália.

Fig. 4. Novos aglomerados urbanos, construção nova com isolamento de base.

Em Lorca a visita técnica que foi efetuada, um mês após o sismo [2], permitiu observar a desorientação das pessoas, que tinham sido afetadas, sobre o que fazer, dada a oferta de empresas a oferecer serviços de construção civil, e a incerteza sobre a decisão a tomar. Notou-se a falta de soluções por parte das entidades oficiais sobre o que fazer e ao mesmo tempo a execução de algumas obras com qualidade muito duvidosa, Figura 5.

Fig. 5. Reforços em elementos estruturais.

4. REFORÇO SÍSMICO - CASOS PRÁTICOS

4.1. Exemplos de estruturas de alvenaria de pedra

O reforço das estruturas de alvenaria consiste em evitar a introdução de massas nos pisos, já que as mesmas são responsáveis pela maioria das mortes, procurando ligar os elementos estruturais existentes, entre si, de uma forma eficiente. O objetivo é que a construção tenha o denominado "box behaviour" ligando entre si as paredes exteriores e interiores, para evitar comportamentos indesejáveis, nomeadamente fora do plano das paredes, e ligando as estruturas dos pisos e coberturas, normalmente vigas de madeira às paredes de alvenaria.

Os dois primeiros exemplos que se apresentam são intervenções em igrejas, a primeira está neste momento em fase de concurso e os custos da intervenção estrutural referem-se a estimativas orçamentais enquanto a segunda se refere a uma obra que está neste momento em curso e os custos são os decorrentes da intervenção, [6] e [7].

O terceiro exemplo está relacionado com o sismo de 9 de Julho de 1998 que afetou cerca de 5 000 edifícios nas ilhas do Faial e Pico, dos quais cerca de 2100 ficaram destruídos. Face à necessidade urgente de dar solução ao grande número de edifícios danificados e destruídos e à certeza de num futuro próximo ocorrer outro sismo foram contratados, pelo Centro de Promoção da Reconstrução (CPR), diversos gabinetes de arquitetura e engenharia para elaborarem projetos de reabilitação e de construções novas. As soluções de reforço estrutural usadas na reabilitação dos edifícios foram preconizadas no documento "Regras de Reabilitação e Reconstrução de Edifícios Correntes Afetados pela Crise Sísmica do Faial, Pico e S. Jorge, iniciado pelo sismo de 9 de Julho de 1998", elaborado pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC relatório 100/98), (LREC, 1998), [8]. Foi criada uma base de dados com toda a informação relacionada com as intervenções realizadas em cerca de 3 700 construções. Esta base de dados tem permitido efetuar alguns estudos, [9]. Um dos primeiros consistiu numa análise cuidada de 40 autos de vistoria e dos correspondentes 40 projetos de execução que foram escolhidos, aleatoriamente, do arquivo da SRHE. Os preços apresentados são referentes aos custos finais das empreitadas executadas em reabilitações e reparações. Para comprovar a eficiência destes reforços foram realizados várias campanhas de ensaios em casas que ficaram abandonadas na sequência do sismo. Apresentam-se alguns resultados desses ensaios para avaliação da eficiência do reforço. Os preços apresentados devem ser considerados com algum cuidado pois englobam outos trabalhos adicionais, ou seja, não é só contabilizado o preço do reforço em si mas também os trabalhos associados à sua execução. Os valores apresentados têm por base uma análise cuidada do mapa de medições em particular de 17 Reabilitações e referem-se a valores da construção açoriana, que correspondem a cerca de 30% acima dos preços do continente, Figura 6.[10]

OBRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	
Pisos	1	3	1	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	
Área m²	51,5	225,6	61,5	122,9	70,9	100,1	138,8	130,3	115,7	194,6	78,0	62,9	158,4	133,7	68,7	73,4	
Tipo Reforco																	Média €/m
1		80,7	205,3		117,4		136,9	208,5		27,0	72,8	66,3		114,1	247,7	133,7	128,2
2	22,2			5,7	13,0	25,7		34,8						19,0	41,3	22,3	23,0
3	88,8	71,8	88,0	34,3		90,0		104,3	59,0	10,8	29,1	26,5	105,7	57,0	66,8	66,8	64,2
4										10,8	29,1	26,5	105,7				43,0
5		26,9		17,2					25,3	5,4	14,6	13,3					17,1

Fig. 6. Custos médios por m2 de soluções de reforço.

O último exemplo de alvenarias diz respeito a um edifício com 7 pisos, em Lisboa, com uma área em planta de cerca de 210m^2 estudado pelo NCREP, gabinete de consultoria e projeto de reabilitação de construções (Porto), [11]. Foi efetuada uma avaliação expedita do comportamento do edifício à ação sísmica com base em métodos simplificados. Estes métodos permitiram estimar a vulnerabilidade sísmica e o risco da estrutura tendo em conta dois cenários: (i) condições do edifício reabilitado apenas para ações verticais; (ii) condições do edifício tendo em conta soluções pontuais de reforço com vista ao melhoramento sísmico do mesmo. Esta avaliação permitiu verificar que o dano físico médio do edifício correspondia a um valor de 4,2, que corresponde a um estado entre o dano muito severo e destruição, [11]. As sugestões de intervenção para melhoramento do comportamento sísmico foram as seguintes:

- Colocação de tirantes de ancoragem para: (i) ligação entre as paredes resistentes exteriores e (ii) das paredes de frontal às paredes existentes, ao nível dos diferentes pisos.
- Reforço dos pavimentos em madeira com tarugamento e contra-soalho em cada um dos pisos por forma a criar um diafragma rígido ao nível dos pavimentos e mobilizar a capacidade resistente das paredes de frontal.
- Reforço das ligações dos pavimentos às paredes resistentes
- Colocação de tirantes ao nível da cobertura para absorver os impulsos horizontais introduzidos.

Estas soluções de melhoramento sísmico permitiram que o dano físico médio passasse de 4,2 para 2,9 o que representa um estado de dano entre o moderado e o severo, permitindo concluir que é possível melhorar o comportamento sísmico da estrutura recorrendo a intervenções minimalista mas fundamentais ao melhor desempenho.

Os custos estimados para a intervenção permitiram concluir que o custo do melhoramento sísmico corresponde a 35€/m^2 o que equivale a 23,3% do custo global de intervenção estrutural.

4.2. Exemplo de estruturas de madeira

O levantamento das estruturas de cobertura da Escola Rodrigues de Freitas no Porto evidenciou um estado precário de conservação dos telhados de madeira, envolvendo uma área de cerca de 4000m^2. A escolha do tipo de intervenção foi cuidadosamente analisada, a substituição global era uma opção, embora a solução preferida fosse, desde o início, a reabilitação com substituição localizada de elementos estruturais. Foi realizado um estudo detalhado sobre os elementos estruturais existentes, permitindo estimar as áreas onde a reabilitação e as substituições eram necessárias [12]. Este estudo confirmou que a reabilitação era a melhor opção, tendo sido adotadas as seguintes técnicas:

a) Adição de novos elementos aos lados dos elementos danificados. Esta operação consiste na fixação de elementos de madeira em ambos os lados da estrutura danificada ligados entre si com elementos metálicos em aço inox, Figura 7. A madeira nova foi realizada com peças com características físicas e mecânicas semelhantes à de elementos existentes e foram tratadas contra ataques bióticos e ao elementos metálicos foram submetidos a um tratamento para aumentar a sua resistência ao fogo.
b) Foram introduzidos novos elementos de contraventamento de madeira para reduzir o comprimento dos elementos sujeitos à compressão (vigas e escoras), diminuindo a possibilidade de encurvadura. Estes novos elementos de contraventamento foram colocados em ambos os lados do elemento de reforço e devidamente aparafusados, Figura 8.
c) Substituição parcial dos elementos estruturais. Em certas situações, foi necessário substituir (globalmente ou parcialmente) os elementos danificados por novos, Figura 9.

Fig. 7 Adição de novos elementos aos lados dos elementos danificados.

(a) (b)

Fig. 8 Introdução de barrotes para reduzir o comprimento de encurvadura dos elementos comprimidos (madres).

(a) (b)

Fig. 9 Substituição parcial dos elementos estruturais.

4.3. Exemplo de estruturas de betão

O edifício foi projetado pelo arquiteto Alberto Pessoa e apresenta uma implantação retangular de 46.10x11.10 metros, tendo uma altura de 30 metros correspondentes aos 9 pisos que possui, Figura 10.
No piso do rés-do-chão existem os acessos verticais consistindo em dois ascensores nas extremidades e um núcleo central com outro ascensor, um monta-cargas e uma escada de acesso a todo o edifício. Os restantes 8 pisos são destinados á habitação.com 24 fogos tipo duplex: duas tipologias T3+1 e quatro T4 em cada dois pisos. O terraço é acessível existindo uma pequena habitação para o porteiro assim como uma zona coberta de estendais [13].
O edifício desenvolve-se longitudinalmente com 11.1m de largura e 46.1m de comprimento, e uma altura de 29.4 m. No seu projeto estavam previstas duas juntas longitudinais que dividiam o edifício em 3 blocos, mas numa inspeção realizada ao edifício verificou-se a inexistência da mesma [14].

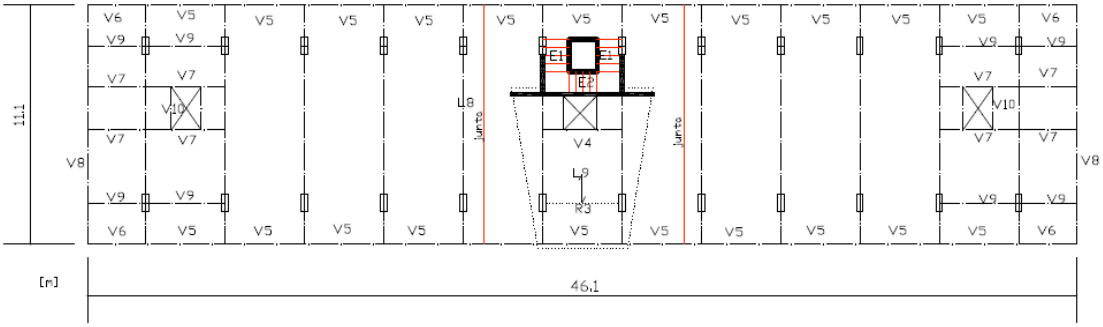

Fig. 10 Dimensões em planta do edifício [14].

4.3.1. Descrição estrutural

O edifício Lisboa é constituído por 12 pórticos transversais de betão armado afastados de 3.70 metros entre si, com dois prolongamentos em consola de 2.70 metros nas suas extremidades (Figura 10). No piso térreo existem duas vigas longitudinais apenas nas extremidades do edifício. Nos 8 pisos restantes as plantas repetem-se em cada dois andares devido á tipologia duplex dos apartamentos. Sendo que a diferença entre os andares inferiores (1,3,5,7) e superiores (2,4,6,8) reside na abertura da laje para a escada interior.

4.3.2. Soluções de reforço

O edifício Infante Santo é um edifício com irregularidade em altura ao nível dos elementos não resistentes (paredes de alvenaria), devido à existência de um piso vazado, o que significa a existência de uma irregularidade em rigidez. Foi avaliada a vulnerabilidade sísmica do edifício que confirmou a ocorrência do mecanismo de piso "flexível" ou soft-storey. Por forma a eliminar/corrigir este mecanismo foram propostas as seguintes soluções de reforço [15]:

- ☒ Encamisamento de pilares com betão armado;
- ☒ Adição de paredes resistentes de betão armado;
- ☒ Adição de contraventamentos metálicos;
- ☒ Adição de contraventamentos metálicos com dispositivo de dissipação de energia.

Encamisamento de pilares com betão armado

O edifício Infante Santo é reforçado através da realização de um encamisamento fechado em todos os pilares do rés-do-chão, com um acréscimo de 50 cm na direção longitudinal e 20 cm na direção transversal. Para estas novas secções foram dimensionadas armaduras longitudinais e transversais que cumprissem os requisitos

mínimos exigidos pelo Eurocódigo 2. Na Figura 11 estão ilustradas as secções transversais dos pilares do rés-do-chão:

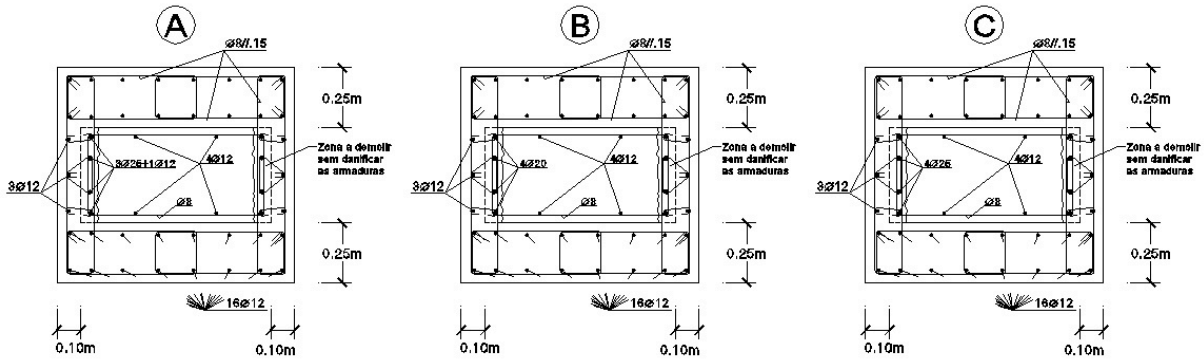

Fig. 11 Secções transversais dos pilares do r/c do edifício Lisboa reforçados através da técnica de encamisamento de betão armado.

No total são 24 pilares alvo deste tipo de reforço: 10 pilares tipo A, 10 pilares tipo B e 4 pilares tipo C. Estes pilares possuem um comprimento de 5 metros.

Adição de paredes de betão armado

Foi proposta uma solução de reforço através da técnica de adição de paredes resistentes para o edifício Santo: adição de quatro paredes resistentes na direção longitudinal e duas na direção transversal no rés-do-chão (Figura 2).

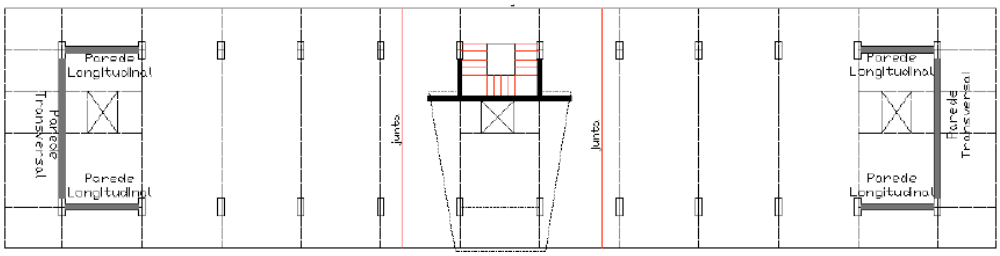

Fig. 12 Disposição em planta da localização das paredes resistentes relativas à solução de reforço 1.

A espessura das paredes é de 0.25m cumprindo a espessura mínima exigida pelo Eurocódigo 8. Dimensionaram-se para as paredes resistentes longitudinais a transversais armaduras que respeitassem as exigências mínimas regulamentares preconizadas pelos Eurocódigos 2 e 8 (Tabela 1). As secções transversais das paredes resistentes estão ilustradas nas Figuras 3 e 4.

Tabela 1 - Armaduras longitudinais e transversais dimensionadas para as paredes resistentes.

	Dimensionamento das armaduras das paredes resistentes - Edifício Lisboa					
	Armadura longitudinal				Armadura transversal	
Direção	$A_{s,v,alma,adotada}$	$A_{s,v,pilar\ fictício,adotada}$	$A_{s,v,max}$ (m^2)	$A_{s,v,total}$ (m^2)	Região crítica	Região não crítica
Longitudinal	8ϕ12	6ϕ12	0.034	0.00226	ϕ8//10	ϕ8//15
Transversal	16ϕ12	10ϕ12	0.066	0.004068	ϕ8//10	ϕ8//15

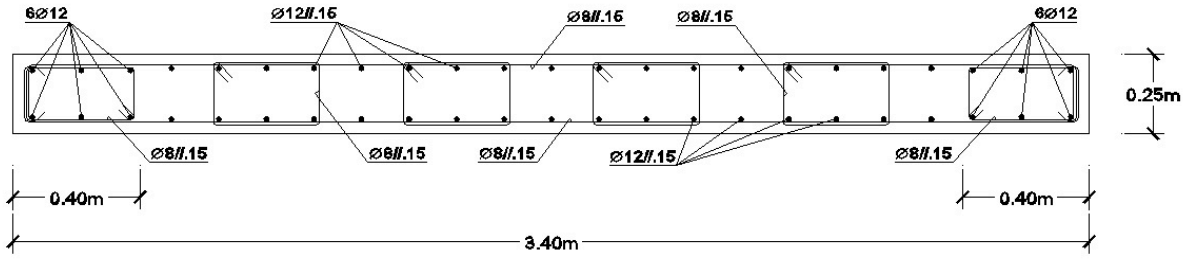

Fig. 13 Secção transversal das paredes resistentes adicionadas na direção longitudinal do edifício Infante Santo.

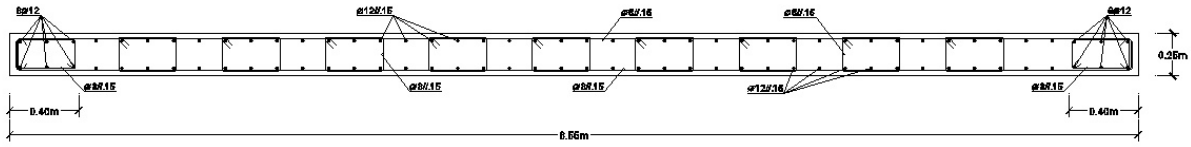

Fig. 14 Secção transversal das paredes resistentes adicionadas na direção transversal do Edifício Infante Santo.

Adição de contraventamentos metálicos

O edifício Infante Santo é reforçado através da proposta de adição de 4 pares de perfis metálicos HEA 650 na direção longitudinal e 2 pares de perfis HEB 650 na direção transversal no rés-do-chão, estando ilustrada na Figura 15 a localização destes em planta.

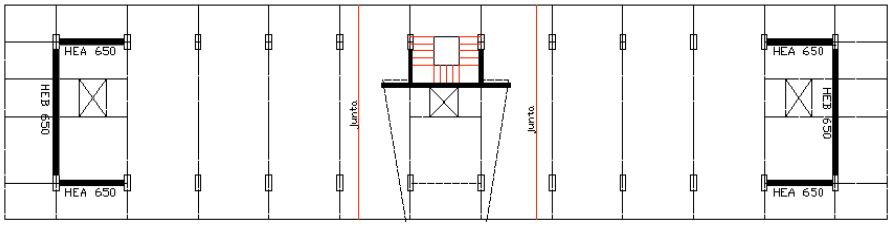

Fig. 15 Localização em planta dos contraventamentos metálicos adicionados ao rés-do-chão do edifício Infante Santo.

A verificação da resistência à encurvadura foi realizada segundo a clausula 6.3.1.1 do Eurocódigo 3, tendo estes as características definidas na tabela 2:

Tabela 2 - Características dos contraventamentos metálicos.

Aço S235		
***E* (GPa)**	**f_y (MPa)**	**μ**
200	235	0.05

Pretende-se que os perfis metálicos vençam na diagonal os vãos de 5 metros de altura por 4 metros de comprimento na direção longitudinal e 5 metros de altura por 7.5 metros de comprimento na direção transversal. No total são 8 perfis HEA 650 com 6.5 metros de comprimento e 4 perfis HEB 650 com 8.85 metros de comprimento.

Adição de contraventamentos metálicos com elemento dissipador de energia

Foi proposto ainda uma técnica de reforço baseada na aplicação de um sistema dúctil de contraventamentos em aço, onde é associado um elemento capaz de dissipar energia por deformações em corte, (Figuras 16 e 17) denominado k-bracing.

Fig. 16 Contraventamento metálico com dissipador de energia.

Fig:17 Localização em planta dos contraventamentos metálicos adicionados ao rés-do-chão do edifício Infante Santo

No total a solução é composta por 24 perfis HEB 120 com 3.5m de comprimento, 16 perfis HEB 120 com 4.20 metros de comprimento e 10 perfis HEB 120 com 1 metro de comprimento.

5. CONCLUSÕES

A maioria dos edifícios existentes, dimensionados e construídos até finais dos anos 70, sem características sismo-resistentes, constituem um elevado risco potencial (económico e social) e precisam de ser intervencionados para que possam resistir à ocorrência de sismos cuja ocorrência é inevitável. Nesse sentido foram apresentadas algumas técnicas de reforço com custos médios associados para evidenciar que algumas técnicas de reforço têm um custo muito baixo e que introduzem um melhoramento sísmico muito relevante.

Alguns edifícios, pela sua conceção arquitetónica ou por razões de introdução de elementos não estruturais, que alteram profundamente o seu comportamento estrutural, representam um perigo para a sociedade sendo fundamental proceder-se ao seu reforço. Nesse sentido pretende esta comunicação servir de alerta para este facto e procurar sensibilizar a sociedade e os técnicos em geral para a urgência de intervenção neste parque edificado.

Também é importante ter presente que todos os edifícios deveriam ser reforçados. Podendo colocar-se a questão de que grau de melhoramento sísmico deveria ser exigido aos proprietários do edifício. Ou seja, deveria existir um grau mínimo de obrigatoriedade a que o proprietário seria obrigado a reforçar, por exemplo 66% do valor da

ação sísmica regulamentar, ficando à opção do proprietário o reforço para uma ação sísmica superior. No primeiro caso a responsabilidade civil dos ocupantes do edifício recairia sobre o proprietário.

É urgente é fazer alguma coisa, enquanto há tempo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar o agradecimento a todas as pessoas e entidades que de algum modo contribuíram para a concretização deste trabalho, pelo seu interesse, apoio e disponibilidade contínua durante a realização do trabalho. Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da "FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia", Portugal.

7. REFERÊNCIAS

[1] Varum, H.; Costa, A.G.; Pinto, A.V. (2006) - Reforço sísmico do património edificado em betão armado - pp. 487-510 - "A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação", Editores: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; e, Direcção Geral de Edifícios e Monumentos Nacionais, 2 Volumes, ISBN 972-99101-3-8, 2006

[2] Romão, X.; Costa, A.A.; Paupério, E.; Rodrigues, H.; Vicente, R.; Varum, H.; Costa, A. (2013) – "Field observations and interpretation of the structural performance of constructions after the 11 May 2011 Lorca earthquake" - Engineering Failure Analysis, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.01.040

[3] Rodrigues, H.; Romão, X.; Costa, A.G.; Arêde, A.; Varum, H.; Guedes, J. Vicente, R.; Costa, A.A.; Paupério, E. (2010) – "Sismo de L'Aquila de 6 de Abril de 2009. Ensinamentos para Portugal" - ISBN: 978-989-95695-4-6, - 8º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica - SISMICA 2010 - Universidade de Aveiro, Aveiro, 20 a 23 de Outubro de 2010.

[4] Paupério, E., Romão, X., Tavares, A., Vicente, R., Guedes, J., Rodrigues, H., Varum, H., Costa, A. (2012) -Survey of churches damaged by the 2012 Emilia-Romagna earthquake sequence. Faculty of Engineering of the University of Porto and University of Aveiro, Portugal.

[5] Vicente, R.; Rodrigues, H.; Varum, H.; Costa, A.; Mendes da Silva, J.A.R. (2012) - Performance of masonry enclosure walls: Lessons learnt from recent earthquakes - Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Springer, Vol. 11, N.1, March 2012, Pages 149-164, 23-34, DOI: 10.1007/s11803-012-0095-3.

[6] GEPEC (2013) Projeto de Conservação, salvaguarda e valorização da Igreja do Mosteiro de Travanca, Porto, Amarante, Travanca.

[7] GEPEC (2013) Projeto de Restauro e Conservação da Igreja e Torre dos Clérigos, Porto

[8] Costa, A.; Oliveira, C.S.; Neves, F. (2008). Técnicas de reforço estrutural mais frequentes na reconstrução da ilha do Faial. - "Sismo 1998 - Açores. Uma década depois". Livro editado por C. Sousa Oliveira, Aníbal Costa, João C. Nunes. ISBN 978-989-20-1223-0. Capítulo 43, pp. 531-557, Julho, 2008

[9] Neves, F.; Oliveira, C.S.; Costa, A. (2008). Base de dados relativa ao parque habitacional da ilha do Faial e Pico, danos sofridos no sismo de 1998 e processo da reconstrução. "Sismo 1998 - Açores. Uma década depois". Livro editado por C. Sousa Oliveira, Aníbal Costa, João C. Nunes. ISBN 978-989-20-1223-0. Capítulo 41, pp. 515-520, Julho, 2008.

[10] Costa, A. (2013) - Reforço estrutural de edifícios: casos concretos e custos. Seminário – a resistência sísmica na nova legislação sobre a reabilitação urbana. Organizado pela SPES e pela OE, realizado no Instituto Superior Técnico, no dia 10 de Janeiro de 2013, Porto.

[11] NCREP (2012) Relatório de Inspecção e Diagnóstico Estrutural, Edifício da Rua dos Douradores, 96 a 104, Dezembro, Porto.

[12] Costa, A., Guedes, J., Paupério, E., Ilharco, T., Ornelas, C. (2007). Relatório de Inspecção e Diagnóstico - Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

[13] Fonseca, J., 2005, "Forma e Estrutura no Bloco de Habitação, Património Moderno em Portugal," Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura, Universidade do Porto.´

[14] Rodrigues, H., 2006: Desenvolvimento e Calibração de Modelos Numéricos para a Análise Sísmica de Edifícios, Dissertação de Mestrado (M.Sc Thesis), Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

[15] Furtado, A. (2013) Avaliação de soluções de reforço para edifícios com o R/C vazado. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro, Aveiro.