



AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DE NÚCLEOS URBANOS ANTIGOS

R. VICENTE

Prof. Associado
Universidade de Aveiro
Aveiro-Portugal

T.M. FERREIRA

Investigador
Universidade de Aveiro
Aveiro-Portugal

R. MAIO

Investigador
Universidade de Aveiro
Aveiro-Portugal

J. ESTÊVÃO

Prof. Adjunto
Universidade do Algarve
Faro-Portugal

A.A. COSTA

Prof. Adjunto
Instituto Superior de
Engenharia do Porto
Porto-Portugal

H. VARUM

Prof. Catedrático
Universidade do Porto
Porto-Portugal

A. COSTA

Prof. Catedrático
Universidade de Aveiro
Aveiro-Portugal

C.S. OLIVEIRA

Prof. Catedrático
Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa-Portugal

SUMÁRIO

Este artigo reúne alguns dos mais importantes outputs resultantes do projeto URBSIS, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, nomeadamente aqueles relacionados com a avaliação da vulnerabilidade sísmica de núcleos urbanos antigos através da aplicação de uma metodologia simplificada baseada no cálculo de um índice de vulnerabilidade que, conseqüentemente, possibilita a avaliação de danos e a criação de cenários de perdas. Neste sentido, será aqui apresentada e discutida a aplicação e calibração da metodologia proposta e a sua integração numa plataforma SIG aos núcleos urbanos antigos de Faro e da Horta (ilha do Faial, Açores).

PALAVRAS-CHAVE: Vulnerabilidade Sísmica; Sistema de Informação Geográfica; Centros Urbanos Antigos.

ABSTRACT

This paper presents some of the most important outputs and findings obtained under the URBSIS project, funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology, namely those dealing directly with the seismic vulnerability assessment of old urban areas through the application of a simplified methodology based on the estimation of a vulnerability index that is subsequently used for the construction of both damage and loss estimation scenarios by integrating such outputs into a GIS platform. Therefore, the application and calibration of this methodology to the old urban areas of Faro and Horta (Faial island, Azores) will be herein presented and discussed.

1. INTRODUÇÃO

O património edificado nos centros históricos das nossas cidades é denunciador de um vasto número de indicadores culturais, sociais e económicos, que possibilitam entender a sua morfologia e traçar o seu processo evolutivo, desde a sua origem até aos dias de hoje. Devido ao efeito combinado entre o avançado estado atual de degradação de uma parte significativa do panorama geral do nosso edificado urbano antigo e o facto de se tratarem de construções seculares, edificadas antes da entrada em vigor de qualquer regulamentação sísmica, a vulnerabilidade sísmica nestas áreas é manifestamente elevada, justificando por isso uma atenção redobrada. Sendo a perigosidade sísmica do território Português moderada a elevada, o risco sísmico e de tsunami é uma ameaça real e que deve ser minimizado de forma proactiva através de uma estreita colaboração entre todas as entidades intervenientes neste processo.

A vulnerabilidade dos núcleos urbanos antigos, no contexto da avaliação e mitigação do risco sísmico e outros fenómenos naturais, é uma temática que tem vindo a ganhar cada vez mais força nas últimas décadas, considerada essencial para a definição e implementação de estratégias de planeamento, gestão e requalificação urbana. A avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios existentes deve colocar-se não só em relação aos edifícios isolados de relevante importância histórica e cultural, mas também, em relação aos aglomerados de construções em centros urbanos.

De entre muitos objetivos que se perspetivam no âmbito dos processos de requalificação urbana, a avaliação da vulnerabilidade estrutural e sísmica do edificado antigo é uma ação fundamental para antever eventuais necessidades de reforço e reabilitação. Nesse sentido, a avaliação da vulnerabilidade sísmica deverá estar na génese de quaisquer estratégias de intervenção no edificado existente e perfeitamente enquadrada com as outras ações de reabilitação não estrutural, conservação e durabilidade das construções.

A análise do desempenho de edifícios em sismos recentemente ocorridos, tem permitido identificar os aspectos estruturais que mais influenciam na sua vulnerabilidade, e consequentemente na produção de mecanismos de danos. Serão apresentados os resultados de avaliação da vulnerabilidade segundo uma metodologia validada, baseada num índice de vulnerabilidade que consequentemente permite a avaliação do dano e criação de cenários de perda (económicas e humanas). Neste sentido, são apresentados e discutidos neste artigo a aplicação da metodologia proposta, e sua integração numa plataforma SIG, a dois núcleos urbanos antigos, das cidades de Faro e da Horta, na ilha do Faial, arquipélago dos Açores.

2. O PROJETO URBSIS

Em Agosto de 2010 foi publicado uma Resolução da Assembleia da República para a adoção de medidas para a redução de risco sísmico [1] que promovam a investigação científica neste domínio, incentivando um plano nacional de redução da vulnerabilidade sísmica. De entre inúmeras recomendações feitas, refira-se a estimulação da investigação científica nas áreas da prevenção, sismologia, engenharia sísmica e caracterização geotectónica do território nacional. Este documento também sublinha a necessidade de elaborar, em articulação com as autarquias locais, um plano nacional de redução da vulnerabilidade sísmica, particularmente do património histórico e zonas históricas dos núcleos urbanos, com identificação e hierarquização das situações de risco. Deste modo, é essencial o desenvolvimento de metodologias que permitam a avaliação socioeconómica das consequências dos sismos.

É uma realidade que a maioria do edificado em alvenaria existente nos centros urbanos dos países do Sul da Europa, como é o caso de Portugal, apresentam

inadequada resistência à ação sísmica. Muitos destes edifícios necessitam de intervenções de reforço de modo a reduzir a sua vulnerabilidade, particularmente quando se tratam de zonas com requisitos de concepção sísmo-resistente dos segundo os recentes códigos europeus [2]. Daí que o desenvolvimento de metodologias de avaliação da vulnerabilidade, bem como de ferramentas de gestão do risco sísmico, seja fundamental, constituindo por isso o cerne deste projeto, através da qual se procura evitar a perda de edifícios e conjuntos urbanos antigos de valor patrimonial incalculável, de vidas humanas e simultaneamente minimizar as consequências económicas.

Nas últimas décadas a avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico, tal como de outros fenómenos naturais, tem vindo a ganhar espaço e a justificar a preocupação crescente da comunidade científica, sendo considerada atualmente essencial na definição do planeamento estratégico de emergência e na gestão urbana. A avaliação da vulnerabilidade sísmica das construções existentes, na perspetiva da mitigação do risco sísmico, não deverá ser considerada apenas em relação aos edifícios de assumida qualidade arquitectónica e valor patrimonial, mas também, em relação aos agregados de edifícios e às suas fachadas em centros históricos urbanos.

A experiência acumulada em diversos trabalhos de investigação anteriores dedicados a estas temáticas [3,4,5,6,7] foi o ponto de partida para este projeto de investigação - URBSIS - Avaliação da Vulnerabilidade e Gestão do Risco Sísmico à Escala Urbana, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (PRDC/ECM-URB/2564/2012). A investigação desenvolvida em projetos precedentes demonstrou que a criação de ferramentas no apoio à avaliação da vulnerabilidade no âmbito de um processo de reabilitação urbana planeado, otimiza a aplicação dos recursos financeiros e reduz o tempo despendido na avaliação de um elevado número de edifícios, assegurando a qualidade de uma inspeção detalhada. Subsequentemente, os resultados da avaliação são necessários para estimar e construir cenários de danos e perdas, tendo-se para isso recorrido a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), uma aplicação de análise e organização espacial com muitas potencialidades e possibilidades, que poderá ser uma ferramenta-piloto a seguir em futuros casos de estudo.

Os centros históricos da cidade de Faro (809 edifícios) e da Horta (443 edifícios), este último localizado na ilha do Faial do arquipélago dos Açores foram os casos de estudo considerados neste projeto. A disponibilidade de informação para os dois casos de estudo continentais foi a principal motivação subjacente à sua seleção. Quanto à cidade da Horta, esta foi selecionada como caso de estudo por combinar uma localização muito interessante em termos de perigosidade sísmica com a disponibilidade de um conjunto de informação valiosa, decorrente da investigação e acompanhamento do processo de reconstrução após o terramoto dos Açores de 1998, por parte de alguns elementos da equipa. Como será destacado neste artigo, o último caso de estudo permitiu ainda desenvolver um processo de calibração para a metodologia original de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios.

Do carácter inovador deste projeto resulta o desenvolvimento de uma ferramenta SIG associada a uma base de dados sobre o edificado integrando a avaliação da vulnerabilidade, auxiliando autoridades locais responsáveis pela gestão do edificado e no apoio às estratégias de mitigação e gestão do risco, a criação de cenários de dano validados permitindo a estimativa e previsão de consequências diretas e indiretas com impacto económico e físico, e ainda a implementação e validação de um procedimento modular na criação de bases de dados de apoio ao estudo da vulnerabilidade, estimativa de danos e avaliação de perdas e custos para centros históricos inseridos em zonas urbanas.

De forma sumária, a estrutura do projeto URBSIS, esquematizada na Figura 1, envolveu a realização de várias tarefas, de acordo com os objetivos iniciais propostos. Neste artigo porém, apenas serão mencionados os resultados associados às Tarefas

3, 4 e 5, nomeadamente a aplicação e calibração da metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica aos diferentes casos de estudo considerados e ainda o estudo da influência da implementação de soluções tradicionais de reforço na metodologia desenvolvida e calibrada.

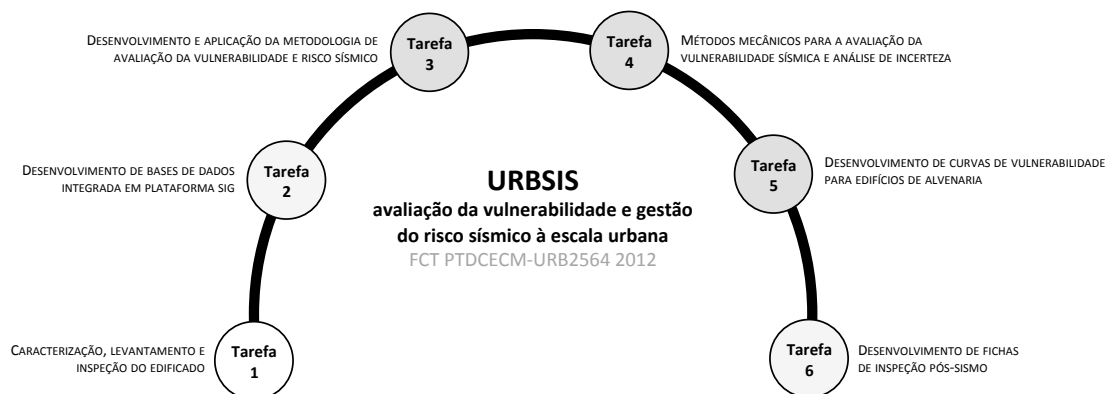


Figura 1: Estrutura do projeto URBSIS, com a identificação das principais tarefas desenvolvidas.

3. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA

A necessidade de estimar de forma fidedigna e eficiente o impacto socioeconómico de grandes eventos sísmicos surgiu, de forma mais efetiva, após os sismos da década de 90, ocorridos nos Estados Unidos da América e no Japão. Os avanços tecnológicos associados às ferramentas SIG (Sistema de Informação Geográfica) permitiram o desenvolvimento de novos e poderosos instrumentos, aplicáveis não só na avaliação do risco sísmico, mas também na gestão do edificado. Adicionalmente, a vasta experiência adquirida em eventos sísmicos recentes permitiu a criação de modelos mais eficazes na avaliação do comportamento estrutural de edifícios, na estimativa de danos e perdas (humanas e económicas) e na gestão de emergência [8].

As várias metodologias de avaliação de vulnerabilidade sísmica disponíveis, aplicáveis quer a edifícios quer a paredes de fachada, diferem não apenas nos critérios associados ao objetivo da avaliação, mas igualmente nos critérios associados à disponibilidade de meios tecnológicos e financeiros, à disponibilidade e detalhe da informação relativa ao edificado a avaliar e à escala de operacionalidade.

3.1. Metodologia do índice de vulnerabilidade

A formulação do índice de vulnerabilidade sísmica utilizada neste trabalho, apresentada de forma resumida na Tabela 1, foi originalmente desenvolvida em Itália pelo GNDT-SSN [9] para a avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de alvenaria através da observação e catalogação de danos e mecanismos após a ocorrência de um evento sísmico. Desde a sua origem, este método tem sido amplamente utilizado por diversos autores (ver por exemplo Calvi *et al.* [10], Lagomarsino e Giovinazzi [11] e Athmani *et al.* [12]. Em Portugal, esta metodologia foi melhorada, adaptada e calibrada à realidade dos nossos edifícios antigos por Vicente [5], introduzindo uma análise e inspeção mais cuidada e ainda outros novos parâmetros contabilizando a interação entre edifícios adjacentes. Inicialmente aplicada à Baixa da cidade de Coimbra em Vicente *et al.* [13], esta metodologia foi recentemente utilizada na avaliação do núcleo urbano antigo do Seixal, Horta e Faro [14].

Formulação da metodologia do índice de vulnerabilidade, desenvolvida por Vicente [5]

Parâmetros	Classe C_{vi}				Peso	Peso relativo	
	A	B	C	D	p_i		
<i>Grupo 1. Sistema construtivo</i>							
P1	Tipo de sistema resistente	0	5	20	50	0,75	46/100
P2	Qualidade do sistema resistente	0	5	20	50	1,00	
P3	Resistência convencional	0	5	20	50	1,50	
P4	Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0,50	
P5	Número de pisos	0	5	20	50	1,50	
P6	Fundações e tipo de solo	0	5	20	50	0,75	
<i>Grupo 2. Irregularidades e interações</i>							
P7	Posição e interação no agregado	0	5	20	50	1,50	27/100
P8	Configuração em planta	0	5	20	50	0,75	
P9	Regularidade em altura	0	5	20	50	0,75	
<i>Grupo 3. Pavimentos e cobertura</i>							
P10	Alinhamento de aberturas	0	5	20	50	0,50	15/100
P11	Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1,00	
P12	Sistema de cobertura	0	5	20	50	1,00	
<i>Grupo 4. Estado de conservação e outros elementos</i>							
P13	Patologias e estado de conservação	0	5	20	50	1,00	12/100
P14	Elementos não estruturais	0	5	20	50	0,50	

Sucintamente, a sua aplicação consiste na determinação de um índice de vulnerabilidade, I_v^* , o qual é calculado para cada edifício através de uma média ponderada de 14 parâmetros distribuídos em 4 classes de vulnerabilidade crescente, C_{vi} , de A a D [5]. A cada parâmetro é ainda associado um determinado peso, p_i , definido em função da relevância desse parâmetro para o comportamento sísmico do edifício. Este índice é posteriormente normalizado, para variar entre 0 e 100, assumindo a designação final de I_v . A definição detalhada de cada um destes 14 parâmetros pode ser consultada em Vicente [5]. Note-se que a principal fonte de incerteza associada ao método reside na definição dos pesos, p_i , associados a cada um dos parâmetros utilizados. A este respeito, Vicente [5] refere que caso a inspeção do edifício a avaliar seja realizada com o detalhe necessário, e que exista informação geométrica suficiente e rigorosa, este método pode ser considerado robusto e a incerteza associada à seleção das classes de vulnerabilidade é relativamente baixa.

3.2. Aplicação da metodologia original

3.2.1. O caso de estudo do Bairro Ribeirinho da cidade de Faro

Com este primeiro caso de estudo pretendeu-se aplicar a metodologia original do índice de vulnerabilidade, tal como explicado na secção anterior, para uma posterior avaliação do risco sísmico, nomeadamente com a estimativa do grau médio de dano e do número de perdas. Dadas as dificuldades encontradas durante o período de inspeção e levantamento dos edifícios pertencentes ao núcleo urbano antigo do Bairro Ribeirinho, foram considerados na nossa análise, edifícios com dois tipos de detalhe. Assim os 354 edifícios que compõe o Bairro Ribeirinho foram divididos em três grandes grupos. O primeiro, composto por 53 edifícios para os quais foi possível

realizar uma inspeção detalhada, foi avaliado através do preenchimento de cinco fichas de inspeção adaptadas de trabalhos anteriores realizados pela mesma equipa [14]. O segundo, agrupou cerca de 138 edifícios, para os quais apenas foi possível efetuar uma inspeção pelo exterior (não-detalhada). Finalmente, foi ainda considerado um terceiro grupo, composto por 163 edifícios, que agrupou os edifícios que devido aos seus materiais, propriedades e sistemas construtivos (edifícios de betão armado), estado de conservação atual (reabilitados ou em ruína) ou estado de ocupação (devolutos) não foram avaliados neste trabalho.

A aplicação da metodologia do índice de vulnerabilidade a cada um destes 191 edifícios avaliados é apresentada na Figura 2 (a), através do mapeamento do I_v para cada edifício. Já na Figura 2 (b) são identificados os edifícios com um valor de I_v superior a 40, e que deverão por isso, ser motivo de maior atenção e preocupação no estabelecimento de prioridades e estratégias de intervenção. Note-se que aproximadamente 15% dos edifícios apresentam um I_v superior a 40, com 5% acima de 45, o equivalente a uma classe de vulnerabilidade A na escala EMS-98 [15]. Por outro lado, apenas 4% dos edifícios avaliados apresentam um I_v inferiores a 20 (equivalente a uma classe de vulnerabilidade B na mesma escala EMS-98). Relativamente aos valores médios do índice de vulnerabilidade, $I_{v,médio}$, foi efetuada uma primeira avaliação considerando apenas os 53 edifícios avaliados detalhadamente para a qual foi obtido um $I_{v,médio}$ igual a 36.15.



Figura 2: Mapeamento do índice de vulnerabilidade I_v : (a) para o Bairro Ribeirinho de Faro; (b) identificação dos edifícios com $I_v > 40$

3.2.2. O caso de estudo do núcleo urbano antigo da cidade da Horta

Por outro lado, a escolha do segundo caso de estudo teve por objetivo não só a avaliação da vulnerabilidade sísmica do núcleo urbano antigo da cidade da Horta através da metodologia do índice de vulnerabilidade, mas também uma primeira tentativa para estudar o impacto de várias soluções tradicionais de reforço sísmico no valor do índice de vulnerabilidade. É importante relembrar que a ilha do Faial foi uma das mais atingidas na sequência do terramoto dos Açores de 9 de Julho de 1998, que deixou um manifesto rasto de destruição por toda a ilha e afetado diretamente mais de 5000 pessoas (8 mortos, 150 feridos e 1500 desalojados). O processo de reconstrução desta e das restantes ilhas afetadas por este terramoto foi conduzido pela Sociedade de Promoção e Reabilitação da Habitação e Infraestruturas (SPRHI) e durou cerca de dez anos, permitindo a recolha de uma quantidade de informação sobre dano pós-terramoto sem precedentes no nosso país, posteriormente organizada e arquivada em 2007 pela Secretaria Regional da Habitação e Equipamentos (SRHE), que dirigiu esta iniciativa [16]. A qualidade e a singularidade desta base de dados motivou o desenvolvimento de inúmeros trabalhos científicos ao longo dos últimos anos. Apesar do livre acesso à referida base de dados ter-nos sido providenciado, foram ainda realizadas algumas inspeções e levantamentos *in situ* prospetadas no âmbito deste

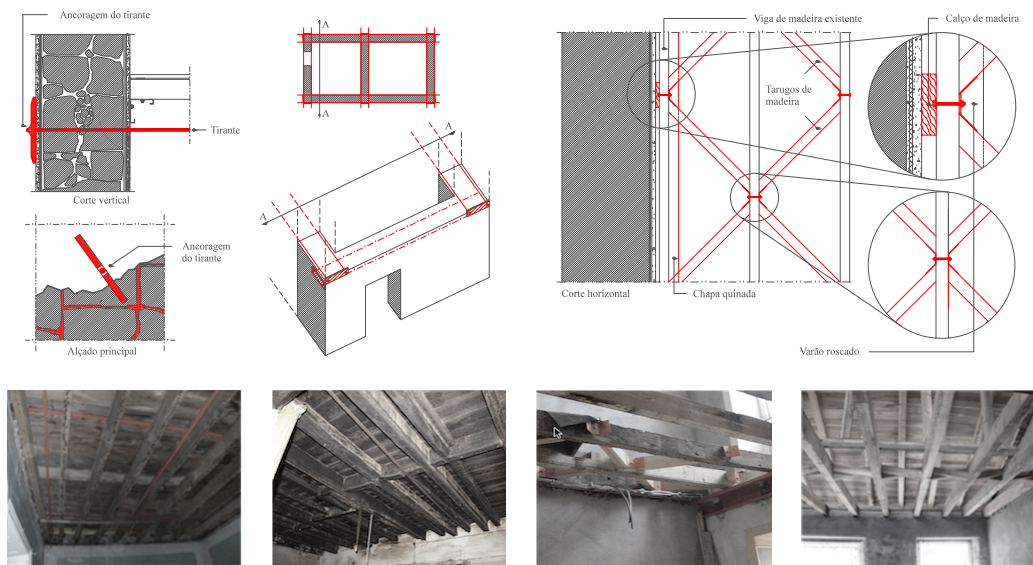
projeto, de forma a complementar alguma dessa informação e a interpretar a evolução e o processo diacrónico resultante das intervenções de reabilitação implementadas desde 1998. Apesar do nível de dano verificado no edificado urbano da cidade da Horta, classificado com uma intensidade macrossísmica $I_{EMS-98} = V/VI$ [17], não ter sido tão severo como no edificado em ambiente rural, esta acabou por ser a zona selecionada como caso de estudo no presente trabalho, dada a sua significância patrimonial.

Uma vez que a demolição e substituição generalizada dos edifícios tradicionais de alvenaria não parece de todo uma estratégia a considerar, dadas as implicações de natureza económica, cultural, histórica e patrimonial, as estratégias de reforço sísmico adotadas neste estudo, desenvolvidas pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores (LREC) em parceria com uma vasta equipa de técnicos e investigadores das áreas da sismologia, engenharia sísmica e engenharia civil [18,19], de acordo com as recomendações definidas no processo de reconstrução do Faial [20] na sequência dos terremotos dos Açores de 1990 e 1998, têm na sua génese essa preocupação em manter a integridade construtiva e arquitectónica dos edifícios. Neste sentido, são aqui analisadas seis soluções de reforço de grau de intrusividade e custo crescentes, de *S1* a *S6*, agrupadas em três pacotes de reforço acumulativos, de *PR1* a *PR3*, apresentadas na seguinte Tabela 2. Enquanto que a descrição pormenorizada de cada uma destas soluções de reforço é feita em detalhe em [21], os custos associados às mesmas foram adoptados a partir de uma base de dados criada na sequência do terremoto dos Açores de 1998 [16].

Soluções de reforço sísmico adoptadas [21]

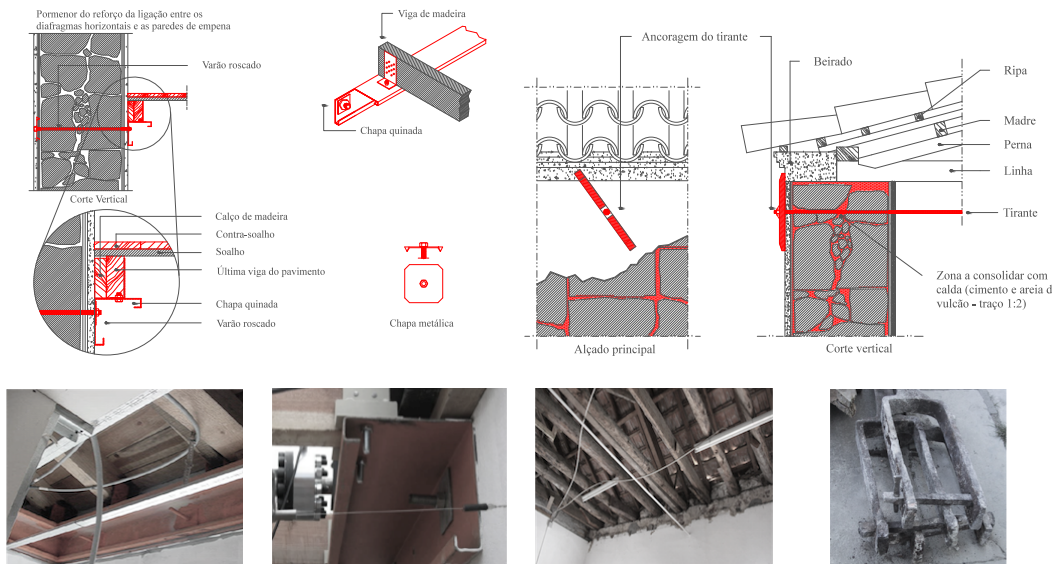
Pacote de reforço, <i>PR</i>	Solução de reforço	Descrição	Custo €/m ²
<i>PR1 = S1 + S2 + S3 + S4</i>	<i>S1</i>	Reforço da ligação entre paredes resistentes com tirantes	35
	<i>S2</i>	Aumento da rigidez com tarugamento e contra-soalho	
	<i>S3</i>	Reforço da ligação entre paredes e diafragmas horizontais	
	<i>S4</i>	Reforço da ligação entre paredes e cobertura com tirantes	
<i>PR2 = PR1 + S5</i>	<i>S5</i>	Reforço da ligação entre paredes e cobertura com cinta de coroamento	100
<i>PR3 = PR2 + S6</i>	<i>S6</i>	Consolidação e reforço das paredes de alvenaria com reboco armado	230

No seguimento da secção anterior, aqui serão tecidas algumas considerações sobre a influência efetiva que as 6 soluções de reforço consideradas (ver Figuras 3, 4 e 5), apresentam no cálculo do índice de vulnerabilidade segundo a metodologia simplificada de avaliação da vulnerabilidade sísmica descrita anteriormente e considerada neste estudo. De acordo com a Tabela 3, cada uma das soluções de reforço contribuiu diretamente para a melhoria gradual do índice de vulnerabilidade, I_v , através da melhoria das classes de vulnerabilidade C_{vi} , nomeadamente dos parâmetros *P1*, *P2*, *P3*, *P11*, *P12* e *P13*. É importante notar uma vez mais que estas soluções foram implementadas de forma cumulativa, de *S1* até *S6*. Assim, todas as soluções de reforço, exceção feita para *S4* e *S6*, implicaram a atribuição direta de uma determinada classe de vulnerabilidade para o respetivo parâmetro em questão, classe essa que foi assim assumida igual em todos os edifícios avaliados. Convém referir que, em casos muito pontuais de edifícios que à data do terremoto de 1998 já se apresentavam munidos com uma ou mais soluções de reforço equiparáveis, a sua classe de vulnerabilidade não sofreu naturalmente qualquer alteração. A solução de reforço *S4* foi implementada na metodologia melhorando em apenas uma classe a classe de vulnerabilidade do parâmetro *P12*, originalmente atribuída para a condição original *SR* do edificado.



(a) Solução de reforço S1

(b) Solução de reforço S2



(c) Solução de reforço S3

(d) Solução de reforço S4

Figura 3: Soluções de reforço S1, S2, S3 e S4, consideradas no pacote de reforço PR1



Figura 4: Solução de reforço considerada no pacote de reforço PR2

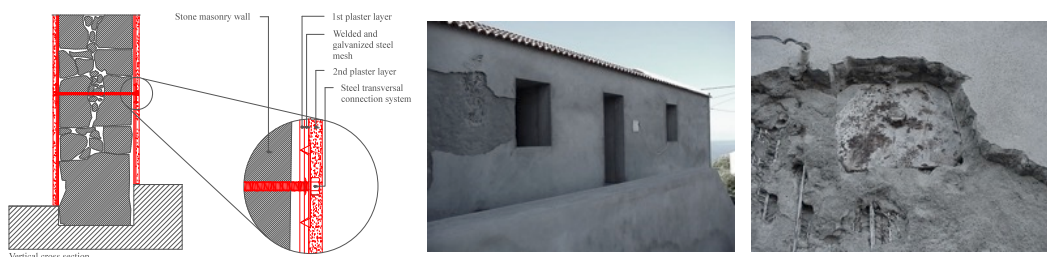


Figura 5: Solução de reforço S6 considerada no pacote de reforço PR3

Influência de cada solução de reforço sobre o índice de vulnerabilidade [21]

Solução de reforço	Descrição	Parâmetro	Classe C_{vi}
S1	Reforço da ligação entre paredes resistentes com tirantes	P1	B
S2	Aumento da rigidez com tarugamento e contra-soalho	P11	A
S3	Reforço da ligação entre paredes e diafragmas horizontais	P1	A
S4	Reforço da ligação entre paredes e cobertura com tirantes	P12	+1
S5	Reforço da ligação entre paredes e cobertura com cintas de coroamento	P12	A
S6	Consolidação e reforço das paredes de alvenaria com reboco armado	P2	A
		P3	T_0
		P13	A

Os resultados obtidos para os valores do índice de vulnerabilidade sísmica do edificado urbano na condição original SR, apresentados na Figura 3 (a), refletem em geral a boa qualidade construtiva e baixa vulnerabilidade sísmica do edificado e estão em conformidade com os relatórios de dano consultados que relatam o baixo impacto que o terremoto de 1998 teve neste núcleo urbano antigo da cidade da Horta, em termos de dano estrutural.



Figura 6: Confronto do mapeamento do índice de vulnerabilidade I_v : (a) para o núcleo urbano antigo da cidade da Horta entre a condição original do edificado sem reforço; (b) e a condição após a implementação de soluções tradicionais de reforço sísmico (*direita*)

4. CONCLUSÕES

As conclusões e recomendações mais gerais que se retiram do trabalho desenvolvido vão ao encontro da necessidade de melhorar a percepção pública, educação e investigação relacionada com a mitigação do risco sísmico, aproveitando os diversos veículos e agentes de comunicação disponíveis na nossa sociedade. Idealmente, as estratégias de mitigação de risco devem abranger a redução da exposição das comunidades e um planeamento e desenvolvimento urbano mais sustentável, assim como campanhas de reforço sísmico aplicadas em conformidade com uma legislação competente e responsável, que garanta simultaneamente reforçar condignamente o edificado existente e exigir um adequado dimensionamento sísmico em construções novas. Se forem revistas as atuais políticas em torno desta temática e repensados os modelos de apoio financeiro e institucional, tanto numa escala regional como nacional, será possível reduzir a vulnerabilidade sísmica do nosso edificado de forma sustentável e sem custos desmesuráveis para ambas as partes interessadas.

Apesar de neste trabalho apenas nos termos focado na metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica, cujo principal output é o índice de vulnerabilidade, existem outro tipo de outputs baseados neste indicador que demonstram o sentido prático e a utilidade deste tipo de metodologias simplificadas no apoio à tomada de decisão, associados a danos físicos (grau médio de dano, número de edifícios colapsados e consequente número de desalojados), perdas humanas (fatalidades e número de feridos), e ainda perdas económicas. Pelos resultados aqui obtidos podemos verificar que a vulnerabilidade do núcleo urbano antigo da cidade da Horta não é, em termos globais, tão gravosa como por exemplo no caso do Bairro Ribeirinho de Faro. Isto deve-se principalmente a dois fatores: à qualidade da alvenaria de pedra e respetivo qualidade de assentamento, e ao facto de grande parte do edificado do núcleo urbano antigo da cidade da Horta ter sido intervencionado estruturalmente com a aplicação de algumas das soluções de reforço aqui apresentadas, após o terramoto de 1998. Ainda assim, estes resultados podem dizer-se bem ajustados ao dano observado em toda a área de estudo, decorrente do terramoto dos Açores de 1998.

Relativamente à implementação das soluções de reforço consideradas, estas conduziram a uma melhoria significativa do desempenho sísmico global do edificado, traduzido pela melhoria dos valores do índice de vulnerabilidade sísmica, refletindo de forma satisfatória a sua real influência sobre a capacidade de resistência ao corte, ductilidade e comportamento em caixa dos edifícios. No entanto, uma vez mais, os resultados em termos de redução de perdas poderiam ter sido mais expressivos caso tivessem sido atingidos valores mais elevados nos índices de vulnerabilidade sísmica na condição original *SR* dos edifícios. Não obstante, aplicação da solução de reforço *S5*, relativa à melhoria da ligação entre paredes e cobertura através de cintas de coroamento, fez levantar algumas questões sobre o seu contributo efetivo no desempenho sísmico global do edifício, uma vez que poderá introduzir modificações importantes nos modos de vibração da estrutura, especialmente em edifícios com dois ou mais pisos. Assim, os autores sugerem que este tipo de solução seja revisto e examinado sob o ponto de vista mecânico, numérico e experimental, de forma esclarecer esta questão.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), pelo financiamento deste projeto, e ainda à Universidade de Aveiro (UA), ao Instituto Superior Técnico (IST), à Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), às Câmara Municipal de Faro e da Horta, e à SRHE, pelo apoio institucional e logístico prestado.

REFERÊNCIAS

- [1] Portugal (2010) Resolução Da Assembleia Da República N. 102/2010: Adopção de Medidas Para Reduzir Os Riscos Sísmicos. Diário Da República, 1ª Série, N. 155 - 11 de Agosto. Portugal.
- [2] CEN (2004) Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part I: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. Eurocode 8. Brussels, Belgium, Brussels, Belgium.
- [3] Neves, F. (2008) Avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional da Ilha do Faial. *MSc Dissertation*. Dept. of Civil Engineering of the University of Aveiro.
- [4] Vicente, R. (2008) Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. *PhD Dissertation*. Dept. of Civil Engineering of the University of Aveiro.
- [5] Ferreira, T.M. (2009) Seismic vulnerability assessment of masonry facade walls. *MSc Dissertation*, University of Aveiro, Portugal (in Portuguese).
- [6] Ferreira, T.M.; Vicente, R.; Varum, H., Costa, A. and Mendes da Silva, J.A.R. (2010) Metodologia de Avaliação Da Vulnerabilidade Sísmica Das Paredes de Fachada de Edifícios Tradicionais de Alvenaria. *8º Congresso de Sismologia E Engenharia Sísmica*.
- [7] Lang, K. (2002) Seismic Vulnerability of Existing Buildings. *PhD Dissertation*. Institute of Structural Engineering of the Swiss Federal Institute of Technology. Switzerland.
- [8] GNDT-SSN (1994) Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo e secondo livello (murata e cemento armato). Grup. Naz. per la Dif. dai Terremoti, Roma (Itália).
- [9] Calvi, G.M.; Pinho, R.; Magenes, G.; Bommer, J.J.; Restrepo-Vélez, L.F. and Crowley, H. (2006) Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISST J Earthq Technol* 43:75–104.
- [10] Lagomarsino S, Giovinazzi S (2006) Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull Earthq Eng* 4:415–443. doi: 10.1007/s10518-006-9024-z.
- [11] Athmani AE, Gouasmia, A.; Ferreira, T.M., Vicente, R. and Khemis, A. (2014) Seismic vulnerability assessment of historical masonry buildings located in Annaba city (Algeria) using non ad-hoc data survey. *Bull Earthq Eng*. doi: 10.1007/s10518-014-9717-7.
- [12] Vicente, R.; Parodi, S.; Lagomarsino, S.; Varum, H. and Mendes da Silva, J.A.R. (2011) Seismic vulnerability and risk assessment: case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal. *Bull Earthq Eng* 9:1067–1096. doi: 10.1007/s10518-010-9233-3.
- [13] Ferreira, T.M.; Vicente, R.; Mendes da Silva, J.A.R., Varum, H. and Costa, A. (2013) Seismic vulnerability assessment of historical urban centres: case study of the old city centre in Seixal, Portugal. *Bull Earthq Eng* 11:1753–1773. doi: 10.1007/s10518-013-9447-2.
- [14] Grünthal, G. (1998) Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et Séismologie: Volume 15 - European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Eur. Cent. Geodyn. Seismol. Luxembourg.
- [15] Neves, F.; Costa, A.; Vicente, R.; Oliveira, C.S. and Varum, H. (2012) Seismic vulnerability assessment and characterisation of the buildings on Faial Island, Azores. *Bull Earthq Eng* 10:27–44. doi: 10.1007/s10518-011-9276-0.
- [16] Zonno, G.; Oliveira, C.S.; Ferreira, M.A.; Musacchio, G.; Meroni, F.; Mota-de-Sá, F. and Neves, F. (2010) Assessing Seismic Damage Through Stochastic Simulation of Ground Shaking: The Case of the 1998 Faial Earthquake (Azores Islands). *Springer - Surv Geophys* 31:361–381. doi:10.1007/s10712-009-9091-1.
- [17] Costa, A.; Oliveira, C.S. and Neves, F. (2008) Reinforcing techniques more commonly used in Faial reconstruction. *Sismo 1998 – Açores. Uma década depois*, 1st ed. pp 531–555.
- [18] Oliveira, C.S.; Lucas, A. and Correia Guedes, J.H. (1990) MONOGRAFIA - 10 Anos após o Sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980 - Volume I e II. Secretaria

Regional da Habitação e Obras Públicas, Delegação da Ilha Terceira, Açores, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Angra do Heroísmo, Açores, Portugal.

- [19] Carvalho, E.C.; Oliveira, C.S.; Fragoso, M. and Miranda, V. (1998) Regras gerais de reabilitação e reconstrução de edifícios correntes afectados pela crise sísmica do Faial, Pico e São Jorge, iniciada pelo sismo de 9 de Julho de 1998. LREC/DMCE REI. 100/98.
- [20] Ferreira, T.M.; Maio, R. and Vicente, R. (2015) O impacto do risco sísmico na resiliência urbana e nas perdas económicas. In: Terramoto de Lisboa de 1755: o que aprendemos 260 anos depois? Coimbra, 2015. doi:10.14195/978-989-26-1099-3_8.