

URBSIS

ISBN 978-989-20-6667-7



9 789892 066677

URBSIS

avaliação da vulnerabilidade e gestão do risco sísmico à escala urbana

URBSIS project

A qualidade de vida nos núcleos urbanos constitui uma meta dinâmica, fortemente influenciada pelos processos sociais e económicos, pela evolução das suas exigências e expectativas e pela evolução do próprio tecido urbano, do parque edificado e das infraestruturas. Nos núcleos urbanos antigos, são peças fundamentais deste desafio a garantia da segurança estrutural, do conforto e de salubridade, num equilíbrio que se quer, sustentado e sustentável, com a preservação das memórias e da cultura local. Para além de inadequada resistência à ação sísmica, a grande maioria deste edificado encontra-se em avançado estado de degradação, situação que, aliada a outros fenómenos de índole social, tem levado ao abandono massivo destes espaços de elevado valor histórico e patrimonial. De facto, muitos destes edifícios necessitam de intervenções estruturais urgentes, nomeadamente de intervenções de reforço que visem reduzir a sua elevada vulnerabilidade sísmica, particularmente nas zonas do território onde perigosidade sísmica é mais importante. É nesta base que surge a presente publicação, elaborada no âmbito do projeto de investigação "URBSIS - avaliação da vulnerabilidade e gestão do risco sísmico à escala urbana", e cujo conteúdo vem sublinhar a necessidade de ser elaborado um plano nacional de redução da vulnerabilidade sísmica, particularmente do património histórico e dos núcleos urbanos antigos, para que as situações de risco sejam devidamente identificadas, hierarquizadas e acatelasadas.

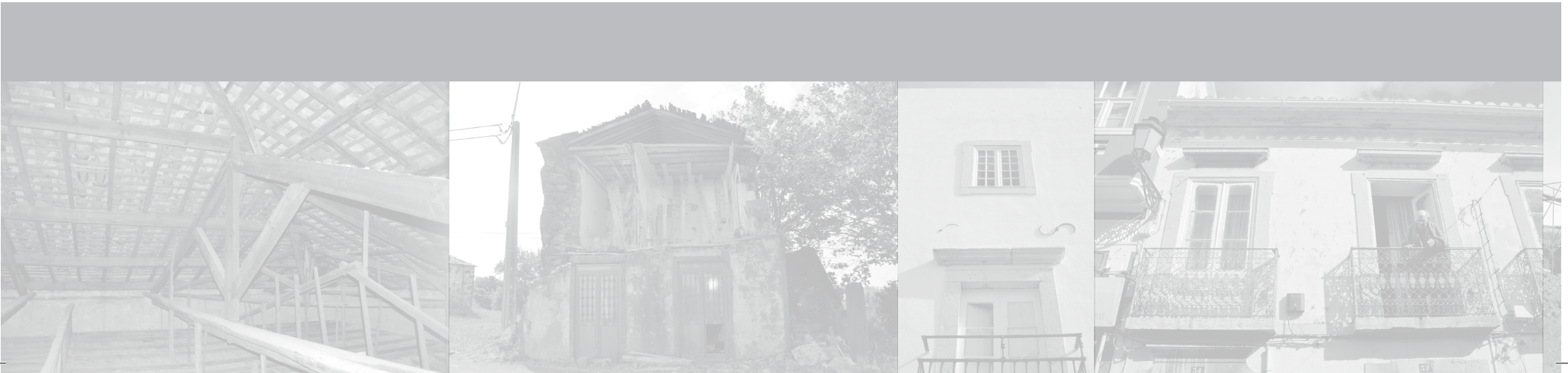
avaliação da vulnerabilidade e gestão do risco sísmico à escala urbana | PTDC/ECM-URB/2564/2012



URBSIS

**avaliação da vulnerabilidade e gestão
do risco sísmico à escala urbana**

Romeu Vicente | Tiago Miguel Ferreira | Rui Maio (eds)



URBSIS

avaliação da vulnerabilidade e gestão do risco sísmico à escala urbana

!"#\$%&%#()

FICHA TÉCNICA

ISBN: 978-989-20-667-7

editores

Romeu Vicente
Tiago Miguel Ferreira
Rui Maio

autores

Anibal Costa	João Estêvão
Alexandre A. Costa	Romeu Vicente
Carlos Sousa Oliveira	Rui Maio
Humberto Varum	Tiago Miguel Ferreira

local e data de edição

Aveiro, maio de 2016

impressão

Tipografia Lusitânia

tiragem

50 exemplares



coordenação:



universidade de aveiro
theoria poiesis praxis



TÉCNICO LISBOA

apoio:

FCT

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



RISCO

Aveiro Research Centre of Risks
and Sustainability in Construction



QUADRO
DE REFERÊNCIA
ESTRATÉGICO
NACIONAL
PORTUGAL 2007-2013



COMPETE

PROGRAMA OPERACIONAL FACTORES DE COMPETITIVIDADE



UNIÃO EUROPEIA

Fundo Europeu de
Desenvolvimento Regional





PREÂMBULO

Este livro resulta da compilação do trabalho de investigação científica desenvolvido no âmbito do projeto I&D “URBSIS - Avaliação da Vulnerabilidade e Gestão do Risco Sísmico à Escala Urbana”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e apoiado institucionalmente pela Universidade de Aveiro (UA), Instituto Superior Técnico (IST), Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), Câmara Municipal de Aveiro, Câmara Municipal de Faro, Câmara Municipal da Horta e Sociedade de Promoção Reabilitação de Habitação e Infraestruturas SA (SPRHI).

Apesar da avaliação da vulnerabilidade sísmica do edificado urbano antigo ser um tema transversal à maioria dos capítulos, são também aqui abordados outros conteúdos relacionados com a avaliação e mitigação do risco sísmico, tais como a perigosidade sísmica e exposição associada ao território nacional, a aplicação de metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica e a utilização de ferramentas de construção de cenários, a aplicação e avaliação do desempenho de soluções de reforço sísmico e a perceção e comunicação do risco sísmico. Tirando partido do apoio da Câmara Municipal de Faro e do Governo Regional dos Açores, os núcleos urbanos antigos do Bairro Ribeirinho da cidade de Faro e da freguesia da Matriz, na cidade da Horta (Açores) foram adotados neste projeto como casos de estudo.





ÍNDICE

CAPÍTULO 1

A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA NA SALVAGUARDA DO EDIFICADO ANTIGO

1.	ENQUADRAMENTO.....	11
2.	ORGANIZAÇÃO DA PUBLICAÇÃO.....	15
3.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	16

CAPÍTULO 2

A PERIGOSIDADE SÍSMICA E A EXPOSIÇÃO ASSOCIADA AO TERRITÓRIO PORTUGUÊS

1.	INTRODUÇÃO.....	17
2.	SISMICIDADE E CATÁLOGOS SÍSMICOS EM PORTUGAL.....	18
3.	RECORRÊNCIA DO FENÓMENO.....	22
4.	ATENUAÇÃO E AMPLIFICAÇÃO DAS VIBRAÇÕES.....	24
5.	MÉTODOS DE ANÁLISE DA PERIGOSIDADE SÍSMICA.....	25
5.1.	Abordagens determinísticas.....	25
5.2.	Abordagens probabilísticas.....	26
5.3.	Abordagens híbridas.....	28
6.	INCERTEZAS.....	29
7.	ESTUDOS REALIZADOS PARA PORTUGAL.....	30
8.	NOTAS FINAIS.....	33
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

CAPÍTULO 3

METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DO EDIFICADO ANTIGO

1.	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DE EDIFÍCIOS EM ALVENARIA.	39
2.	METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA.	41
2.1.	Metodologias Baseadas em Vulnerabilidade Observada	42
2.2.	Metodologias Baseadas em Modelos Simplificados	44
2.3.	Metodologias de Análise Detalhada	45
3.	COMENTÁRIOS FINAIS.	46
4.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.	46

CAPÍTULO 4

VULNERABILIDADE SÍSMICA DO NÚCLEO URBANO ANTIGO DE FARO

1.	INTRODUÇÃO.	49
1.1.	O centro histórico de Faro como caso de estudo.	50
1.2.	Metodologia do Índice de Vulnerabilidade.	53
2.	RESULTADOS.	54
3.	CONCLUSÕES	58
4.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.	59

CAPÍTULO 5

MITIGAÇÃO DO RISCO SÍSMICO EM NÚCLEOS URBANOS ANTIGOS

1.	INTRODUÇÃO.	61
1.1.	Resiliência urbana e mitigação do risco sísmico	61
1.2.	O contexto de Portugal.	64
2.	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA E SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO	66
2.1.	O caso de estudo do núcleo urbano antigo da cidade da Horta, Portugal.	66
2.2.	Aplicação de soluções tradicionais de reforço sísmico.	70
2.3.	O reflexo de cada solução de reforço na metodologia do Iv	75



3.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	76
3.1.	Avaliação da vulnerabilidade sísmica.....	76
3.2.	Cenários de dano e estimativa de perdas.....	79
3.3.	Perdas económicas.....	85
4.	COMENTÁRIOS FINAIS.....	87
5.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	89

CAPÍTULO 6 ESTUDO DE SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO DE UM EDIFÍCIO DE ALVENARIA

1.	INTRODUÇÃO.....	93
1.1.	Caracterização do Edificado Antigo de Alvenaria de Pedra.....	93
1.2.	O edificado da ilha do Faial.....	94
2.	O COMPORTAMENTO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA DE PEDRA.....	95
2.1.	Caracterização do caso de estudo.....	95
2.2.	Análises não-lineares.....	97
2.3.	Avaliação do desempenho sísmico do edifício na sua condição original (BR).....	101
3.	REFORÇO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA DE PEDRA.....	103
3.1.	Aplicação numérica de soluções tradicionais de reforço.....	103
3.2.	Comparação entre os diferentes pacotes de reforço sísmico analisados.....	106
4.	COMENTÁRIOS FINAIS.....	110
5.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	110



CAPÍTULO 7 PERCEÇÃO E COMUNICAÇÃO DO RISCO

1.	PERCEÇÃO E SENSIBILIZAÇÃO PARA O DE RISCO SÍSMICO EM PORTUGAL.....	113
2.	METODOLOGIA DE COMUNICAÇÃO ASSOCIADA AO PROJETO URBSIS	115
3.	PERCEÇÃO DO RISCO: QUESTIONÁRIOS E RESULTADOS.....	116
3.1.	O questionário	117
3.2.	Exposição e análise dos principais resultados	119
4.	COMENTÁRIOS FINAIS.....	124
5.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	125

CAPÍTULO 8 REFLEXÕES FINAIS E ENSINAMENTOS

1.	REFLEXÕES FINAIS	127
1.1.	Génese e análise dos processos de reabilitação urbana	127
1.2.	Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico de núcleos urbanos antigos	128
1.3.	Verificação da segurança e análise de estratégias de reforço	129
2.	PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	130
2.1.	A Perigosidade Sísmica e a Exposição Associada ao Território Português	130
2.2.	A Vulnerabilidade Sísmica do Edificado Antigo	130
2.3.	Reforço Sísmico de Edifícios Antigos: O Núcleo Urbano Antigo do Cidade da Horta ...	131
2.4.	Análise Numérica do Comportamento Sísmico de Edifícios Antigos	132
2.5.	Percepção e Comunicação do Risco.....	132
3.	COMENTÁRIO FINAL.....	133





CAPÍTULO 1

A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA NA SALVAGUARDA DO EDIFICADO ANTIGO

1. ENQUADRAMENTO

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

A avaliação das condições de segurança estrutural é frequentemente esquecida ou subvalorizada, talvez pela ausência de risco e exposição recente à ação devastadora de um evento sísmico de intensidade moderada ou alta. Reconhece-se, no entanto, a importância da avaliação da vulnerabilidade sísmica das construções, uma vez que se

estabeleceu como um dos objetivos do processo de reabilitação e gestão do edificado, presente nos critérios da recolha de informação em campo, fazendo uso dos mesmos recursos. A inclusão de mais este objetivo no processo, necessitou da adaptação da metodologia proposta para avaliação aos meios usados, à escala de intervenção (a dos núcleos urbanos antigos) e ao detalhe da informação recolhida. Desta forma, a motivação para o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica validada e inserida num processo de recuperação e reabilitação urbana e adequada à escala de estudo, surgiu como uma oportunidade única e singular no que diz respeito à caracterização da vulnerabilidade do edificado à escala de um centro histórico para o nosso País.

A avaliação da vulnerabilidade dos edifícios “nobres” (igrejas, monumentos, etc.) motivou diversos estudos neste

domínio e rapidamente se estendeu aos outros edifícios comuns em alvenaria resistente e estruturas de betão armado. Grande percentagem do edificado urbano é constituído por edifícios do Séc. XVIII ao Séc. XX, não tendo sido objeto de regulamentos de construção antissísmica, como acontece com edifícios recentes em betão armado.

O edificado em alvenaria dos centros históricos, frequentemente considerado hoje como património mundial pela UNESCO, está desprovido de regras de conceção sísmo-resistente e a avaliação da sua segurança estrutural é justificável pelo incalculável valor cultural e arquitetónico que locais encerram. O nível de recursos empregues na avaliação da segurança estrutural dos edifícios antigos é claramente viável do ponto de vista custo-benefício, quando se trata de património. A possibilidade de avaliar a vulnerabilidade do edificado, através de uma metodologia criada para o efeito, constitui uma oportunidade de estudo e aprendizagem do edificado antigo, através de uma inspeção mais aprofundada, permitindo registar e diagnosticar anomalias e fragilidades estruturais e ainda identificar construções que apresentem um grau de deterioração e vulnerabilidade elevado. Como resultado da filtragem destes casos, surge o aconselhamento de uma inspeção mais cuidada e detalhada que defina casos críticos que serão alvo de intervenções prioritárias.

Estudos sísmicos recentes desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), nomeadamente para

a área metropolitana de Lisboa (Sousa 2006), revelam números preocupantes no que diz respeito a perdas económicas associadas a um forte evento sísmico, como o histórico sismo de Lisboa de 1755. Mesmo em zonas de moderada perigosidade, como a região centro e norte do país, os sismos têm causado níveis de dano que, traduzidos economicamente, justificam a necessidade de uma avaliação da vulnerabilidade de primeiro nível, isto é, de um procedimento expedito. Isto é tanto mais verdade nas zonas de baixa a moderada perigosidade, onde as construções antigas em alvenaria apresentam fragilidades estruturais e falta de princípios de conceção sísmo-resistente, que se traduz em sérios riscos quando sujeitos a um sismo de média intensidade.

A aplicação de estudos de vulnerabilidade em centros urbanos deve considerar tanto os aspetos estruturais como os funcionais, operativos e urbanos, para que possa proporcionar informação útil na prevenção de riscos, no planeamento e ordenação territorial. Tais medidas requerem uma avaliação prévia do seu comportamento sísmico espetável e o estabelecimento de prioridades de intervenção com um adequado planeamento técnico e financeiro, através do desenvolvimento de programas de controlo da vulnerabilidade sísmica. Noutro sentido, constituem uma importante ferramenta no apoio à decisão, relacionada com a reabilitação ou demolição de edifícios. O estudo da vulnerabilidade sísmica permite criar indicadores simples passíveis de serem utilizados no auxílio a intervenções de reparação e



reforço e na adoção de medidas de mitigação do risco sísmico destas áreas. É neste contexto que o recurso a métodos simplificados e expeditos, capazes de fornecer indicadores auxiliares importantes, mobilizando recursos limitados, se pode revelar muito útil.

Em suma, as análises de vulnerabilidade sísmica das diferentes estruturas existentes, infraestruturas, edifícios essenciais, centrais nucleares, entre outras, encontram-se num nível avançado devido ao trabalho de investigação acumulado ao longo de 20 anos, existindo diferentes formas de avaliação da vulnerabilidade sísmica com diferentes níveis de detalhe e com numerosas aplicações pelo mundo. No entanto, em países com um stock de edificado antigo degradado, como é o caso de Portugal, pouco se tem feito para reduzir a vulnerabilidade sísmica das estruturas antigas, que, sujeitas a movimentos de intensidade moderada e alta, irão sofrer danos físicos, sociais e económicos e resultar em perdas de vidas humanas. A ocorrência de um sismo é sempre associada a danos com impacto humano, socioeconómico e material muito significativo. No entanto, embora sejam muitas vezes esquecidas, as perdas culturais em termos de valores arquitetónicos são igualmente irreparáveis.

Em Agosto de 2010 foi publicado uma Resolução da Assembleia da República para a adoção de medidas para a redução de risco sísmico (Portugal 2010) 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 conceção sismo-resistente dos segundo os recentes códigos europeus (CEN 2004). 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 arquitetónica 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 (Ferreira 2008; Neves 2008; Vicente 2008; Ferreira 2009; Ferreira 2010) é o ponto de partida para este projeto de investigação. A investigação já desenvolvida revelou 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 de Aveiro (521 edifícios) e de Faro (809 edifícios) são os casos de estudo ao nível continental, e o centro histórico da cidade da Horta (443 edifícios), na ilha do Faial no arquipélago dos Açores é o terceiro caso de estudo. 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 devido por conciliar uma localização muito interessante em termos de perigosidade sísmica com a disponibilidade de um conjunto de informação valiosa, decorrente da investigação de parte da equipa. Os casos de estudo dos centros históricos de Aveiro e da Horta permitirão aplicar e melhorar significativamente a metodologia já desenvolvida no passado por esta equipa de investigação, através do processo de validação e calibração previsto.

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;
- O estabelecimento e a 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.

2. ORGANIZAÇÃO DA PUBLICAÇÃO

Esta publicação está estruturada em 7 capítulos, em que o Capítulo 1 é a presente introdução, onde se apresentam as motivações, premissas e objetivos deste trabalho (ver Figura 1).

No Capítulo 2 faz-se a abordagem a conceitos de perigosidade e de exposição, enquanto aspetos definidores do risco

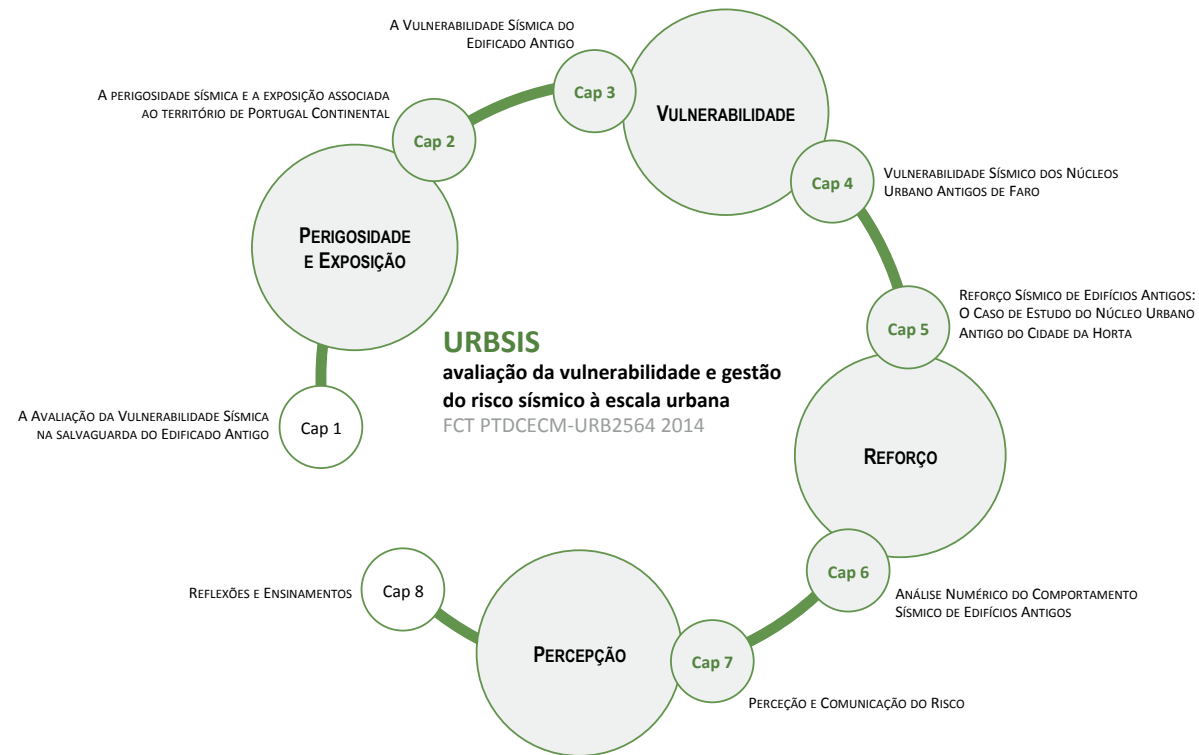


Figura 1: Estrutura do livro e relacionamento com a organização em capítulos.

sísmico, particularizando a abordagem para o território português. No Capítulo 3, apresenta-se uma análise às principais metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica do edificado antigo, identificando fragilidades, mecanismos de dano e efeito dos sismos.

No Capítulo 4 aplica-se a metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica desenvolvida para um dos casos de estudo – Faro – e discute-se a construção de cenários de dano com recurso a um sistema de informação geográfica. No capítulo 5, já recorrendo a resultados do caso de estudo da cidade da Horta, Açores, apresenta-se um estudo técnico-económico das principais técnicas de reforço sísmico de edifícios antigo em alvenaria.

No Capítulo 6, com recurso a modelos numéricos de edifícios tipologicamente representativos dos Açores, analisa-se a sua resposta não-linear, com base na comparação entre modelos simples e reforçados. No Capítulo 7 apresenta-se a discussão dos resultados obtidos de um inquérito desenvolvido para avaliação do nível de perceção e comunicação do risco da comunidade na região de Faro, Algarve, e por fim, no Capítulo 8, sistematizam-se as principais conclusões deste projeto, com uma breve reflexão sobre a realidade do País, no que diz respeito à gestão e cultura de avaliação do risco no planeamento e nos procedimentos e ferramentas de apoio à salvaguarda do património edificado nos núcleos urbanos antigos.

3. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

CEN (2004) Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. Eur. Stand. NF EN, Brussels

Ferreira CF (2008) Vulnerabilidade sísmica do parque edificado na cidade de Aveiro. Universidade de Aveiro

Ferreira T (2009) Avaliação da vulnerabilidade sísmica das paredes de fachada de edifícios em alvenaria. Universidade de Aveiro

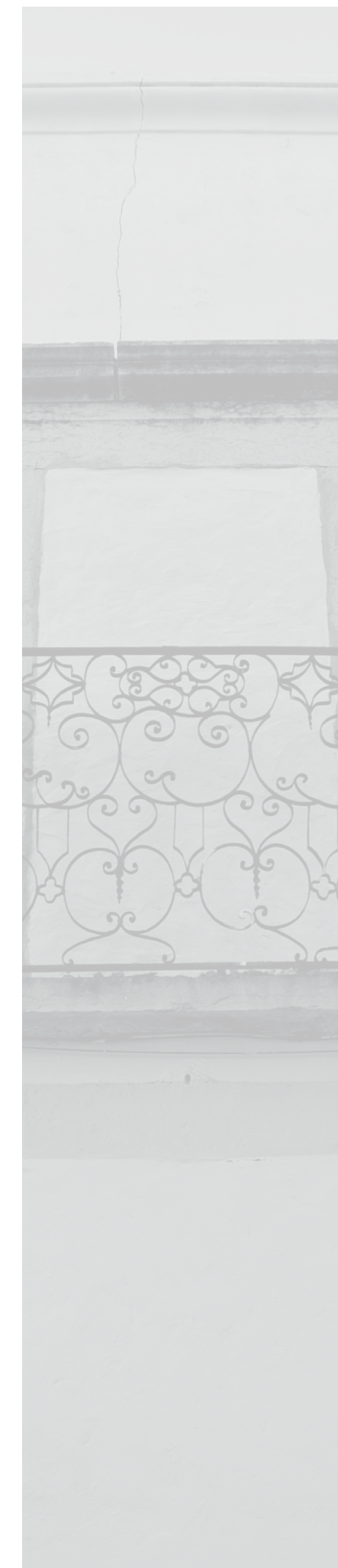
Ferreira T (2010) Avaliação da vulnerabilidade sísmica de núcleos urbanos antigos. Aplicação ao núcleo urbano antigo do Seixal. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Neves F (2008) Avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional da ilha do Faial. Universidade de Aveiro

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 Agosto. p 3317

Sousa ML (2006) Risco sísmico em Portugal continental. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

Vicente R (2008) Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. Universidade de Aveiro





CAPÍTULO 2

A PERIGOSIDADE SÍSMICA E A EXPOSIÇÃO ASSOCIADA AO TERRITÓRIO PORTUGUÊS

1. INTRODUÇÃO

Os sismos são fenómenos naturais de grande impacto sobre as comunidades, tendo nos últimos cem anos provocado, a nível global, mais de um milhão e meio de vítimas. Cinquenta por cento destas vítimas resultaram de dois enormes sismos apenas, um no Japão em 1923 e outro na China em 1976, tendo as restantes ocorrido em sismos, à média de três por ano, alguns deles com mais de 20,000 vítimas. Somente entre Agosto e Dezembro de 1999 ocorreram 5 grandes eventos, dos quais resultaram mais de 30,000 vítimas, mais de meio milhão de desalojados e prejuízos superiores ao PIB de Português.

Já no início do Século XXI, a atividade sísmica no mundo continuou a manifestar-se de forma extremamente intensa, causando grave impactos humanos, sociais e económicos em diversas comunidades, um pouco por todo o mundo. Sismos como o de 2004 em Sumatra (Indonésia) que foi seguido por um enorme tsunami, o de 2008 em Sichuan (China), o do Haiti de 2010, o do Chile 2010, e o sismo de 2011 no Japão (estes dois últimos seguidos por enorme

tsunami -, para nomear apenas os de maior dimensão), revelam que a atividade sísmica e os impactos que dela resultam, não têm diminuído.

O risco sísmico pretende dar conta exatamente do impacto da atividade sísmica sobre as comunidades, utilizando-se a designação de perigosidade sísmica para exprimir apenas a atividade sísmica que se pode vir a sentir num dado território, num dado intervalo de tempo. De forma simples, pode afirmar-se que a perigosidade sísmica (“*hazard*” na terminologia anglo-saxónica) mede a tendência para se sentirem sismos (ação sísmica), sendo expressa essa tendência através da probabilidade de se exceder determinado valor dessa ação, num determinado intervalo de tempo. A perigosidade depende da Natureza (e é por ela regida), sendo até hoje impossível fazer previsões da sua ocorrência para períodos de curta ou média duração (dias, anos ou décadas). A previsão a longo prazo (dezenas, centenas de anos) pode ser feita e é nela que se baseiam os regulamentos de construção para a definição da ação sísmica.

Assim, o risco sísmico exprime o efeito da ação sísmica sobre os objetos construídos, como sejam o parque habitacional, industrial, ou o património monumental, ou as infraestruturas de abastecimento (gás, eletricidade, água, etc.) e de transportes.

2. SISMICIDADE E CATÁLOGOS SÍSMICOS EM PORTUGAL

O Instituto de Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) é a instituição que gere, desde 2012 (anteriormente Instituto de Meteorologia, IM), a rede sismográfica portuguesa (refira-se que nos Açores existe ainda o Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos que gere a sua rede sismográfica própria), produzindo informação mensal e anual sobre todos os fenómenos sísmicos ocorridos no continente, Açores e regiões vizinhas. Para consulta da carta dos sismos registados no território continental português ao longo da última semana, é possível consultar o portal do IPMA em www.ipma.pt. Adicionalmente, podem ainda ser consultados os portais do Instituto Geográfico Nacional de Espanha, em www.geo.ign.es, e do European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC), que agrega toda a informação sísmica europeia, em www.emsc-csem.org. O Boletim Sísmico Mensal ou o Anuário Sismológico de Portugal, ambas publicações do IM/IPMA, contêm um vasto conjunto de informação relati-

va a sismos ocorridos, reportando os parâmetros mais importantes e os tempos de chegada das várias ondas às diferentes estações que compõem a rede sismográfica.

Existem igualmente outras publicações que fornecem, para períodos mais alargados, as ocorrências sísmicas, constituindo catálogos sísmicos com toda a informação existente sobre os principais parâmetros. Com cerca de 14,000 eventos, o catálogo de Sousa et al. (1992) contém todos os sismos de magnitude $M > 3$ de que há memória histórica, isto é, desde o princípio da Era Cristã até 1991. Para os Açores, o catálogo de Sousa e Martins (2000) contém cerca de 15,000 eventos de magnitude $M > 3$, ocorridos no período compreendido entre 1500 até 1998. A informação sobre os sismos ocorridos desde 1998 até à presente data, pode ser encontrada nos endereços eletrónicos atrás referidos, contando com os seguintes dados relacionados com a atividade sísmica registada na rede sísmica, por ocorrência: data, hora, minuto e segundo na origem; localização do epicentro; profundidade do foco; magnitude do sismo.

No caso de sismo sentido, as agências responsáveis pela vigilância sísmica produzem alguma informação complementar, nomeadamente *shakemaps*, um instrumento que revela a forma como o sismo se fez sentir e as intensidades observadas nas povoações próximas do epicentro (Marreiros e Carrilho 2012).



Portugal Continental encontra-se localizado na Margem Continental Ibérica, uma transição geológica entre a chamada Crosta Oceânica a Oeste e a Crosta Continental para o centro e Leste da Península Ibérica. A atividade sísmica que se faz sentir no Continente é proveniente do jogo das placas Euro-Asiática e Africana que se encontram em colisão uma contra a outra à velocidade de cerca de 5 mm por ano. Esta colisão é responsável pela ocorrência de sismos, quer na zona de encontro (fronteira de placas), quer em estruturas geológicas que se prolongam da fronteira através da margem continental. Os sismos produzidos no movimento das placas junto à fronteira são tipicamente de elevada magnitude, sendo sentidos a grandes distâncias. Os sismos que se produzem nas falhas que entram pelo continente através da Margem Continental são de magnitude moderada mas podem causar impactos graves nas zonas próximas das falhas que rompem. A sismicidade histórica e a instrumental são o melhor testemunho do efeito dos sismos sobre o território, dando também conta dos tempos de ocorrência de eventos de dada magnitude.

As principais zonas de geração dos sismos e tsunamis têm sofrido algumas evoluções desde que se começaram a produzir as cartas de perigosidade, tanto em número como na forma, refletindo o conhecimento que a Neotectónica vai tendo ao longo dos tempos. Normalmente estas zonas correspondem a áreas, ou linhas coincidentes com falhas ativas, onde a atividade sísmica é uniforme. Podem também

coincidir com pontos onde a atividade sísmica é mais relevante. Se soubermos a profundidade a que se encontram os focos, então estamos na presença de volumes ou planos de geometria variável em profundidade, como seja o caso de uma falha bem conhecida em torno da qual os sismos se aglomeram. Nas zonas de geração admite-se que a atividade é bem conhecida, isto é, que existe informação sobre a distribuição de epicentros, e geralmente uniforme (Vilanova et al. 2012). Com o aumento da cobertura das redes sismográficas, tem-se tornado possível interpretar de forma mais precisa os padrões de libertação de energia, tanto no espaço como no tempo. Esta libertação súbita no tempo está relacionada com as tensões acumuladas em torno das falhas, sendo ainda praticamente impossível identificar onde irá ocorrer a próxima libertação, facto que impede que a ciência consiga fazer previsões a curto prazo. Esta libertação, caracterizada fisicamente pela magnitude, vai depender do intervalo de tempo desde a última ocorrência, e cujo fenómeno físico associado é extraordinariamente complexo, dependendo de inúmeros parâmetros de difícil quantificação, nomeadamente, a compressão entre os bordos da falha, e o respetivo ângulo de incidência, as forças de atrito que se desenvolvem, as asperezas existentes no plano de falha, o traçado da falha, etc.

O fenómeno de rotura inicia-se numa zona da falha onde as forças atuantes tenham ultrapassado a resistência dos materiais e propaga-se a outras zonas onde o material ficou mais

fragilizado. Este fenómeno de propagação da rotura ao longo da falha é extremamente importante para se saber qual a magnitude do sismo e de que modo as ondas sísmicas produzidas pela rotura progressiva vão afetar as zonas envolventes.

Atualmente, caso exista um numero significativo de estações em redor de uma determinada falha, é já possível reconstituir a forma como se deu a sua rotura com um nível de detalhe semelhante aquele que temos nas análises tomográficas ao corpo humano. O problema é a instalação de tal sistema de monitorização requer necessariamente um trabalho de antecipação em relação ao que possa vir a acontecer e isso é que, para já, é incomportável dado o infindável número de combinações de potenciais. A título de exemplo, pensemos que a falha pode iniciar rotura no meio e propagar rotura para os dois lados, ou iniciar numa ponta e a rotura propagar até à outra extremidade. Qualquer destas soluções irá produzir movimentos do solo bem diferenciados. É por esta razão que a engenharia dos movimentos fortes prefere basear-se em modelos muito simples, dependentes de um ou dois parâmetros, para a obtenção de soluções plausíveis. As incertezas são variadas, a começar pela localização das falhas, pela sua descrição geométrica, pelo comprimento do que pode romper e pelo possível mecanismo de rotura associado. Deste mecanismo, que define a direção da rotura no plano da falha, depende também se estamos perante uma falha que gera apenas vibrações ou se,

no caso de falhas localizadas no fundo do oceano, pode gerar um tsunami (caso exista componente vertical no movimento). No entanto, no caso do tsunami, é possível recorrer a um conjunto de regras empíricas para prever a sua ocorrência. Por exemplo, um tsunami só terá lugar se o movimento na falha possuir componente vertical de amplitude igual ou superior a 1 m, o que só poderá acontecer para sismos com magnitudes superiores a $M > 7.5$.

A atividade sísmica em Portugal Continental é conhecida desde o Século X, mas só a partir de 1755 os registos são mais bem documentados. A informação sobre os grandes terremotos tem passado ao longo dos séculos através da literatura ou de outros testemunhos. O terremoto de 1755 marcou uma viragem importante na evolução da sismicidade histórica não só porque foi pela primeira vez que foi inquirido aos párocos para informar sobre eventos anteriores e porque esse sismo, pelas suas consequências, marca o início da ciência da sismologia. Dessa altura até ao início do lançamento das redes sísmicas, em finais do século XIX, todos os sismos sentidos passaram a ser reportados na imprensa diária, informando sobre os locais onde se fizeram sentir as vibrações ou reportando danos ocorridos. As incertezas associadas a este tipo de informação são naturalmente significativas, sobretudo quando o epicentro se encontra no mar. Para dar um exemplo da forma como alguns sismos do final do século XIX ainda estão sujeito a escrutínio, basta referir que a eventual localização do



epicentro do sismo de 21 de outubro de 1880, foi recentemente sujeita a correção (Ribeiro et al. 2015). Também os sismos de 26 de janeiro de 1531 e 23 de abril de 1909 continuam a ser sistematicamente sujeitos a correção na localização dos seus epicentros e magnitudes, embora o segundo já tenha sido registado pelas primeiras redes sismográficas mundiais. Embora existam já grandes avanços no conhecimento associado às falhas e roturas, qualquer destes dois sismos continuam a registar grandes incertezas sobre quais as falhas que efetivamente estiveram na sua origem. Mais difícil se tornam os eventos ocorridos no mar, longe das redes sismológicas, em locais onde se torna praticamente impossível identificar as estruturas Neotectónicas responsáveis por sismos históricos. O terramoto de 1755, embora sujeito a um enorme escrutínio pela parte da comunidade científica, continua um enigma do ponto de vista científico. Relembrando então os maiores sismos que ocorreram no território continental português, ou em regiões vizinhas, apresentam-se na Tabela 1 os anos de ocorrência e os locais mais prováveis dos seus epicentros e respetivas intensidades máximas.

Tabela 1 : Principais sismos que afetaram a região de Portugal Continental.

Data	Intensidade máxima	Zona mais afetada	Zona provável do epicentro	Observações
1969/02/28	VIII	Sagres	Falha da Ferradura	O último sismo a provocar colapsos em Portugal Continental
1909/04/23	IX	Benavente	Benavente	-
1858/11/11	IX	Setúbal	Sudoeste de Setúbal	-
1755/11/01	X	Algarve/Lisboa	Sudoeste/Oeste de Sagres	Tsunami
1722/12/27	X	Tavira	Tavira (imersa ou emersa)	Tsunami em Tavira
1531/01/26	IX	Vale do Tejo	Vale do Tejo	-
1356/08/24	IX	Algarve	Sudoeste de Sagres	-
382 DC	?	Costa de Portugal	Sudoeste/Oeste de Sagres	Tsunami e desaparecimento de ilhotas junto ao cabo de S. Vicente
60 AC	?	Costa de Portugal	Sudoeste/Oeste de Sagres	Tsunami

Existem essencialmente duas formas de medir os sismos, que muitas vezes são objeto de equívoco junto do público, meios de comunicação social e até autoridades. Uma forma tem a ver com os registos instrumentais efetuados em estações sísmicas e que após tratamento e interpretação produzem um valor (escala de magnitude) que mede a energia libertada na origem (falha, etc.). Outra forma reporta-se à medição dos efeitos do sismo sobre as populações, o parque construído, etc. (escala de intensidade). Haverá tantos valores da intensidade quantos os locais onde foi possível estimá-la.

Foi no início do século XX que começaram a aparecer os primeiros sismómetros, tendo a rede sísmica sido inicial-

mente constituída no continente, até à década de 70, por três estações analógicas apenas (Lisboa, Porto e Coimbra). Os sensores destas estações medem as velocidades associadas ao movimento do local onde se encontram. Desde essa altura até hoje, a rede sofreu grandes alterações, sendo atualmente equipada com um largo conjunto de estações modernas digitais de grande dinâmica. O objetivo destas redes sismográficas, como parte das redes mundiais, é registar a atividade sísmica, seja esta de baixa ou de elevada magnitude. Contudo, para eventos de grande amplitude, as estações sismográficas saturavam para valores elevados da vibração. Por esse motivo, a partir dos anos 50 começaram a aparecer as primeiras estações acelerométricas (que, tal como o nome indica, medem as acelerações em vez de amplitudes) que registavam apenas os movimentos sentidos pelos humanos, e que não saturavam para as maiores vibrações que se produziam em zonas mais próximas do epicentro. No entanto, estas estações não possuíam temporização, não podendo por isso ser utilizadas para o cálculo epicentral. Com o evoluir da tecnologia instrumental quer as estações sismológicas quer as acelerométricas, passaram a transmitir praticamente em tempo real para uma estação central, sendo os registos produzidos por ambas as redes usadas para o cálculo dos parâmetros sísmicos acima referidos, com muito maior precisão. Nas redes mais avançadas foram introduzidos recentemente os registos produzidos por GPS, os quais permitem determinar o campo de deslocamentos em torno das falhas, tal como o deslocamento associado ao movimento do local em observação, funcio-

nando como um novo transdutor de medição da vibração. Com os três tipos de sensores, de aceleração, de velocidade e de deslocamento, consegue-se quase o pleno na caracterização do campo ondulatório num ponto. Claro que estas variáveis não são independentes entre si, relacionando-se por integração e derivação algébrica através de algoritmos numéricos complexos. Resta ainda verificar o campo espacial que é caracterizado por estações densamente distribuídas geograficamente, e as componentes de rotação do movimento que são medidas com sensores próprios, tipo gravitacionais. Prevê-se que os recentes progressos na área dos nano-materiais venham, num futuro próximo, a permitir estender o tipo de sensores de baixo custo a muitas das tarefas de monitorização dos movimentos fortes, tanto do solo, quanto da resposta de construções, como é o caso dos MEMS (PRIME 2002).

O atual desenho das redes existentes no continente, em funcionamento coordenado, está apresentado na Figura 1. Existem outras estações dedicadas à monitorização temporária de pequenas zonas e até de obras de engenharia de maior importância como sejam algumas barragens, pontes ou edifícios. A barragem do Alqueva e a Ponte Vasco da Gama são dois exemplos dessa monitorização temporária.

3. RECORRÊNCIA DO FENÓMENO

Tal como foi referido anteriormente, o fenómeno sísmico é essencialmente caracterizado por três variáveis, uma que mede os intervalos de tempo entre eventos, outra que dá



identifica o local de ocorrência, e aterceira que mede a sua grandeza. Do ponto de vista estatístico das ocorrências, a lei que regula o número de eventos, N , de magnitude, M , igual ou superior a determinado valor, que podem ocorrer numa determinada zona de geração sísmica, num dado intervalo de tempo, é conhecida como lei de Gutenberg-Richter:

$$\log(N) = a - b \cdot M \quad (1)$$

em que a e b são constantes a obter dos catálogos sísmicos. Quanto maior for a magnitude, M , menor será a frequência de ocorrências expectável. O valor b mede a relação entre sismos de reduzida e elevada magnitude numa determinada zona, enquanto a está relacionada com a taxa de atividade dessa mesma zona. Esta lei, que surge com um sentido universal, está de acordo com a modelo de *Poisson* ou com a distribuição de tempos entre eventos dada por uma função exponencial negativa.

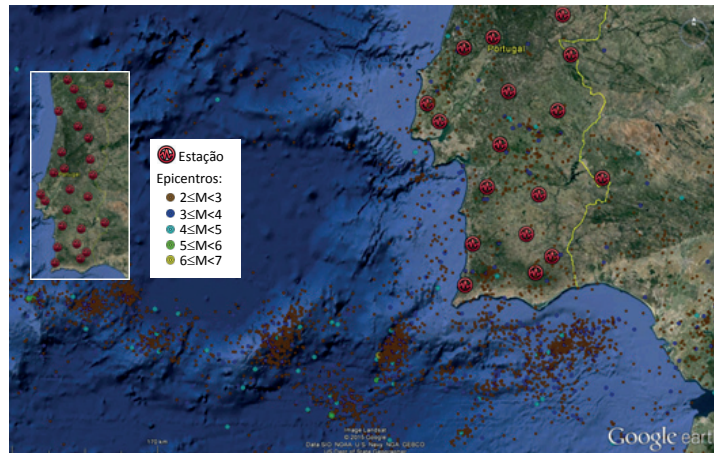


Figura 1: Rede de estações sismográficas do IPMA, com a localização dos epicentros dos sismos registados por essa rede no sul de Portugal Continental desde 1996 (com $M \geq 2$) (fonte: Google Earth).

A Lei de Gutenberg-Richter que apresenta a forma de uma reta num referencial $\log(N)$ versus M , pode afastar-se desse comportamento para valores de magnitude, M , muito pequenos, por não ser possível registar todos os sismos de baixa magnitude e para os casos do chamado “sismo característico”, em que há predomínio de dada magnitude que aparece mais frequentemente do que aquela lei faria prever.

A lei de Poisson, na qual se baseia todo o processo das ocorrências, implica que os fenómenos não apresentam memória, isto é, o próximo sismo vai ocorrer independentemente do que ocorreu até então. Esta hipótese, que claramente contraria o processo físico de acumulação de energia, tem sido posta de lado por falta de dados históricos que lhe deem suporte. Os processos com memória, mais concretamente os enquadrados pelas Cadeias de Markov, apenas têm sido usados em estudos muito específicos tentando mostrar qual o erro cometido quando se utilizam os processos de Poisson. Esses erros para situações de extremos, como quando queremos extrapolar para intervalos de tempo muito superiores aos que temos de observações nos catálogos sísmicos, podem ser potencialmente grandes. Uma das razões que pode ser invocada para alguns insucessos em estudos recentes de perigosidade sísmica é precisamente o efeito de memória que o Modelo de Poisson despreza.

4. ATENUAÇÃO E AMPLIFICAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

As leis de atenuação, também conhecidas como *Ground Motion Prediction Equations* (GMPE) são os instrumentos que permitem relacionar o sismo na sua origem, através do conhecimento da magnitude e da falha associada, com o que se passa em termos vibratórios num dado sítio localizado a dada distância do epicentro ou do traço da falha. À medida que as redes acelerométricas e sismográficas têm vindo a reunir mais informação, tem sido possível traçar funções que melhor se adaptam aos dados. Tais funções permitem fazer ajustes possibilitando chegar a funcionais que dependem essencialmente da distância, atrás referida, e da magnitude. Neste momento existe uma enorme profusão de GMPE's, reunidas por ambientes tectónicos semelhantes, altitude das falhas, campo próximo e campo afastado. Também a descrição do movimento pode ser expresso em termos de um único parâmetro (PGA, PGV, HI, etc.) ou de um conjunto de ordenadas espectrais. Pode também ser em função de Intensidades macrosísmicas, quando os dados instrumentais são escassos ou não cobrem situações de maiores magnitudes, como é o caso da situação no continente onde os registos acelerométricos intensos são ainda escassos e respeitam apenas a magnitudes máximas de $M=6$. Na década de 40 existiam muito poucos registos acelerométricos e as curvas de atenuação em termos de variáveis instrumentais, para além de serem em número muito limitado, referiam-se apenas às regiões da Califórnia,

E.U.A., e do Japão. Para estender essas curvas para outras regiões, um dos processos passava pela conversão de intensidades macrosísmicas em PGA ou PGV e depois estabelecer as curvas com base nestes valores. Aqui surgia um problema grave que era a incerteza na conversão, que ainda hoje é extremamente importante. Os estudos feitos em Portugal no início dos anos 70 basearam-se exatamente neste conceito, o que se traduzia em grandes incertezas, que têm vindo a ser progressivamente minimizadas.

Com o aparecimento de novas redes acelerométricas, mais dinâmicas, foi possível reunir em Portugal um pequeno conjunto de dados que tem permitido adotar curvas de atenuação numa gama de magnitudes até $M=5.2$. A partir dessa magnitude a única forma de chegar a curvas de atenuação é utilizar a simulação numérica de rotura de falhas (Carvalho 2007), juntar a informação macrosísmica (Le Goff et al. 2014), e tentar comparações com curvas de atenuação estabelecidas para regiões de regime tectónico semelhante.

Pelo facto de as ondas atravessarem camadas superficiais de diferente composição geotécnica (estratigráfica) e traçado geométrico, as alterações introduzidas na ação sísmica são de grande importância, tanto no valor dos vários parâmetros como no conteúdo espectral. Ao conjunto destas alterações dá-se o nome de “efeito de sítio”, desdobrado essencialmente em três aspetos fundamentais, sendo importante referir que o primeiro destes tem dominado claramente



toda a engenharia sísmica geotécnica: (i) o tipo de solo definido através das propriedades mecânicas das camadas mais superficiais, (ii) a topografia do local em estudo e ainda, (iii) a localização em bacia recente. A temática “efeitos de sítio” sofreu grandes avanços nos anos 40, estando consagrada em todas as regulamentações. O agravamento de danos em estruturas localizadas em zonas de solos mais brandos, confirmado pelo aumento da ação sísmica em determinados intervalos espectrais, tem posto a claro toda esta problemática do efeito de sítio. Não basta conhecer a distância à falha e a magnitude do sismo para conhecermos a ação sísmica num dado local. É fundamental conhecer a classe de solo através de uma classificação em tipologias, função de uma descrição estratigráfica, sondagens que permitam determinar a velocidade das ondas S, preferencialmente até ao substrato rochoso de forma a que seja possível avaliar o contraste de impedância, ou pelo menos acima dos últimos 30 m, ou ensaios H/V onde é possível verificar a frequência predominante do local. Em estudos mais específicos, é ainda possível proceder a trabalhos mais detalhados, como seja averiguar efeitos 3-D na propagação e efeitos de proximidade da falha (“*fling*”).

5. MÉTODOS DE ANÁLISE DA PERIGOSIDADE SÍSMICA

Existem diversas definições para perigosidade sísmica. Por exemplo, do ponto de vista quantitativo, esta pode ser definida como sendo uma medida do potencial de perigo relacionado com fenómenos sísmicos, designadamente as vibrações sísmicas, as roturas do terreno, e os fenómenos de liquefação, ou também pode ser definida como sendo a propriedade de um sismo que se relaciona com a capacidade de causar danos e perdas (Wang 2011).

As abordagens adotadas na análise da perigosidade sísmica podem ser divididas em três grupos principais: as abordagens determinísticas, as abordagens probabilísticas e as abordagens híbridas (Oliveira e Campos-Costa 2006).

5.1. Abordagens Determinísticas

Os métodos que envolvem abordagens determinísticas baseiam-se normalmente na definição de um conjunto de cenários sísmicos que poderão vir a afetar o local em estudo (Bommer 2002).

Estes tipos de abordagens poderão envolver diversas etapas, designadamente: a seleção de todas as possíveis fontes sísmicas que poderão afetar o local de estudo, e das correspondentes características e localização do máximo evento sísmico credível; a definição do tipo de atenuação das ondas e influência dos efeitos locais; a obtenção de acelerogramas e/ou espectros de resposta (Krinitzsky 1995).

A título de exemplo, é apresentado na Figura 2 um mapa de intensidades sísmicas obtido para a cidade de Faro com um cenário determinístico correspondente a uma magnitude de 5.5 e uma distância focal de 15 km, que teve em conta os efeitos geológicos locais (Oliveira et al. 2004).

A grande vantagem dum abordagem determinística está relacionada com o facto da ação sísmica, assim definida, poder ser muito mais facilmente compreendida por parte de uma comunidade técnica que a aplica na prática de projeto, e poderá facilitar a perceção do nível de perigosidade de um local por parte das populações. Por outro lado, a grande desvantagem é que este tipo de abordagens poderá conduzir a níveis de ação sísmica muito elevados, o que poderá exigir níveis de segurança totalmente inatingíveis do ponto de vista económico, para as correntes situações de projeto sísmico. Além disso, usando este grupo de métodos, não é perceptível qual é a probabilidade desse sismo poder vir a ocorrer.



Figura 2: Exemplo da distribuição de intensidades sísmicas obtidas na cidade de Faro com um cenário determinístico (adaptado de Oliveira et al. 2004).

5.2. Abordagens Probabilísticas

Após a publicação do artigo "*Engineering Seismic Risk Analysis*" (Cornell 1968), o paradigma da engenharia sísmica mudou, e a problemática da perigosidade sísmica começou a ser pensada em termos probabilísticos (Scawthorn 2008).

No método proposto por Cornell, a probabilidade de excedência de um efeito Y , num determinado local de estudo e resultante da ocorrência de um evento sísmico, corresponde à soma das contribuições de um conjunto de n_j zonas geradoras de eventos:

$$P(Y > y) = \sum_{j=1}^n P(Y > y | E_j) \cdot P(E_j) \quad (2)$$

em que y é o valor de referência para o efeito Y , e $P(E_j)$ é a probabilidade do evento sísmico E_j ocorrer na zona j (normalmente considerada como sendo proporcional ao número relativo de eventos sísmicos registados nessa zona, e pode ser obtida diretamente a partir da Lei de Gutenberg-Richter).

Do ponto de vista matemático, as avaliações da perigosidade sísmica que recorrem a abordagens probabilísticas podem ser formuladas com base no teorema da probabilidade total (McGuire 2008). Assim, e admitindo que os efeitos de um sismo podem ser descritos a partir de um conjunto de n variáveis aleatórias x_i ($i=1, \dots, n$), sendo mais vulgar a escolha recair sobre a magnitude do evento e a distância do local em estudo até ao evento (que pode ser a distância epicentral, a distância focal ou a menor distância à rotura), a probabilidade condicional $P(Y > y | E_j)$ será igual a

$$P(Y > y | E_j) = \int \dots \int P_j(Y > y | x_1 \dots x_n) \cdot f_j(x_1) \dots f_j(x_n | x_1 \dots x_{n-1}) \cdot dx_1 \dots dx_n \quad (3)$$

sendo $f_j(x)$ a função de densidade de probabilidade de x .

No método de Cornell, as zonas geradoras de eventos sísmicos poderão ser pontos, áreas, linhas ou volumes. No entanto, por simplicidade, foi assumido que toda a energia é irradiada num só ponto (fontes pontuais). Este tipo de filosofia foi implementado em diversos programas infor-

máticos, designadamente no programa EQRISK (McGuire 1976).

A formulação matemática evoluiu nos modelos que foram propostos posteriormente, ainda que baseados na abordagem probabilística de Cornell, pois já foram contempladas as incertezas referentes à direção e ao comprimento da rotura (tentando reproduzir os efeitos das fontes extensas, tendo em conta que a energia não irradia toda de um só ponto) na formulação matemática desses métodos (Bender 1984; Kiureghian e Ang 1977). Este novo tipo de métodos foi implementado em programas informáticos como o SEISRISK, que teve diversas versões (Bender e Perkins 1987).

Frankel (1995) propôs uma nova abordagem na definição das zonas geradoras de eventos sísmicos, com a criação de um conjunto de células onde as taxas de ocorrência dos sismos são espacialmente suavizadas usando operadores Gaussianos bidimensionais. Este tipo de procedimento tem sido usado em diversos estudos mais recentes, designadamente nos Estados Unidos da América (Petersen *et al.* 2008).

Mais recentemente, também surgiram outras plataformas informáticas, designadamente algumas em formato "open-source", como a OpenQuake, por exemplo, que possibilitam a consideração de zonas geradoras de eventos sísmicos e de modelos de rotura com formas geométricas

complexas, mas com a formulação matemática clássica de Cornell (Silva *et al.* 2014).

Portugal esteve na vanguarda dos estudos probabilísticos de análise da perigosidade sísmica (inicialmente também designada por casualidade sísmica), recorrendo nomeadamente a formas inovadoras para a resolução numérica da Eq. (3), propondo procedimentos análogos ao da transformação de coordenadas vulgarmente usada nos elementos isoparamétricos dos modelos de análise por elementos finitos (Oliveira 1977). Este inovador procedimento foi implementado com sucesso no programa SRAPOR, designadamente com aplicações a Portugal (Estêvão 1998).

Usando abordagens probabilísticas é possível definir um espectro de resposta cujos pontos apresentem a mesma probabilidade de excedência (Espectro de Resposta Uniforme), não correspondendo, portanto, a um único evento sísmico. Do ponto de vista da engenharia de estruturas, essa evidência pode constituir uma desvantagem, pois desaparece o conceito de "sismo de projeto", ao contrário do que acontece com as abordagens determinísticas (Sen 2009).

Tentando minimizar esta aparente desvantagem, surgiu a ideia da realização da desagregação da perigosidade sísmica, como forma de obter um "sismo de projeto", ou simplesmente para determinar o evento sísmico dominante relativamente à perigosidade sísmica de um determinado local (McGuire 1995; Oliveira e Campos-Costa 2006).

5.3. Abordagens Híbridas

A maior parte dos estudos de perigosidade sísmica já realizados têm adotado abordagens determinísticas ou abordagens probabilísticas, existido um grande debate na comunidade científica sobre quais destes dois grupos de métodos será o mais adequado para realizar a tarefa (Bommer 2002; Krinitzsky 2002; McGuire 2001).

É possível considerar a existência de um terceiro grupo de abordagens, que podemos classificar como híbrida, pois combina características das abordagens determinísticas e das abordagens puramente probabilísticas. Existem autores que defendem que os resultados das abordagens puramente probabilísticas são meras "criações" numéricas sem bases físicas, que podem tanto conduzir a resultados inseguros, como a resultados muito conservativos (Wang 2011). Neste contexto, Wang (2006) propôs uma abordagem que, de alguma forma, combina características das abordagens puramente probabilísticas com características das abordagens determinísticas, designadamente para a realização de estudos de perigosidade sísmica em locais onde existe o conhecimento histórico de importantes crises sísmicas no passado, mas onde não existem suficientes registos sísmicos instrumentais, no presente.

Mais recentemente, Estêvão (2012) também propôs uma abordagem híbrida, que aplicou ao Algarve, consistindo na determinação da magnitude de um evento sísmico associa-



do a um determinado período de retorno, que é usada na realização de simulações estocásticas de sismos, o que possibilita a obtenção de espectros de resposta para um "sismo de projeto" associado a um determinado período de retorno.

6. INCERTEZAS

Face à natureza do fenómeno, existem muitas incertezas em torno da análise da perigosidade sísmica de um local. É vulgar essas incertezas serem divididas em incertezas epistémicas e aleatórias. As incertezas epistémicas são devidas ao deficiente conhecimento existente sobre o fenómeno, enquanto as incertezas aleatórias são inerentes ao próprio fenómeno e não podem ser reduzidas (Sigbjörnsson e Ambraseys 2003).

Muito embora as abordagens probabilísticas procurem lidar com as incertezas, ainda existem muitas incertezas epistémicas, designadamente em relação à forma como as várias abordagens lidam com as características das fontes sísmicas (como sejam a delimitação das zonas geradoras de eventos, o tratamento da possível existência de asperezas, e a determinação da recorrência do fenómeno, entre outras), a propagação das ondas sísmicas até ao local, e por fim a forma como são avaliados os efeitos das características específicas do local em estudo.

Estudos recentes relativos aos Açores evidenciaram como todos estes fatores têm grande importância nas característi-

cas da ação sísmica, com consequências diretas sobre a segurança das estruturas (Estêvão e Carvalho 2015).

O conhecimento de que a forma como as incertezas são tratadas influencia significativamente os resultados das análises da perigosidade sísmica, quando se usam diferentes abordagens probabilísticas, já não é um assunto novo, designadamente em relação à influência da delimitação das zonas geradoras de eventos sísmicos e do catálogo sísmico usado (Peruzza e Slejko 1993). Em estudos realizados para Portugal, também ficou evidente o efeito da consideração da incerteza da profundidade do foco (Estêvão e Oliveira 1999), da incerteza das características da rotura e da inclusão, ou não, dos sismos históricos (Estêvão e Oliveira 2000), e da incerteza relativa ao parâmetro b da lei de Gutenberg-Richter (Estêvão e Oliveira 2001), que é algo de especial importância atendendo ao facto do catálogo de sismos instrumentais do território nacional ser muito incompleto relativamente às magnitudes mais elevadas, como foi já referido anteriormente.

A prática mais recente dos estudos envolvendo abordagens probabilísticas, tem sido considerar que as incertezas aleatórias são tratadas nos próprios modelos, designadamente nas leis de atenuação, e que as incertezas epistémicas podem ser minimizadas através do uso de árvores lógicas, combinando os resultados de diversos modelos num único resultado final (Delavaud *et al.* 2012). Os pesos atribuídos a cada ramo da árvore lógica resultam da opinião de um

conjunto de especialistas, sendo, portanto, de cariz subjetivo e determinístico, o que tem originado algumas opiniões muito críticas sobre esta abordagem (Krinitzsky 2002).

Também existe a opinião de que não faz sentido esta divisão da incerteza (em epistémica e aleatória), por não ter qualquer significado prático nas mais modernas análises da perigosidade sísmica (Panza *et al.* 2011).

Tem sido evidente a incapacidade das abordagens probabilísticas conseguirem apresentar resultados totalmente satisfatórios em zonas afetadas posteriormente por sismos destrutivos, designadamente se observarmos, por exemplo, os casos dos sismos de Wenchuan em 2008 (China), L'Aquila em 2009 (Itália), Christchurch em 2011 (Nova Zelândia), Tohoku em 2011 (Japão) e Emília em 2012 (Itália), o que tem evidenciado o problema da influência das incertezas nos resultados dos estudos de perigosidade sísmica, e tem originado alguma discussão em torno do assunto (Stein *et al.* 2012; Stein *et al.* 2013).

Todas estas incertezas têm especial relevo no contexto da perigosidade sísmica de Portugal, designadamente tendo em conta o conhecimento existente sobre a sismicidade histórica do território, donde se destaca o sismo de 1755, e o atual conhecimento sobre a sismo-tectónica da região envolvente. Por esse facto, é necessário continuar a procurar novas formas de reduzir as incertezas e os seus efeitos na fiabilidade dos resultados dos estudos de perigosidade

sísmica, designadamente minimizando as incertezas relativas à influência dos efeitos geológicos locais nos resultados (Oliveira 2008).

7. ESTUDOS REALIZADOS PARA PORTUGAL

Desde a década de 70 que têm vindo a ser realizados vários estudos de perigosidade para Portugal, designadamente no contexto da mitigação do risco sísmico do território nacional (Oliveira 2013). Os resultados obtidos até ao presente momento são, em alguns casos, bastante distintos entre si, o que revela o nível de incerteza ainda inerente à perigosidade sísmica de Portugal.

O primeiro estudo probabilístico de perigosidade sísmica realizado para Portugal Continental (Oliveira 1977) serviu de base à definição da ação sísmica preconizada no "Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes" (RSAEEP 1983). O valor máximo associado a um período de retorno de 1000 anos foi obtido para o Algarve, e correspondeu a uma aceleração de pico de cerca de 177 cm/s^2 . É de referir que este estudo foi realizado numa época em que ainda não existiam os meios informáticos da atualidade, e que a aceleração de pico foi determinada a partir de intensidades sísmicas, usando leis de conversão, que possuem alguma incerteza inerentes aos processos de propagação.

Também é de salientar que a ação sísmica preconizada no



RSAAEP era majorada com um coeficiente parcial de segurança de 1.5 (que contemplava as incertezas). Após o sismo dos Açores de 1980, e tendo em conta a observação do comportamento sísmico das construções, foi sugerida a revisão da ação sísmica estabelecida no RSAAEP, designadamente com um alerta para os efeitos da geologia local (Oliveira 1992).

Tendo em conta o enquadramento sismo-tectónico de Portugal Continental, tem sido regra a consideração de dois sismos de projeto (IPQ 2010; RSAAEP 1983): um sismo próximo de pequena magnitude, e um sismo mais afastado e de maior magnitude. No entanto, no RSAAEP só foi considerado um único mapa de zonas sísmicas para ambos os sismos (Figura 3a).

O primeiro estudo português de desagregação da perigosidade sísmica foi realizado por Campos-Costa (1993). Esse estudo apresentou Faro como tendo a maior aceleração de pico para um período de retorno de 1000 anos (322 cm/s² total, 321 cm/s² afastado e 103 cm/s² próximo), sendo condicionada pelo cenário de sismo afastado. Por outro lado, Lisboa apresentou o maior valor para um cenário de sismo próximo (309 cm/s² total, 196 cm/s² afastado e 274 cm/s² próximo).

Sousa (1996) usou o programa EQRISK (fontes pontuais) para realizar um estudo em termos de intensidades sísmicas, que apontava o cabo de Sagres como sendo a zona com

maior perigosidade sísmica de Portugal Continental para vários períodos de retorno. Nesta época, também foi feito um estudo de perigosidade que demonstrou a influência dos solos no agravamento das intensidades sísmicas (Sousa e Oliveira 1996).

Afilhado *et al.* (1999) apresentaram um estudo para o Algarve com valores compreendidos entre 0.15g (Alcoutim) e 0.35g (Sagres), obtidos com o programa SEIS-RISK III (fontes correspondentes a falhas finitas) para um período de retorno de 975 anos.

Oliveira *et al.* (1999) apresentaram uma proposta de alteração ao RSAAEP para Portugal Continental, com dois zonamentos distintos para a ação sísmica, correspondendo a cenários de sismos próximos e distantes. Neste estudo, as zonas com maior perigosidade sísmica são o Vale do Tejo e o Barlavento Algarvio, respetivamente para os cenários de sismos próximos e afastados.

Em 2000 foi apresentado outro estudo para o Algarve (Estêvão e Oliveira 2000), usando o programa SRAPOR, designadamente contemplando modelos com fontes pontuais (tipo EQRISK) e com falhas finitas (tipo SEISRISK III). Os resultados que foram obtidos para um período de retorno de 1000 anos ficaram compreendidos entre 290 e 350 cm/s² (zona da Costa Vicentina) e entre 170 e 250 cm/s² (zona do Guadiana).

Peláez Montilla e López Casado (2002) realizaram um estudo para toda a Península Ibérica, e concluíram que a zona de Sagres é aquela que apresenta a maior perigosidade sísmica, seguida da zona de Lisboa.

Num estudo de risco sísmico realizado por Luísa Sousa (Sotto-Mayor 2006), foi realizada uma reavaliação da perigosidade sísmica de Portugal Continental. Neste estudo, as máximas intensidades sísmicas foram obtidas para a zona de Sagres, para diversos períodos de retorno.

Vilanova e Fonseca (2007) propuseram a utilização de árvores lógicas como forma de reduzir as incertezas epistémicas, designadamente combinando os resultados obtidos com diferentes leis de atenuação (com pesos atribuídos de forma determinística), zonas de geração, catálogo sísmico, recorrência do fenómeno e máxima magnitude. Neste estudo, que teve por base o programa SEISRISK III, os valores máximos (obtidos da árvore lógica) ficaram compreendidos entre 0.07g e 0.20g (período de retorno de 475 anos) para a zona do Sotavento do Algarve (a partir de Faro) e para a zona do Vale do Tejo. Estes resultados contrariam muitos dos anteriores estudos, que apontavam a zona oeste do Barlavento Algarvio (zona de Sagres) como a de maior perigosidade sísmica de Portugal Continental.

Peláez *et al.* (2009) realizaram a desagregação da perigosidade sísmica, tendo obtido azimutes, magnitudes e distâncias para diversas cidades portuguesas associados a diversos

períodos de retorno. O estudo de desagregação da perigosidade realizado por (Sousa e Campos Costa 2009) apontou a zona de Sagres como sendo aquela que apresenta a maior perigosidade sísmica do território, sendo controlada pelos cenários de sismos afastados.

A NP EN 1998-1:2010 (IPQ 2010) apresentou dois zonamentos para a definição da ação sísmica (Figura 3b e 3c). Neste documento, é a zona do concelho de Vila do Bispo aquela que apresenta a maior perigosidade sísmica do território continental para um período de retorno de 475 anos, com valores de aceleração de pico para o cenário de sismo afastado compreendidos entre 250 e 375 cm/s², respetivamente para terrenos tipo A e D. É de salientar que a ação sísmica deixou de ser majorada na NP EN 1998-1:2010.

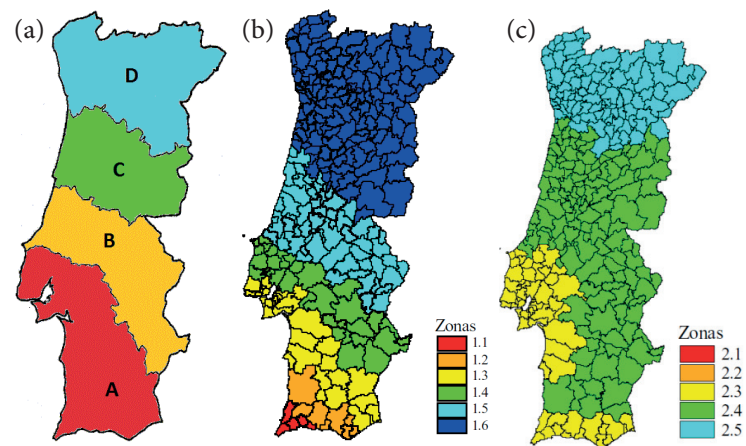


Figura 3: Mapa das zonas sísmicas de Portugal Continental que constam no (a) RSAEEP (b) EC8, sismos afastados, e (c) EC8, sismos próximos.

Estêvão (2012) adotou uma abordagem híbrida, envolvendo a determinação de uma magnitude associada a um período de retorno de 475 anos, e gerando espectros de resposta médios para diversos tipos de solos existentes no Algarve, que foram comparados com os existentes no RSAEEP e na NP EN 1998-1:2010 (EC8). As magnitudes assim obtidas foram consistentes com os valores obtidos da desagregação da perigosidade sísmica realizada por outros autores (Peláez *et al.* 2009; Sousa e Campos Costa 2009). Os resultados das simulações evidenciaram a influência das incertezas nos valores da perigosidade sísmica, pois foram obtidos espectros muito acima e muito abaixo dos valores do EC8, consoante as características adotadas para as simulações, e dependendo dos tipos de terrenos de fundação.

O projeto SHARE surgiu como uma tentativa de harmonização da perigosidade sísmica da Europa, designadamente para não existirem diferenças nas fronteiras dos diversos países europeus, e como suporte à revisão do EC8. Os últimos resultados foram obtidos a partir da utilização de uma árvore lógica que envolveu três diferentes modelos com diferentes abordagens probabilísticas, aos quais foram atribuídos pesos distintos (Woessner *et al.* 2015). Também foram consideradas diferentes características tectónicas, magnitudes máximas, e modelos de atenuação. Os resultados médios obtidos para a Península Ibérica estão apresentados na Figura 4. A partir da observação deste mapeamento, é evidente o contraste dos resultados deste estudo em relação ao Algarve, quando confrontados com estudos do

passado, designadamente com o zonamento da norma NP EN 1998-1:2010, dado que a zona de Sagres deixou de ser a região de Portugal Continental com maior perigosidade sísmica, para passar a ser Lisboa.

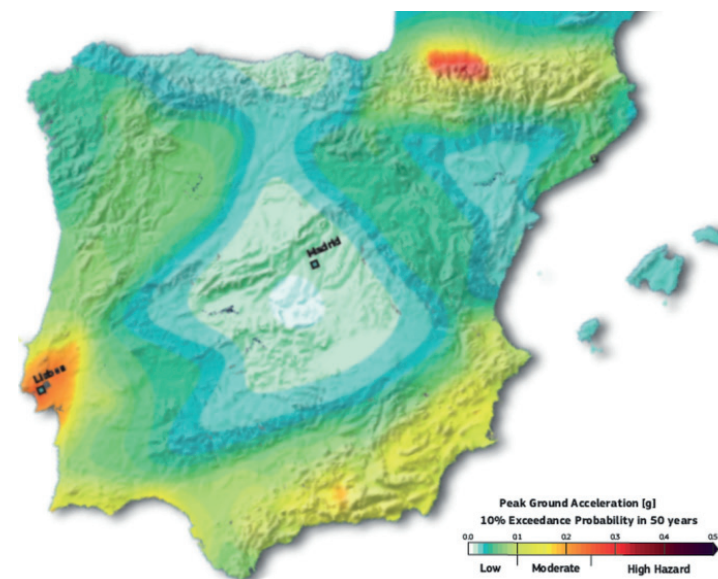


Figura 4: Acelerações de pico obtidas no projeto SHARE para a Península Ibérica, associadas a um período de retorno de 475 anos (adaptado de Giardini *et al.* 2013).

8. NOTAS FINAIS

A definição da perigosidade sísmica em Portugal Continental, pese embora os grandes avanços científicos conseguidos nos últimos 40 anos, contém ainda inúmeras incertezas. Estas resultam da dificuldade em trabalhar diferentes aspetos relacionados, nomeadamente:

- (i) com dados históricos relativamente escassos como sejam os grandes sismos serem conhecidos somente a partir do século X; os modelos de ocorrência com memória são, portanto, de grande complexidade em Portugal; só a paleosismologia e a arqueo-sismologia permitirão estender o conhecimento para épocas mais antigas;
- (ii) com os dados instrumentais que se referem apenas a sismos de magnitude $M < 6$, limitando o campo de trabalho para dedução de leis de atenuação até magnitudes médias, tendo necessidade de recorrer a leis de outras regiões com ambiente sísmo-tectónico semelhante, ou processos de simulação de rotura de falhas para analisar intervalos com $M > 6$;
- (iii) com processos geológicos associados a elevados períodos de retorno, não permitindo uma clara definição das falhas potencialmente mais ativas, que se distribuem pelo Oceano Atlântico e que se prolongam pela Margem Continental.

A investigação atual, nas suas diversas componentes, entre as quais se insere o tratamento e interpretação dos registos sísmicos efetuados numa rede sismográfica de grande qualidade e extensão, irá certamente permitir uma redução significativa a médio prazo das incertezas referidas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afilhado A, Teves-costa P, Rio I, Mendes-Vitor L (1999) Risco sísmico na região do Algarve: contribuição das zonas sísmogénicas do Goringe, Margem Alentejana e Algarve. In: 4º Encontro nacional sobre sismologia e engenharia sísmica/2ème Rencontre em génie parasismique des pays méditerranéens. Escola superior de Tecnologia, UAlg, Faro, pp 103-112

Bender B (1984) Seismic hazard estimation using a finite-fault rupture model. Bulletin of the Seismological Society of America 74(5):1899-1923

Bender B, Perkins DM (1987) SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation. In,

Bommer JJ (2002) Deterministic vs. probabilistic seismic hazard assessment: an exaggerated and obstructive dichotomy. Journal of Earthquake Engineering 6(sup001):43-73

Campos-Costa A (1993) A ação dos sismos e o comportamento das estruturas. In: FEUP, Lisboa, p 217

Carvalho A (2007) Modelação estocástica da ação sísmica em Portugal continental. In: Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, p 304

Cornell CA (1968) Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America 58(5):1583-1606

Delavaud E, Cotton F, Akkar S, Scherbaum F, Danciu L, Beauval



C, Drouet S, Douglas J, Basili R, Sandikkaya MA, Segou M, Faccioli E, Theodoulidis N (2012) Toward a ground motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe. *J Seismol* 16(3):451-473

Estêvão JMC (1998) Modelo computacional de avaliação do risco sísmico de edifícios. In: Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, p 147

Estêvão JMC (2012) Efeitos da ação sísmica no comportamento de edifícios de betão armado com alvenarias de enchimento. In: Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, Portugal, p 452

Estêvão JMC, Carvalho A (2015) The role of source and site effects on structural failures due to Azores earthquakes. *Engineering Failure Analysis* 56:429-440

Estêvão JMC, Oliveira CS (1999) Contribuição para a avaliação do risco sísmico: Aplicação à cidade de Faro. In: 4º Encontro nacional sobre sismologia e engenharia sísmica/2ème Rencontre em génie parasismique des pays méditerranéens. Escola superior de Tecnologia, UAlg, Faro, pp 93-102

Estêvão JMC, Oliveira CS (2000) Análise comparativa da casualidade sísmica do Algarve. In: 2ª Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica. Lagos, pp 241-242

Estêvão JMC, Oliveira CS (2001) Parâmetros que condicionam os valores da casualidade sísmica. In: 5º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica. Laboratório Regional de Engenharia Civil, Açores, pp 29-41

Frankel A (1995) Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters* 66(4):8-21

Giardini D, Woessner J, Danciu L (2013) European Seismic Hazard Map. http://www.shareu.org/sites/default/files/v6.2.SHARE_ESHM.png

IPQ (2010) NP EN 1998-1. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, p 230

Kiureghian AD, Ang AH-S (1977) A fault-rupture model for seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 67(4):1173-1194

Krinitzky EL (1995) Deterministic versus probabilistic seismic hazard analysis for critical structures. *Engineering Geology* 40(1-2):1-7

Krinitzky EL (2002) How to obtain earthquake ground motions for engineering design. *Engineering Geology* 65(1):1-16

Le Goff B, Borges JF, Bezzeghoud M (2014) Intensity-distance attenuation laws for the Portugal mainland using intensity data points. *Geophysical Journal International* 199(2):1278-1285

Marreiros C, Carrilho F (2012) The ShakeMap at the Instituto de Meteorologia. In: 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisboa, pp 1-8, Paper 3069

McGuire RK (1976) EQRISK: Evaluation of earthquake risk to site. Fortran computer program for seismic risk analysis. In,

McGuire RK (1995) Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the loop. *Bulletin of the Seismological Society of America* 85(5):1275-1284

Capítulo 2. A perigosidade sísmica e a exposição associada ao território português

- McGuire RK (2001) Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 21(5):377-384
- McGuire RK (2008) Probabilistic seismic hazard analysis: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 37(3):329-338
- Oliveira CS (1977) Sismologia, Sismicidade e Risco Sísmico. Aplicações em Portugal. In: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, p 205
- Oliveira CS (1992) Algumas considerações sobre o comportamento das edificações com elementos em betão armado. In: Oliveira CS, Lucas ARA, Guedes JHC (eds) 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980, volume 2. Governo Regional dos Açores and LNEC, Lisboa, pp 461-480
- Oliveira CS (2008) Lisbon earthquake scenarios: A review on uncertainties, from earthquake source to vulnerability modelling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28(10-11):890-913
- Oliveira CS (2013) Studies made since early nineteen ninety in Portugal reducing the seismic risk. In: Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vienna, pp 1-10, Paper No. 315
- Oliveira CS, Campos-Costa A (2006) Overview on Earthquake Hazard Assessment - Methods and New Trends. In: Oliveira C, Roca A, Goula X (eds) *Assessing and Managing Earthquake Risk*. Springer Netherlands, pp 15-46
- Oliveira CS, Ferreira MA, Oliveira M, Sá FMd (2004) Planning in Seismic Risk Areas – The Case of Faro – Algarve. A First approach. In: XI Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”. Genova, pp 1-12
- Oliveira CS, Sousa ML, Costa AC (1999) Contribuição para a revisão da acção sísmica em Portugal Continental no contexto do Eurocódigo 8. In: 4º Encontro nacional sobre sismologia e engenharia sísmica/2ème Rencontre en génie parasismique des pays méditerranéens. Escola superior de Tecnologia, UAlg, Faro, pp 153-164
- Panza GF, Irikura K, Kouteva M, Peresan A, Wang Z, Saragoni R (2011) Advanced Seismic Hazard Assessment. *Pure Appl. Geophys.* 168(1-2):1-9
- Peláez JA, Casado CL, Henares J (2009) How distant earthquakes contribute to seismic hazard in mainland Portugal. In: Mendes-Victor LA, Oliveira CS, Azevedo J, Ribeiro A (eds) *The 1755 Lisbon earthquake: revisited*. Springer, pp 245-254
- Peláez Montilla JA, López Casado C (2002) Seismic Hazard Estimate at the Iberian Peninsula. *Pure Appl. Geophys.* 159(11-12):2699-2713
- Peruzza L, Slejko D (1993) Some aspects of seismic hazard assessment when comparing different approaches. *Nat Hazards* 7(2):133-153
- Petersen MD, Frankel AD, Harmsen SC, Mueller CS, Haller KM, Wheeler RL, Wesson RL, Zeng Y, Boyd OS, Perkins DM, Luco N, Field EH, Wills CJ, Rukstales KS (2008) Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps. In: Geological Survey, Open-File Report 2008-1128, p 61



PRIME (2002) An Introduction to MEMS (Micro--electromechanical Systems). Prime Faraday Technology Watch, Loughborough University, Loughborough, Leicestershire

Ribeiro JR, Ribeiro AI, Correia AP (2015) Solving the Mystery: The 21 October 1880 Portuguese Earthquake. *Seismological Research Letters*

RSAAEP (1983) Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes. Decreto-Lei nº 235/83, de 31 de Maio. Imprensa Nacional-Casa da Moeda, E.P., Lisboa, p 114

Scawthorn C (2008) A Brief History of Seismic Risk Assessment. In: Bostrom A, French S, Gottlieb S (eds) *Risk Assessment, Modeling and Decision Support*. Springer Berlin Heidelberg, pp 5-81

Sen TK (2009) *Fundamentals of seismic loading on structures*. John Wiley and sons, Lda, p 404

Sigbjörnsson R, Ambraseys NN (2003) Uncertainty Analysis of Strong-Motion and Seismic Hazard. *Bulletin of Earthquake Engineering* 1(3):321-347

Silva V, Crowley H, Pagani M, Monelli D, Pinho R (2014) Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Nat Hazards* 72(3):1409-1427

Sotto-Mayor MLSousa (2006) Risco sísmico em Portugal continental. In: Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, p 338

Sousa M, Campos Costa A (2009) Ground motion scenarios consistent with probabilistic seismic hazard disaggregation analy-

sis. Application to Mainland Portugal. *Bulletin of Earthquake Engineering* 7(1):127-147

Sousa ML, Martins A (2000) Compilação de um Catálogo Sísmico para a Região dos Açores. In: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 260/18/13343 - C3ES, p 46

Sousa ML, Martins A, Oliveira CS (1992) Compilação de Catálogos Sísmicos da Região Ibérica. In: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 36/92 - NDA, p 250

Sousa ML, Oliveira CS (1996) Hazard mapping based on macroseismic data considering the influence of geological conditions. *Nat Hazards* 14(2-3):207-225

Sousa MLRMNe (1996) Modelos probabilistas para avaliação da casualidade sísmica em Portugal Continental. In: Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, p 98

Stein S, Geller RJ, Liu M (2012) Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it. *Tectonophysics* 562-563(0):1-25

Stein S, Geller RJ, Liu M (2013) Reply to comment by Arthur Frankel on "Why Earthquake Hazard Maps Often Fail and What to do About It". *Tectonophysics* 592:207-209

Vilanova SP, Fonseca JFBD (2007) Probabilistic Seismic-Hazard Assessment for Portugal. *Bulletin of the Seismological Society of America* 97(5):1702-1717

Vilanova SP, Fonseca JFBD, Oliveira CS (2012) Ground-Motion Models for Seismic-Hazard Assessment in Western Iberia: Constraints from Instrumental Data and Intensity Observations. *Bulle-*

Capítulo 2. A perigosidade sísmica e a exposição associada ao território português

tin of the Seismological Society of America 102(1):169-184

Wang Z (2006) Understanding seismic hazard and risk assessments: An example in the New Madrid Seismic Zone of the central United States. In: Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, California, USA, pp 1-10, Paper 416

Wang Z (2011) Seismic Hazard Assessment: Issues and Alternatives. Pure Appl. Geophys. 168(1-2):11-25

Woessner J, Laurentiu D, Giardini D, Crowley H, Cotton F, Grünthal G, Valensise G, Arvidsson R, Basili R, Demircioglu M, Hiemer S, Meletti C, Musson R, Rovida A, Sesetyan K, Stucchi M (2015) The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. Bulletin of Earthquake Engineering:1-44





CAPÍTULO 3

METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DO EDIFICADO ANTIGO

1. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DE EDIFÍCIOS EM ALVENARIA

A vulnerabilidade sísmica pode ser definida como uma propriedade intrínseca das estruturas, uma característica do seu próprio comportamento quando sujeitas à ação sísmica, descrita através de uma lei causa-efeito em que a causa é ação sísmica e o efeito é o dano estrutural (Sandi e Floricel 1995).

Dependendo das características do uso, tipo e valor do edificado, os diferentes níveis de avaliação da vulnerabilidade assumem uma importância relativa. Assim, os objetivos de uma avaliação de vulnerabilidade e a profundidade com que esta é conduzida, serão impreterivelmente função da exposição e das condicionantes socioeconómicas. Se para o edificado com carácter residencial, a avaliação da sua vulne-

rabilidade estrutural é determinante, uma vez que a prevenção do seu colapso (salvaguardando a perda de vidas humanas) é o objetivo fundamental dessa avaliação, para edifícios com carácter especial (hospitais, quartéis de bombeiros, esquadras de polícia, escolas, etc.), a avaliação da vulnerabilidade estrutural deverá ser acompanhada de exigências ao nível do funcionamento e operacionalidade, garantindo uma resposta adequada em caso de crise sísmica (Ferreira 2009; Ferreira 2010).

A vulnerabilidade, no sentido mais lato do termo, é invariavelmente uma propriedade de um determinado elemento ou sistema. Com efeito, podem definir-se três níveis de vulnerabilidade associada aos edifícios:

Nível 1. Vulnerabilidade estrutural, associada à suscetibilidade de um determinado elemento ou componente do sistema resistente sofrer determinado grau de dano. A natureza desse dano pode ser descrita de forma quantitativa, utilizando parâmetros definidores da resposta estrutural e determinando um índice de dano, ou de forma qualitativa, recorrendo a observações de dano estrutural pós-sismo;

Nível 2. Vulnerabilidade não estrutural, associada à suscetibilidade dos elementos não estruturais - paredes de envolvente externa e de compartimentação, portas, janelas, platibandas, elementos decorativos, etc. - e dos componentes/instalações - tubagens, equipamentos mecânicos, etc. - sofrerem dano (Staeclin 1998). Destaquem-se a título de exemplo os sismos, ocorridos nos Estados Unidos da América, de Loma Prieta (1989) e de Northridge (1994) em que, apesar do comportamento estrutural satisfatório de muitos edifícios, os elevados danos não estruturais comprometeram a sua funcionalidade e reocupação dos edifícios (Oliveira et al. 1995);

Nível 3. Vulnerabilidade funcional, definida como o potencial de perturbação do funcionamento de determinada instalação, em consequência da exigência sobre os serviços prestados. Trata-se de avaliar a capacidade de resposta pós-sismo dos edifícios considerados essenciais (hospitais, quartéis de bombeiros, esquadras de polícia, etc.) e sobre os quais é exigida a manutenção de funções mesmo em situações de catástrofe. A funcionalidade destes edifícios depen-

de de alguns fatores, entre os quais: a distribuição de atividades dentro dos espaços do edifício; a existência e adequabilidade de um plano de emergência e evacuação; os meios de resposta disponíveis e ainda; os sistemas de comunicação, sinalização e acessibilidade (OPS 1993). O conceito de vulnerabilidade funcional é igualmente extensível a outras infraestruturas básicas, tais como redes de distribuição e abastecimento de água e gás, redes rodoviárias e ferroviárias, centrais de produção de energia, etc.

De igual forma, o conceito de vulnerabilidade estrutural apresentado, e objeto de estudo nesta publicação, poderá ainda ser hierarquizado em três níveis distintos:

Nível 1.1. Vulnerabilidade estrutural de agregados (quarteirões), utilizada na identificação de situações de risco induzidas pela interação entre construções vizinhas ou por mecanismos de dano/rotura complexos;

Nível 1.2. Vulnerabilidade estrutural de edifícios, quando se pretende avaliar a vulnerabilidade estrutural do sistema resistente de um determinado edifício, avaliando implicitamente o desempenho de todos os seus componentes e materiais;

Nível 1.3. Vulnerabilidade estrutural de paredes de fachada, quando se pretende avaliar isoladamente a vulnerabilidade estrutural do elemento fachada. Eventos sísmicos recentes têm demonstrado que estes elementos apresentam



elevadas fragilidades, salientando desta forma a importância de estudos da vulnerabilidade estrutural a este nível (Ferreira 2015).

Refira-se que estes três níveis de vulnerabilidade estrutural são inter-relacionáveis, servindo, no entanto, objetivos distintos no que se refere à avaliação de perdas (Figura 1).

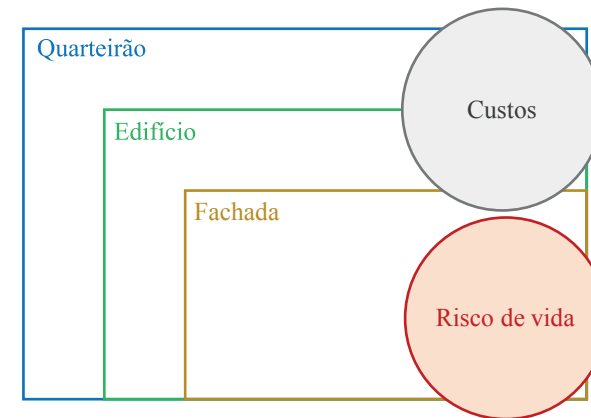


Figura 1: Relação entre os vários níveis de avaliação da vulnerabilidade sísmica (Vicente 2008)

2. 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 (Lang 2002).

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 (Tabela 1).

Tabela 1: Metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica a diferentes escalas (Ferreira 2010)

Metodologia	Campo de aplicação		Esforço computacional		
	Conjuntos de edifícios	Edifício individual	Baixo	Moderado	Elevado
Vulnerabilidade observada	x		x		
Modelos de análise simplificada	x	x		x	
Modelos de análise detalhada		x			x

Ao longo da secção seguinte apresentam-se os principais grupos de metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica atualmente disponíveis na literatura internacional. Estes grupos encontram-se aqui ordenados em função do esforço computacional associado à implementação de cada metodologia. Assim, apresentar-se-ão em primeiro lugar as metodologias de avaliação baseadas em vulnerabilidade observada (ou na opinião de especialistas), seguidas das metodologias de avaliação baseadas em modelos simplificados. Finalmente, apresentar-se-ão de forma sucinta as metodologias de análise detalhada.

2.1. Metodologias Baseadas em Vulnerabilidade Observada

Uma das primeiras tentativas de avaliar a vulnerabilidade sísmica a larga escala, foi desenvolvida nos Estados Unidos da América pelo *Applied Technology Council* (ATC), uma organização sem fins lucrativos fundada pela *Federal Management Agency* (FEMA), com o intuito de garantir assistência ao exercício da engenharia estrutural e ao seu desenvolvimento tecnológico. Entre os principais trabalhos desenvolvidos e publicados pelo ATC destaca-se o ATC-13 *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, elaborado com o objetivo de avaliar danos e perdas associados ao sismo de 1985 na Califórnia (ATC-13 1985).

Com o ATC-13, foram desenvolvidas várias matrizes de probabilidade de dano (MPD) (ver Tabela 2) para diferentes tipologias estruturais e intensidades sísmicas. A particularidade deste método reside no facto de que estas MPD's foram desenvolvidas com base na opinião de 78 especialistas, cada um deles fornecendo uma estimativa do grau de dano mais provável em determinada tipologia estrutural, para determinada intensidade sísmica. O ponto fraco desta metodologia reside no elevado grau de subjetividade associado à forma como são construídas as MPD, facto que leva a que os seus resultados não possam ser considerados inteiramente fiáveis e/ou aplicáveis a outros casos de estudo. No entanto, esta metodologia foi uma das ferramentas mais utilizadas durante a década de 80 (Speranza 2003).



Tabela 2: Formato da matriz de probabilidade de dano (MPD)
(Whitman et al. 1973)

Estado de dano	Dano estrutural	Dano não estrutural	Rácio de dano (%)	Intensidade sísmica				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	Sem dano	Sem dano	0.00-0.05	-	-	-	-	-
1	Sem dano	Ligeiro	0.05-0.30	-	-	-	-	-
2	Sem dano	Localizado	0.10-1.25	-	-	-	-	-
3	Não assinalável	Distribuído	1.25-3.50	-	-	-	-	-
4	Ligeiro	Substancial	3.50-4.50	-	-	-	-	-
5	Substancial	Extensivo	7.50-20.0	-	-	-	-	-
6	Elevado	Quase total	20.0-65.0	-	-	-	-	-
7		Pré-ruína	65.0-100	-	-	-	-	-
8		Colapso	65.0-100	-	-	-	-	-

O formato da MPD apresentado na Tabela 2 foi aquele que se tornou mais popular para definir probabilidades de distribuição de dano, tendo sido adotado em várias outras metodologias. Refira-se que o número de estados de dano considerados (oito no exemplo apresentado na Tabela 2) é frequentemente reduzido a seis ou a quatro, como consequência da sua difícil distinção e balizamento.

Com o objetivo de melhorar e acelerar as inspeções de dano pós-sismo, surgiram posteriormente duas metodologias semelhantes, formuladas, tal como a anterior, através de escalas macrossísmicas: a *Seismic intensity scale* MSK (Medvedev 1977) e a *European Macroseismic scale* EMS (Grünthal 1998). A escala macrossísmica europeia de 1992 (EMS-92), atualizada em 1998 para EMS-98, foi criada com o intuito de melhorar a definição de classes de dano propostas em 1976 pela MSK-76. Assim, em vez das 3 classes de dano definidas na MSK (A, B e C), a EMS propõe 6 classes de avaliação (A, B, C, D, E e F). Nesta nova abordagem, o dano encontra-se distribuído em graus de dano crescente (entre 0 e 5), em função de uma determinada classe de

vulnerabilidade e intensidade macrossísmica (Speranza 2003). Atualmente, e um pouco por todo o mundo, têm sido realizados estudos de vulnerabilidade sísmica à escala urbana e regional tendo por base as escalas EMS-98 e MSK-76.

Apesar do elevado grau de incerteza associado às classes de vulnerabilidade descritas, o principal método Italiano de avaliação da vulnerabilidade sísmica, desenvolvido em 1991 pelo *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti* (GNDT), assenta em dois níveis de seleção (nível 1 e 2) (GNDT-SSN 1994). Nesta metodologia, o dano observado é classificado e catalogado em função da sua extensão e severidade. Em 1980, no rescaldo do sismo de Irpinia (Itália), foi realizada uma inspeção de dano a larga escala, utilizando uma versão piloto da GNDT de nível 1. Esse trabalho consistiu na classificação preliminar dos edifícios, de acordo com uma escala pré-definida de 13 tipologias construtivas. Devido à vasta quantidade de informação resultante da inspeção de cerca de 38 mil edifícios, distribuídos por 41 localidades, foi possível construir diagramas com valores prováveis de dano, em função de uma determinada intensidade macrossísmica e tipologia construtiva. Através da montagem dos referidos diagramas, foi então possível construir MPDs para cada uma das 13 tipologias construtivas consideradas (Speranza 2003).

Como principais limitações desta metodologia, aponte-se a amplitude de classes de edifícios consideradas e a forma

pouco rigorosa como cada uma dessas classes é definida. Estas imprecisões podem conduzir à obtenção de curvas de vulnerabilidade incorretas (Carocci 1996).

Refira-se ainda uma outra abordagem sofisticada no campo de investigação relacionado com a aplicação de redes neuronais para a avaliação da vulnerabilidade sísmica (Sánchez-Silva e García 2001). Esta metodologia, baseada no uso da lógica difusa e da teoria de sistemas, pode ser utilizada na avaliação do dano estrutural para um determinado sismo conhecido. Este modelo é capaz de sintetizar múltiplos fatores, com o objetivo de obter uma avaliação global do comportamento estrutural, considerando a dependência e a interação entre todos os componentes do sistema. Aplicada na comparação do dano observado após o sismo de 1999 na Califórnia, esta metodologia encontra-se na base do software ERS-99® (Speranza 2003).

2.2. Metodologias Baseadas em Modelos Simplificados

Não existindo a possibilidade de realizar inspeções de dano pós-sismo, a formulação de curvas de vulnerabilidade baseadas nos pressupostos apresentados na secção anterior é uma tarefa na prática impossível. Assim, outras metodologias alternativas de avaliação da vulnerabilidade sísmica, capazes igualmente de avaliar um grande número de edifí-

cios num curto espaço de tempo, são por isso necessárias. Surgem assim as metodologias baseadas em modelos analíticos simplificados de edifícios, nas quais a avaliação da vulnerabilidade sísmica de um determinado edifício é realizada com base no conhecimento de alguns parâmetros (por exemplo, características geométricas ou mecânicas). Na grande maioria dos casos, quanto mais simples for a formulação da metodologia, menor será o uso de recursos, nomeadamente o tempo associado à sua aplicação. No entanto, para que os resultados obtidos sejam fidedignos, é fundamental que os parâmetros associados à avaliação da vulnerabilidade sejam obtidos com rigor, garantindo desta forma uma adequada capacidade de avaliação do comportamento sísmico dos edifícios.

No ano de 1995 foi apresentada no Congresso de Engenharia Sísmica de Siena uma nova metodologia desenvolvida especificamente para análises a larga escala, baseada em inspeções de dano expeditas, mas interpretativas do comportamento mecânico de edifícios de alvenaria (D'Ayala et al. 1997). Esta metodologia foi aplicada pela primeira vez em dois casos de estudo: no bairro Lisboeta de Alfama, em Portugal; e na região Italiana de Umbria-Marche (Spence e D'Ayala 1999). A sua abordagem baseia-se na análise das características estruturais dos edifícios e desenvolve-se através da recolha de informação relativa a algumas das suas características exteriores (geometria, configuração dos



blocos de alvenaria, número de pisos, condições de fronteira, etc.). Nesta formulação é assumido que o elemento mais vulnerável do sistema estrutural é a parede de fachada.

Já em 2008, Vicente apresenta uma nova metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de alvenaria, aplicada ao caso de estudo da Baixa de Coimbra (Vicente 2008). À semelhança de outras metodologias precedentes, esta nova abordagem apoia-se no cálculo de um índice de vulnerabilidade sísmica, utilizado na avaliação individual de cada edifício. Esta metodologia assemelha-se à formulação original do GNDT-SSN (GNDT-SSN 1994), baseando-se em estudos e levantamentos de dano pós-sismo. Os dados resultantes desses levantamentos são tratados como parâmetros a analisar na definição e construção de um índice de vulnerabilidade. Partindo das funções de vulnerabilidade desenvolvidas em 2005 por Giovinazzi (Giovinazzi 2005), este autor relacionou ainda o valor do índice de vulnerabilidade com graus de dano médio, permitindo desta forma a estimativa de perdas (humanas e económicas). Esta metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de alvenaria serviu ainda de base ao desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica de paredes de fachada, aplicada a edifícios de alvenaria, apresentada por Ferreira em 2009 (Ferreira 2009)

2.3. Metodologias de Análise Detalhada

Estas metodologias são aplicáveis apenas em edifícios para os quais, se dispõe de informação completa e rigorosa acerca da geometria dos seus elementos, das tecnologias construtivas envolvidas e das propriedades mecânicas dos seus materiais. Nestes casos, recorre-se a modelos numéricos pormenorizados para avaliar edifícios representativos de uma determinada tipologia estrutural, com um grau de detalhe que não se adequaria a uma avaliação a média/larga escala. Nos casos em que as análises justificam a utilização de um elevado nível de recursos, como são os casos por exemplo de construções de valor histórico ou patrimonial relevante (ou mesmo pequenos agregados), o recurso à modelação numérica em elementos finitos pode auxiliar a avaliação da vulnerabilidade sísmica, através do cálculo dos modos de vibração associados à estrutura e da distribuição de tensões e deformações.

As metodologias de análise detalhada mais utilizadas baseiam-se em: análises estáticas lineares, frequentemente utilizadas no dimensionamento de estruturas; análises estáticas não-lineares, que admitem um comportamento não-linear dos elementos estruturais; análises dinâmicas lineares, utilizadas na análise modal espectral e finalmente;

análises dinâmicas não-lineares, que consideram, tal como acontece nas análises estáticas não-lineares, um comportamento mecânico não linear do material.

3. COMENTÁRIOS FINAIS

A breve apresentação de metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios, ao longo do presente capítulo, permite-nos retirar algumas conclusões importantes: desde logo, a ideia de que o processo de seleção de uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade deverá ser necessariamente em função das características particulares e dos objetivos do trabalho a desenvolver. Assim, a adequabilidade de uma determinada metodologia depende diretamente das características do edificado, da escala a que é aplicada e dos recursos envolvidos.

As metodologias baseadas na opinião de especialistas, isto é vulnerabilidade observada, apresentam um grau de subjetividade inerente. Inversamente, e desde que os parâmetros envolvidos na análise se encontrem corretamente definidos e calibrados, as metodologias de análise estrutural revelam-se extremamente fiáveis e eficientes.

4. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ATC-13 (1985) Earthquake damage estimation data for California. Appl. Technol. Council. Redw. City, California, USA

Carocci C (1996) Conservazione e sicurezza dei centri storici in area sismica: vulnerabilità e mitigazione. PhD Thesis on Storia delle Scienze e delle Tecniche del Construire, Roma

D’Ayala D, Spence R, Oliveira CS, Pomonis A (1997) Earthquake Loss Estimation for Europe’s Historic Town Centres. Earthq Spectra 13:773–793. doi: 10.1193/1.1585980

Ferreira T (2009) Avaliação da vulnerabilidade sísmica das paredes de fachada de edifícios em alvenaria. Universidade de Aveiro

Ferreira T (2010) Avaliação da vulnerabilidade sísmica de núcleos urbanos antigos. Aplicação ao núcleo urbano antigo do Seixal. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Ferreira TM (2015) Out-of-plane Seismic Performance of Stone Masonry Walls: Experimental and Analytical Assessment. Universidade de Aveiro

Giovinazzi S (2005) The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig, Braunschweig, Germany and University of Florence, Florence, Italy



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

Grünthal G (1998) Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et Séismologie: Volume 15 - European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Eur. Cent. Geodyn. Seismol. Luxemb.

Lang K (2002) Seismic vulnerability of existing buildings. Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Medvedev S (1977) Seismic intensity scale MSK-76. Pub Intst Geophys Pol Acad Sc A-6 (117):95-102.

Oliveira CS, Azevedo J, Delgado R, et al. (1995) O sismo de Northridge, Los Angeles, de 17 de Janeiro de 1994 - Ensinamentos para Portugal. Edição conjunta do Inst. Super. Técnico Lisboa e da Fac. Eng. da Univ. do Porto

OPS (1993) Mitigación de desastres en las instalaciones de salud: evaluación y reducción de la vulnerabilidad física y funcional. Organ. Panam. la Salud, Washingt. DC

Sánchez-Silva M, García L (2001) Earthquake damage assessment based on fuzzy logic and neural networks. Earthq Spectra 17:89.

Sandi H, Floricel I (1995) Analysis of seismic risk affecting the existing building stock. Proc 10th Eur Conf Earthq Eng 3:1105--1110.

Spence R, D'Ayala D (1999) Damage assessment and analysis of the 1997 Umbria-Marche earthquakes. Struct Eng Int 9:229-233.

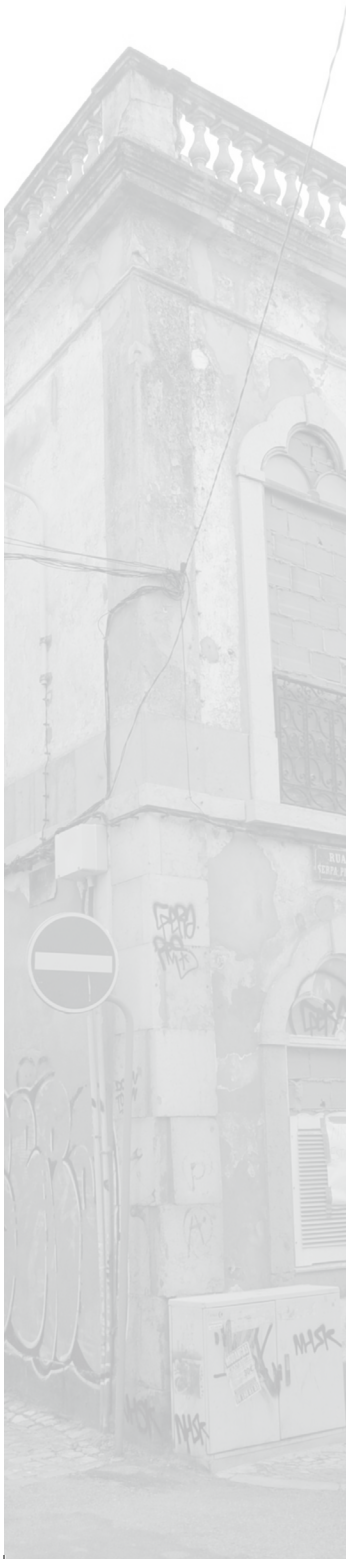
Speranza E (2003) An integrated method for the assessment of the seismic vulnerability of historic buildings. University of Bath, United Kingdom

Stahlin W (1998) Seismic design and performance of nonstructural components in hospitals. Report No. ATC 29-1. Semin Seism Des Retrofit, Perform Nonstructural Components, Appl Technol Counc Redw City, CA 469-473.

Vicente R (2008) Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. Universidade de Aveiro

Whitman RV, Reed JW, Hong ST (1973) Earthquake damage probability matrices. Proc 5th World Conf Earthq Eng Rome, Italy 2:2531-2540.





CAPÍTULO 4

VULNERABILIDADE SÍSMICA DO NÚCLEO URBANO ANTIGO DE FARO

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.

Perante este quadro, o presente artigo aborda o estudo da vulnerabilidade sísmica do edificado como a medida mais eficaz na mitigação do risco sísmico de núcleos urbanos antigos. Dada a incerteza associada à ocorrência de um evento, a perigosidade sísmica é, de entre os três vetores definidores de risco sísmico, aquele que não é passível de ser minimizado. A exposição, a qual avalia o valor dos elementos em risco (humanos e materiais), poderá contribuir para a mitigação do risco sísmico através da adoção de medidas no sentido de condicionar a construção e o desenvolvimento das cidades em locais de elevada perigosidade sísmica e de descentralizar e distribuir as grandes massas humanas e centros económicos e financeiros destas áreas de risco. Com base no exposto, a redução da vulnerabilidade sísmica do edificado urbano apresenta-se como a estratégia mais imediata na mitigação do risco sísmico. Assim sendo, e porque a implementação de qualquer estratégia de redução da vulnerabilidade deverá assentar impreterivel-

mente no conhecimento da condição dessa mesma vulnerabilidade, este artigo apresenta o processo de construção de cenários de perda (patrimonial, humana e económica), baseados na aplicação de uma metodologia simplificada de avaliação da vulnerabilidade sísmica. Esta metodologia, adaptada ao caso Português por Vicente (2008) é baseada num índice de vulnerabilidade estimado a partir de informação qualitativa e quantitativa relacionada com as características geométricas e propriedades mecânicas do edificado.

Refira-se ainda que, de forma a melhorar e otimizar a gestão das características do parque edificado, foi desenvolvido e

utilizado um sistema de informação geográfica em software ArcGis 10.2® (ESRI 2005), o qual combina dados georreferenciados com informação relativa a cada edifício avaliado.

1.1. O Centro Histórico de Faro Como Caso de Estudo

Tal como ilustrado na Figura 1, o centro histórico de Faro encontra-se subdividido em três núcleos edificados, associados às áreas de reabilitação urbana delimitadas pela Câmara Municipal de Faro: Vila Adentro (Zona A), Mouraria (Zona

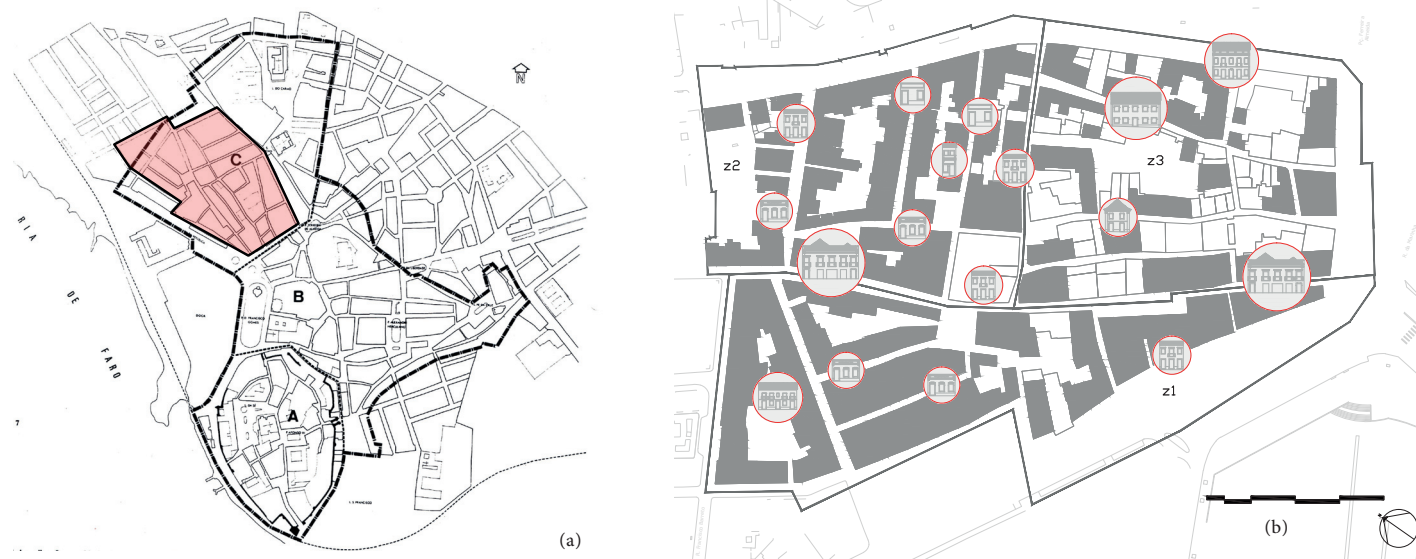


Figura 1: Localização do Bairro Ribeirinho (Zona C) no núcleo urbano antigo da cidade de Faro (a) e o levantamento e caracterização tipológica (b)



B) e Bairro Ribeirinho (Zona C), este último utilizado neste trabalho como zona de estudo para a avaliação da vulnerabilidade sísmica através de uma metodologia de avaliação proposta por Vicente et al. (2011), aqui apresentada de forma resumida na Secção 2. A seleção do Bairro Ribeirinho de Faro como caso de estudo baseou-se no facto de esta ser uma das zonas com elevada concentração de edifícios de alvenaria de pedra, muitos destes com níveis de alteração estrutural reduzidos, premissa essencial para a aplicação da referida metodologia.

O levantamento e caracterização tipológica e construtiva do património edificado do Bairro Ribeirinho, que antecedeu naturalmente o presente trabalho de avaliação da vulnerabilidade sísmica, revelou-se uma tarefa fundamental para um melhor conhecimento estrutural das tipologias existentes naquele núcleo edificado, tornando assim mais célere o processo de avaliação da vulnerabilidade sísmica segundo a metodologia utilizada. De um modo geral, e no que ao tipo de paredes resistentes diz respeito, foram observados os seguintes sistemas: construção mista em taipa composta ou por fragmentos de pedra argamassados com areia, terra e cal (Figura 2 (d)), ou por uma alvenaria em blocos de adobe; construção em alvenaria de pedra de fraca qualidade (de origem aluvionar) com a presença de detritos cerâmicos (ver Figura 2 (a)), construção mista em taipa de melhor qualidade, com

cantaria e cunhais em pedra calcária, e por último, construção porticadas em betão armado com painéis de enchimento em alvenaria de tijolo, esta última fora do contexto da nossa avaliação.

Não menos importante, as coberturas, que assumem um papel crucial na preservação geral do edifício e que acabam muitas vezes por determinar o estado de conservação dos restantes elementos estruturais e não estruturais. No Bairro Ribeirinho de Faro foram encontradas diversas tipologias, desde os tradicionais “telhados em tesouro” (coberturas inclinadas) na Figura 2 (b), aos terraços em “Santa Catarina” (coberturas planas) na Figura 2 (e). Por último, no que diz respeito aos diafragmas horizontais, foi observada a presença de arcos e abóbadas de alvenaria, com ou sem vigamento metálico (ver Figura 2 (f)), vestígio da utilização das semicaves de alguns destes edifícios como antigos armazéns. Quanto aos pavimentos, a sua estrutura tradicional era normalmente realizada em vigamentos (barrotes) de madeira encastrados diretamente nas paredes resistentes ou simplesmente apoiados por arcos, abóbadas ou abobadi-lhas, constituídas por elementos cerâmicos ou pétreos (Figura 2 (c)). O soalho e os ladrilhos cerâmicos cozidos são os dois tipos de revestimento mais frequentemente observados no edificado antigo do Bairro Ribeirinho de Faro.



Figura 2: Exemplo de alvenaria de pedra muito pobre e irregular (a) e paredes em taipa com pequenos fragmentos de pedra (d), “telhados em tesouro” (b) e terraços em “Santa Catarina” (e), e ainda, estrutura de pavimento com barrotes de madeira (c) e com vigamento metálico (f)

A necessidade de adaptação do tipo de utilização dos edifícios em função da evolução da morfologia da cidade de Faro potenciou a grande maioria das intervenções e alterações no edificado do Bairro Ribeirinho. Os grandes armazéns foram divididos em lotes mais pequenos, dando lugar a habitações unifamiliares, ao aproveitamento dos pisos térreos para a instalação de comércio, contribuindo definitivamente para a zona do Bairro Ribeirinho de Faro se tenha afirmado como um dos polos mais importantes

de atração noturna na cidade Faro. O ruído gerado por estes estabelecimentos, particularmente durante o período noturno, num Bairro demarcado pelo seu carácter habitacional, tem motivado frequentes queixas por parte dos residentes, situação que, a par de outras, contribui para a elevada taxa de edifícios devolutos e em ruína. Simultaneamente, esta situação potencia o desinteresse de possíveis investidores dispostos a apostar na reabilitação de alguns destes edifícios.

Destaque ainda para a existência de inúmeros edifícios em situação de ruína ou pré-ruína, e para as intervenções de adaptação e reabilitação de edifícios realizadas ao longo das últimas duas décadas, as quais foram responsáveis pela descaracterização de algum do edificado, levando à perda de uma parte importante deste património arquitetónico. Refiram-se ainda algumas alterações que, pela sua natureza, podem apresentar consequência estruturais graves, tais como a abertura de grandes vãos na parede de fachada ou a supressão de elementos resistentes ao nível do rés-do-chão, situações tipicamente decorrentes da mudança de função do edifício. Note-se que as alterações de uso ou de ocupação de um edifício são aceitáveis, desde que não motivem intervenções estruturais e arquitectónicas intrusivas e que sejam devidamente pautadas pelo rigor e ponderação (Ferreira et al. 2013a).

Finalmente importa ainda destacar a falta de coerência arquitetónica da zona de estudo, situação claramente recorrente da fiscalização desadequada das intervenções de ampliação destes edifícios, com resultado numa sobreposição desadequada, por vezes labiríntica, de volumes cuja resposta estrutural é muitas vezes desconhecida.

1.2. 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 1994) 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. (2006), Lagomarsino e Giovinazzi (2006) e Athmani et al. (2014). Em Portugal, esta metodologia foi adaptada à realidade dos nossos edifícios antigos por Vicente (2008), 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 (Vicente et al. 2011), esta metodologia foi recentemente utilizada na avaliação do núcleo urbano antigo do Seixal (Ferreira et al. 2013b).

Tabela 1: Formulação da metodologia do índice de vulnerabilidade em Vicente (2008)

Parâmetros por grupo	Classe C_{vi}				Peso p_i	Peso relativo sobre I_v^*
	A	B	C	D		
Grupo 1. Sistema construtivo						
$P1$ Tipo do 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	
$P5$ Altura do edifício	0	5	20	50	1.50	
$P6$ Posição do edifício e fundações	0	5	20	50	0.75	
Grupo 2. Irregularidades e interações						
$P7$ Localização e interação	0	5	20	50	1.50	27/100
$P8$ Irregularidade em planta	0	5	20	50	0.75	
$P9$ Irregularidade em altura	0	5	20	50	0.75	
$P10$ Desalinhamento de aberturas	0	5	20	50	0.50	
Grupo 3. Pavimentos e cobertura						
$P11$ Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1.00	15/100
$P12$ Tipo de cobertura	0	5	20	50	1.00	
Grupo 4. Estado de conservação e outros elementos						
$P13$ Danos estruturais identificados	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. A cada parâmetro é ainda associado um determinado peso, p_i , definido em função da relevância desse parâmetro para o comportamento sísmico do edifício.

$$I_v^* = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \times p_i \quad (1)$$

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 (2008). 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 (2008) 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.

2 RESULTADOS

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 (Ferreira et al. 2013b). 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 dos 191 edifícios avaliados é apresentada na Figura 3 (a), através do mapeamento do I_v para cada edifício. Já na Figura 3 (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 (Grünthal 1998). 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).



Figura 3: Mapeamento do índice de vulnerabilidade I_v para o Bairro Ribeirinho de Faro (a) e identificação dos edifícios com $I_v > 40$ (b)

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. De acordo

com esta metodologia, o grau de dano médio, μ_D , pode ser estimado para diferentes intensidades através da aplicação das seguintes equações, desenvolvidas para esse fim por Bernardini et al. (2007):

Capítulo 4. Vulnerabilidade sísmica do núcleo urbano antigo de Faro

$$\mu_D = 2.5 \times \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 \times V - 13.1}{Q} \right) \right]; 0 \leq \mu_D \leq 5 \quad (2)$$

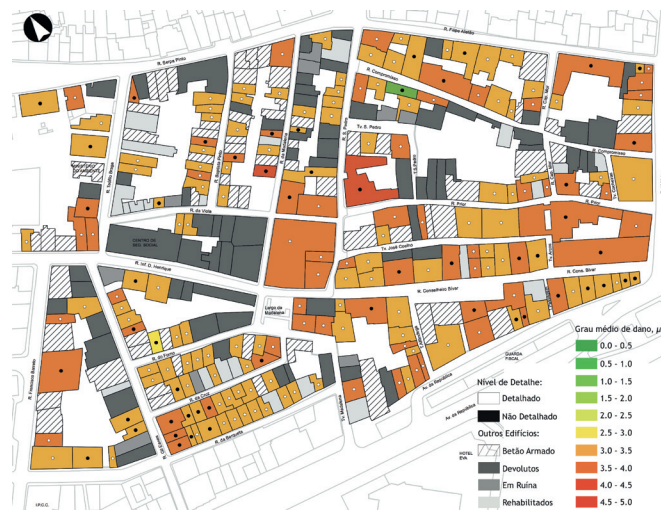
$$V = 0.592 + 0.0057 \times I \quad (3)$$

onde I representa a perigosidade sísmica descrita em termos de intensidade macro sísmica, V representa o

índice de vulnerabilidade (calculado na equação anterior), e Q é um fator de ductilidade definido em função da tipologia construtiva do edifício a avaliar (considerado neste trabalho igual a 3.0). A Figura 4 (a) e (b) apresenta os cenários de grau de dano médio obtidos para intensidade macro sísmicas, $I_{(EMS-98)}$, VIII e IX, respetivamente.



(a)



(b)

Figura 4: Cenários de dano para intensidades $I_{(EMS-98)} = VIII$ (a) e $I_{(EMS-98)} = IX$ (b)

A estimativa de edifícios colapsados e inutilizáveis, resultado de extrema importância e utilidade para as entidades governamentais e de proteção civil, foi neste artigo avaliada com base num modelo desenvolvido por Bramerini et al. (1995), que define os estados de dano que relacionam a probabilidade de se exceder um determinado grau de

dano com a probabilidade de colapso e perda funcional. A estimativa do número total de edifícios colapsados e inutilizáveis para diferentes intensidades sísmicas, $I_{(EMS-98)}$, e para o valor $I_{v,médio} = 34.12$, encontra-se apresentada na Figura 5.



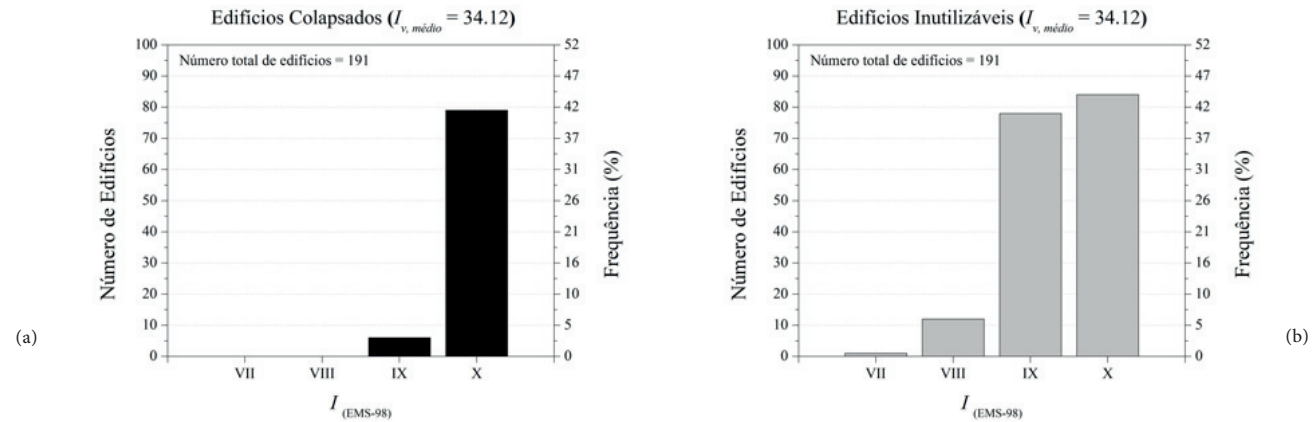
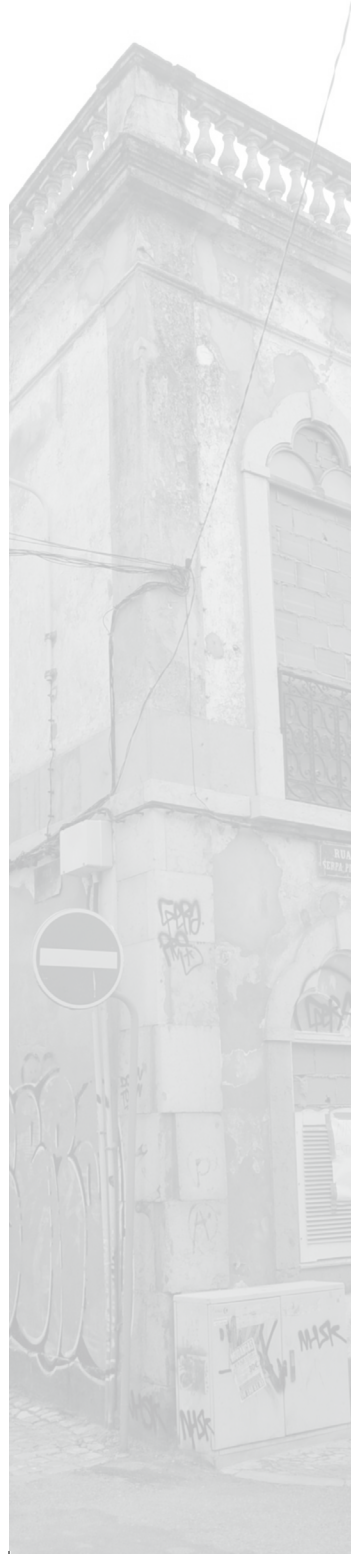


Figura 5: Estimativa do número de edifícios colapsados (a) e inutilizáveis (b)

Também na avaliação das perdas humanas e número de desalojados, foi utilizado o modelo desenvolvido por Bramerini et al. (1995). Para tal, definiu-se a percentagem de mortos e feridos graves como sendo 30% do número total de habitantes residentes em edifícios colapsados e inutilizáveis. A estimativa do número de mortos e feridos

graves e de desalojados, para o $I_{v, mean} = 34.12$, é apresentada na Figura 6. A origem da referência não foi encontrada. Importa, no entanto, salientar que estes números podem ser significativamente agravados em função da sazonalidade própria da região do Algarve e da hora a que ocorra o sismo.

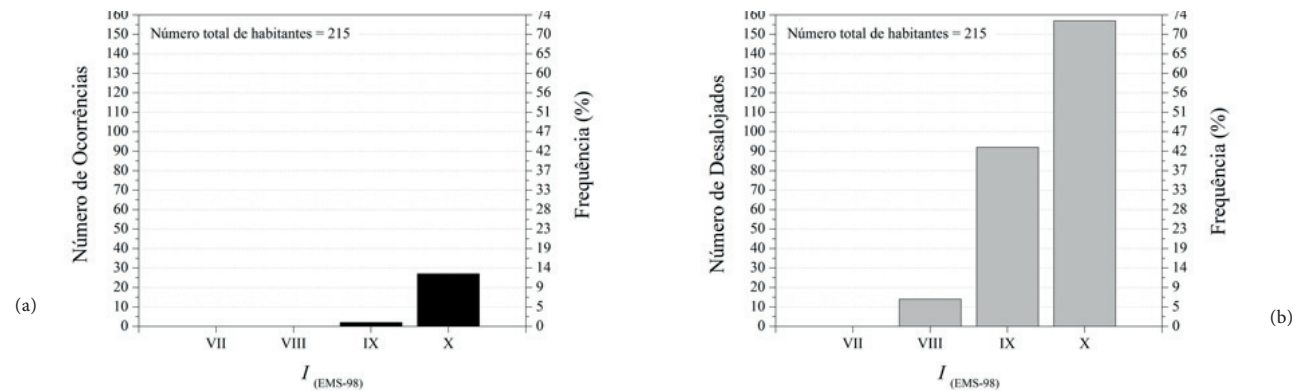


Figura 6: Estimativa do número de mortos e feridos graves (a) e desalojados (b)

Finalmente, de acordo com Vicente et al. (2011) a probabilidade de custo de reparação para um determinado evento sísmico caracterizado por uma intensidade I , $P[R|I]$, pode ser calculada através do produto da probabilidade condicional do custo de reparação para cada grau de dano, $P[R|D_k]$ com a probabilidade condicional de condição de dano para cada nível de vulnerabilidade e intensidade sísmica, $P[D_k|I_v, I]$. Assim, de forma a estimar o custo de reparação associado a diferentes valores de vulnerabilidade na estimativa de perdas, considerou-se um custo unitário de reparação de 482 €/m² em função do valor sugerido pela Portaria n.º 370/2013 (Portugal 2013). Com base neste dado, a Figura 7 apresenta a estimativa global dos custos de reparação para o Bairro Ribeirinho de Faro.

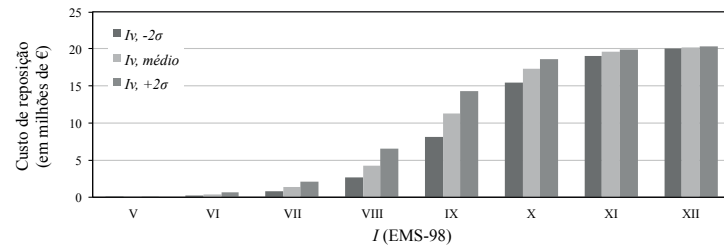


Figura 7: Estimativa dos custos da reparação para diferentes intensidades

3. CONCLUSÕES

É fundamental que a legislação que regula a reabilitação de edifícios antigos de valor patrimonial reconhecido se estenda para além da conservação da fachada, criando

condições e eventuais contrapartidas para os interessados em preservar e reabilitar com as técnicas e soluções construtivas originais. As leis e a burocracia associada ao licenciamento e execução das obras de reabilitação devem ser aligeiradas, de forma a tornar este processo mais célere, simples e económico, atraindo desta forma potenciais investidores. Parece claro que existem ainda situações em que as políticas e as estratégias atuais de incentivo à reabilitação urbana não conseguem dar uma resposta eficiente. No entanto, este descongestionamento processual deve ser acompanhado de uma estratégia de fiscalização mais rígida e penalizadora para os incumpridores, com o intuito de evitar a intrusividade e consequente descaracterização arquitetónica do património edificado. Por outro lado, sublinhe-se que uma avaliação rigorosa e competente da vulnerabilidade sísmica dos núcleos históricos antigos, complementada com soluções apropriadas de reforço estrutural e sísmico, podem reduzir significativamente os danos e as perdas humanas e económicas causados por futuros eventos. Através de projetos de reabilitação bem concebidos baseados nos princípios definidos pelo ICOMOS (2005), sem um acréscimo significativo dos custos globais da empreitada, promover a reabilitação estrutural e sísmica do património edificado.

Assim, de um modo geral os resultados obtidos nesta avaliação podem dizer-se coerentes com as características





e o estado de conservação do edificado do Bairro Ribeirinho de Faro. Como nota final refira-se ainda que o valor médio obtido para o índice de vulnerabilidade sísmica deste edificado, igual a 34.14, encontra-se em linha com os valores obtidos pelos autores em outros estudos realizados no passado, nomeadamente para o edificado antigo da Baixa de Coimbra ($I_{v,médio}=38.38$) e do núcleo urbano antigo do Seixal ($I_{v,médio}=32.81$). No entanto, sendo a perigosidade sísmica da cidade de Faro moderada a elevada, estes resultados revelam que a ocorrência de evento sísmico de intensidade moderada poderá causar danos e perdas significativas, motivadas, quer pela vulnerabilidade do próprio edificado, quer pela falta de preparação das entidades responsáveis e sensibilização da população. Resultado idêntico foi ainda apresentado em 2010 pela Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), num estudo sobre o risco sísmico e de tsunamis na região do Algarve (ANPC 2010).

4. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ANPC (2010) Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve. Edição da Autoridade Nacional de Proteção Civil. Coordenação da Direção Nacional de Planeamento de Emergência

Athmani AE, Gouasmia A, Ferreira TM, et al. (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

Bernardini A, Giovinazzi S, Lagomarsino S, Parodi S (2007) Vulnerabilità e previsione di danno a scala territoriale secondo una metodologia macrosismica coerente con la scala EMS-98. ANIDIS, XII Convegno Naz. l'ingegneria sismica Ital.

Bramerini F, Di Pasquale G, Orsini A, et al. (1995) Rischio sismico del territorio italiano. Proposta per una metodologia e risultati preliminari. Serv. Sism. Naz. Rapp. Tec. SSN/RT/95/01, Roma

Calvi GM, Pinho R, Magenes G, et al. (2006) Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. ISET J Earthq Technol 43:75-104.

ESRI (2005) Geographic Information Systems. 310 New York Street, Redlands, 92373-8100, USA

Ferreira TM, Santos C, Vicente R, Silva JARM da (2013a) Caracterização arquitectónica e construtiva do património edificado do núcleo urbano antigo do Seixal. Conserv Património 17:21-37. doi: 10.14568/cp2012008

Ferreira TM, Vicente R, Mendes da Silva JAR, et al. (2013b) 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

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

Grünthal G (1998) Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et Séismologie: Volume 15 - European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Eur. Cent. Geodyn. Seismol. Luxemb.

Capítulo 4. Vulnerabilidade sísmica do núcleo urbano antigo de faro

ICOMOS/ISCARSAH Committee (2005) Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. ICOMOS international committee for analysis and restoration of structures of architectural heritage

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

Portugal (2013) Portaria no370/2013, de 27 de Dezembro de 2013. Ministério do Ambient. e do Ordenam. do Territ. Diário da República, 1a série, no251, Port.

Vicente R (2008) Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. Universidade de Aveiro

Vicente R, Parodi S, Lagomarsino S, et al. (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





CAPÍTULO 5

MITIGAÇÃO DO RISCO SÍSMICO EM NÚCLEOS URBANOS ANTIGOS

1. INTRODUÇÃO

O investimento em políticas de mitigação do risco sísmico é considerado fundamental não só na promoção da resiliência urbana e preparação da população para uma situação de catástrofe, mas também para controlar a extensão dos danos provocados no património edificado e assim reduzir ambas as perdas sociais e económicas. Assim, este trabalho tem por objetivo contribuir para a mitigação do impacto de diferentes cenários sísmicos, através da avaliação de diferentes estratégias de reforço, implementadas em parte do núcleo urbano antigo da cidade da Horta.

1.1. Resiliência Urbana e Mitigação do Risco Sísmico

O conceito de resiliência urbana é muitas vezes definido como a capacidade inerente às comunidades expostas de resistir, suportar e recuperar de forma sustentável dos efeitos causados por um determinado risco e está diretamente associado à gestão da mitigação, preparação, desastre, resposta, recuperação e reconstrução (Coaffee, 2008). O trabalho que será apresentado nesta secção tem como principal objetivo contribuir para o estudo da resiliência ao nível das infraestruturas e da mitigação do risco sísmico de

núcleos urbanos antigos, zonas particularmente vulneráveis e de enorme valor patrimonial, e que por isso devem ser analisadas com atenção redobrada. O reconhecimento das consequências catastróficas e impactos causados por desastres naturais ao longo da história da humanidade, nomeadamente os terremotos, é uma das principais motivações para o desenvolvimento de investigação nesta área científica, sendo por isso fundamental conhecer e aprender com os bons e maus exemplos de práticas e estratégias levadas a cabo recentemente e a uma escala global com o objetivo de melhorar a resiliência das comunidades. Assim, a identificação dos riscos associados à ocorrência de fenómenos naturais é considerado o primeiro passo no sentido de mitigar os seus efeitos adversos. Várias organizações tais como a GFDRR (*Global Facility for Disaster Reduction and Recovery*) estão empenhadas em auxiliar os governos e respetivas comunidades localizadas em áreas de elevada perigosidade através da implementação de medidas preventivas que permitam aumentar os índices de perceção e consciência dessas populações, providenciando-lhes o acesso a informação detalhada sobre risco e exposição física e social (Ashar and Athar, 2013). Este tipo de iniciativas permitirá aos decisores políticos estabelecer uma melhor estimativa dos impactos, a nível económico e social, que a ocorrência de determinados fenómenos naturais possam causar, e assim adaptar a tomada de decisões em função dessa mesma análise de risco (Ashar and Athar, 2013). Para além disso, estas parcerias assistem muitas vezes os governos, a sociedade civil e o sector privado na melhoria da legislação e das

políticas nacionais associadas ao planeamento do território, ao atrair investimento para implementar estratégias sustentáveis de mitigação do risco sísmico e ainda ao desempenharem o papel de moderadores num diálogo muitas vezes difícil entre as várias partes interessadas (Ashar and Athar, 2013).

Uma vez que a perigosidade sísmica continua a ser condicionada pela sua imprevisibilidade e pela impossibilidade de poder ser de todo suprimida, as estratégias de perceção e preparação para o risco sísmico, através do desenvolvimento e otimização de planos de contingência e emergência em situação de catástrofe, são vistas como fundamentais para a salvaguarda e proteção das comunidades. Apesar disto, e principalmente em países subdesenvolvidos, as populações permanecem altamente expostas e vulneráveis aos choques financeiros decorrentes deste género de fenómenos. Deste modo, torna-se imperativo o desenvolvimento e implementação de estratégias adequadas de proteção financeira para a eventualidade de ocorrência de desastres naturais, permitindo aumentar a capacidade resiliente das comunidades e das várias partes interessadas. Existem bastantes exemplos de programas que demonstraram no passado essa influência positiva que a gestão e planeamento do risco de catástrofe apresenta na capacidade resiliente das comunidades, como por exemplo o RHRP (*Rural Housing Reconstruction Program*), conduzido na sequência do terremoto de Outubro de 2005 no norte do Paquistão, evento que causou a morte de cerca de 73000 pessoas e que fez mais de 2800000



desalojados (Ashar and Athar, 2013). Também os terremotos do Chile de Fevereiro de 2010 (Astroza et al., 2012) e de Christchurch em Fevereiro de 2011 foram importantes para impulsionar o desenvolvimento de programas relativos à mitigação do risco sísmico. Por último, o terremoto de Março de 2011 (*GEJE - Great East Japan Earthquake*), o primeiro mega-desastre alguma vez registado que incluiu um terremoto, tsunami, acidente numa central nuclear, falha de energia e ainda fortes perturbações nas cadeias de abastecimento, causando a morte de 20000 habitantes, levando ao colapso 130000 edifícios e danificando significativamente cerca de 270000 edifícios, com um custo económico direto estimado em cerca de 210 biliões de dólares (Ranghieri and Ishiwatari, 2014). Pese embora a sensibilidade e preparação da população Japonesa para o risco sísmico seja internacionalmente reconhecida como uma das mais bem preparadas, mérito das estratégias de mitigação e gestão de risco de desastre implementadas ao longo das últimas décadas, a imprevisibilidade e complexidade do efeito em cadeia derivado do terremoto de magnitude 9.0 superou as cenários mais pessimistas.

Em muitos países, tal como em Portugal, o corpo da proteção civil é a entidade responsável pela concepção dos planos de resposta e emergência em caso de ocorrência de desastres naturais ou causados pelo homem, em ambas as situações pré e pós evento. Para que esta missão seja bem sucedida é necessário que estes agentes envolvidos no planeamento de estratégias de mitigação de riscos sejam capazes de identificar as zonas mais vulneráveis e desenvolver exercícios que

promovam a interação com as comunidades locais através de simulacros, e a sua preparação na eventualidade de uma situação real de emergência (Goula *et al.*, 2006). No entanto, tal como discutido por Ferreira *et al.* (2013), a gestão do risco em zonas urbanas é muitas vezes praticada sem a utilização de ferramentas de planeamento apropriadas. A consequência mais imediata desta situação reside na impossibilidade dos técnicos e decisores políticos ao nível das entidades camarárias ou autoridades regionais, poderem construir/idealizar uma visão global da área sob estudo, muitas vezes comprometendo a eficácia das estratégias e medidas de mitigação do risco. Uma das soluções mais eficazes na abordagem desta problemática é a utilização de ferramentas multiuso ligadas a base de dados armazenadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que permitem realizar análises espaciais integradas da área sob estudo e a gestão desses dados (*multi-layer analysis*). No que diz respeito à mitigação do risco sísmico à escala urbana, a utilização destas ferramentas é essencial para o desenvolvimento de estratégias de reforço sísmico, das respetivas análises custo-benefício e ainda para o apoio à proteção civil na elaboração e implementação dos planos de emergência (Neves *et al.*, 2012a). Pelas razões aqui mencionadas, os resultados apresentados e discutidos nesta secção foram gerados a partir da versão comercial do programa ArcGis® 10.2 (ESRI, 2012), onde foi combinada informação gráfica georreferenciada à base de dados, onde foi armazenada toda a informação relativa às principais propriedades dos edifícios inspecionados e avaliados.

1.2. O Contexto de Portugal

Portugal continental está localizado no extremo sudoeste da parte continental da placa litosférica Eurásia, próximo do limite entre as placas litosféricas Eurásia e África (Núbia), estando por isso sujeito a uma sismicidade de magnitude moderada a muito elevada (Moreira, 1989). Para além disto, o arquipélago dos Açores ao conjugar a sua origem vulcânica com uma importante atividade tectónica, uma vez que se localiza na tripla intersecção das placas litosféricas Eurásia, África e América do Norte, é considerado uma das zonas de maior sismicidade em Portugal (Nunes, 2008). Perante este contexto, Portugal apresenta uma perigosidade sísmica moderada, que em países de contextos semelhantes se tem materializado através da ocorrência de eventos sísmicos importantes, que têm causado perdas humanas e económicas consideráveis (Barata, 2005).

O grande terramoto de Lisboa de 1755, ao qual se seguiu um tsunami e um incêndio urbano de grande escala, assumiu-se como um ponto de viragem na história do sector da construção e continua a ser o maior desastre natural ocorrido em Portugal. O período Pombalino, que emergiu na sequência deste desastre, foi revelador de uma grande mudança ao nível da tecnologia e qualidade da construção, pois pela primeira vez na fase de projeto foram considerados alguns dos princípios básicos do dimensionamento sísmico, dando origem à técnica sismo-resistente designada por Gaiola Pombalina (Andrade, 2011). Por volta de 1930, aquando da

introdução do betão armado no sector da construção, os edifícios tradicionais de alvenaria, incluindo os edifícios Gaioleiros, foram sendo progressivamente substituídos por edifícios de betão armado à medida em que as trágicas memórias do terramoto de 1755 pareciam já esquecidas. Assim como as memórias do terramoto, também a consideração dos princípios básicos sismo-resistentes e a qualidade na construção foram gradualmente esquecidas com a introdução desta nova tecnologia construtiva, começando primeiramente apenas pela substituição de pavimentos e varandas, e posteriormente, depois de 1950, pela substituição integral da tipologia original de alvenaria (Andrade, 2011). Nos dias de hoje, o edificado urbano antigo de várias cidades Portuguesas encontra-se em geral e salvo raras exceções, num mau estado de conservação, apresentando graves patologias estruturais, falta de manutenção e de provisões sísmicas adequadas. Um estudo recente conduzido por Maio et al. (2015) no Bairro Ribeirinho da cidade de Faro, concluiu que cerca de 20% do número total de edifícios da área sob estudo encontram-se abandonados ou devolutos. De forma a contrariar esta tendência, nos últimos anos, a comunidade científica nacional, os media e a proteção civil, têm unido esforços no sentido de alertar e sensibilizar a população para a preocupante vulnerabilidade estrutural e sísmica que o edificado em geral apresenta em zonas de elevada perigosidade sísmica, tal como a área metropolitana de Lisboa e a costa sudoeste de Portugal continental, que tem gerado um impulso positivo nos índices de perceção e sensibilização da sociedade para esta



problemática, isto apesar dos resultados de uma campanha de inquéritos dirigida à população e aos técnicos locais sobre risco e vulnerabilidade sísmica e conduzida no Bairro Ribeirinho da cidade de Faro, ter revelado que a perceção e sensibilidade para as questões do risco sísmico e da vulnerabilidade sísmica são em geral muito insuficientes, demonstrando que existe ainda um longo caminho a percorrer nesta matéria (Vicente et al., 2014a; Vicente et al., 2014b).

Este cenário e contexto nacional vem reforçar a necessidade de uma metodologia de avaliação do risco sísmico mais credível e capaz, assim como do desenvolvimento estratégico e implementação de medidas apropriadas de mitigação do risco sísmico que visem melhorar a capacidade resiliente das cidades, através do estabelecimento de prioridades de intervenção em campanhas de reabilitação e reforço sísmico, de regimes de seguros para transferir os encargos financeiros associados aos processos de reconstrução da entidade governamental para o sector privado, de regulamentos para aprovisionar os princípios construtivos sísmo-resistentes e ainda do desenvolvimento de planos de emergência a nível regional (Silva et al., 2014). Não obstante, Portugal tem enfrentado nos últimos anos uma grave crise económica, que tem condicionado o progresso nas várias frentes identificadas anteriormente e limitando por isso a capacidade resiliente das nossas cidades.

O sector da construção tem sido um dos maiores lesados da crise económica e financeira dos últimos anos, que acabou

por gerar uma crise de valores com implicações multilaterais, que naturalmente se refletiram, e muito, nas matérias relacionadas com a mitigação do risco e da vulnerabilidade sísmica, que abordamos ao longo deste livro. Hoje em dia, a maioria da população Portuguesa ainda não reconhece a reabilitação e reforço sísmico como uma medida necessária para a redução da vulnerabilidade sísmica do edificado e consequentemente para a redução do risco sísmico. Em geral, os arquitetos, projetistas e engenheiros, tirando partido dos sucessivos impasses na aprovação dos regulamentos para o dimensionamento sísmico de estruturas novas e existentes, e do incentivo à reabilitação urbana low-cost por parte do governo, entidades camarárias, e investidores privados, têm conduzido intervenções francamente intrusivas e ou superficiais, desconsiderando os princípios básicos de dimensionamento sísmico. Além disso, a população em geral não está minimamente informada sobre a vulnerabilidade sísmica da sua própria habitação nem recetiva para o investimento adicional que a reabilitação ou reforço sísmico poderá significar no custo total da intervenção, escolhendo preferencialmente as soluções mais económicas, mesmo sem conhecerem a relação custo-benefício de tais soluções de reforço. Situações como as anteriores fazem com que a integridade física das populações residentes em zonas de elevada perigosidade sísmica esteja facilmente comprometida com a ocorrência de um terramoto.

Desta forma, nesta secção, os autores pretendem trazer atenção para esta problemática, através de uma melhor

compreensão da relação custo-benefício da aplicação de diferentes soluções tradicionais de reforço sísmico em edifícios de alvenaria localizados em núcleos urbanos antigos. Espera-se que estes resultados possam contribuir para contrariar essa ideia preconizada de que a reabilitação e o reforço sísmico em Portugal não são necessários, e de que essas ações comportam despesas avultadas.

2. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA E SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO

2.1 O Caso de Estudo do Núcleo Urbano Antigo da Cidade da Horta, Portugal

O presente caso de estudo diz respeito à avaliação da vulnerabilidade sísmica no núcleo urbano antigo da cidade da Horta, ilha do Faial (arquipélago dos Açores). É importante referir que esta ilha 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, tendo conduzido cerca de 70% do edificado à ruína, 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, que foi posteriormente organizada e arquivada em 2007 pela Secre-

taria Regional da Habitação e Equipamentos (SRHE), que dirigiu esta iniciativa (F. Neves *et al.*, 2012). A qualidade e a singularidade da 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 do já referido projeto FCT URBSIS, 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 $IEMS-98 = V/VI$ (G. Zonno *et al.*, 2010), 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. É importante ainda referir que os autores consideraram a avaliação do edificado existente à data do terramoto de 1998, portanto, imediatamente antes de se darem início os trabalhos de reconstrução, reabilitação e reforço sísmico, condição que daqui para a frente será designada por SR (“sem” reforço).

Neste sentido, a vulnerabilidade sísmica do núcleo urbano antigo da cidade da Horta foi avaliado através da aplicação da metodologia do índice de vulnerabilidade desenvolvido por Vicente (2008), baseado na abordagem da metodologia Italiana GNDT II (GNDT, 1994), e que tem vindo a ser utilizada nos últimos anos na avaliação da vulnerabilidade sísmica de núcleos urbanos antigos de cidades como Coimbra, Seixal e Faro (R. Vicente *et al.*, 2011; T. Ferreira *et al.*,



2013; R. Maio *et al.*, 2015). À semelhança das dificuldades enfrentadas nos anteriores casos de estudo, nomeadamente ao nível da inspeção e levantamento estrutural dos edifícios e da logística associada a este tipo de ações, os autores acabaram por atuar em dois níveis de avaliação distintos. Assim, os 313 edifícios pertencentes à área delimitada sob estudo foram divididos em quatro grupos em função do nível de detalhe da informação disponível. Um primeiro grupo, composto por 50 edifícios avaliados de forma detalhada (Avaliação Detalhada), foi avaliado tendo em conta as plantas de arquitetura e plantas estruturais, reportagens fotográficas pós-terramoto e outros relatórios relacionados com o respetivo processo de reabilitação (especificações técnicas e orçamentos), permitindo recolher de um forma geral, toda a informação necessária à avaliação de todos parâmetros integrantes da referida metodologia. Um segundo grupo formado por 142 edifícios foi apenas avaliado com recurso a uma inspeção pelo exterior do edifício (Avaliação não-detalhada). Um terceiro grupo composto por 93 edifícios de betão armado não foi incluído neste estudo, uma vez que a metodologia utilizada foi apenas desenvolvida para a

avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de alvenaria. Finalmente, um quarto grupo foi definido para agrupar 28 edifícios, também eles não avaliados neste estudo, por se tratarem de edifícios religiosos ou governamentais (singulares), ou ainda edifícios que se encontram em estado de pré-ruína ou sujeitos a processos de reabilitação. Desta forma, o de índice de vulnerabilidade médio foi estimado através da assemblagem dos dois primeiros grupos, avaliação essa que daqui para a frente será designada por Avaliação Global.

A metodologia de avaliação sísmica do índice de vulnerabilidade aqui aplicada, classificada como uma técnica híbrida, apropriada para uma avaliação a larga escala de edifícios de alvenaria (G. Calvi *et al.*, 2006), compreende a determinação de um índice de vulnerabilidade sísmica, I^*_v , para cada edifício, calculado através da média ponderada de 14 parâmetros, onde cada um deles avalia um determinado aspeto relacionado com a resposta sísmica do edifício, distribuídos em quatro classes de vulnerabilidade crescente, C_{vi} , de A a D (R. Vicente *et al.*, 2011), de acordo com a Equação 1:

$$I_v^* = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \times p_i \quad (1)$$

Posteriormente, um peso variável p_i , é atribuído a cada parâmetro com base na opinião de especialistas, assumindo valores desde 0.50 para os parâmetros menos importantes em termos de vulnerabilidade estrutural, até 1.50 para aqueles considerados mais importantes.

O valor inicial de I_v^* , que pode variar portanto entre 0 e 650, é posteriormente normalizado passando a variar entre 0 e 100, designado por I_v , para facilitar a sua própria leitura e ainda a sua comparação com a estimativa de danos com base em diferentes escalas macrossísmicas (G. Grünthal, 1998) ou perdas. De acordo com a Tabela 1, estes 14 parâmetros estão agrupados em quatro grandes grupos por forma a destacar a sua importância relativa e diferenças na resposta sísmica global do edifício.

Tabela 1: Metodologia do índice de vulnerabilidade (Vicente, 2008).

Parâmetros por grupo	Classe C_{vi}				Peso p_i	Peso relativo sobre I_v^*
	A	B	C	D		
Grupo 1. Sistema construtivo						
<i>P1</i> Tipo do sistema resistente	0	5	20	50	0.75	46/100
<i>P2</i> Qualidade do sistema resistente	0	5	20	50	1.00	
<i>P3</i> Resistência convencional	0	5	20	50	1.50	
<i>P4</i> Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0.50	
<i>P5</i> Altura do edifício	0	5	20	50	1.50	
<i>P6</i> Posição do edifício e fundações	0	5	20	50	0.75	
Grupo 2. Irregularidades e interações						
<i>P7</i> Localização e interação	0	5	20	50	1.50	27/100
<i>P8</i> Irregularidade em planta	0	5	20	50	0.75	
<i>P9</i> Irregularidade em altura	0	5	20	50	0.75	
<i>P10</i> Desalinhamento de aberturas	0	5	20	50	0.50	
Grupo 3. Pavimentos e cobertura						
<i>P11</i> Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1.00	15/100
<i>P12</i> Tipo de cobertura	0	5	20	50	1.00	
Grupo 4. Estado de conservação e outros elementos						
<i>P13</i> Danos estruturais identificados	0	5	20	50	1.00	12/100
<i>P14</i> Elementos não estruturais	0	5	20	50	0.50	

Apesar da definição do peso de cada um dos parâmetros poder apresentar naturalmente alguma incerteza, os autores acreditam que, com base nas experiências anteriores, se a inspeção dos edifícios for conduzida de uma forma detalhada e o mais precisa possível, esta metodologia pode ser



considerada robusta, com uma incerteza associada à atribuição das classes de vulnerabilidade de cada parâmetro relativamente baixa (R. Vicente *et al.*, 2011; R. Maio *et al.*, 2015). De acordo com a explicação anterior, numa primeira fase foram avaliados os 50 edifícios pertencentes ao primeiro grupo (Avaliação detalhada). Posteriormente, numa segunda fase, foram avaliados os 142 edifícios avaliados de forma não detalhada (Avaliação não-detalhada), usando como ponto de partida os valores médio obtidos na Avaliação detalhada, assumindo as propriedades da alvenaria homogéneas em toda a zona de estudo. Partindo deste princípio, o valor médio do índice de vulnerabilidade sísmica calculado na Avaliação detalhada foi adotado como indicador tipológico de vulnerabilidade na Avaliação não-detalhada, sendo posteriormente afetado pelos coeficientes dos parâmetros modificadores (T. Ferreira *et al.*, 2013).

A classificação desses parâmetros modificadores influencia o índice de vulnerabilidade de cada um dos edifícios pertencentes à Avaliação não-detalhada através da soma de cada um dos respetivos coeficientes, definidos na Tabela 2. Desta forma, o índice de vulnerabilidade da Avaliação não-detalhada, I_v , é definido de acordo com a Equação 2:

$$\bar{I}_v = \bar{I}_v + \sum \Delta I_v \quad (2)$$

onde I_v , representa o valor médio do índice de vulnerabilidade calculado na Avaliação detalhada e $\sum \Delta I_v$, a soma dos coeficientes modificadores para a respetiva classe atribuída.

É importante notar que esta estratégia é apenas válida se a Avaliação detalhada compreender um número significativo de edifícios e uma única tipologia construtiva da zona sob estudo. A seguinte equação demonstra como foram calculados os coeficientes relativos a cada uma das classes dos parâmetros modificadores, de acordo com a Equação 3:

$$\frac{p_i}{\sum_{i=1}^6 p_i} \times (C_{vi} - \bar{C}_{vi}) \quad (3)$$

onde p_i representa o peso atribuído a cada parâmetro modificador i , $\sum_{i=1}^6 p_i$, representa a soma de cada um dos pesos p_i , C_{vi} a classe de vulnerabilidade de cada um dos coeficientes e \bar{C}_{vi} , a classe de vulnerabilidade média obtida para cada parâmetro na Avaliação detalhada.

Tabela 2: Coeficientes dos parâmetros modificadores.

Parâmetros modificadores	Classe C_{vi}			
	A	B	C	D
P4 Distância máxima entre paredes	-0.31	0.00	0.94	2.81
P5 Altura do edifício	-0.94	0.00	2.81	8.44
P7 Localização e interação	-0.94	0.00	2.81	8.44
P9 Irregularidade em altura	-0.47	0.00	1.41	4.22
P10 Desalinhamento de aberturas	-0.31	0.00	0.94	2.81
P14 Elementos não estruturais	-1.25	-0.94	0.00	1.88

Com a aplicação da metodologia do índice de vulnerabilidade aos 50 edifícios da Avaliação detalhada, foi obtido um valor do índice de vulnerabilidade médio I_v , igual a 26.32, com desvio padrão σI_v , igual a 9.73. Posteriormente, a introdução da Avaliação não-detalhada na referida metodologia levou à obtenção de um valor médio do índice global de vulnerabilidade sísmica (Avaliação global), $I_{vglobal}$, igual a 26.55, ao qual está associado um desvio padrão $\sigma I_{vglobal}$, de 5.45. Os valores máximos e mínimos dos índices de vulnerabilidade, I_v , obtidos com a Avaliação detalhada do edifício do núcleo urbano da cidade da Horta foram 55.00 e 10.96, respetivamente. Os histogramas e curvas de distribuição normal resultantes da aplicação faseada desta metodologia são apresentados na Figura 1.

O mapeamento e distribuição dos índices de vulnerabilidade I_v , obtidos para a Avaliação global será apresentado e discutido mais à frente na Figura 7 (a), de forma a poder comparar a condição original SR com os diferentes cenários de reforço sísmico. É importante notar também que os resultados aqui obtidos para esta condição original SR podem dizer-se bem ajustados às características do edifício e às fragilidades avaliadas e registadas pelas fotografias anexadas aos respetivos relatórios de dano, aquando do terramoto de 1998, que vêm assim confirmar a robustez e o sentido prático desta metodologia.

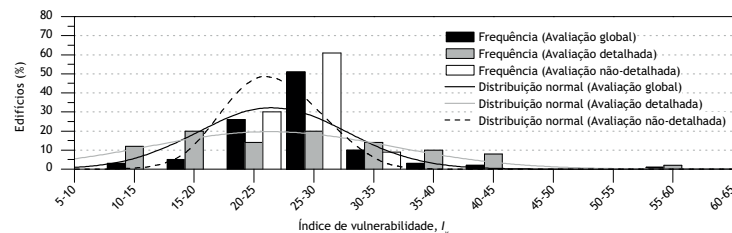


Figura 1: Histogramas e curvas de distribuição normal de cada uma das fases de avaliação (Avaliação detalhada e Avaliação não-detalhada) e da Avaliação global, relativas à condição original SR do edificado.

2.2. Aplicação de Soluções Tradicionais de Reforço Sísmico

A proteção da vida e integridade física da população é um dos principais objetivos das ações de reforço e reabilitação sísmica. Em muitos casos, as exigências colocadas aos edifícios existentes em termos de desempenho na salvaguarda da vida humana são difíceis de alcançar apenas recorrendo a pequenas intervenções estruturais. Assim, o reforço sísmico em edifícios existentes é considerado não sustentável em situações em que o capital necessário associado às soluções de reforço exceda o custo inicial do edifício, ou ainda quando estes se encontram num estado avançado de degradação ou pré-ruína. Ainda assim, os custos associados com operações de demolição, redirecionamento de resíduos e a reconstrução de um novo edifício deverão determi-





nar a viabilidade de cada projeto de reforço sísmico ou reabilitação. Para além disso, outros assuntos legais deverão ser equacionados quando por exemplo, a segurança de um determinado edifício está condicionada pelo estado de conservação dos edifícios adjacentes, tal como acontece nos edifícios dispostos em banda. Reforçar ou reabilitar sísmicamente um edifício em banda de meio sem intervir nos edifícios adjacentes, quando estes não cumprem os requisitos mínimos de segurança sísmica, acaba por se tornar contra-producente (J. Bothara *et al.*, 2011). As seguintes estratégias de reforço têm vindo a ser apontadas por Bothara *et al.* (2011) como as que melhor relação custo-benefício apresentam na melhoria da segurança estrutural e sísmica de edifícios de alvenaria: i) melhorar a integridade global do edifício garantindo um comportamento sísmico em caixa (do inglês “*box-like behaviour*”); ii) melhorar a resistência no plano e fora do plano das paredes resistentes de alvenaria e o comportamento dos diafragmas horizontais e ainda iii) reforço ao nível das fundações, uma estratégia de difícil aplicabilidade e por isso pouco viável na maioria dos casos.

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 (A. Costa *et al.*, 2008; C. Oliveira *et al.*, 1990), de acordo com as recomendações definidas no processo de reconstrução do Faial (E. Carvalho *et al.*, 1998) na sequência dos terremotos dos Açores de 1990 e 1998, têm na sua génese essa preocupação em manter a integridade construtiva e arquitetónica dos edifícios. Neste sentido, são aqui analisadas seis soluções de reforço de grau de intrusividade e custo crescentes, de S_1 a S_6 , agrupadas em três pacotes de reforço acumulativos, de PR_1 a PR_3 , apresentadas na seguinte Tabela 3.

Tabela 3: Soluções de reforço sísmico adoptadas.

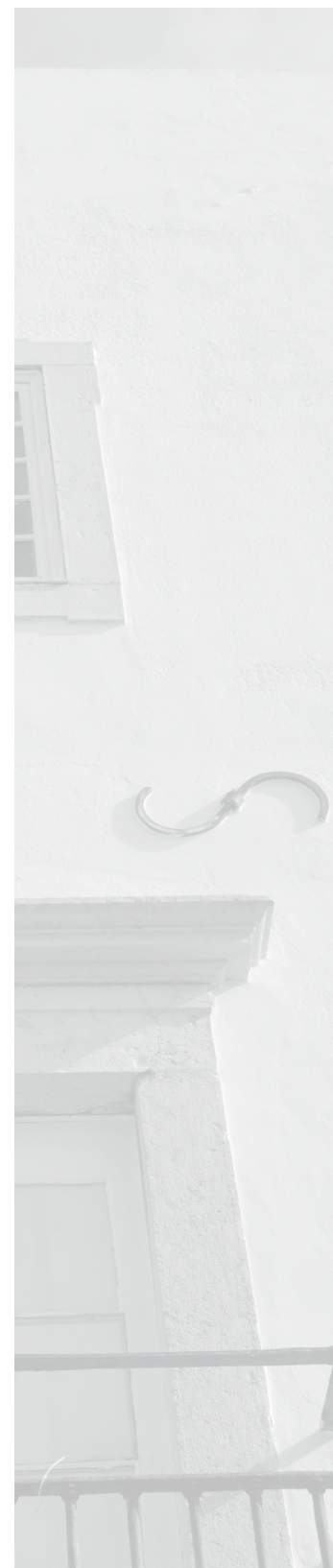
Pacote de reforço, PR	Solução de reforço	Descrição	Custo €/m ²
$PR_1 = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$	S_1	Reforço da ligação entre paredes resistentes com tirantes	35
	S_2	Aumento da rigidez com tarugamento e contra-soalho	
	S_3	Reforço da ligação entre paredes e diafragmas horizontais	
	S_4	Reforço da ligação entre paredes e cobertura com tirantes	
$PR_2 = PR_1 + S_5$	S_5	Reforço da ligação entre paredes e cobertura com cinta de coroamento	100
$PR_3 = PR_2 + S_6$	S_6	Consolidação e reforço das paredes de alvenaria com reboco armado	230

A solução de reforço da ligação entre paredes resistentes através da introdução de tirantes, designada por S_1 , é uma das mais antigas e eficazes soluções de reforço sísmico e também uma das mais utilizadas internacionalmente. Com diâmetros compreendidos normalmente entre os 16 e os 20 mm (J. Bothara *et al.*, 2011), estes tirantes de aço são aplica-

dos horizontalmente ao nível dos pavimentos (no caso da solução S_1), ou ainda ao nível da cobertura (solução S_4), dispostos com um espaçamento variável em função do vão e da tipologia da parede resistente e devidamente ancorados, tal como ilustrado na Figura 2 (a), adaptada de Carvalho *et al.* (1998) e D' Ayala e Speranza (2002).

Esta solução é duplamente vantajosa pois, para além de permitir aumentar a rigidez dos diafragmas horizontais, por natureza extremamente flexíveis, reforça ainda a ligação entre as paredes fachada e as paredes de frontal. Por outro lado, a predominância de diafragmas flexíveis, comprovada pela equipa durante o trabalho de campo, aliada ao avançado estado de degradação global ou parcial dos mesmos (nomeadamente ao nível das ligações e apoios), torna de certa forma imperativa a consideração de uma solução de reforço sísmico e estrutural a este nível, representada pela solução S_2 . Esta solução, ilustrada na Figura 2 (b), incluiu a

substituição total ou parcial de todos os elementos de madeira deteriorados e ainda duas medidas para o aumento de rigidez: a instalação de tarugos de madeira de 75 mm dispostos na diagonal entre as vigas de madeira do pavimento, com ancoragem realizada através de varões roscados de 10 mm e chapas quinadas de 3 mm de espessura e a instalação de contra-soalho, disposto perpendicularmente e devidamente pregado/ligado ao soalho existente. Ainda no que diz respeito às soluções integrantes do pacote de reforço PR1, o reforço da ligação entre as paredes resistentes e os diafragmas horizontais (S_3) foi idealizado pela introdução de chapas quinadas de 3 mm devidamente ancoradas às paredes por meio de varões roscados, tal como ilustrado na Figura 2 (c). Finalmente a solução de reforço S_4 , respeitante ao reforço da ligação entre as paredes e a cobertura, compreende o uso da mesma técnica da solução S_1 , com a aplicação de tirantes realizada desta vez ao nível da cobertura.



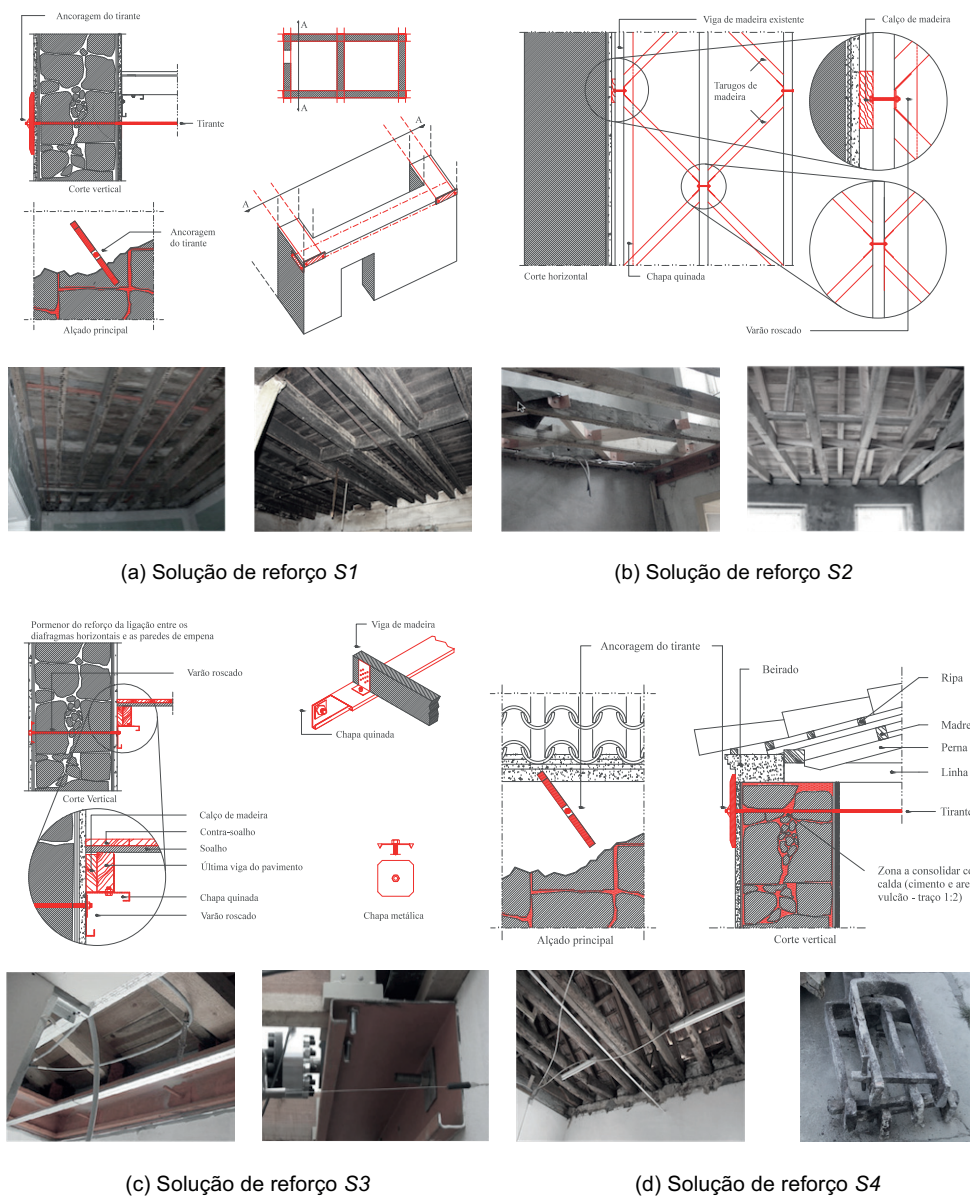


Figura 2: Pormenores das soluções de reforço implementadas no pacote PR1.

O pacote de reforço *PR2*, tal como foi referido atrás, para além de envolver a aplicação das soluções reforço anteriores respeitantes ao pacote *PR1*, pressupõe ainda a introdução de vigas cintas (perimetrais) em betão armado no coroamento das paredes resistentes de alvenaria (*S5*), vigas essas realiza-

das com $4\phi 10$ mm (armadura longitudinal) e $\phi 6//.20$ mm (estribos), reforçando assim o referido *box-like behaviour* dos edifícios e ainda a ligação entre essas paredes e a estrutura da cobertura (ver Figura 3).



Figura 3: Pormenores das soluções de reforço *S5* implementadas no pacote *PR2*.

Por último, o pacote de reforço *PR3*, compreende a aplicação de todas as seis soluções de reforço consideradas, diferenciando-se do pacote *PR2*, apenas pela introdução da

solução *S6*, relativa à consolidação e reforço das paredes de alvenaria com reboco armado (ver Figura 4), de acordo com as especificações avançadas por Costa (2002).



Figura 4: Pormenores das soluções de reforço *S6* implementadas no pacote *PR3*.





2.3 O Reflexo de Cada Solução de Reforço na Metodologia do I_v

No seguimento da secção anterior, aqui serão tecidas algumas considerações sobre a influência efetiva que as 6 soluções de reforço consideradas 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 4, 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 P_1 , P_2 , P_3 , P_{11} , P_{12} e P_{13} . É importante notar uma vez mais que estas soluções foram implementadas de forma cumulativa, de S_1 até S_6 . Assim, todas as soluções de reforço, exceção feita para S_4 e S_6 , 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 terramoto 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 S_4 foi implementada na metodologia melhorando em apenas uma classe a classe de vulnerabilidade do parâmetro P_{12} , originalmente atribuída para a condição original SR do edificado.

Tabela 4: Influência de cada solução de reforço sobre o índice de vulnerabilidade, I_v^* .

Solução de reforço	Descrição	Parâmetro	Classe C_{vi}
S_1	Reforço da ligação entre paredes resistentes com tirantes	P_1	B
S_2	Aumento da rigidez com tarugamento e contra-soalho	P_{11}	A
S_3	Reforço da ligação entre paredes e diafragmas horizontais	P_1	A
S_4	Reforço da ligação entre paredes e cobertura com tirantes	P_{12}	+1
S_5	Reforço da ligação entre paredes e cobertura com cintas de coroamento	P_{12}	A
S_6	Consolidação e reforço das paredes de alvenaria com reboco armado	P_2 P_3 P_{13}	A T_0 A

Já a implementação da solução de reforço S_6 , que influiu diretamente sobre o parâmetro P_3 , requer maior atenção. Em primeiro lugar convém realçar que em ambiente urbano, exemplo do presente caso de estudo, a tipologia de alvenaria de pedra observada na maioria dos edifícios, difere bastante daquela encontrada em ambiente rural, nomeadamente no que diz respeito à qualidade e tipologia construtiva da alvenaria, propriedades mecânicas da pedra, qualidade de embricamento e das juntas, por exemplo.

Tal como demonstrado na Tabela 5, para a avaliação do parâmetro P_3 dos edifícios do núcleo urbano antigo da cidade da Horta, foram consideradas duas tipologias distintas de alvenaria de pedra, baseadas na correspondência entre as tipologias de alvenaria definidas pela Norma Italiana NTC (2008) e a classificação tipológica definida por Costa (2002) para os edifícios em ambiente rural e urbano.

Assim, a solução de reforço S6 teve reflexo não só ao nível da atribuição de uma classe de vulnerabilidade A para os parâmetros P_2 e P_{13} , mas também na melhoria do valor da resistência ao corte da alvenaria τ_0 , valor estimado de acordo com a Norma Italiana NTC (2008) e necessário no cálculo da resistência convencional (P_3).

Tabela 5: Correspondência entre a classificação tipológica de Costa (2002) e da Norma Italiana NTC (2008).

Tipos de alvenaria	Tipo A	Tipo B
Classificação tipológica por Costa (2002)	Alvenaria de boa qualidade, formada por pedras de dimensões regulares	Alvenaria de pedras irregulares, com pequenos fragmentos de pedra
Classificação tipológica da Norma Italiana NTC (2008)	<i>Muratura a blocchi lapidei squadrati</i>	<i>Muratura in pietrame disordinata</i>
τ_0^* (condição original SR) [kPa]	90	110
τ_0^* (pacote de reforço PR3) [kPa]	40	90

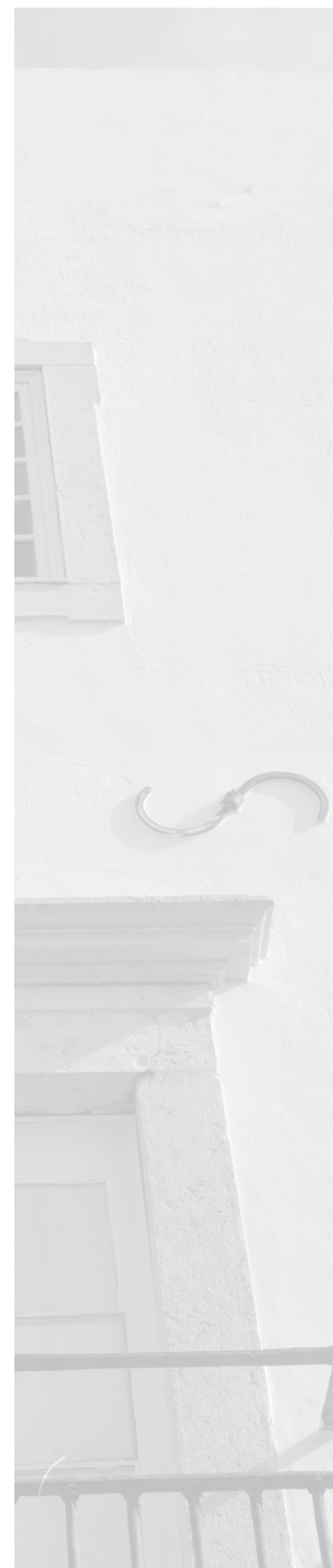
3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

3.1. Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica

Os resultados obtidos para os valores do índice de vulnerabilidade sísmica do edificado urbano na condição original SR, apresentados na Figura 6 (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. Esta baixa vulnerabilidade generalizada deve-se principalmente à geometria e

alinhamentos favoráveis da maioria do edificado avaliado, onde os parâmetros P_4 , P_6 , P_7 , P_9 e P_{10} se apresentam como os mais influentes, tal como demonstrado pela Figura 5 (a).

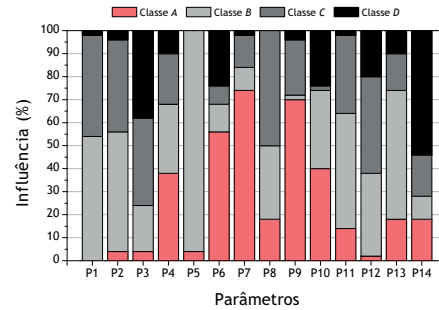
Nesta secção serão apresentados e discutidos os mais relevantes outputs que permitirão estabelecer a comparação a vários níveis entre os três pacotes de reforço estudados. Assim, a primeira análise, apresentada na Figura 5, é feita para avaliar a influência que cada classe de vulnerabilidade C_{vi} tem em cada parâmetro, isto para cada uma das condições estudadas (SR , PR_1 , PR_2 e PR_3), permitindo compre-



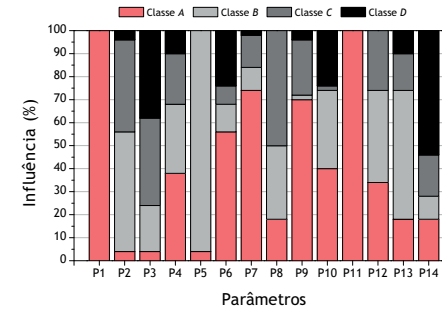
ender o impacto gradual e efetivo que cada pacote de reforço teve no cálculo do índice de vulnerabilidade sísmica, $I_{v_{global}}$.

A aplicação da metodologia considerando o pacote de reforço RP1 conduziu a uma redução do valor médio do índice global de vulnerabilidade sísmica, $I_{v_{OA}}$, em cerca de

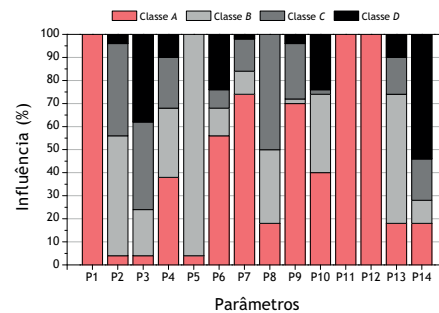
18.9%. Subsequentemente, com a introdução do pacote de reforço RP2, e uma vez mais quando comparada com a situação não reforçada (SR), esta redução subiu ligeiramente para uma percentagem em torno dos 23.1%. Finalmente, considerando o pacote de reforço RP3 (o qual inclui os pacotes de reforço anteriores PR1 e PR2), o valor médio do índice de vulnerabilidade sísmica foi reduzido em 51.7%.



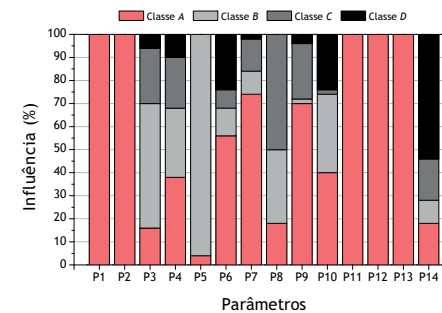
(a) Condição original SR



(b) Pacote de reforço PR1



(c) Pacote de reforço PR2



(d) Pacote de reforço PR3

Figura 5: Influência global de cada classe de vulnerabilidade sobre, $I_{v_{global}}$.

A Figura 6 apresenta o mapeamento da vulnerabilidade sísmica dos edifícios em situação não reforçada (SR), enquanto a Figura 7 apresenta o mesmo mapeamento, desta feita tendo em conta a inclusão de todas as soluções de reforço analisadas (correspondente ao pacote PR3). Os resultados obtidos em termos do índice vulnerabilidade sísmica encontram-se compilados na Tabela 6. Na mesma tabela apresentam-se ainda as reduções em termos percen-

tuais obtidas com a aplicação de cada um dos pacotes de reforço, sempre em relação à condição original do edifício não reforçado (SR).

Tabela 6: Valores de índice de vulnerabilidade e respetivas reduções em termos percentuais.

Condição do edifício	Avaliação detalhada		Avaliação global		Redução (%)
	\bar{I}_v	σ_{I_v}	$\bar{I}_{v_{global}}$	$\sigma_{I_{v_{global}}}$	
SR	26.32	9.73	26.55	5.45	-
PR1	21.30	7.64	21.52	4.52	18.9
PR2	20.19	7.18	20.41	4.32	23.1
PR3	12.61	4.72	12.84	3.34	51.7



Figura 6: Mapeamento do índice de vulnerabilidade, I_v , considerado: (a) a situação original SR e (b) a aplicação do pacote de reforço PR3.



3.2. Cenários de Dano e Estimativa de Perdas

Tal como discutido anteriormente, a avaliação de perdas desempenha um papel fundamental na implementação de medidas de gestão e planeamento urbano e de reforço do edificado, permitindo o confronto entre os custos associados à implementação dessas medidas e o seu retorno em termos financeiros e humanos (D. D'Ayala et al., 1997). Assim, esta secção apresenta os resultados de perdas estimadas para diferentes cenários de dano calculados para diferentes intensidades macrossísmicas, IEMS-98. De acordo com Nunes et al. (2008), durante a segunda metade do século XX as intensidades macrossísmicas máximas registadas no arquipélago dos Açores variaram entre IEMS-98=VII e VIII, para os sismos de 1952 (São Miguel), 1964 (São Jorge), 1973 (Pico) e 1988 (São Miguel), tendo sido ainda registada uma intensidade máxima de IX durante as crises sísmicas de 1958, 1980 e 1998. De entre os vários métodos descritos na literatura para estimar perdas em função da probabilidade de ocorrência de um certo grau de dano, optou-se neste trabalho pela construção de cenários de dano baseados em distribuições probabilísticas globais, através dos valores obtidos para o índice de vulnerabilidade sísmica, I_v , para as diferentes condições aqui analisadas (SR,

PR1, PR2 e PR3). Os modelos de distribuição de dano dependem inevitavelmente dos graus de dano físico, compreendendo ainda a definição das correlações entre a probabilidade de excedência de um certo nível de dano e a probabilidade da ocorrência de um determinado fenómeno de perda (por exemplo a probabilidade de colapso ou de inutilização de um edifício devido à falta de condições de segurança estrutural, a probabilidade de ocorrência de mortos ou feridos graves, etc.). Desta forma, e com base nos outputs obtidos para a avaliação da vulnerabilidade sísmica do edificado é possível estimar graus de dano médio, μ_D , para diferentes intensidades macrossísmicas. Para isso, Bernardini *et al.* (2007) propôs uma expressão analítica, apresentada na Equação 4, que corelaciona a intensidade macrossísmica com o grau de dano médio ($0 < \mu_D <$) em função da vulnerabilidade sísmica:

$$\mu_D = 2.5 \times \left[1 + \tanh\left(\frac{I + 6.25 \times V - 13.1}{Q}\right) \right]; \quad 0 \leq \mu_D \leq 5 \quad (4)$$

onde I representa a intensidade macrossísmica de acordo com a Escala Macrossísmica Europeia (EMS-98), V é o índice de vulnerabilidade utilizada na metodologia macrossísmica e que de relaciona com o valor do índice de vulnera-

bilidade sísmica, I_v , através da Equação 5 em baixo, e Q é um fator de ductilidade que tem em conta a ductilidade da tipologia construtiva em análise (variável entre 1 e 4). Seguindo o que é recomendado por Vicente *et al.* (2011) e Ferreira *et al.* (2013), foi adotado aqui um valor de Q igual a 3.0.

$$V = 0.592 + 0.0057 \times I_v \quad (5)$$

A Figura 7 (a) apresenta as curvas de vulnerabilidade obtidas a partir do valor médio do índice global de vulnera-

bilidade sísmica, $I_{v_{global}}$ considerando cada uma das condições do edificado analisadas, e para intensidades macro sísmicas entre V e XII. Adicionalmente, a Figura 7 (b) e (c) apresenta dois exemplos de distribuições de grau de dano médio obtidas através da distribuição probabilística beta para intensidades macro sísmicas $I_{EMS-98}=IX$ e $I_{EMS-98}=X$, a qual corresponde à máxima intensidade histórica registada na cidade da Horta (J. Nunes, 2008). Importa referir ainda que a variância da distribuição beta foi definida com base nos seguintes parâmetros: $t=8$, $a=0$ e $b=5$.

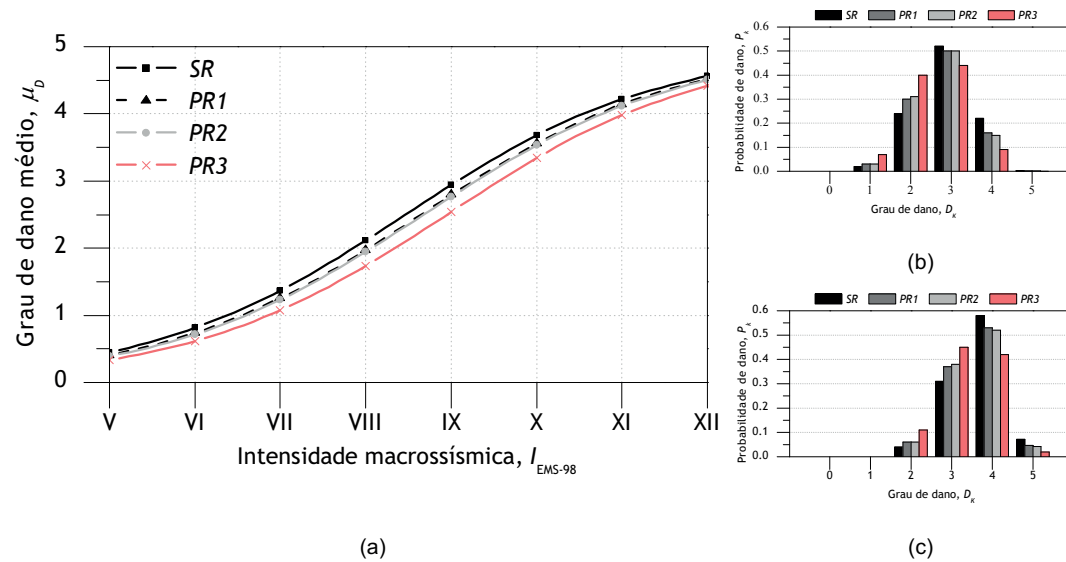
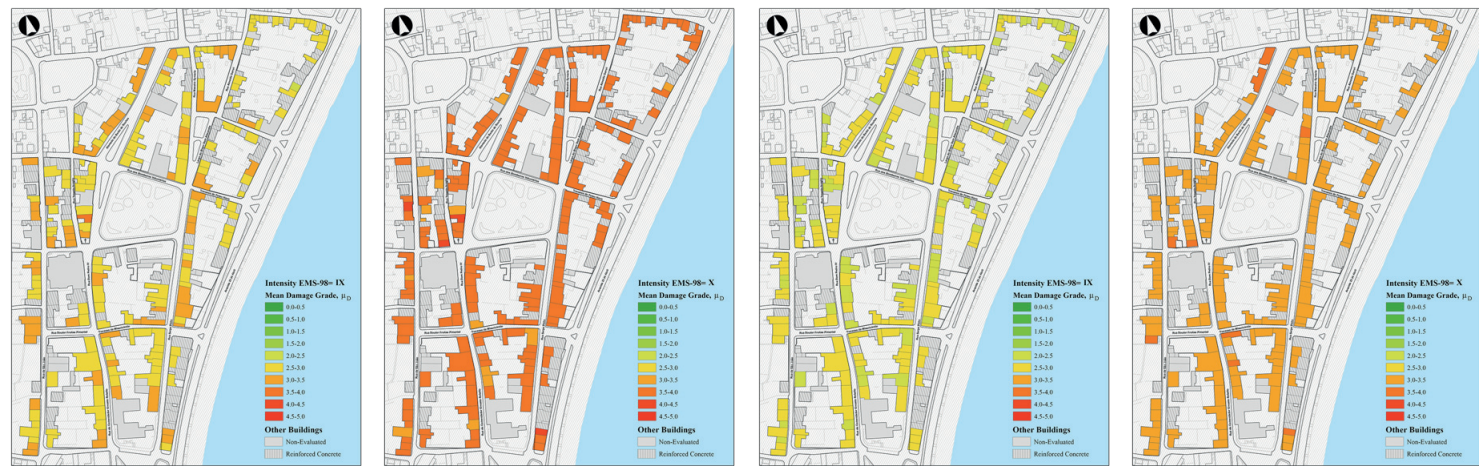


Figura 7: Curvas de vulnerabilidade obtidas para cada uma das condições analisadas (a) e correspondentes distribuições probabilísticas de dano, P_k , obtidas para cada grau de dano, D_k , para valores de intensidade macro sísmica de $I_{EMS-98}=IX$ (b) e $I_{EMS-98}=X$ (c).



Tal como foi já mencionado, a utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possibilita a representação espacial das distribuições globais de dano para o edificado em análise, permitindo a identificação das áreas e dos edifícios mais vulneráveis, o que, para fins de gestão urbana e de

definição de estratégias de ação e planeamento, representa uma mais-valia importante. A Figura 8 (a) e (b) apresenta os cenários de dano obtidos para eventos sísmicos de intensidades $I_{EMS-98}=IX$ e $I_{EMS-98}=X$, para as condições SR e PR_3 , respetivamente.



(a) Distribuições de dano considerando a condição SR , obtidas para intensidades $I_{EMS-98}=IX$ e $I_{EMS-98}=X$

(b) Distribuições de dano considerando a condição PR_3 , obtidas para intensidades $I_{EMS-98}=IX$ e $I_{EMS-98}=X$

Figura 8: Mapeamento do grau de dano médio, μ_D , para a condição: (a) SR e (b) após a aplicação do PR_3 .

Globalmente, os danos estimados para os edifícios sem reforço (SR) variaram entre 2.49 e 3.69 e entre 3.30 e 4.23 para cenários sísmicos correspondentes às intensidades $I_{EMS-98}=IX$ e $I_{EMS-98}=X$, respetivamente. Como pode ser observado na Fig. 8 (b), com a aplicação do pacote de reforço RP_3 , os valores obtidos em termos de grau de dano médio reduziram substancialmente, para valores a variar entre 2.30 e 2.88 e entre 3.12 e 3.63 (mínimo e máximo)

para intensidades macro sísmicas de $I_{EMS-98}=IX$ e $I_{EMS-98}=X$, respetivamente.

Tendo por base estes resultados, é pertinente notar que alguns autores (L. Pagnini et al., 2011; R. Vicente et al., 2011; T. Ferreira et al., 2013) referem que edifícios com valores de índice de vulnerabilidade igual ou superior a 45, isto é, edifícios para os quais é expectável a ocorrência de danos severos ($3 \leq \mu_D \leq 4$) e de fenómenos de colapso localizado (μ_D

> 4), devem ser sujeitos a uma reavaliação com recurso a uma metodologia de análise mais detalhada. O modelo de estimativa de dano utilizado neste trabalho é baseado em graus de dano que relacionam a probabilidade de excedência de um certo nível de dano e a probabilidade de colapso e perda de funcionalidade. Apoiados em observação de dano, a abordagem aqui aplicada foi proposta pelo *Servizio Sismico Nazionale (SSN)* com base nos trabalhos de Bramerini *et al.* (1995). Esta metodologia envolve a análise de informação associada à probabilidade de inutilização dos edifícios para ações sísmica de intensidade baixa e moderada.

Tal como destacado por Maio *et al.* (2015a), apesar deste tipo de ações produzirem baixos níveis de dano estrutural e não-estrutural, valores de dano médio mais elevados encontram-se normalmente associados a probabilidades de colapso, também elas, mais elevadas. Assim, a probabilidade de um certo nível de dano ser excedido é utilizada na estimativa de dano afetada por um fator multiplicador variável entre 0 e 1. Em Itália, o vasto conjunto de informação analisada e tratada por Bramerini *et al.* (1995) permitiu

a aferição dos valores associados a estes fatores e a construção das respectivas expressões analíticas de estimativa de perdas. Neste caso, as expressões da Equação 6 e Equação 7 foram utilizadas, respetivamente, na determinação da probabilidade de colapso e de inutilização dos edifícios.

$$P_{\text{colapso}} = P(D_5)$$
$$P_{\text{inutilização do edifício}} = P(D_3) \times W_{ei,3} + P(D_4) \times W_{ei,4} \quad (7)$$

onde $P(D_i)$ é a probabilidade de ocorrência de um certo grau de dano (de D_1 a D_5) e $W_{ei,j}$ são fatores multiplicadores que indicam a percentagem de edifícios associados ao grau de dano, D_i , que sofreram colapso ou, não tendo sofrido colapso, são considerados inutilizáveis. Seguindo o trabalho de Maio *et al.* (2015a), estes fatores multiplicados foram aqui assumidos como $W_{ei,3} = 0.4$ e $W_{ei,4} = 0.6$. Na Figura 9 apresentam-se as curvas de probabilidade de colapso e de inutilização dos edifícios para as quatro condições estudadas (SR , $PR1$, $PR2$ e $PR3$). Adicionalmente, na Tabela VII sumarizam-se os resultados globais obtidos em termos para estas mesmas condições, considerando intensidades macrossísmicas variáveis entre $I_{EMS-98}=VIII$ to $I_{EMS-98}=XII$.



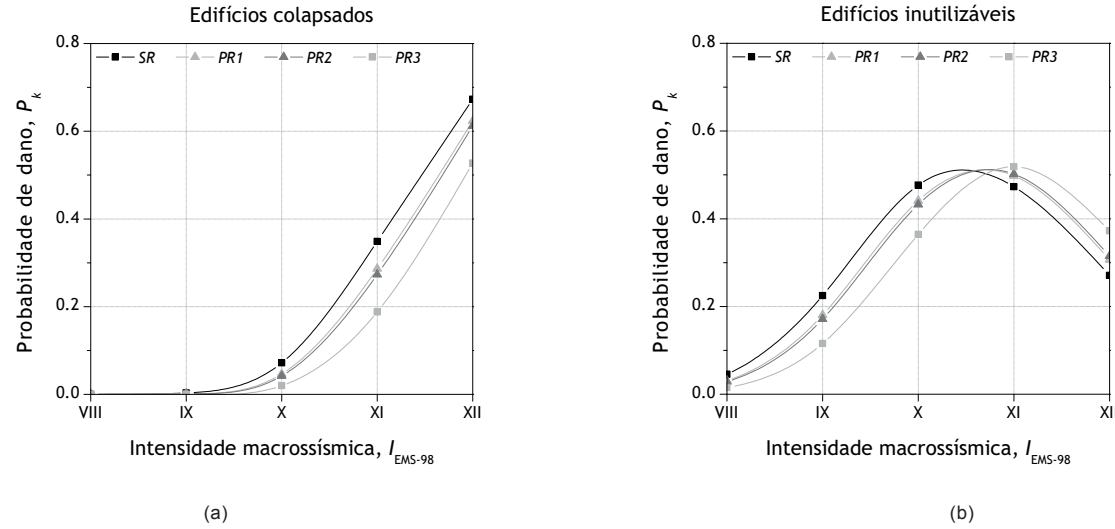


Figura 9: Curvas de probabilidade de colapso (a) e de inutilização de edifícios (b) para as diferentes condições de reforço.

Tabela 7: Estimativa do número de edifícios colapsados e inutilizáveis, para um total de 192 edifícios avaliados.

Intensidade I _{EMS-98}	Edifícios colapsados				Edifícios inutilizáveis			
	SR	PR1	PR2	PR3	SR	PR1	PR2	PR3
VIII	0	0	0	0	9 (4.5%)	6 (3.1%)	5 (2.8%)	3 (1.5%)
IX	1 (0.3%)	0	0	0	43 (22.4%)	35 (18.1%)	33 (17.1%)	22 (11.5%)
X	14 (7.2%)	9 (4.7%)	8 (4.2%)	4 (2.0%)	92 (47.7%)	85 (44.1%)	83 (43.2%)	70 (36.4%)
XI	67 (34.9%)	55 (28.6%)	52 (27.3%)	36 (18.8%)	91 (47.3%)	96 (49.8%)	96 (50.2%)	100 (51.8%)
XII	129 (67.3%)	120 (62.4%)	118 (61.2%)	101 (52.7%)	52 (27.1%)	59 (30.7%)	60 (31.5%)	72 (37.3%)

Tal como no caso anterior, a proposta apresentada pelo Servizio Sismico Nazionale (SSN) foi aqui utilizada para estimar a probabilidade da ocorrência de mortos, feridos graves e desalojados. No que respeita à probabilidade de mortos e feridos graves, esta foi definida como sendo igual a 30% do número total dos ocupantes de edifícios colapsados e inutilizáveis. No caso dos sobreviventes (os restantes 70%),

assume-se que é necessário providenciar abrigos temporários para o seu realojamento. As taxas de mortos e feridos graves e de desalojados podem ser determinadas, respetivamente, com recurso às seguintes expressões:

$$P_{\text{mortos e feridos graves}} = 0.3 \times P(D_5) \quad (8)$$

$$P_{\text{desalojados}} = P(D_3) \times W_{ei,3} + P(D_4) \times W_{ei,4} + 0.7 \times P(D_5) \quad (9)$$

Seguindo o mesmo esquema de apresentação, a Figura 10 apresenta a probabilidade de mortos e feridos graves e de desalojados obtidos para cada uma das condições de reforço analisadas (SR a PR3) e para as mesma intensidades macrossísmicas, entre $I_{EMS-98}=VIII$ e $I_{EMS-98}=XII$. Adicionalmente, as frequências globais calculadas a partir destes dois outputs probabilísticos encontram-se compiladas na Tabela

8. A propósito das frequências apresentados na Tabela 8 importa salientar a redução significativa do número de desalojados em resultado da aplicação das medidas de reforço analisadas. A título de exemplo, refira-se o decréscimo de 15% no número de desalojados (de 841 para 603, num total de 1596 habitantes), para uma intensidade de $I_{EMS-98}=X$.

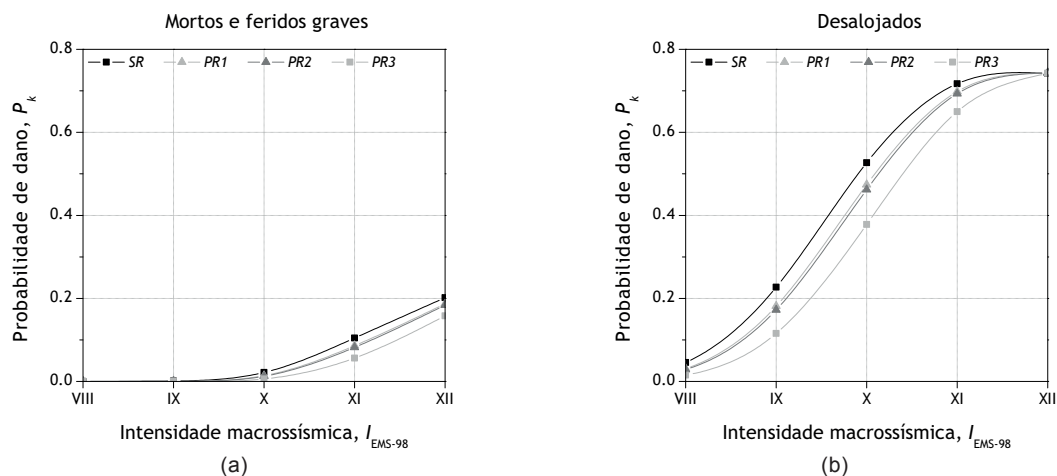


Figura 10: Curvas de probabilidade de mortos e feridos graves (a) e de desalojados (b) para as diferentes condições de reforço analisadas.

Tabela 8: Estimativa do número de mortos e feridos e de desalojados, para um total de 1596 habitantes.

Intensidade I_{EMS-98}	Mortos e feridos graves				Desalojados			
	SR	PR1	PR2	PR3	SR	PR1	PR2	PR3
VIII	0	0	0	0	73 (4.5%)	49 (3.1%)	45 (2.8%)	24 (1.5%)
IX	2 (0.1%)	1 (0.1%)	1 (0.1%)	0	363 (22.7%)	290 (18.2%)	275 (17.2%)	185 (11.6%)
X	34 (2.2%)	22 (1.4%)	20 (1.3%)	9 (0.6%)	841 (52.7%)	756 (47.4%)	737 (46.2%)	603 (37.8%)
XI	167 (10.5%)	137 (8.6%)	131 (8.2%)	90 (5.6%)	1144 (71.7%)	1114 (69.8%)	1106 (69.3%)	1037 (65.0%)
XII	322 (20.2%)	299 (18.7%)	293 (18.4%)	253 (15.8%)	1184 (74.2%)	1186 (74.3%)	1187 (74.4%)	1184 (74.2%)



Como comentário final, importa salientar o facto de que estes resultados demonstram a importância de uma preparação logística eficiente por parte das autoridades competentes, nomeadamente no realojamento de um potencial número elevado de habitantes (ver Tabela 8).

3.3. Perdas Económicas

Nesta secção, o desempenho de cada uma das ações de reforço consideradas neste trabalho é analisada, não apenas do ponto de vista do seu efeito na redução da vulnerabilidade sísmica do edifício, mas também do ponto de vista da sua viabilidade económica. Segundo Benedetti e Petrini (1984), o grau de dano médio, discutido na secção anterior, pode ser interpretado quer economicamente, quer em termos de um índice económico traduzido no rácio entre o custo de reparação e o custo de reposição (isto é, o valor do edifício). A correlação entre o grau de dano médio e estes dois custos foi proposta por Dolce *et al.* (2006) com base na análise de informação de dano pós-sismo recolhida com recurso à metodologia GNDT-SSN (1994), após os sismos de Umbria-Marche (1997) e de Pollino (1998). Tirando partido da quantidade extensiva de informação recolhida e analisada, estes autores obtiveram valores estatísticos baseados na estimativa do custo associado a ações de reparação

padrão aplicadas a um universo de mais de 50000 edifícios. Assim, e de acordo com Vicente *et al.* (2010), a probabilidade associada ao custo de reparação para um determinado evento sísmico caracterizado por uma intensidade I , $P[R|I]$, pode ser obtido através do produto entre a probabilidade condicionada do custo de reparação para cada nível de dano, $P[R|D_k]$, e a probabilidade condicionada da condição de dano para cada edifício sujeito a uma determinada intensidade sísmica, $P[D_k|I_v, I]$:

$$P[R|I] = \sum_{D_k=1}^5 \sum_{I_v=0}^{100} P[R|D_k] \times P[D_k|I_v, I] \quad (10)$$

Para estimar os custos de reposição associados às diferentes condições de reforço, foi adotado um valor médio de 700€/m² para o edificado antigo no centro histórico da cidade da Horta, valor que se encontra em linha com o estimado por Dolce *et al.* (2006) a partir do processo de reconstrução conduzido após o terramoto de Irpinia de 1980. De forma a entrar em linha de conta com o valor patrimonial do edificado, e uma vez que a adoção de técnicas e materiais tradicionais podem aumentar ligeiramente os custos associados ao processo, o valor médio considerado para os edifícios na situação SR foi corrigido para

1000€/m². Vale a pena notar que este valor foi já sugerido no passado por Vicente et al. (2011) para a cidade portuguesa de Coimbra.

Com base neste valores probabilísticos é então possível estimar o custo global de reposição do edificado contido na área em estudo (192 edifícios) e obter o balanço económico calculado para cada uma dos três pacotes de reforço sísmico considerados em relação à situação inicial SR. Este resultado encontra-se ilustrado na Figura 11 para intensidades macrossísmicas entre $I_{EMS-98}=V$ e XII, encontrando-se ainda sistematizado na Tabela 9 sob a forma de valores poupança global associados a este balance económico.

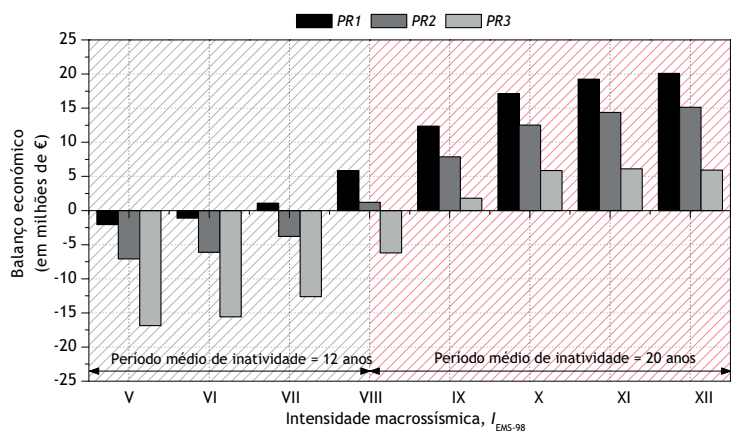


Figura 11: Balanço económico obtido para as três condições de reforço consideradas em relação à condição inicial SR.

Adicionalmente, os períodos médios de inatividade sísmica referidos por Nunes (2008) para o Arquipélago dos Açores

(isto é, a quantidade média de tempo entre dois terremotos de intensidades de $V < I_{EMS-98} < VIII$ e $I_{EMS-98} \geq VIII$), foram ainda incluídos na Figura 11 com o objetivo de facilitar a interpretação e a análise dos resultados que aqui se discutem.

Da análise da Figura 12 é fácil concluir que os três pacotes de reforço analisados provaram ser viáveis economicamente para intensidades macrossísmicas iguais ou superiores a IX. Apesar desta facto, para as intensidades $I_{EMS-98}=VII$ e VII, as quais se encontram já dentro do período médio de inatividade de 12 anos, foram obtidas poupanças globais da ordem dos 1.08 e 5.85 milhões de euros (M€) com a aplicação dos pacotes de reforço PR1 e PR2, respetivamente (ver Tabela 9).

Como seria espectável, as poupanças globais obtidas são mais expressivas para intensidades mais elevadas, uma vez que o nível relativo de dano sofrido pelos edifícios é mais importante para essas intensidades, o que leva a que, do ponto de vista estritamente económico, o pacote de reforço PR1 tenha sido o mais eficiente em termos económicos, com poupanças globais da ordem dos 20 M€. No entanto, é importante sublinhar que estes resultados devem ser analisados e interpretados lado a lado com os resultados de dano e de perdas apresentados na secção anterior, uma vez que, apesar dos pacotes PR2 e PR3, para determinadas intensidades, serem menos interessantes do ponto de vista económi-



co, a sua aplicação conduz a um decréscimo significativo em termos de perdas humanas. Dê-se como exemplo o pacote *PR2*, com um custo estimado de 100€/m², isto é, cerca de 14% do valor médio do custo de reposição, e que conduz a uma redução de cerca de 0.9%, 6.5%, 3.0% e 4.5% em termos de mortos e feridos graves, desalojados, edifícios colapsados e edifícios inutilizáveis, para uma intensidade $I_{EMS-98}=X$. Replicando o exercício para o pacote de reforço *PR3*, com um custo estimado de cerca de 33% do custo médio de reposição, é possível obter uma redução da ordem dos 51.7% em termos do valor global do índice de vulnerabilidade sísmica, o que, em termos de estimativa de danos para uma intensidade $I_{EMS-98} = X$, corresponde a uma redução de 1.6%, 14.9%, 5.0% e 11.5% em termos de rácios de mortos e feridos, desalojados, edifícios colapsados e edifícios inutilizáveis.

Tabela 9: Poupanças globais obtidas através de cada um dos pacotes de reforço analisados PRi (milhões de €).

Pacote de reforço	Intensidade macrosísmica, I_{EMS-98}							
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<i>PR1</i>	-	-	1.08 M€	5.85 M€	12.24 M€	17.15 M€	19.23 M€	20.10 M€
<i>PR2</i>	-	-	-	1.20 M€	7.89 M€	12.53 M€	14.39 M€	15.13 M€
<i>PR3</i>	-	-	-	-	1.80 M€	5.86 M€	6.12 M€	5.91 M€

Finalmente, note-se que ao longo do processo de reconstrução e reforço do edificado da ilha do Faial atingido pelo terramoto de intensidade VIII que abalou o Arquipélago dos Açores em 1998, foi gasto um total de 330 milhões de

euros, valor que representa aproximadamente 1/6 do Produto Interno Bruto da Região Autónoma dos Açores. Assim, é fácil perceber que caso alguma destas ações de reforço tivesse sido estudada e implementada antes do terramoto, os custos associados à sua implementação seriam praticamente desprezáveis quando comparados com o valor total despendido no referido processo de reconstrução, tendo sido ainda possível reduzir drasticamente as perdas materiais e humanas associadas ao evento.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

As conclusões e recomendações mais gerais que se retiram do trabalho desenvolvido vão ao encontro da necessidade de melhorar a perceção 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.

Tal como esperado, os resultados obtidos em termos de perdas e danos para o núcleo urbano antigo da cidade da Horta não resultaram tão gravosos como em outros casos de estudo anteriores (caso do Bairro Ribeirinho de Faro), isto porque o índice de vulnerabilidade médio do edificado apresenta uma grande influência sobre as formulações aqui utilizadas para tais estimativas. 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 vulnerabili-

dade 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. Alguns autores defendem que esta técnica, apesar de bastante comum no edificado da Horta, poderá favorecer o desenvolvimento de mecanismos de colapso nas paredes resistentes quando sujeitas a uma excitação sísmica, devido a um importante aumento de massa e rigidez, localizado no topo das paredes, podendo 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.

Finalmente, no que diz respeito às perdas económicas, é importante sublinhar que os três pacotes de reforço considerados neste estudo apresentaram uma boa relação custo-benefício para as intensidades macrossísmicas mais elevadas ($I_{EMS-98} = IX$ a XII), permitindo atingir poupanças globais na ordem dos 20 M€. Por outro lado, para intensidades moderadas ($I_{EMS-98} = VII$ a $VIII$), foram estimadas poupanças ainda assim muito interessantes de 5.85 e 1.20 M€ com a aplicação dos pacotes de reforço *PR1* e *PR2*, respetivamente.



5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, H. M. Castro (2011) Caracterização de Edifícios Antigos, Edifícios “Gaioleiros.” Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Arshad, Shahnaz e Athar, Sohaib (2013) Rural Housing Reconstruction Program Post-2005 Earthquake - Learning from the Pakistan Experience - A Manual for Post-Disaster Housing Program Managers. The World Bank Group, pp 116.

Arya, A. Swarup (2000) Non-Engineered Construction in Developing Countries – An approach toward earthquake risk reduction. In 12th World Conf. Earthq. Eng. Auckland, New Zealand, pp 1–22.

Astroza, Maximiliano; Ruiz, Sergio e Astroza, Rodrigo (2012) Damage Assessment and Seismic Intensity Analysis of the 2010 (Mw 8.8) Maule Earthquake. *Earthq Spectra* 28:S145–S164.

Barata M. R. (2005) The Lisbon earthquake of 1st November 1755 — A historical perspectives approach. In Int. Conf. 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake. 1-4 November, Lisbon, Portugal, pp 31-41.

Benedetti, Duilio e Petrini, Vincenzo (1984) Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: un metodo di valutazione. A method for evaluating the seismic vulnerability of masonry buildings. *L'industria delle Costruzioni*, pp 66–74.

Bernardini, Alberto; Giovinnazzi, Sonia; Lagomarsino, Sergio e Parodi, Sonia (2007) Vulnerabilità e previsione di danno a scala

territoriale secondo una metodologia macrosismica coerente con la scala EMS-98. In 12th Conf. Ital. Natl. Assoc. Earthq. Eng. – ANIDIS. 10-14 Giugno, Pisa, Italia.

Bothara, Jithendra e Brzev, Svetlana (2011) A TUTORIAL: Improving the Seismic Performance of Stone Masonry Buildings, 1st ed. EERI, Oakland, California, USA. ISBN: 9781932884487.

Bramerini, Fabrizio; Di Pasquale, Giacomo; Orisini, A. ; Pugliese, A. ; Romeo, R. e Sabetta, Fabio (1995) Rischio sismico del territorio Italiano: proposta per una metodologia e risultati preliminary, Technical report SSN/RT/95/01. Servizio Sismico Nazionale. Roma, Italia.

Calvi, G. Michele; Pinho, Rui; Magenes, Guido; Bommer, Julian J.; Restrepo-Vélez, L. Fernando and Crowley, Helen (2006) Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 472, Vol. 43, No. 3, September 2006, pp. 75-104.

Carreño, Martha-Liliana; Cardona, O. Darío e Barbat, Alex (2007) Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach. *Nat Hazards* 40:137–172. doi:10.1007/s11069-006-0008-8

Carvalho, E. Cansado; Oliveira, C. Sousa; Fragoso, Mário e Miranda, Vidália (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 REL.* 100/98.

Coaffee, Jon (2008) Risk, resilience, and environmentally sustainable cities. *Energy Policy* 36:4633–4638.

doi:10.1016/j.enpol.2008.09.048.

Costa, Aníbal (2002) Determination of mechanical properties of traditional masonry walls in dwellings of Faial Island, Azores. *Earthq Eng Struct Dyn* 31:1361–1382. doi:10.1002/eqe.167.

Costa, Aníbal; Oliveira, C. Sousa e Neves, Filipe (2008) Reinforcing techniques more commonly used in Faial reconstruction. *Sismo 1998 – Açores. Uma década depois*, 1st ed. pp 531–555

Costa, A. Aníbal; Arêde, António; Costa, Aníbal; Guedes, João e Silva, Bruno (2012) Experimental testing, numerical modelling and seismic strengthening of traditional stone masonry: comprehensive study of a real Azorian pier. *Bull Earthq Eng* 10:135–159. doi:10.1007/s10518-010-9209-3.

Cunha, Sérgio (2013) Técnicas de Reforço em Edifícios de Alvenaria. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pp 151.

D’Ayala, Dina; Spence, Robin; Oliveira, C. Sousa e Pomonis, Antonios (1997) Earthquake Loss Estimation for Europe’s Historic Town Centres. *Earthq Spectra* 13:773–793. doi:10.1193/1.1585980.

D’Ayala, Dina e Speranza, Elena (2002) Housing Report: Single-family stone masonry house. Earthquake Engineering Research Institute (EERI) and International Association for Earthquake Engineering (IAEE), pp 15.

Dolce, Mauro; Kappos, Andreas; Masi, Angelo; Penelis, Gregory e Vona, Marco (2006) Vulnerability Assessment and Earthquake Damage Scenarios of the Building Stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek Methodologies. *Elsevier - Eng Struct* 28:357–371. doi:10.1016/j.engstruct.2005.08.009.

Esri (2012) Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI). 310 New York Street, Redlands, 92373-8100, USA.

Ferreira, T. Miguel; Vicente, Romeu; Mendes da Silva, J. A. Raimundo; Varum, Humberto e Costa, Aníbal (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.

GNDT (1994) Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo livello e secondo livello (muratura e cemento armato). Grupo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - Servizio Sismico Nazionale, Rome, Italy.

Goula, Xavier; Roca, Antoni e Oliveira, C. Sousa (2006) Assessing and managing earthquake risk - Geo-Scientific and Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation: developments, tools, techniques. Springer. 2nd editon; ISBN: 978-1-4020-3524-1, pp 564.

Gregersen, Søren; Basham, Peter e Moreira V. S. (1989) Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound. *Seism. Port. Cont. Margin*, NATO ASI S. Springer Netherlands, pp 533–545.

Grünthal, Gottfried (1998) European Macroseismic Scale 1998





(EMS-98), European Seismological Commission, Subcommittee on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scales. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, pp 15:101.

IDNDR (1994) Yokohama Strategy and Plan of Action for a Safer World - Guidelines for Natural Disaster Prevention, Preparedness and Mitigation. In World Conf. Nat. Disaster Reduct. International Decade for Natural Disaster Reduction. Yokohama, Japan.

Maio, Rui; Ferreira, T. Miguel; Vicente, Romeu e Estêvão, João (2015a) Seismic vulnerability assessment of historical centres: case study of the old city centre of Faro, Portugal. *J Risk Res.* doi: 10.1080/13669877.2014.988285.

Maio, Rui; Ferreira T. Miguel e Vicente, Romeu (2015b) The morphology of old urban centres: architectural and constructive survey of Bairro Ribeirinho of Faro, Portugal. *Conservar Património.* doi: 10.14568/cp2015002.

Mitchelson, Mark (2011) Haiti and Christchurch Earthquakes Viewed through a resilience lens - A comparative case study. Tese de Mestrado em Emergency Management (MEMMgt). Auckland University of Technology. pp 92.

Neves, Filipe; Costa, Aníbal; Vicente, Romeu; Oliveira, C. Sousa e Varum, Humberto (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.

Neves, Nuno; Arêde, António e Costa, Aníbal (2012) Seismic analysis of a building block. *Bull Earthq Eng.*

doi:10.1007/s10518-011-9310-2. pp 1-33.

NTC (2008) Ministero dei Lavori Pubblici, Decreto Ministeriale 14/1/2008, Norme tecniche per le costruzioni.

Nunes J. Carlos (2008) General description of the Azores region seismicity. Sismo 1998 - Açores. Uma década depois, 1st Edition. Horta, Faial Island, Azores, Portugal, pp 59-72.

Oliveira, C. Sousa; Lucas, Arcindo e Guedes, J. H. Correia (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.

Pagnini, L. Carlotta; Vicente, Romeu; Lagomarsino, Sergio e Varum, Humberto (2011) A mechanical model for the seismic vulnerability assessment of old masonry buildings. *Earthq Struct* 2:25-42.

Ranghieri, Federica e Ishiwatari, Mikio (eds) (2014) Learning from Megadisasters - Lessons from the Great East Japan Earthquake. The World Bank Group. doi:10.1596/978-1-4648-0153-2. pp 391.

Silva, Vitor; Crowley, Helen; Varum, Humberto e Pinho, Rui (2014) Seismic risk assessment for mainland Portugal. *Bull Earthq Eng.* doi:10.1007/s10518-014-9630-0.

Vicente, Romeu (2008) Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana - Avaliação da Vulnerabilidade e do

Capítulo 5. Mitigação do risco sísmico em núcleos urbanos antigos

Risco Sísmico do Edificado da Baixa de Coimbra. Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. pp 471.

Vicente, Romeu; Ferreira, T. Miguel; Maio, Rui e Koch, Herbert (2014a) Awareness, Perception and Communication of Earthquake Risk in Portugal: Public Survey. *Procedia Econ Financ* 18:271–278. doi:10.1016/S2212-5671(14)00940-X.

Vicente, Romeu; Ferreira, T. Miguel; Maio, Rui (2014b) Seismic Risk at the Urban Scale: Assessment, Mapping and Planning. *Procedia Econ Financ* 18:71–80. doi:10.1016/S2212-5671(14)00915-0.

Vicente, Romeu; Parodi, Sonia; Lagomarsino, Sergio; Varum, Humberto e Mendes da Silva, J. A. Raimundo (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.

Vicente, Romeu; Mendes da Silva, J. A. Raimundo; Varum, Humberto; Costa, Aníbal; Oliveira, C. Sousa; Ferreira, T. Miguel; Santos, Mário; Santos, Cátia e Subtil, Ana (2010) Avaliação da vulnerabilidade sísmica do núcleo urbano antigo do Seixal. In 8th Port Congr Seismol Seism Eng.

Zonno, G ; Oliveira, C. Sousa; Ferreira, Mónica Amaral ; Musacchio, G. ; Meroni, F. ; Mota-de-Sá, Francisco e Neves, Filipe (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.





CAPÍTULO 6

ESTUDO DE SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO DE UM EDIFÍCIO DE ALVENARIA

1. INTRODUÇÃO

A melhoria da capacidade resistente dos edifícios tradicionais de alvenaria de pedra face à ação sísmica é considerado uma medida fundamental para a salvaguarda do património edificado, particularmente em zonas de elevada sismicidade, tal como é o caso do arquipélago dos Açores. Neste sentido, o presente capítulo é dedicado à avaliação da vulnerabilidade sísmica de um edifício tradicional de alvenaria de pedra localizado na ilha do Faial, representativo de uma tipologia construtiva rural característica do arquipélago dos Açores. Para tal, foi selecionado um edifício considerado representativo da referido tipologia construtiva e modelado no programa 3Muri®, o qual que gera uma malha de macroelementos e nós rígidos para a avaliação da estrutura através de análises estáticas não lineares (análises *pushover*). Poste-

riormente, foi estudada a aplicação de três tipos de reforço sísmico distintos no modelo original, de forma a analisar e comparar a sua influência global sobre a capacidade sísmica, no plano, do edifício.

1.1. Caracterização do Edificado Antigo de Alvenaria de Pedra

Os edifícios em alvenaria de pedra representam uma tipologia construtiva largamente aplicada em todo o mundo como solução construtiva. Em muitos países e particularmente na Europa, a grande maioria do edificado construído em alvenaria de pedra representa um importante legado do nosso património arquitectónico. Os centros históricos ao serem caracterizados maioritariamente pela presença deste tipo de construções, as quais que apresentam um desempe-

no sísmico tipicamente fraco, são áreas particularmente vulneráveis das nossas cidades. No entanto, o desempenho sísmico destes edifícios varia substancialmente em função de múltiplos fatores tais como: propriedades dos materiais; configuração geométrica, qualidade de execução de pormenores construtivos/detalhes estruturais; intervenções estruturais inadequadas ou ainda das condições de fronteira e interações com edifícios adjacentes (Maio *et al.* 2015). Apesar disto, e pese embora algumas iniciativas pontuais que têm vindo a ser implementadas em Portugal, os centros históricos inseridos em zonas de moderada a elevada sismicidade, tais como na região de Lisboa e Vale do Tejo, Algarve e o arquipélago Açoreano, necessitam ainda de planos e estratégias de reabilitação e reforço estrutural, que respeitem os princípios básicos do dimensionamento sísmico e que garantam as condições de segurança e habitabilidade dessas mesmas estruturas.

Este assunto tem gerado bastante controvérsia em Portugal ao longo dos últimos anos, principalmente após a aprovação do Decreto-Lei nº53/2014 (Portugal 2014), que regula as intervenções de reabilitação em Portugal e que ignora a necessidade de dimensionamento e reforço sísmico em obras de reabilitação (Maio *et al.* 2015). Perante este cenário, os autores reconhecem a necessidade presente do desenvolvimento de estudos relacionados com a avaliação do desempenho sísmico de edifícios existentes em alvenaria de pedra, como forma de se estabelecerem estratégias de mitigação do risco sísmico adequadas ao contexto do país,


garantido não só uma melhor segurança dos cidadãos que habitam estes edifícios, mas também a preservação deste património edificado para as gerações futuras. Importa referir que destas estratégias depende a preservação da identidade e do valor patrimonial, cultural e arquitetónico dos nossos centros históricos.

1.2. O Edificado da Ilha do Faial

A informação recolhida e a investigação desenvolvida ao longo dos dez anos que durou o processo de reconstrução da ilha do Faial, dirigido pela Sociedade de Promoção para a Habitação e para a Reabilitação de Infraestruturas (SPHRI), foi compilada e arquivada em 2007 pela Secretaria Regional para a Habitação e Equipamentos (SRHE) da ilha do Faial, tendo resultado, um ano mais tarde, na publicação do livro “Sismo 1998 – Açores. Uma década depois”, editado por Oliveira *et al.* (2008). A qualidade e unicidade desta base de dados motivou o desenvolvimento de inúmeros estudos e projetos de investigação a nível nacional.

Apesar de, no âmbito deste trabalho, nos ter sido concedido acesso total a esta base de dados, os autores levaram a cabo um trabalho complementar de inspeção de parte do edificado, previsto no âmbito do presente projeto URBSIS, com o intuito de recolher alguma informação sobre a evolução e o processo diacrónico da reconstrução e das intervenções de reabilitação realizadas no período entre 1998 e 2015.





Neves *et al.* (2012) conduziram um extenso trabalho de caracterização do edificado da ilha do Faial descrevendo detalhadamente as tipologias construtivas mais comuns, contribuindo desta forma para o desenvolvimento da referida base de dados. De acordo com estes autores, à data do terramoto, os edifícios em alvenaria de pedra constituíam cerca de 60% do edificado da ilha do Faial (amostra de 2305 edifícios). Apesar de diversos fatores já terem sido apontados como potenciadores de um desempenho sísmico mais frágil dos edifícios em alvenaria de pedra, os autores pretendem neste capítulo chamar atenção para a vulnerabilidade sísmica que esta tipologia construtiva apresenta, nomeadamente num contexto rural, tal como discutido por Costa (2002). A partir de Costa e Arêde (2006) e dos trabalhos de pesquisa e inspeção realizado pelos autores, foi possível verificar que os edifícios em alvenaria de pedra inseridos num contexto rural apresentam usualmente um ou dois pisos, são estruturalmente independentes dos edifícios vizinhos e francamente mais pobres em termos materiais e construtivos, do que os edifícios em ambiente urbano.

2. O COMPORTAMENTO SÍSMICO DE UM EDIFÍCIO DE ALVENARIA DE PEDRA

2.1. Caracterização do Caso de Estudo

No seguimento das considerações enunciadas na secção anterior, o desempenho sísmico de um edifício em alvenaria de pedra, representativo desta tipologia construtiva, será aqui avaliado. A informação que será exposta de seguida relativa ao edifício analisado foi obtida por meio de um relatório disponibilizado pela SRHE, no qual constava informação detalhada sobre a geometria, o sistema estrutural e as propriedades dos materiais, e que se revelou determinante no processo de modelação do edifício (Figura 1). Este edifício isolado com planta aproximadamente retangular (9.0 m por 8.0 m) é formado por dois pisos que perfazem uma altura total de 6.5 m, onde o acesso ao piso superior é garantido por duas escadas exteriores também elas em alvenaria de pedra. Com cerca de 0.7 m de espessura, as paredes portantes em alvenaria de pedra irregular, fracamente argamassada, são constituídas maioritariamente por basalto, cinerite, andesito e outras pedras de menores dimensões (Costa 2002). As paredes interiores são em tabique e apresentam uma espessura de 0.1 m.



Figura 1: Vista exterior do edifício analisado, localizado na freguesia de Cedros, ilha do Faial, Açores

No que diz respeito aos elementos estruturais horizontais, enquanto que os pavimentos são constituídos por soalho apoiado em vigas de madeira, a estrutura da cobertura é constituída por um telhado tradicional em de quatro águas. Por último, as fundações funcionam tradicionalmente como o prolongamento das paredes resistentes no solo, utilizando portanto o mesmo tipo de pedra mas uma espessura ligeiramente maior, até uma profundidade que varia em função do número de pisos e que, neste caso, foi estimada em cerca 1.0 m.

Alguns trabalhos experimentais têm sido desenvolvidos para a estimativa das propriedades mecânicas das paredes resistentes desta tipologia de edifícios. Nomeadamente o peso específico, γ , o módulo de Young, E , e a resistência ao

corde, τ_0^* , foram estimadas por Costa (2002) para um edifício em alvenaria de pedra situado também ele num ambiente rural da ilha do Faial, No entanto, apesar da evidente discrepância entre alguns dos valores apresentados em Costa (2002) e pela norma Italiana NTC (Itália 2008), nomeadamente para o módulo de Young, E , neste trabalho, as propriedades mecânicas das paredes em alvenaria foram adoptadas da norma Italiana NTC (Itália 2008), através da correspondência entre esta tipologia construtiva, descrita também em Costa (2002), e a tipologia equivalente da norma Italiana. Assim, os valores apresentados na Tabela 1 dizem respeito a média entre os valores mínimos e máximos adotados pela NTC para a tipologia construtiva de alvenaria com pedra irregular, *Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)*.



Tabela 1: Propriedades mecânicas das paredes em alvenaria de pedra consideradas na modelação do edifício

Módulo de Young, E (GPa)	Módulo de Corte, G (GPa)	Resistência à compressão f_m (MPa)	Resistência ao corte, τ_0 (MPa)	Peso específico, γ (kN/m ³)
0.87	0.15	0.63	0.02	19

Assim, após ter sido consultada a informação disponível na literatura relacionada com as propriedades geométricas do sistema estrutural em questão, os detalhes e pormenores construtivos e as respetivas propriedades mecânicas dos materiais constituintes, foi adoptado na modelação numérica um nível de conhecimento KL_2 , ao qual corresponde um fator de confiança $CF_{KL_2}=1.20$, de acordo com as indicações presentes no Eurocódigo 8. É importante referir ainda que as propriedades relacionadas com a rigidez dos painéis de alvenaria, E e G , representando a condição de fissuração, foram definidas aplicando um fator de redução para os valores elásticos igual a 0.50, uma vez mais como recomendado pelo Eurocódigo 8 (CEN 2004) e NTC (Itália 2008).

Os pavimentos foram definidos como elementos finitos de membranas ortotrópicas (Lagomarsino *et al.* 2013), caracterizados por uma espessura equivalente, s , por módulo de Young equivalentes, $E_{1,eq}$ na direção do vigaento (perpendicular à parede de fachada) e $E_{2,eq}$ na direção perpendicular ao vigaento, e ainda por um módulo de rigidez de corte equivalente, G_{eq} , ambos os valores estimados para a tipologia de vigas de madeira com soalho e

contra-soalho, disponível no programa utilizado para a modelação do edifício (ver Tabela 2). O comportamento flexível dos diagramas horizontais e a sua contribuição na transferência de carga dos pavimentos para as paredes resistentes foi modelado através da variação deste valor de módulo de rigidez de corte equivalente, G_{eq} . Na Tabela 2 encontram-se ainda apresentados os valores das cargas permanentes e variáveis consideradas no modelo numérico, G_k e Q_k , respetivamente.

Tabela 2: Parâmetros relativos à membrana equivalente e respetivas cargas permanentes e variáveis considerados na modelação do edifício

	s (m)	$E_{1,eq}$ (GPa)	$E_{2,eq}$ (GPa)	G_{eq} (GPa)	G_k (kN/m ²)	Q_k (kN/m ²)
Pavimento	0.02	19.5	9.0	0.02	1.00	2.00
Cobertura	0.05	12.2	9.0	0.10	1.00	0.30

2.2. Análise Estática Não-Linear

Tal como foi já referido anteriormente, com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade e o desempenho sísmico global do edifício adotado como caso de estudo, foi utilizado o programa de cálculo 3Muri® (versão 10.0.1), desenvolvido especificamente para a verificação da segurança sísmica no plano de edifícios em alvenaria através da computação de análises não-lineares, *pushover analyses* (STADATA 2012). Na construção do modelo tridimensional apresentado na Figura 2 (a), baseado no método *Equivalent Frame Model*

(EFM), partiu-se do pressuposto de que a resposta no plano das paredes de alvenaria com aberturas podem ser discretizadas por um conjunto de painéis/macro-elementos, tal como ilustrado na Figura 2 (b): panos de parede (*piers*); lintéis (*spandrels*) e nós rígidos (*nodes*). Enquanto que os panos de parede são elementos verticais responsáveis por

suportar ambas as cargas permanentes e variáveis, os lintéis são elementos horizontais posicionados entre duas aberturas verticalmente alinhadas. Por último, os nós rígidos representam elementos não danificados confinados entre os panos de alvenaria e os lintéis (Lagomarsino *et al.* 2013; Penna *et al.* 2014).

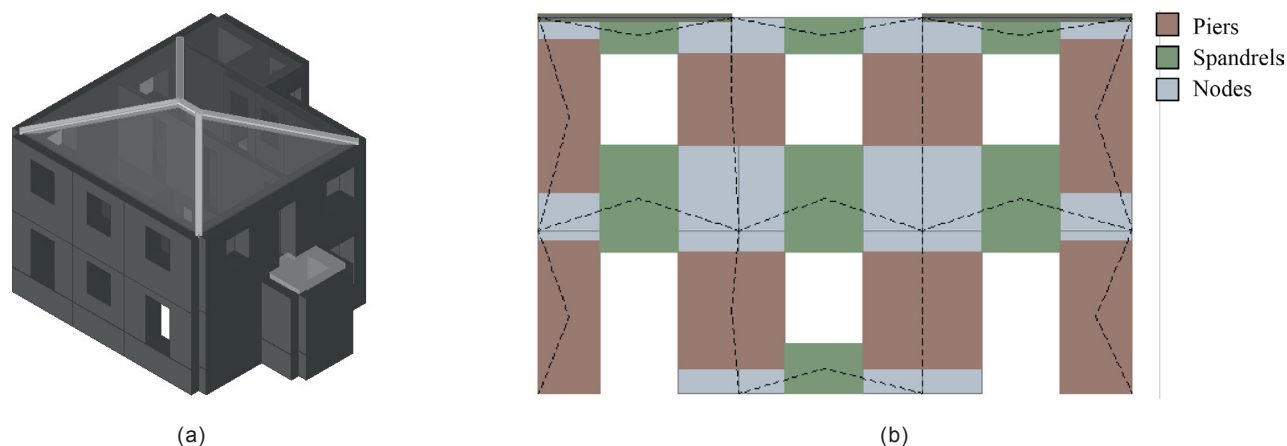


Figura 2: Vista tridimensional do edifício modelado (a) e a respetiva malha equivalente em macroelementos da parede de fachada

O critério de resistência que governa o comportamento no plano dos macro-elementos é definido de acordo com o Eurocódigo 8 (CEN 2004) e com a norma Italiana NTC (Itália 2008), e modelado através de vigas não-lineares (Lagomarsino *et al.* 2013). A resposta à flexão, que combina rotura por compressão e flexão, é baseada na *beam theory*, desprezando a resistência à tração do material e assumindo uma distribuição de tensão retangular normal no banzo comprimido (Simões 2015). A resposta ao corte é governa-

da por um critério de rotura de fissuração diagonal, desenvolvido por Turnšek e Sheppard (1980), recentemente adotado pela norma NTC (Itália 2008) para edifícios existentes em alvenaria. Este modo de rotura é condicionante para o tipo de alvenaria alvo deste estudo, nomeadamente alvenaria irregular pobre.

A resposta do modelo no plano foi avaliada através de análises estáticas não-lineares, sujeitando a estrutura a cargas



cargas laterais crescentes até à rotura, com carregamentos dependentes da distribuição de massa. Todas as análises foram realizadas de acordo com as recomendações do Eurocódigo 8 e NTC, isto é, considerando ambas as direções principais U_x e U_y , distribuições distintas de carga em altura (uniforme, proporcional à massa, e pseudo-triangular, proporcional ao produto entre a massa e a altura) e ainda excentricidade accidental do centro de massa em relação ao centro de rigidez da estrutura (critério de 5% da maior dimensão em planta perpendicular a cada direção principal).

Para além disso, a computação das curvas *pushover* apresentadas na Figura 3 (a) foi interrompida para um decréscimo de 20% do valor máximo de força de corte, V_b , tal como sugerido pelos referidos códigos, relacionando assim esta condição à capacidade de deslocamento último da estrutura. As curvas resultantes das análises mais desfavoráveis para cada uma das direções e para a condição original do edifício, BR_x e BR_y , encontram-se evidenciadas na Figura 3 (a), e dizem ambas respeito a uma distribuição de carga pseudotriangular.

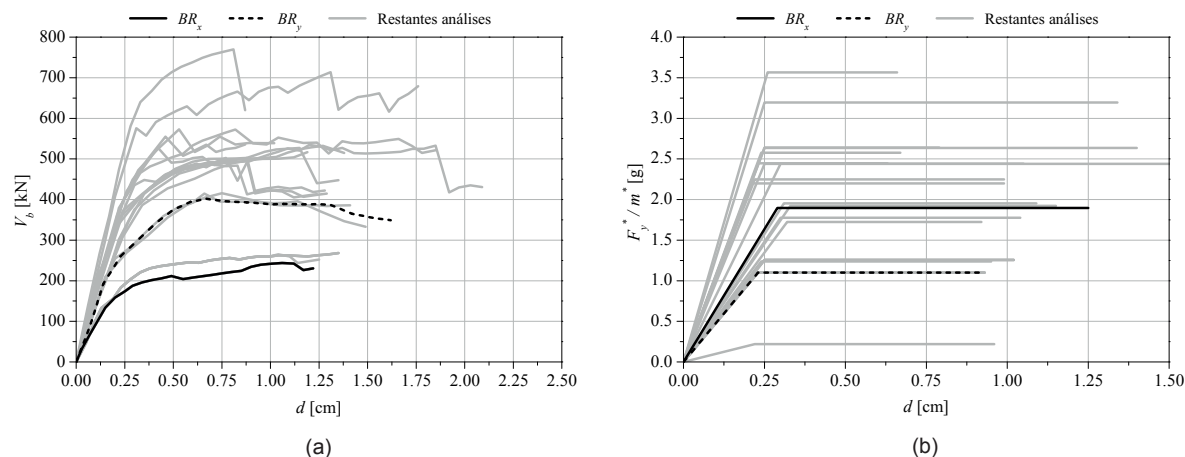


Figura 3: Curvas *pushover* (a) e curvas de capacidade (b) obtidas para a condição original do edifício

Tal como esperado, a rigidez e força resultaram consideravelmente inferiores na direção U_x , uma vez que esta direção apresenta uma maior área de aberturas e por isso, menor área de parede resistente. A ductilidade apresenta valores ligeiramente superiores na direção U_x . Os valores de deslo-

camento último, d_u , associados às curvas *pushover* mais desfavoráveis da Figura 3 (a), BR_x e BR_y , foram avaliados em 1.22 e 1.62 cm, para os quais correspondem os valores de força de corte, V_b , de 231 e 349 kN, respetivamente.

Note-se que as curvas de capacidade foram obtidas convertendo as curvas pushover do sistema original com n graus de liberdade (*Multi Degree of Freedom System - MDoF*) num sistema equivalente com 1 grau de liberdade (*Single Degree of Freedom System - SDoF*) (Simões 2015), de acordo com o Método N2, originalmente proposto por Fajfar (1999) e adotado posteriormente, quer pelo Eurocódigo 8, quer pela NTC. A relação força-deslocamento elasto-perfeitamente plástica é assumida no Eurocódigo 8 para a definição da curva de capacidade do sistema *SDoF*, onde a rigidez inicial do sistema equivalente *SDoF* é determinada de forma a que as áreas sob as curvas força-deslocamento sejam iguais (CEN 2004). Contudo, a utilização desta abordagem não contabiliza a capacidade de deslocamento da estrutura após atingir a resistência máxima, tal como mencionado por Costa *et al.* (2011), reportando também que a abordagem apresentada agora pela NTC é mais realista que a apresentada no Eurocódigo 8.

Não obstante, Simões *et al.* (2014) defendeu que em casos de diafragmas horizontais extremamente flexíveis, a adoção do referido critério que representa a condição de paragem das curvas *pushover* proposto no Eurocódigo 8 pode conduzir a resultados não conservativos, uma vez que paredes distintas comportam-se praticamente de forma independente. Podendo a presença de danos severos nas paredes não estar refletida nas curvas de capacidade bi-linear equivalentes da Figura 3 (b), que representam apenas o comportamento global do modelo para cada uma das análises realizadas, os autores apresentam na Figura 4 a distribuição de dano obtida para os últimos passos das análises *pushover* mais desfavoráveis (BR_x e BR_y) da parede de fachada do edifício modelado. Note-se que a parede de fachada é aquela que normalmente apresenta de forma mais clara os padrões de dano instalados, permitindo assim identificar e comparar os mecanismos de dano observados no modelo com aqueles que foram efetivamente observados e levantados na sequência do terramoto dos Açores de 1998.

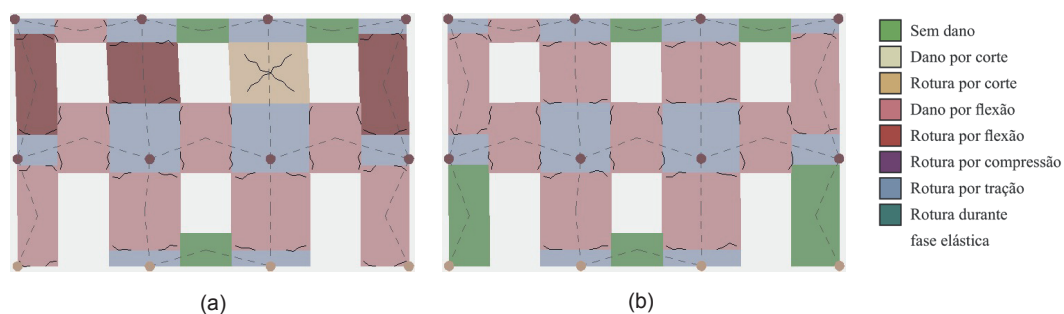


Figura 4: Distribuição dos danos estimados em cada macro-elemento para a parede de fachada do edifício modelado, resultantes das análises *pushover* para a condição original do edifício: (a) BR_x , e (b) BR_y .



Analisando a Figura 4, é possível observar que os danos por flexão governam o comportamento dos panos de alvenaria e dos lintéis nas duas direções, fruto da configuração das aberturas e da sua geometria regular. É importante notar que para o BR_x , os panos de alvenaria do piso superior alcançam a rotura por corte e flexão. Paralelamente, a Figura 5 apresenta a distribuição efetiva de dano da estrutura, no rescaldo do terramoto dos Açores de 1998, a partir da

qual fica também evidente um padrão de dano por flexão nos panos de alvenaria e lintéis e ainda sinais de rotura por corte no pano de alvenaria destacado, ambos os mecanismos em conformidade com os anteriores na direção U_x , obtidos através de análises numéricas, reforçando desta forma a fiabilidade quer do modelo quer do programa utilizado.



Figura 5: Distribuição dos danos efetivos observados na parede de fachada do edifício modelado, resultantes do terramoto dos Açores de 1998

2.3. Avaliação do Desempenho Sísmico do Edifício na sua Condição Original (BR)

A avaliação do desempenho sísmico do edifício analisado compreendeu a determinação do ponto de desempenho da estrutura, d_{max}^* , obtido através da interseção entre a curva de capacidade da estrutura, ver Figura 3 (b), e a exigência sísmica regulamentar em termos de espectro de resposta. A verificação da segurança ao Estado Limite Último (ELU)

consiste por isso em averiguar se a estrutura suporta a exigência sísmica regulamentar para a cidade da Horta (ilha do Faial, arquipélago dos Açores) e para um período de retorno T_R de 475 anos. A ação sísmica Tipo 2 foi adotada com um coeficiente de amortecimento equivalente, ξ , igual a 5% e para um solo de fundação Tipo C. Tratando-se de um edifício de carácter residencial, o fator de importância do edifício, γ_I , foi considerado igual a 1.0.

A Tabela 3 apresenta as propriedades mais importantes e os valores correspondentes às curvas de capacidade das análises mais desfavoráveis em cada direção, previamente ilustradas na Figura 3 (b).

Tabela 3: Propriedades das curvas de capacidade obtidas para as análises mais desfavoráveis na condição original do edifício (BR)

	T (s)	μ (-)	F^*/m^* (g)	q (-)	d^*/d^*_{max} (cm)	$a_{g,max}/a_{gR}$ (-)
BR _x	0.29	4.04	1.10	7.39	0.54	0.41
BR _y	0.25	4.31	1.90	4.95	0.66	0.61

Em termos do período equivalente, T^* , as diferenças entre os valores obtidos para as duas direções estão em conformidade com o facto de na direção U_x haver uma deformabilidade ligeiramente superior motivada por uma maior área de aberturas. No que diz respeito à ductilidade, μ^* , dada pelo rácio entre os deslocamentos último e de cedência, d^*_u e d^*_y , respetivamente, não foram detetados desvios significativos entre as duas direções. Por último, o valor obtido para a resistência limitada do edifício na direção U_x , F^*/m^* , este é praticamente o dobro daquele obtido para a direção U_y , facto uma vez mais justificado pelas diferenças entre área resistente efetiva nas duas direções.

A avaliação do desempenho sísmico tem em conta a verificação das condições regulamentares associadas aos seguintes indicadores de desempenho, q^* , d^*_u/d^*_{max} e $a_{g,max}/a_{gR}$. De acordo com a norma Italiano NTC, o indicador q^* , que representa o rácio entre a aceleração na estrutura com comportamento elástico ilimitado, $S_e(T^*)$, e com resistência limitada, F^*/m^* , deve verificar a condição $q^* < 3.0$, de forma

a limitar a ductilidade global do edifício. Já o rácio entre o deslocamento último e o ponto de desempenho, d^*_u/d^*_{max} , deverá verificar a condição $d^*_u/d^*_{max} > 1.0$ para ser verificada a segurança estrutural sísmica do edifício, de acordo com as recomendações do Eurocódigo 8. Por último, o rácio entre a aceleração máxima admissível para a verificação do Estado Limite Último considerando a condição $q^* < 3.0$, $a_{g,max}$ e a aceleração de solo de referência, a_{gR} , considerada igual a 2.5 m/s² para a ação sísmica adotada, deve ser verificado para a condição $a_{g,max}/a_{gR} > 1.0$. Tal como demonstram os resultados apresentados na Tabela 3, nenhum dos referidos indicadores verifica as condições enunciadas atrás, exigidas quer pelo Eurocódigo 8 quer pela norma NTC para a verificação da segurança aos ELU, havendo por isso a necessidade efetiva de aplicar soluções de reforço estrutural adequadas que melhorem o desempenho global do edifício.

3. REFORÇO SÍSMICO DE UM EDIFÍCIO DE ALVENARIA DE PEDRA

3.1. Aplicação Numérica de Soluções Tradicionais de Reforço

A demolição em massa ou intervenções estruturais pesadas e intrusivas, tais como a substituição dos elementos estruturais originais por tecnologias construtivas recentes, situação que, para além de comprometer o valor patrimonial e arquitetónico do edifício, implicam um acréscimo importante e localizado de massas, agravando o seu comportamento



sísmico global da estrutura. Procurando incentivar a utilização de soluções mais compatíveis, nesta seção serão apresentadas e adotadas algumas soluções de reforço sísmico baseadas na estratégia de reconstrução e reabilitação do parque edificado da ilha do Faial, aquando do terramoto dos Açores de 1998, desenvolvida pelo Governo Regional dos Açores com o objetivo de melhorar o desempenho sísmico dos edificado existente em alvenaria de pedra.

Assim, neste trabalho serão analisadas seis soluções tradicionais de reforço, com graus de intrusividade e custos crescentes (S_1 a S_6), agrupadas em três pacotes de reforço cumulativos, RP_1 a RP_3 , tal como exposto na próxima Tabela 4. Estas soluções foram desenhadas no rescaldo dos terramotos dos Açores de 1980 e 1998 por diferentes gabinetes de projeto, tendo como base as recomendações desenvolvidas especificamente para o processo de reabilitação da ilha do Faial pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), em colaboração com diversos especialistas das áreas da sismologia e da engenharia civil e sísmica (Oliveira *et al.* 2008; Oliveira *et al.* 1990). A comparação entre o

desempenho sísmico da condição original do edifício modelado (BR) e os diferentes pacotes de reforço será discutida na secção seguinte. Dado que a estratégia adotada neste trabalho passa por avaliar a implementação cumulativa das várias soluções de reforço, e que os autores consideram que o conjunto de soluções de reforço de S_1 a S_4 beneficiam o comportamento em forma de caixa dos edifícios em alvenaria de pedra, implicando um grau de intrusividade baixo a moderado, estas soluções de reforço foram agrupadas no pacote de reforço RP_1 , ilustrado na Figura 6. Esta abordagem é semelhante aos estudos realizados nesta área, onde o objectivo de avaliar a eficácia de diferentes técnicas de reforço revertese numa avaliação global final da(s) mais eficiente(s), como apresentado por Diz *et al.* (2015).

Tabela 4: Soluções de reforço sísmico adotadas em edifícios em alvenaria de pedra

Pacote de reforço	Solução de reforço	Descrição
RP_1	S_1	Utilização de tirantes para reforçar a ligação entre paredes (ao nível do pavimento)
	S_2	Tarugamento e rigidificação dos pavimentos
	S_3	Reforço da ligação entre pavimentos e paredes
	S_4	Utilização de tirantes para reforçar a ligação entre a cobertura e as paredes (ao nível da cobertura)
RP_2	$+S_5$	Reforço da ligação entre a cobertura e as paredes através da utilização de uma cinta de coroamento no topo das paredes
RP_3	$+S_6$	Utilização de reboco armado para a consolidação das paredes de alvenaria

A utilização de tirantes para reforçar a ligação entre as paredes ao nível dos pavimentos, S_1 , é uma das técnicas mais antigas e mais utilizadas para melhorar a funcionamento global do edifício, sendo considerado por muitos especialistas como fundamental para evitar o colapso para fora do plano das paredes. Estes tirantes são normalmente constituídos por varões de aço galvanizado, com cerca de 10 a 20 mm de diâmetro, instalados ao nível dos diafragmas horizontais (pavimentos (S_1) e coberturas (S_4)) e ancorados nas paredes através de chapas de aço galvanizadas, como demonstrado na Figura 6 (a) (Cansado *et al.*, 1998; D'Ayala e Speranza, 2002). Esta solução revela-se eficaz não apenas na melhoria da rigidez dos diafragmas horizontais mas também na melhoria das ligações entre paredes resistentes.

A inspeção realizada a parte do edificado na ilha do Faial confirmou a predominância de pavimentos de soalho suportados por vigas de madeira, onde grande parte dos elementos de madeira se apresentam num avançado estado de degradação. Assim, a substituição ou reparação dos elementos degradados, restaurando a sua capacidade resistente original, encontra-se prevista na solução de reforço S_2 , ilustrada na Figura 6 (b). Esta solução conta ainda com a instalação de um contra-soalho, devidamente aparafusado e disposto perpendicularmente à direção do soalho original, e de tarugamento com vigas de madeira com cerca de 75 mm de espessura ancorado às vigas principais do pavimento

através de uma sistema de fixação composto por uma chapa quinada de 3 mm e varões roscados galvanizados com 10 mm de diâmetro. Importa ainda referir, que todas as dimensões incluídas na solução de reforço S_2 foram simuladas no modelo numérico através do aumento do módulo de corte de rigidez, G , de 0.02 para 0.75 GPa, e ainda duplicando a espessura do soalho de 2 para 4 cm, respetivamente. A influência deste tipo de reforço no desempenho estrutural dos edifícios de alvenaria foi recentemente estudada por exemplo por Senaldi *et al.* (2014), Brignola *et al.* (2009) e Ilharco *et al.* (2010).

O reforço da ligação entre pavimentos e paredes (S_3) foi conseguido através da introdução de chapas quinadas em L com 3 mm de espessura, ancoradas às paredes resistentes através de conectores e chapas de ancoragem adequadas, tal como ilustrado na Figura 6 (c), complementando desta forma a solução de reforço anterior (S_2) e já estudada experimentalmente por Costa *et al.* (2011). Por último, a Figura 6 (d) ilustra o reforço da ligação entre a cobertura e as paredes, S_4 , realizado através da aplicação do mesmo tipo de tirantes utilizados na solução de reforço S_1 , sendo que, neste caso, a sua aplicação é feita ao nível da cobertura (sob as vigas da cobertura), de forma a que esta possa suportar as solicitações horizontais respeitantes a uma eventual ação sísmica.



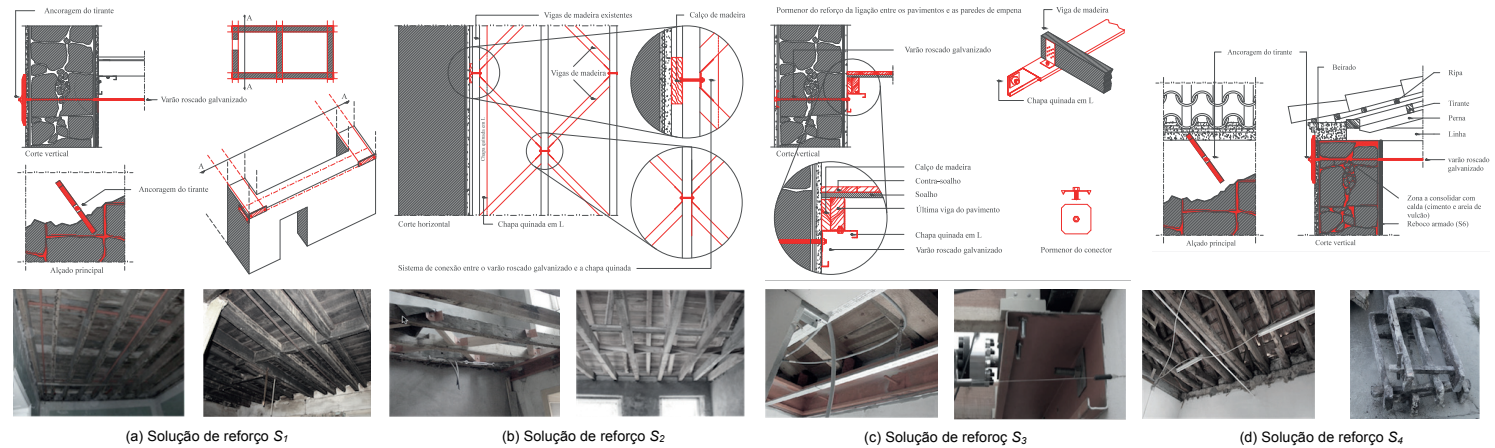


Figura 6: Pormenores das soluções de reforço incorporadas no pacote de reforço RP_1 , adaptado de Oliveira *et al.* (2008)

O pacote de reforço RP_2 acrescenta ao pacote de reforço RP_1 a solução de reforço S_5 , a qual compreende a introdução de uma cinta de coroamento de betão armado (com armadura longitudinal $4\phi 10$ e estribos $\phi 6//.30$), aplicada no topo das paredes de alvenaria e executada ao longo de todo o perímetro do edifício. Com esta solução, ilustrada na Figura 7, pretende-se reforçar a ligação entre a cobertura e as paredes.

A viga de betão armado foi implementada no modelo numérico de acordo com os desenhos e disposições técnicas disponíveis no relatório do edifício, considerando uma classe de betão C12/15 e de aço estrutural B420. Ainda na Figura 7 é possível observar-se um pormenor de reforço da ligação entre a cobertura e a parede de empena.



Figura 7: Pormenores da solução de reforço S_5 , incorporada no pacote de reforço RP_2

Por último, o pacote de reforço RP_3 , que inclui a solução de reforço S_6 , envolve a aplicação de reboco armado para a consolidação das paredes resistentes, aumentando desta forma a sua capacidade resistente ao corte. Esta solução foi aplicada com base nas recomendações especificadas por Costa (2002), ver Figura 8. Após a aplicação do reboco de enchimento e regularização das juntas com uma argamassa na proporção 1:3 (areia local extraída da Praia de Fajã: cimento Portland: água), utilizou-se uma rede metálica galvanizada e nervurada de aço Fe430, fixada em ambas as faces da parede através de um sistema de fixação composto

por parafusos de aço galvanizado M20, varões roscados de aço galvanizado $\Phi 20$, ancorados a chapas de aço de 4 mm de espessura (20 por 20 mm) e com espaçamento máximo de 150 cm. Por último, foi aplicada uma camada de reboco de acabamento de 3 cm de espessura com uma argamassa de areado fino (Costa 2002). Esta solução de reforço foi simulada no modelo numérico através da consideração da opção homónima, disponível na janela de opções dos parâmetros beneficiadores da qualidade da alvenaria, implicando uma melhoria de cerca de duas vezes e meia em relação às propriedades mecânicas originais da alvenaria.



Figura 8: Pormenores da solução de reforço S_6 , incorporada no pacote de reforço RP_3

3.2. Comparação entre os Diferentes Pacotes de Reforço Sísmico Analisados

Nesta secção discute-se a influência dos pacotes de reforço sísmico apresentados anteriormente na avaliação do desempenho sísmico do modelo numérico. Uma vez mais, esta análise é realizada com base na comparação das condições

exigidas pelas normas Eurocódigo 8 e NTC para os mesmos indicadores de desempenho introduzidos na Secção 1.2.3. Nas seguintes figuras (Figura 9 a 12) encontram-se resumidos os resultados obtidos para cada um desses indicadores, discretizados por direção, tipo de distribuição de carga e ainda por condição do edifício (de BR a RP_3).



Através observação da Figura 9 (a) é possível verificar uma melhoria gradual e regular dos valores de q^* para as várias condições de reforço do edifício, principalmente na direção U_x . Note-se ainda assim que os valores obtidos para as análises realizadas considerando excentricidade acidental encontram-se ainda muito distantes de verificarem a condição recomendada pela NTC. Apenas as análises realizadas na direção U_x , e que não têm em conta os efeitos de excen-

tricidade, verificam ou encontram-se muito perto de verificar a condição $q^* < 3.0$. Na Figura 9 (b), respeitante aos resultados obtidos para a direção U_y , é possível observar que apenas os valores associados às análises executadas para a distribuição de carga uniforme verificam esta condição em todos os pacotes de reforço.

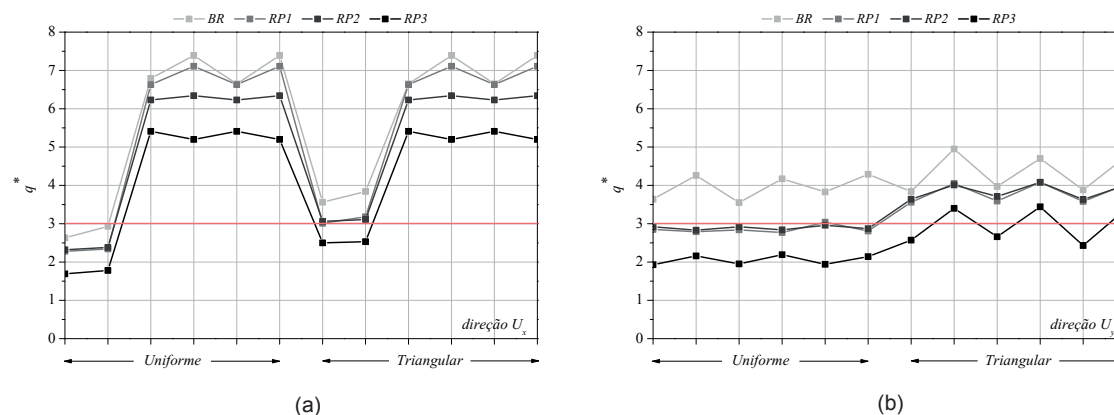


Figura 9: Resultados da comparação do desempenho sísmico dos vários pacotes de reforço para o fator q^* : (a) direção U_x e (b) direção U_y

No que diz respeito à avaliação do indicador d_{u}^*/d_{max}^* , ilustrado na Figura 10, também neste caso, na direção U_x , apenas as análises que não contabilizam os efeitos de excentricidade verificam a condição $d_{u}^*/d_{max}^* > 1.0$. Ainda considerando a direção U_x , na Figura 10 (a), e embora com pacote de reforço RP_3 , se verifiquem melhorias significativas, principalmente nas análises mencionadas atrás (sem

efeitos de excentricidade), com restantes pacotes de reforço não são visíveis quaisquer tendências de melhoria. Na Figura 10 (b), relativa à direção U_y , nenhuma das condições de reforço verifica esta exigência regulamentar para a verificação da segurança sísmica ao ELU do Eurocódigo 8, à exceção do pacote de reforço RP_3 , que satisfaz esta condição para todas as análises consideradas.

Capítulo 6. Estudo de soluções de reforço sísmico de um edifício de alvenaria

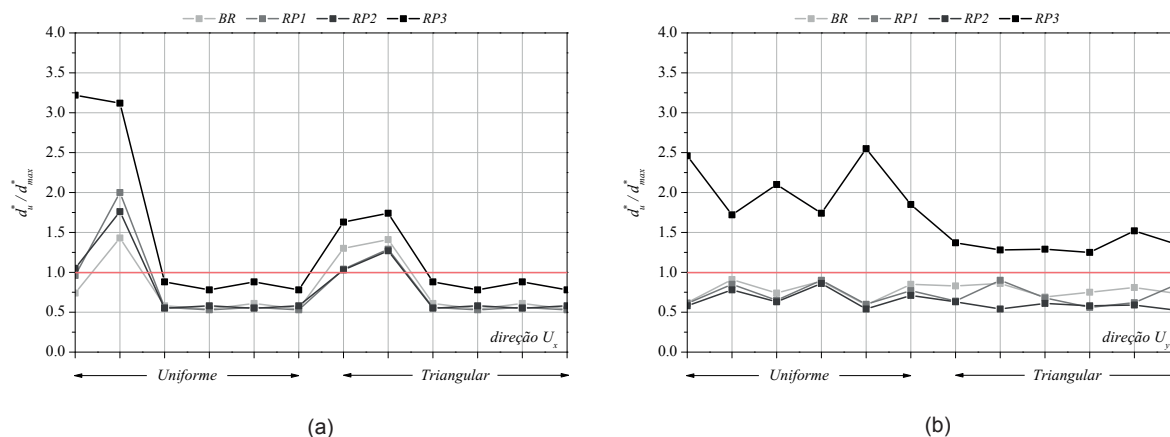


Figura 10: Resultados da comparação do desempenho sísmico dos vários pacotes de reforço em termos do quociente entre o deslocamento último e o ponto de desempenho dos edifícios, d_u^*/d_{max}^* : (a) direção U_x e (b) direção U_y

Finalmente, também os valores obtidos para o indicador $a_{g,max}/a_{gR}$, resumidos na Figura 11, seguem a tendência dos indicadores anteriores, uma vez que na direção U_x , apresentada na Figura 11 (a), apenas as análises que não contabilizam efeitos de excentricidade verificam, ou encontram-se muito próximas de verificar, a condição normativa $a_{g,max}/a_{gR} > 1.0$. Os resultados relativos à direção U_y , apresentados na Figura 11 (b), demonstram que esta condição é

igualmente verificada apenas para o pacote de reforço RP_3 , exceção feita para as análises executadas considerando simultaneamente o sentido negativo da direção U_y e a distribuição de carga pseudo-triangular. Para além disso, observando a Figura 11 (b), é possível verificar que não foram obtidas melhorias efetivas com os pacotes de reforço RP_1 e RP_2 , situação que serão discutida de forma mais detalhada nos próximos parágrafos.



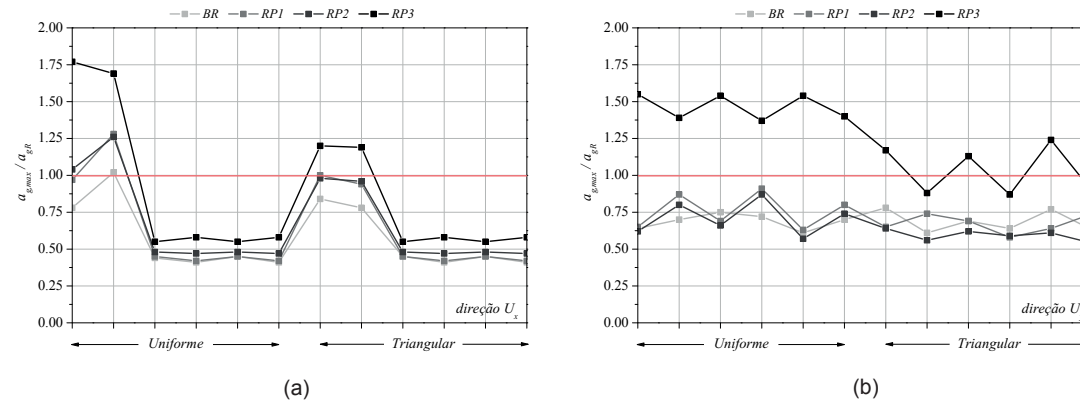


Figura 11: Resultados da comparação do desempenho sísmico dos vários pacotes de reforço em termos do rácio entre a aceleração máxima admissível e a de referência $a_{g,max}/a_{gR}$, considerando $q^* < 3$: (a) direção U_x e (b) direção U_y

Por um lado, é expectável que o pacote de reforço RP_1 , que inclui as soluções de reforço de S_1 a S_4 , tidas como pouco ou moderadamente intrusivas e reconhecidas por reforçar de forma eficaz o comportamento em caixa (*box-like behaviour*) dos edifícios de alvenaria de pedra, imprima uma melhoria significativa do comportamento para fora do plano das paredes. Neste sentido, uma vez que as análises estáticas não-lineares (*curvas pushover*) foram executadas exclusivamente para avaliar a capacidade no plano do modelo, não seria expectável que o pacote de reforço RP_1 causasse uma melhoria significativa na capacidade para fora do plano da estrutura, acabando por justificar desta forma a menor expressividade nos resultados obtidos com este pacote de reforço. Por outro lado, a influência do pacote de reforço RP_2 , que compreende a instalação de uma cinta de coroamento de betão armado ao longo de todo o perímetro

e no topo das paredes resistentes, levanta algumas dúvidas quanto à sua contribuição efetiva no desempenho sísmico global da estrutura. Vários autores têm debatido e contestado a aplicação deste tipo de solução de reforço, defendendo que esta pode conduzir ao desenvolvimento mais acelerado de mecanismos de dano locais nas paredes resistentes quando sujeitas à ação sísmica, motivado pelo acréscimo de massa e rigidez localizadas no topo das paredes, situação que introduzir modificações significativas nos modos de vibração da estrutura, principalmente daquelas que apresentam dois ou mais pisos. Danos pós-sismo, como o recente sismo de L'Aquila (2009) mostram que este tipo de intervenção, quando não compatibilizada em termos de rigidez com a estrutura portante, poderá mesmo agravar os danos na estrutura.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo estudou-se o desempenho sísmico de um edifício tradicional em alvenaria de pedra com recurso a análises estáticas não-lineares (análises *pushover*). Com este estudo, os autores pretenderam não só chamar atenção para a elevada vulnerabilidade sísmica associada, por natureza, a este tipo de edificado, mas também para a necessidade de se compreender de forma clara a influência que diferentes soluções e estratégias de reforço tradicionais apresentam na capacidade sísmica no plano de edifícios em alvenaria de pedra.

De uma forma global, das análises realizadas para a avaliação do desempenho sísmico da estrutura, apenas o pacote de reforço RP_3 (reboco armado) verifica as exigências normativas recomendadas em termos de ELU, quer pelo Eurocódigo 8 quer pela norma Italiana NTC, para a generalidade das análises. Os resultados obtidos, apesar de carecerem de validação através da aplicação a outros edifícios representativos de diferentes tipologias construtiva, por exemplo edifícios de piso térreo ou com mais de dois pisos, parecem indicar desde já uma influência muito pronunciada da qualidade da alvenaria no desempenho sísmico da estrutura. Por outro lado, os autores reconhecem que o facto de se ter ignorado a presença das escadas exteriores em alvenaria (que estruturalmente se comportam como corpos rígidos), por questões de incompatibilidade do programa na modelação deste tipo de elementos, pode ter agravado os

resultados obtidos. Assim, novas análises deverão ser realizadas com recurso a outras ferramentas, no sentido de se perceber, em toda a sua extensão, a influência destes corpos rígidos no desempenho global da estrutura. Importa ainda analisar a influência das soluções de reforço aqui apresentadas, no comportamento para fora do plano da estrutura. Os autores reconhecem ainda que a solução de reforço S_5 necessita de uma análise mais cuidada e particular, de forma a esclarecer se a sua aplicação tem efetivamente um efeito é benéfico no comportamento sísmico da estruturas, principalmente no caso de estruturas em alvenaria de pedra com dois ou mais pisos.

5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

Brignola, A.; Pampanin, S. e Podestà, S. (2009) Evaluation and control of the in-plane stiffness of timber floors for the performance-based retrofit of URM buildings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 42(3):204.221.

Carvalho, E.C.; Oliveira, C.S.; Fragoso, M. e 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 REL. 100/98.

CEN (2004) Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance – part I: general rules, seismic actions and rules for buildings. *European Committee for Standardization*, Brussels, Belgium.



Costa, A. (2002) Determination of mechanical properties of traditional masonry walls in dwellings of Faial Island, Azores. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31:1361-1382, doi:10.1002/eqe.167, issn:00988847.

Costa, A. e Arêde, A. (2006) Strengthening of structures damaged by the Azores earthquake of 1998, *Construction and Building Materials*, 20(4):252-268. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.029, ISSN: 0950-0618.

Costa, Alexandre A.; Arêde, A.; Costa, A.; Guedes, J. e Silva, B. (2012) Experimental testing, numerical modelling and seismic strengthening of traditional stone masonry: comprehensive study of a real Azorian pier. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(1), 135-159. doi:10.1007/s10518-010-9209-3.

D'Ayala, D. e Speranza, E. (2002) Housing Report: Single-family stone masonry house. Earthquake Engineering, Research Institute (EERI) and International Association for Earthquake Engineering (IAEE), pp.15.

Diz, S.; Costa, A. e Costa, Alexandre A. (2015) Efficiency of strengthening techniques assessed for existing masonry buildings. *Engineering Structures*, 101:205-215, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.07.017.

Fajfar, P. (1999) Capacity spectrum method based on the inelastic demand spectra. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(9):979-993, doi:10.1002/(SICI)1096-9845(199909)28:9<979:AID-EQE850>3.0.CO.

Ferreira, T.M. (2015) Out-of-plane seismic performance of stone masonry walls: Experimental and analytical assessment. PhD Thesis. University of Aveiro, Portugal.

Italy (2008) “Decreto Ministeriale 14/1/2008”, NTC 2008 – “Norme tecniche per le costruzioni”. Ministry of Infrastructures and Transportations, *Gazzetta Ufficiale* S.O. No. 30 on 4/2/2008.

Ilharco, T.; Guedes, J.; Costa, A.; Arêde, A. e Paupério, E. (2010) Avaliação da distribuição de carga em pavimentos de madeira através de ensaios “in situ” (p. 21-23). Guimarães, Portugal.

Lagomarsino, S.; Penna, A.; Galasco A. e Cattari, S. (2013) TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, *Engineering Structures*, 56(2013):1787-1799, doi:10.1016/j.engstruct.2013.08.002, issn:01410296.

Maio, R.; Ferreira T.M. e Vicente, R. (2015) Seismic vulnerability assessment of historical centres: case study of the old city centre of Faro, Portugal, *Journal of Risk Research*, doi:10.1080/13669877.2014.988285, in press.

Maio, R.; Vicente, R.; Formisano, A. e Varum, H. (2015) Seismic vulnerability of building aggregates through hybrid and indirect assessment techniques, *Bulletin of Earthquake Engineering*, doi:10.1007/s10518-015-9747-9, issn:1570-761X.

Neves, F.; Costa, A.; Vicente, R.; Oliveira, C.S. e Varum, H. (2012) Seismic vulnerability assessment and characterisation of the buildings on Faial Island, Azores, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(1):27-44, doi:10.1007/s10518-011-9276-0, isbn:1051801192.

Oliveira, C.S.; Lucas, A., Guedes, J. e Correia, J.H. (1990) MONOGRAFIA - 10 Anos após o Sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980 - Volume I e II. Regional Secretariat for Housing and Equipment (SRHE), Delegation of the Terceira Island of Azores, Labo-

Capítulo 6. Estudo de soluções de reforço sísmico de um edifício de alvenaria

ratório Nacional de Engenharia Civil, Angra do Heroísmo, Açores, Portugal.

Oliveira CS, Costa AG e Nunes JC (2008) Sismo de 1998 - Açores, uma década depois, ISBN: 978-989-20-1223-0.

Penna A.; Lagomarsino S. e Galasco A. (2014) A nonlinear macro-element model for the seismic analysis of masonry buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(2):159-179.

Portugal (2014) Ministerial Order No. 53/2014, of April 8, Ministry for Environment and Spatial Planning, in Official Gazette of the Republic of Portugal, 1st series, No. 69, Portugal.

Senaldi I.; Magenes G.; Penna A.; Galasco A. e Rota M. (2014) The effect of stiffened floor and roof diaphragms on the experimental seismic response of a full scale unreinforced stone masonry building, *Journal of Earthquake Engineering*, 18(3):407-443.

Simões, A.; Bento, R.; Cattari, S. e Lagomarsino, S. (2014) Seismic performance-based assessment of “Gaioleiro” buildings. *Engineering Structures*, 80(2014):486-500, doi:10.1016/j.engstruct.2014.09.025.

Simões, A.; Milošević, J.; Meireles, H.; Bento, R.; Cattari, S. e Lagomarsino, S. (2015) Fragility curves for old masonry building types in Lisbon, *Bulletin of Earthquake Engineering*, doi:10.1007/s10518-015-9750-1.

STADATA (2012) 3Muri Program, Release 10.0.1, url: <http://www.3muri.com>.

Turnšek, V. e Sheppard, P. (1980) The shear and flexural resistance of masonry walls. In: *Proc. Int. Research Conference on Earthquake Engineering*, Skopje, Japan, p.517-573.





CAPÍTULO 7

PERCEPÇÃO E COMUNICAÇÃO DO RISCO

1. PERCEPÇÃO E SENSIBILIZAÇÃO PARA O RISCO SÍSMICO EM PORTUGAL

Em sociedades frequentemente assoladas por desastres de origem natural ou humana, a implementação de estratégias e de ações de sensibilização, preparação, gestão e comunicação do risco encontra-se naturalmente facilitada (Kung & Chen, 2012). Pelo contrário, em sociedades com reduzida memória histórica e experiência em desastres, é mais difícil sensibilizar as populações da necessidade de implementar medidas efetivas de preparação, gestão e comunicação do risco.

O último grande evento sísmico ocorrido em Portugal remonta já ao ano de 1755. Conhecido como o Grande Terramoto de Lisboa de 1775, o evento subaquático de 1 de

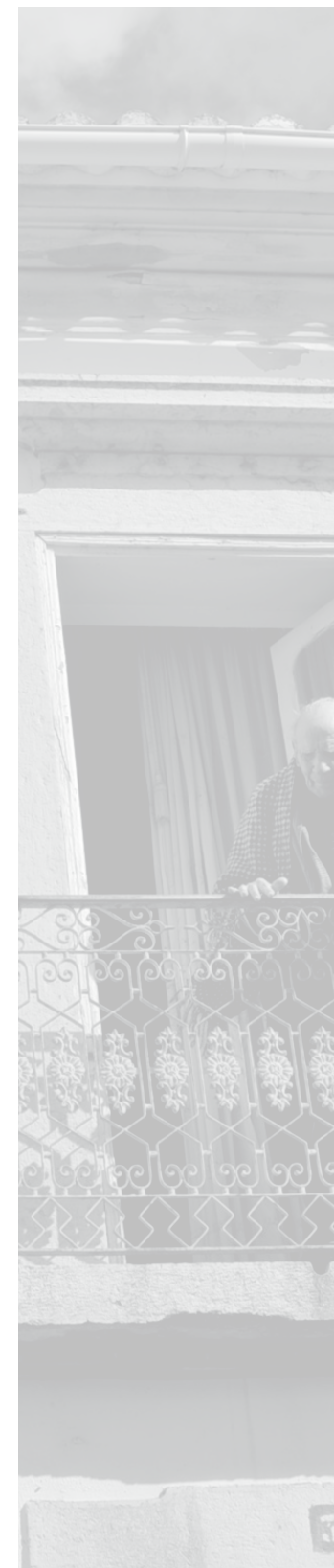
Novembro teve o seu epicentro em pleno Oceano Atlântico, a cerca de 200 km sudoeste da ilha Cabo-verdiana de São Vicente, atingindo uma magnitude estimada entre 8.5 e 9.0 na escala de Richter. Este terramoto, amplamente reportado na época, é um dos maiores, senão mesmo o maior, evento sísmico deste tipo registado na história do continente europeu. Sucedido por um enorme tsunami, com ondas entre 5 e 10 metros, e por violentos incêndios, a cidade de Lisboa ficou praticamente destruída na sequência deste evento. A costa sul do país foi também ela bastante afectada, incluindo a região do Algarve. Com um total estimado entre 10,000 e 100,000 vítimas mortais, este é tido como um dos eventos sísmicos mais mortíferos da história. Com uma perda financeira estimada entre 32% e 48% do produto interno bruto Português, é também um dos maiores desastres financeiros da história da Europa Ocidental. Pese embora a severidade

deste evento em particular, a atual atividade sísmica do território continental Português é maioritariamente latente, sendo caracterizada por pequenos abalos espaçados no tempo, e de muito baixa intensidade.

A percepção para o risco depende de diversos factores. No entanto, poder-se-á dizer que a percepção para um determinado risco surge da conjugação da ocorrência de um evento forte, com uma elevada probabilidade de retorno num curto espaço de tempo. Assim, e apesar da probabilidade e da frequência da ocorrência de fenómenos sísmicos em Portugal possa ser considerada moderada a elevada, a grande maioria dos eventos sísmicos ocorridos ao longo das últimas décadas foram de baixa magnitude (inferiores a 5.0 na escala de Richter), facto que contribuiu decisivamente para a baixa percepção do risco sísmico por parte da população portuguesa. Importa, no entanto, ressaltar o caso do arquipélago do Açores onde existe já uma cultura sísmica devidamente estabelecida e enraizada, decorrente da atividade sísmica mais frequente e do registo de magnitudes mais elevadas (superiores a 5.0 na escala de Richter).

A Associação para a Comunicação do Risco e da Gestão de Crise (ACRGC), a congénere nacional da *International Association of Risk and Crisis Communication* (IARCC), é um dos parceiros oficiais do projeto URBSIS. A IARCC é um associação não governamental independente com sede em Genebra, na Suíça, formada por uma rede de associações

nacionais. O objectivo da IARCC e das suas organizações nacionais é o aprofundamento da comunicação responsável e profissional e o seu reconhecimento como uma ferramenta importante na redução dos riscos e dos seus efeitos em termos de perdas e na prevenção de situações de crise e de catástrofe. A IARCC, apoiada pelas suas associações nacionais, constitui-se como uma plataforma para todos os intervenientes de qualquer projeto relacionado com a problemática do risco e da comunicação de crise. Do projeto URBSIS irá resultar um conjunto de recomendações técnicas, as quais, através da parceria com a ACRGC, irão ser expostas a uma plateia mais ampla, devendo desta forma contribuir para a melhoria do entendimento e da aceitação destas recomendações, não apenas por parte dos decisores políticos, mas também do público em geral. Esta componente da comunicação do risco vem ao encontro dos objetivos que a equipa científica da Universidade de Aveiro pretende atingir, nomeadamente: garantir a boa cooperação com as populações de dos núcleos em estudo (Faro, Faial e Aveiro) e seus representantes; garantir que o conteúdo da audição pública preparada pela equipa é compreendida pelas populações e que, em consequência desta, são definidas, planeadas e implementadas ações consonantes com os seus resultados; melhorar a estratégia de comunicação do risco e da crise e o planeamento de emergência no caso da ocorrência de um evento sísmico; e reforçar o seu nível de preparação e as suas capacidades globais de gestão de riscos.



2. METODOLOGIA DE COMUNICAÇÃO ASSOCIADA AO PROJETO URBSIS

De forma a definir o plano de comunicação de risco mais adequado, é necessário considerar de forma cuidadosa todos os aspectos subjacentes à comunicação. Um aspeto fundamental reside na definição clara dos princípios básicos e das linhas orientadoras relacionadas com o planeamento urbano, com a arquitetura e com as infraestruturas. Estas bases deverão ainda ser acompanhadas do conhecimento do estado da arte das ciências da sismologia e da engenharia sísmica. Encontrando-se os decisores e as comunidades familiarizadas com estes fundamentos, o passo seguinte será definir e implementar regras que reflitam tais fundamentos e standards.

Tal como ilustrado na Figura 1, o Nível A define “O que tem de ser feito” e o Nível B define “como deve ser feito”. Assim que estas definições estejam claras, os atores responsáveis poderão dar então início ao processo de comunicação e informar todos os intervenientes. Este processo de comunicação necessita de uma estratégia, na qual é definido o objetivo, a mensagem, o público alvo e as ferramentas (Nível C). A estratégia de comunicação será a base do plano de comunicação do risco, através da qual são definidos os elementos adicionais que permitem responder às seguintes questões essenciais: “Que ações e atividades devemos pôr em práti-

ca?”; “Quem será o responsável por essas ações?”; “Em que momento é que a comunicação terá lugar?”; “Qual será o orçamento para determinada atividade?”, e “Com base em que critério(s) podemos classificar uma campanha de comunicação bem sucedida?”.

A análise da perceção do risco sísmico em Portugal é essencial para a definição de um plano de comunicação do risco apropriado. Esse plano deve abordar a atual perceção do risco e da perigosidade sísmica da população residente no território continental Português e no arquipélago dos Açores.



Figura 1: A pirâmide da comunicação

Um dos paradoxos mais interessantes na literatura sobre percepção do risco sísmico é que os riscos que matam e amedrontam as populações, e os riscos que as alarmam e inco-

modam, são frequentemente muito diferentes (Covello, 2010). Isto é, vários riscos que preocupam e incomodam as pessoas, mas que apresentam poucas consequências. Paralelamente, existem alguns riscos que matam ou que causam danos elevados, mas que preocupam e incomodam pouco as pessoas. Este paradoxo é explicado em parte por fatores que afetam a forma como os riscos são percebidos (Covello, 2010). Essa percepção determina a resposta emocional da pessoa à informação do risco. Níveis de medo, preocupação, ansiedade, raiva ou indignação tendem a ser inferiores quando o risco é percebido e compreendido pelas populações, e relativamente bem caracterizado pela ciência, originando “vítimas estatísticas” causadas pela natureza ou por um “ato Divino”. Exemplo disto são os sismos que, causados pela natureza, são relativamente bem compreendidos pelas pessoas e que se encontram bem caracterizados pela ciência, produzindo “vítimas estatísticas”. Todos estes fatores contribuem para reduzir a consciência das populações para o risco sísmico.

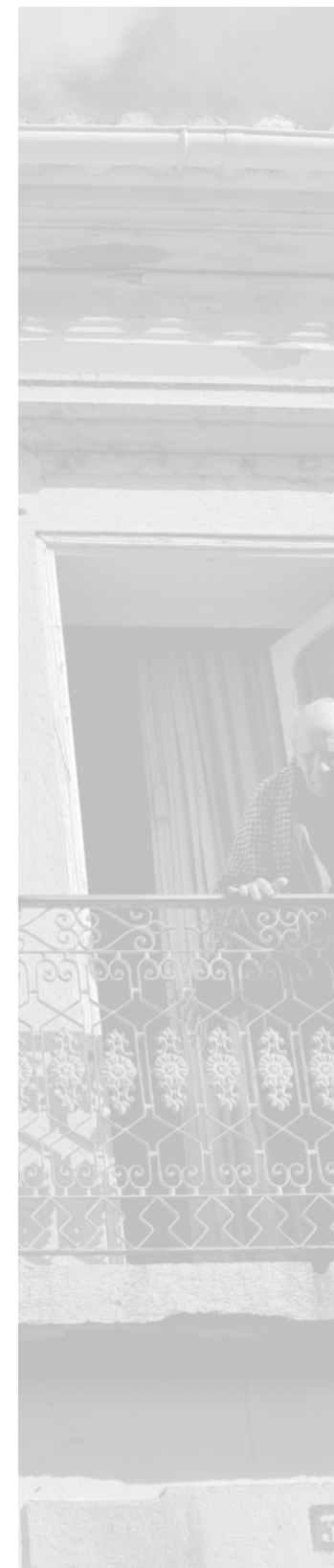
A consciência e a percepção do risco não depende unicamente da experiência e da memória pessoal de exposição ao risco. Uma outra forma de desenvolver consciência de risco e de moldar a percepção pessoal é através da criação e disseminação de informação, da utilização de ferramentas de comunicação e da organização de campanhas de percepção de risco. Note-se que algumas instituições Portuguesas têm sido bastante ativas neste campo. Como exemplo refira-se que a Autoridade Nacional para a Proteção Civil (ANPC)

organizou recentemente uma ação com o objetivo de incrementar a percepção e a preparação da população em caso de risco sísmico. A primeira edição da ação “A terra treme” decorreu a 11 de Outubro de 2013 e pretendeu informar a população acerca de como reagir em caso de sismo.

3. PERCEÇÃO DO RISCO: QUESTIONÁRIOS E RESULTADOS

A percepção do risco é uma questão na definição e adoção de medidas preventivas. De forma a desenvolver medidas efetivas de informação e comunicação do risco, a percepção do risco e os fatores que a influenciam devem ser conhecidos. Com esse intuito, no âmbito do projeto URBSIS foi elaborado e tornado público um questionário de percepção de risco, questionário esse cujos resultados são apresentados e discutidos nas seções seguintes.

A partir da informação recolhida e tratada, é notória a falta de entendimento dos inquiridos relativamente à questão da percepção do risco sísmico. Mais, tendo em conta que a grande maioria dos inquiridos reside na região do Algarve, uma das regiões que apresenta perigosidade sísmica mais elevada em Portugal continental, esta falta generalizada de entendimento sobre conceitos como vulnerabilidade, perigosidade, exposição e risco é particularmente grave e preocupante, sendo naturalmente merecedora de uma maior atenção. Assim, pela interpretação dos resultados, verifica-se claramente a urgência de tomar medidas no



sentido de melhorar a comunicação do risco sísmico em Portugal.

3.1. O Questionário

Com o objetivo explorar o nível de percepção e comunicação da população, foi criado um questionário público para avaliar o seu conhecimento em relação aos fenómenos sísmicos e o seu grau de preparação e resposta em caso de ocorrência de um sismo. Assim, elaborou-se um conjunto de questões básicas relacionadas com a atividade sísmica, com as características do edificado, acerca de como proceder em caso de um evento sísmico e sobre quem é responsável por coordenar as ações de reposta. Tal como foi já referido, este questionário foi pensado para avaliar o nível de conhecimento relativo ao risco sísmico, e por isso foram preparadas duas versões: a primeira versão para a comunidade técnica (engenheiros, arquitetos, decisores, etc.) e a segunda versão para o público em geral. Este capítulo

aborda apenas os resultados obtidos através do questionário para o público em geral.

O questionário foi realizado através de entrevista de rua aos residentes do núcleo urbano antigo de Faro e encontra-se atualmente online com o objetivo de alargar, tanto o número de questionários preenchidos, com o universo dos inquiridos. A Figura 2 apresenta o layout geral do questionário.

Importa ainda acrescentar que a amostra é composta por 135 indivíduos, 72 dos quais do sexo masculino, e os restantes 63, do sexo feminino. A maioria dos inquiridos encontra-se na faixa etária entre os 25 e os 50 anos (72.22% e 66.66% dos homens e das mulheres, respectivamente). Relativamente ao nível de instrução dos inquiridos, 79.17% dos homens e 90.48% das mulheres apresentam formação média ou superior (65 indivíduos, o que representa cerca de 48.15% do total da amostra).

urbis project - percepção e comunicação do risco sísmico - faro

Por favor preencha devidamente o seguinte questionário, respondendo com a maior honestidade e seriedade possíveis. Os seus dados usados para a realização de um estudo de percepção e comunicação do risco sísmico que está a ser desenvolvido ao abrigo do projeto URBISIS - Avaliação da Vulnerabilidade e Gestão do Risco Sísmico à Escala Urbana (FCT PTDC/CEM-URB/2014), financiado pela Faculdade de Ciências e Tecnologia. Os seus dados pessoais (nome) serão apenas usados para facilitar o processo de tratamento estatístico inerente a este questionário e em ocasião nenhuma serão divulgados a terceiros. Se desejar obter mais informações sobre o projeto URBISIS ou sobre o resultado deste questionário pode visitar o nosso site em urbis.web.ua.pt ou contactar-nos através do endereço de e-mail decivil-urbis@ua.pt.

*** Required**

Nome
Indique o seu primeiro e último nome.

Sexo *

Masculino
 Feminino

Idade *

< 18
 18 - 24
 25 - 34
 35 - 50
 > 50

Habilitações Académicas *
Indique apenas a mais recente habilitação.

1º e/ou 2º ciclo
 3º ciclo
 Ensino secundário
 Licenciatura
 Mestrado
 Doutoramento

Área de Atividade Profissional *

Alguma vez participou ou assistiu a algum evento de esclarecimento ou percepção sobre eventos sísmicos? *

Sim
 Não

Já sentiu algum evento sísmico? *

Sim
 Não

Como classifica o seu nível de conhecimento sobre fenómenos sísmicos? *

Excelente
 Bom
 Suficiente
 Insuficiente
 Desconhece por completo

Acredita que o perigo de tsunami possa estar associado ao risco sísmico no Algarve? *

Sim
 Não
 Sem opinião

Qual(uais) dos seguintes procedimentos deve adotar durante um sismo, caso se encontre no interior de um edifício? *

Baixar, proteger e aguardar
 Evacuar de imediato o edifício
 Procurar abrigo sob mesas ou outros vãos
 Dirigir-se imediatamente para a divisão mais pequena do edifício
 Nenhuma das respostas anteriores

Conheça as causas que estão na origem dos sismos ocorridos em Portugal? *

Aquecimento global
 Movimento das placas tectónicas
 Atividade vulcânica

Qual foi a região afetada pelo último grande evento sísmico que ocorreu em Portugal? *

Como classifica o risco sísmico do território nacional? *
Atribua uma classificação média para todo o território.

Muito elevado
 Elevado
 Moderado
 Baixo
 Muito baixo

Como classifica o risco sísmico em Faro? *

Muito elevado
 Elevado
 Moderado
 Baixo
 Muito baixo

A região de Bragança apresenta maior risco sísmico que Faro? *

Sim
 Não

Globalmente, como classifica a capacidade dos edifícios em Faro para resistir a um eventual sismo? *

Excelente
 Bom
 Suficiente
 Insuficiente
 Desconhece

Edifícios mais altos são de uma maneira geral mais seguros que os edifícios mais baixos? *

Sim
 Não
 Sem relação

A segurança estrutural dos edifícios face à ação sísmica está apenas relacionada com a qualidade dos respetivos materiais de construção? *

Sim
 Não
 Não sei

A definição de vulnerabilidade sísmica está relacionada com qual(uais) dos seguintes fatores? *

Características geométricas e mecânicas dos edifícios
 Região geográfica onde o edifício está inserido
 Histórico de ocorrências sísmicas do país

Sente que o país está preparado para responder a uma situação de emergência sísmica? *

Sim
 Não

Acredita que num futuro próximo (50 anos) a cidade de Faro possa ser atingida por um sismo semelhante ao de Lisboa de 1757? *

Sim
 Não

Acha necessário um sistema de certificação sísmica de edifícios novos e a reabilitar em Portugal? *

Sim
 Não

Na sua opinião, quem é a entidade responsável pela salvaguarda da sua segurança, na eventualidade de uma ocorrência sísmica? *

O governo
 A proteção civil
 As câmaras municipais
 As companhias de seguros
 Nenhuma das respostas anteriores

Muito obrigado pela sua participação neste estudo. *

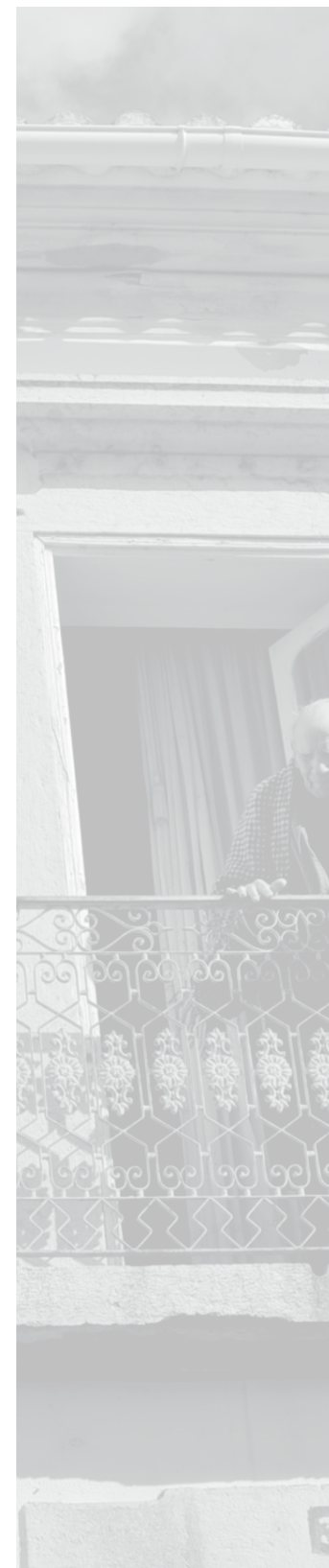
Respondi atentamente ao questionário e pretendo submeter as minhas respostas.

Never submit passwords through Google Forms.

Powered by Google Drive

This content is neither created nor endorsed by Google.
[Report Abuse](#) [Terms of Service](#) [Additional Terms](#)

Figura 2: Inquérito à população sobre percepção e nível de conhecimento sobre sismos



3.2. Exposição e Análise dos Principais Resultados

Os resultados obtidos através do tratamento dos resultados do questionário exposto na Figura 2 encontram-se apresentados e discutidos na presente secção. Com o objetivo de facilitar a sua análise, estes encontram-se divididos em quatro grandes grupos: memória da população em relação a eventos sísmicos passados; conhecimento geral acerca da atividade sísmica em Portugal; comportamento sísmico adequado de pessoas e edifícios e, capacidade de resposta

face a um evento sísmico (cada um deles tratado graficamente nas Figuras 3 a 6).

O primeiro grupo de questões, ilustrado na Figura 3, pretende avaliar o histórico da população em relação a eventos sísmicos passados, inquirindo, em primeiro lugar, se já sentiu algum sismo, e depois, se já participou em alguma sessão de esclarecimento sobre sismos e como classifica o seu nível de conhecimento neste campo.

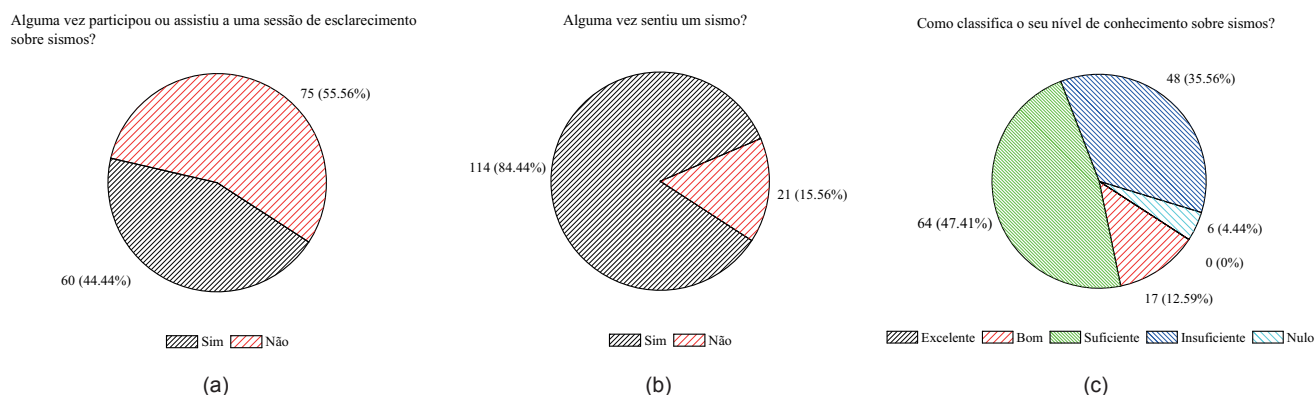


Figura 3: Resultados: Conhecimento sobre o fenómeno sísmico

Da análise da Figura 3 (a) é possível constatar que a grande maioria dos inquiridos (84%) reportam já ter sentido pelo menos um sismo ao longo da sua vida. Os restantes 16% afirmam nunca ter experienciado um evento sísmico. Esta é uma observação interessante uma vez que, de acordo com o

Instituto Português para o Mar e a Atmosfera (IPMA, IP), o território Português é atingido com uma frequência quase diária por pequenos abalos de baixa magnitude, alguns deles passíveis de serem sentidos pela população.

A segunda questão, ver Figura 3 (b), revela que 56% dos inquiridos assumem nunca ter participado em ações informativas sobre sismos. Tais iniciativas são fundamentais para instruir as populações sobre conceitos básicos relacionados com os fenómenos sísmicos e acerca de como devem proceder durante e após um evento. Recentemente, vários países, tais com a Turquia e a Itália, têm vindo a promover um investimento pró-ativo na educação para o risco sísmico, nomeadamente através de programas de sensibilização e prevenção e da publicação de manuais práticos (Elgin, 2009).

Em relação à terceira e última questão deste primeiro grupo

de respostas, apesar de mais de 56% dos inquiridos assumir nunca ter participado em ações informativas, 13% e 47% dos entrevistados consideram possuir um nível de conhecimento excelente ou bom, respetivamente, em relação a esta matéria. No entanto, 36% dos inquiridos consideram possuir um nível de conhecimento insuficiente ou inadequado.

O segundo grupo de questões, ilustrado na Figura 4, é dedicado à análise do conhecimento geral da população acerca da atividade sísmica em Portugal, quer no que se refere à memória de eventos passados, quer no que respeita ao risco sísmico da cidade de Faro.

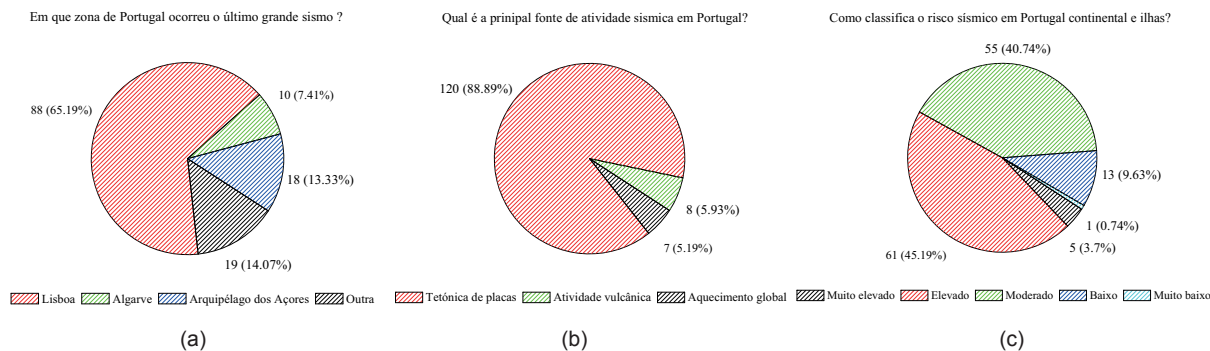
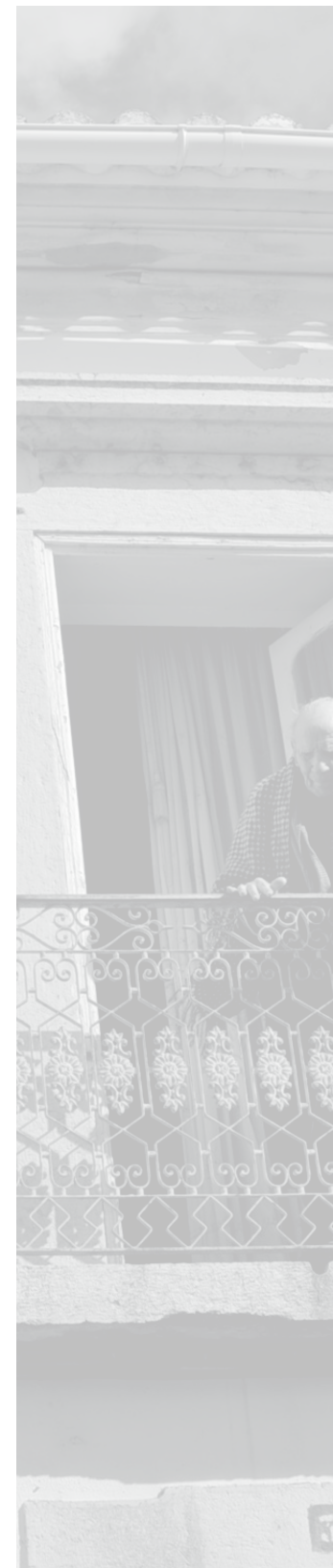


Figura 4: Resultados: Atividade sísmica no território Português

O objetivo da primeira questão foi avaliar a memória dos inquiridos em relação a eventos sísmicos importantes ocorridos em Portugal, isto é, eventos passados responsáveis por mortes ou por prejuízos materiais avultados. Importa

referir que, uma vez que estamos a considerar todo o território nacional, a resposta correta seria: no Arquipélago dos Açores, remetendo para o sismo ocorrido nas ilhas do grupo central no ano de 1998. No entanto, e uma vez que



este inquérito foi realizado apenas a nível local, a resposta Algarve foi também ela considerada correta, uma vez que o sismo de 1969 provocou danos severos na região. 65% dos inquiridos recorda o grande sismo de Lisboa, em 1755, como sendo o último grande sismo ocorrido em Portugal, seja por falta de memória de eventos posteriores ou por considerarem que este foi efetivamente o sismo mais devastador alguma vez sentido em Portugal e um dos mais importantes a nível mundial. De qualquer forma, este resultado merece alguma atenção até porque cerca de 14% dos inquiridos respondeu de forma incorreta a esta questão.

Quanto à segunda questão deste grupo, importa referir que os sismos, enquanto desastres naturais, ocorrem usualmente devido a duas causas principais, são elas, a interação entre placas tectónicas e a atividade vulcânica. A partir do resultado apresentado na Figura 4 (b), é evidente que a esmagadora maioria dos inquiridos, cerca de 92%, associa a atividade sísmica em Portugal à tectónica de placas. Apenas cerca de 3% dos inquiridos acredita que a atividade vulcânica é responsável por alguma atividade sísmica concentrada em certas zonas do território nacional, nomeadamente no arquipélago dos Açores. Finalmente, 5% dos inquiridos respondeu de forma incorreta, considerando que os fenómenos de aquecimento global são os responsáveis pela atividade sísmica em Portugal.

A terceira questão foi formulada com o objetivo de avaliar a opinião dos inquiridos em relação ao risco sísmico associado ao território Português (continental e ilhas). De acordo com o resultado obtido, cerca de 86% dos inquiridos classificam o risco sísmico associado ao território nacional como moderado a elevado, enquanto 4% classificam esse risco como sendo muito elevado e os restantes 10% baixo a muito baixo. Apesar da ambiguidade inerente a esta questão, vale a pena sublinhar a aparente consciência da grande maioria dos participantes, que classificaram o risco sísmico em Portugal entre moderado e elevado.

De seguida, a Figura 5 apresenta as respostas obtidas para as questões formuladas com o objetivo de obter a opinião dos inquiridos em relação à forma como as pessoas devem reagir e se os seus edifícios estão, ou não, preparados estruturalmente para resistir a um evento sísmico. Para a questão ilustrada na Figura 5 (a) deve salientar-se que, considerando um edifício corrente, duas respostas podem ser consideradas corretas: “Proteger-se, baixar-se e aguardar” e “Proteger-se sob uma mesa ou sob um vão de porta”. Assim, e no total, cerca de 58% dos inquiridos escolheram uma destas opções. No que respeita às respostas incorretas, 20% dos participantes acredita que evacuar o edifício de forma imediata é a decisão mais acertada. A propósito desta ideia é importante recordar que muitos dos eventos sísmicos

mais destrutivos ocorridos no passado provaram que este comportamento deve ser evitado uma vez que a queda de objetos pesados, nomeadamente de elementos não estruturais dos edifícios, tem sido uma das principais causas de

vítimas (Tiago M. Ferreira, Vicente, & Varum, 2014). Globalmente, cerca de 42% dos inquiridos desconhecem as recomendações básicas de segurança a adoptar em caso de sismo.

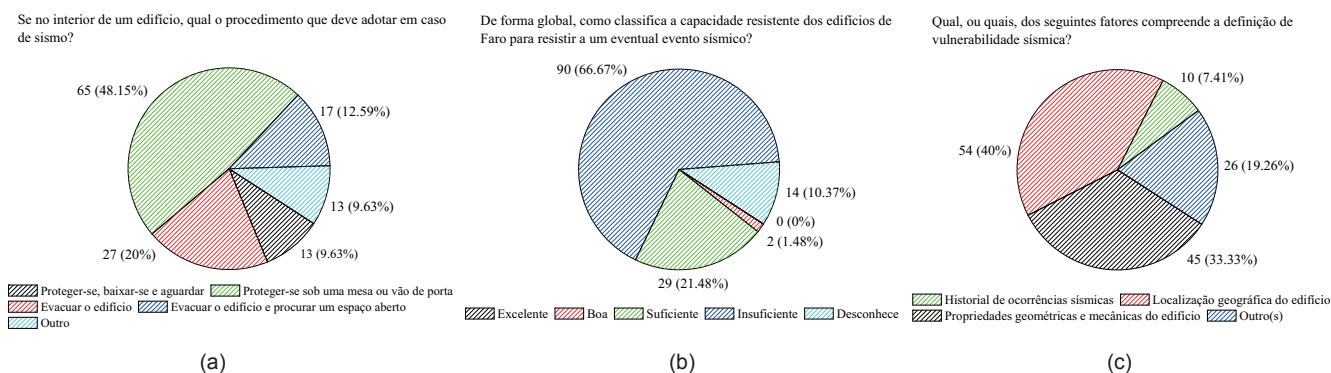


Figura 5: Resultados: Comportamento sísmico adequado de pessoas e edifícios

No que respeita à opinião dos inquiridos acerca da capacidade dos edifícios de Faro para resistir a um eventual evento sísmico, na Figura 5 (b), a grande maioria dos participantes, cerca de 67%, não tem dúvidas em classificá-la como insuficiente, tendo por base o mau estado geral deste edificado, particularmente dos edifícios localizados no núcleo urbano antigo da cidade, onde a percentagem de edifícios devolutos é muito elevada (ver Maio, Ferreira, Vicente, & Estêvão (2015)). Ainda assim, 21% dos inquiridos acredita que, de uma forma geral, o edificado da cidade de Faro apresenta resistência sísmica adequada e que por isso será capaz de

resistir a um eventual evento sísmico sem danos significativos. Finalmente, 10% dos participantes afirmam desconhecer a vulnerabilidade sísmica dos edifícios da cidade de Faro.

A última questão deste grupo pretende avaliar o nível de conhecimento da população acerca do conceito de vulnerabilidade. Como é sabido, a vulnerabilidade sísmica de uma estrutura pode ser descrita como uma propriedade intrínseca dessa estrutura e que reflete a sua predisposição para sofrer dano devido a uma determinada ação sísmica,



encontrando-se por isso associada às suas características físicas e estruturais. (Barbat et al., 2010; Tiago Miguel Ferreira *et al.*, 2013). Como pode ser observado na Figura 5 (c), apenas 33% dos inquiridos reconhece este conceito e conhece a definição correta de vulnerabilidade sísmica. As restantes respostas encontram-se distribuídas entre os inquiridos que acreditam que a localização geográfica do edifício influencia a sua vulnerabilidade sísmica (cerca de 40%), aqueles que consideram que a história de ocorrência

sísmicas em Portugal é um factor decisivo na sua vulnerabilidade (4%) e aqueles que consideraram, de forma incorreta, mais do que um destes factores (19%).

Finalmente, o quarto conjunto de questões pretende avaliar a percepção dos cidadãos em relação à preparação de Portugal para fazer face a um evento sísmico e sobre o papel das autoridades numa situação de catástrofe (ver Figura 6).

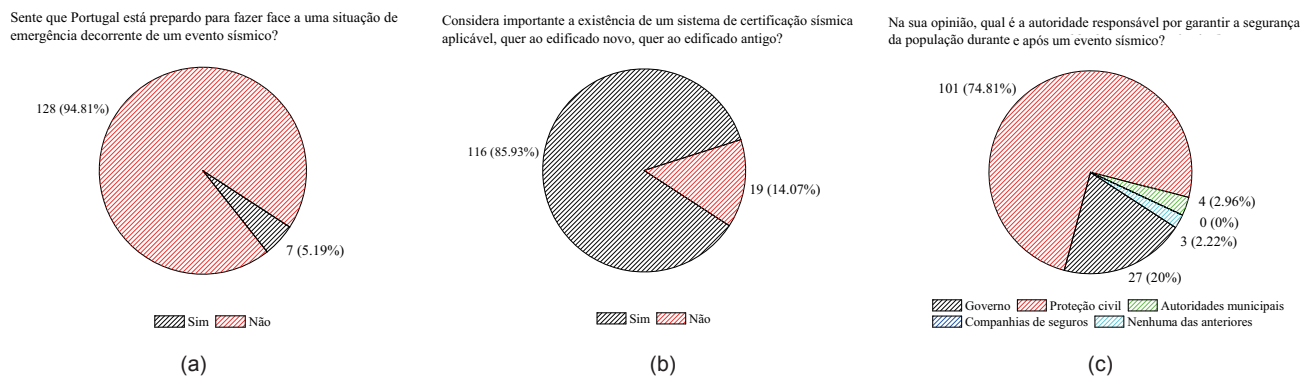


Figura 6: Resultados: Capacidade de resposta face a um evento sísmico

Pese embora na maioria das questões anteriores as respostas não tenham sido alarmantes, quando questionados sobre a preparação de Portugal para fazer face a um evento sísmico, 95% dos inquiridos não acredita que o nosso país esteja preparado para responder a tal desafio. A ineficácia ou a ineficiente divulgação dos planos estratégicos de resposta em caso de catástrofe, a sua lenta implementação e até

alguma negligência política, têm contribuído decisivamente para a criação desta imagem negativa.

Ultimamente esta questão tem criado alguma controvérsia em Portugal a propósito da criação e implementação de uma certificação sísmica do edificado novo e existente. Vários especialistas nacionais desta área têm vindo a defen-

der que proprietários e inquilinos devem ter consciência da resistência sísmica e da qualidade estrutural e sísmica do edifício onde habitam. Para tal, e à semelhança da certificação energética já existente em Portugal, a comunidade científica da especialidade e a Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica (SPES) propõem um sistema de certificação equivalente para a questão da resistência sísmica. Esta medida, que seria de extrema utilidade para o mercado segurador, tem sido debatida de forma acesa e encontra-se atualmente a aguardar acordo político. O ponto de vista dos inquiridos em relação a este assunto é claro, com 86% destes a considerar que se exige um sistema de certificação sísmica, tanto para edifícios novos, como para edifícios existentes. Finalmente, 75% dos entrevistados está consciente de qual a autoridade nacional responsável por assegurar a segurança da população durante e após um evento sísmico. Apenas 20% dos inquiridos atribui essa competência ao governo, o que é de certa forma compreensível, uma vez que é sobre o governo central que recai a responsabilidade de definir a estratégia nacional. Uma pequena percentagem das pessoas inquiridas, cerca de 5%, desconhece completamente qual a autoridade nacional responsável por este assunto.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Segundo foi possível apurar com este trabalho, a percepção da população residente na cidade de Faro em relação ao risco sísmico e à sua mitigação é insuficiente. Para combater

esta situação, e à semelhança do que tem vindo a ser feito em vários países através da implementação de projetos à escala nacional, a realização de campanhas de informação e educação para o risco sísmico deverão ser tidas como prioritárias. De entre os vários projetos passíveis de serem referenciados aqui, refira-se o *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP) e o *Istanbul Seismic Risk Mitigation and Emergency Preparedness Project* (ISMEP), ambos com a especificação de linhas de atuação nas áreas da percepção, educação e comunicação do risco sísmico. Uma referência especial ao UNISDR pelo desenvolvimento do guia “My city is getting ready”, um documento lato mas que define algumas das principais bases de ação e estratégia.

Há ainda muito trabalho a fazer, a vários níveis, pelas autoridades nacionais, nomeadamente: a realização de cursos técnicos de prevenção de desastres e emergência; reforço da educação, através do desenvolvimento e da implementação de mecanismos e protocolos com o objetivo de minorar os efeitos dos desastres naturais; realização de campanhas públicas de informação ao nível das cidades, tendo em vista a educação das população para as problemáticas do risco, nomeadamente em relação à prevenção e ao comportamento em caso de catástrofe.

Uma vez que se pretende que este estudo seja alargado a outras cidades, o conteúdo do questionário aqui apresentado será refinado e a sua disseminação melhorada. As questões deverão procurar avaliar o impacto direto que este tipo



de eventos teve ou tem na vida das pessoas, sendo que as questões abertas deverão dar a possibilidade ao inquirido de propor eventuais medidas de melhoria. Na fase final deste estudo, a análise conjunta de todas as questões deverá dar indicações valiosas sobre como deverá ser produzida informação relacionada com o risco sísmico e sobre a forma como essa informação deve ser comunicada, situação que tem sido pouco trabalhada pelas autoridades competentes, tal como testemunha o questionário realizado. Estes resultados permitirão ainda enriquecer a discussão em torno dos princípios básicos, das linhas orientadoras e dos procedimentos e regras relacionadas com a problemática do risco sísmico em Portugal.

5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

Barbat, A. H., Carreño, M. L., Pujades, L. G., Lantada, N., Cardona, O. D., & Marulanda, M. C. (2010). Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 17–38. doi:10.1080/15732470802663763

Covello, V. T. (2010). Strategies for overcoming challenges to effective risk communication. (R. L. Heath & H. D. O’Hair, Eds.) *Handbook of Risk and Crisis Communication*. Routledge.

Elgin, K. G. (2009). Istanbul Seismic Risk Mitigation and Emergency Preparedness Project (ISMEP). In *Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures* (pp. 1129–1140).

Ferreira, T. M., Vicente, R., Mendes da Silva, J. A. R., Varum, H., & Costa, A. (2013). Seismic vulnerability assessment of historical urban centres: case study of the old city centre in Seixal, Portugal. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(5), 1753–1773. doi:10.1007/s10518-013-9447-2

Ferreira, T. M., Vicente, R., & Varum, H. (2014). Seismic vulnerability assessment of masonry facade walls: development, application and validation of a new scoring method. *Structural Engineering and Mechanics*, 50(4), 541–561. doi:10.12989/sem.2014.50.4.541

Kung, Y.-W., & Chen, S.-H. (2012). Perception of Earthquake Risk in Taiwan: Effects of Gender and Past Earthquake Experience. *Risk Analysis*, 32(9), 1535–1546. doi:10.1111/j.1539-6924.2011.01760.x

Maio, R., Ferreira, T. M., Vicente, R., & Estêvão, J. (2015). Seismic vulnerability assessment of historical centres: case study of the old city centre of Faro, Portugal. *Journal of Risk Research*. doi:10.1080/13669877.2014.988285





CAPÍTULO 8

REFLEXÕES FINAIS E ENSINAMENTOS

1. REFLEXÕES FINAIS

Tal como foi referido no Capítulo 1 desta publicação, o projeto URBSIS centrou-se na avaliação da vulnerabilidade na gestão do risco sísmico à escala urbana, tirado partido de dois casos de estudo, as cidades de Faro e Horta. As várias tarefas desenvolvidas e articuladas neste trabalho, contribuíram para cimentar e desenvolver o conhecimento no domínio das estratégias de investigação e do comportamento do edificado antigo, particularmente através do estudo da vulnerabilidade sísmica dos edifícios em alvenaria antiga à escala urbana. Considera-se que este projeto contribuiu ainda para o estado atual do conhecimento nas referidas áreas, através da identificação e divulgação das principais fragilidades associadas a este tipo de construção e da avaliação e promoção de soluções de reabilitação e reforço mais eficientes.

A forte componente aplicacional do projeto URBSIS, patente no desenvolvimento de metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica, e na subsequente estimativa de danos e perdas, contribuiu não apenas para a implementação de uma cultura de gestão do risco, mas igualmente para o aumento da perceção e comunicação desse mesmo risco junto da sociedade técnica e civil. Esta convicção fundamenta-se nas conclusões a seguir indicadas para cada uma das áreas de trabalho desenvolvidas ao longo da investigação.

1.1 Gênese e análise dos processos de reabilitação urbana

A avaliação do património dos centros urbanos antigos é um exercício de aprofundamento do conhecimento da nossa história e da nossa própria identidade, associado ao

encorajamento da opção conservacionista de particulares e de entidades públicas que, sendo detentoras de imóveis isolados ou conjuntos edificados, devem interpretar a sua conservação não apenas do ponto de vista cultural, mas, essencialmente, como uma oportunidade para um desenvolvimento económico e social sustentável.

Em termos nacionais, a consciencialização crescente e a acumulação de experiências de ações de reabilitação urbana, mais ou menos conseguidas, colocou finalmente o tema da reabilitação urbana na ordem do dia, sendo atualmente uma das prioridades estratégicas ao nível nacional e regional. A reabilitação urbana é um processo de criação de valor e de renovação da competitividade dos centros núcleos urbanos, potenciando o seu desenvolvimento. Nesse sentido, os efeitos da implementação de estratégias e de políticas de conservação urbana corretas não atingirão apenas os aspetos de melhoria das condições de habitabilidade e de conforto do edificado, mas terão também, naturalmente, inúmeros impactos socioeconómicos.

1.2 Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico de núcleos urbanos antigos

É amplamente reconhecida a necessidade de avaliar a vulnerabilidade e segurança sísmica do edificado existente. No entanto, este objetivo exige uma ação de planeamento e uma estratégia apoiada num enquadramento legal estruturado, com regulamentação específica, de modo a criar crité-

rios definidores dos níveis de avaliação das construções em função do seu grau de importância, funcionalidade e interesse patrimonial.

A metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica desenvolvida neste projeto é adequada para avaliações da vulnerabilidade sísmica à escala urbana, regional ou territorial.

Em relação a outras metodologias mais complexas, as denominadas “*first level approaches*” apresentam como principais vantagens a fácil implementação e o baixo dispêndio de recursos, possibilitando a construção de cenários de dano e de perda para áreas extensas, os quais podem servir posteriormente de base à definição e implementação de diversos tipos de ações, sejam elas, de reabilitação ou reforço das construções existentes, ou de planeamento de emergência. Importa sublinhar que os resultados produzidos com base neste tipo de metodologias deverão ser interpretados estatisticamente, dada a incerteza associada à definição e avaliação dos parâmetros definidores da vulnerabilidade. Todavia, a análise comparativa entre cenários determinísticos de dano resultantes da aplicação da metodologia e cenários reais de dano observados após o sismo que atingiu em 1998 a ilha do Faial, no arquipélago dos Açores, permitiu calibrar alguns desses parâmetros através da redefinição dos seus pesos. Após a calibração, e tendo por base o referido confronto, foi possível observar uma melhoria substancial na capacidade da metodologia para captar e descrever as





principais vulnerabilidades associadas ao comportamento sísmico de edifícios antigos de alvenaria, apresentando uma boa correlação entre as fragilidades identificadas e as características estruturais e construtivas dos edifícios.

O uso de uma ferramenta SIG associada a uma base de dados sobre o edificado é crucial na avaliação da vulnerabilidade, auxiliando na gestão, visualização e análise dos resultados. A programação de todos os procedimentos, a visualização espacial dos resultados, sejam estes de vulnerabilidade, estimativa de danos ou avaliação de perdas associadas ao cálculo probabilístico (identificando zonas no núcleo urbano onde o edificado é mais vulnerável, onde existe risco de obstrução das vias de acesso ou onde existe uma maior concentração de potenciais vítimas), fazem do SIG uma ferramenta de extrema utilidade no apoio às estratégias de mitigação e gestão do risco. A edição de informação sobre o edificado permite ainda que o SIG seja utilizado para efetuar análises de sensibilidade. Numa perspetiva de redução da vulnerabilidade, refira-se que a criação de cenários de dano para diferentes intensidades sísmicas, alterando os valores da vulnerabilidade do edificado, possibilita que os mesmos sejam rapidamente analisados e comparados, graças à programação de todo o procedimento em SIG, desde o cálculo da vulnerabilidade à estimativa de danos e perdas.

1.3 Verificação da segurança e análise de estratégias de reforço

Com recurso a modelos numéricos para a simulação do comportamento sísmico dos edifícios é possível conhecer as suas fragilidades e os mecanismos de dano ou colapso mais prováveis para determinado nível da ação sísmica. Partindo da análise numérica de dois edifícios selecionados pelos autores com base na sua representatividade em termos construtivos e tipológicos, pretendeu-se, não apenas investigar e avaliar a sua resposta sísmica, mas também, definir estratégias de reforço otimizadas em termos de desempenho e economia.

São necessárias orientações para as estratégias de intervenção, pela definição dos critérios e técnicas de reforço mais adequadas, correlacionadas com as ferramentas de análise e avaliação da segurança sísmica, de forma a permitir a reavaliação do risco e a quantificação da sua redução após intervenção. A nível nacional, não existe nenhum documento com carácter normativo para a definição de uma estratégia de avaliação e verificação da segurança sísmica do edificado. Pela sua natureza, o documento italiano “Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale” é um excelente exemplo neste âmbito, definindo linhas orientadoras para a avaliação e mitigação do risco, com referências aos códigos de construção e regulamentos nacionais. Salienta-se por isso a atual necessidade de ser criado, a nível nacional, um documento com natureza e âmbito semelhantes.

2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

As principais conclusões retiradas das diversas tarefas realizadas no decurso deste projeto de investigação, as quais foram já sendo apresentadas e discutidas ao longo dos vários capítulos que compõem esta publicação, encontram-se resumidas nas secções seguintes.

2.1. A Perigosidade Sísmica e a Exposição Associada ao Território Português

Em relação à problemática da perigosidade sísmica e da exposição associada ao território nacional, tratada no Capítulo 2, importa realçar que, apesar dos consideráveis avanços científicos conseguidos ao longo dos últimos 40 anos, a definição da perigosidade sísmica em Portugal Continental apresenta ainda inúmeras incertezas associadas a diversos fatores, tais como: i) a escassez de dados referentes a sismos históricos ocorridos em território nacional, situação que só poderá ser corrigida com o recurso à paleo-sismologia e à arqueo-sismologia; ii) a atual dificuldade em deduzir leis de atenuação para magnitudes médias, motivada pelo facto dos dados instrumentais existentes serem referem apenas a sismos de magnitudes inferiores a 6, levando a que, para analisar intervalos de magnitudes superiores, seja necessário recorrer a leis de outras regiões com ambiente sismo-tectónico semelhante ou a processos de simulação de rotura de falhas; e iii) o desconhecimento dos processos

geológicos associados a elevados períodos de retorno, situação que leva a que não seja possível definir claramente as falhas potencialmente mais ativas.

Importa no entanto salientar que a investigação atual, nas suas diversas componentes, entre as quais se insere o tratamento e interpretação dos registos sísmicos efetuados numa rede sísmica de grande qualidade, irá certamente permitir, a médio prazo, uma redução significativa das incertezas referidas.

2.2. A Vulnerabilidade Sísmica do Edificado Antigo

Tal com discutido no Capítulo 3, a seleção de uma determinada metodologia de avaliação da vulnerabilidade deverá ser realizada em função das características particulares e dos objetivos do trabalho a desenvolver. Nesse sentido, é fundamental perceber que a eficiência de uma determinada metodologia depende diretamente das características do edificado em estudo, da escala a que é aplicada e dos recursos envolvidos na avaliação.

Finalmente, note-se que as metodologias baseadas na opinião de especialistas são extremamente subjetivas e de morosa aplicação, ao contrário do que acontece com as metodologias de análise estrutural que, uma vez definidos de forma correta os parâmetros envolvidos na análise, se revelam extremamente fiáveis e eficientes.





Em relação ao Capítulo 4, dedicado à avaliação da vulnerabilidade sísmica do edificado antigo, tendo por base a análise do núcleo urbano antigo de Faro, importa referir que é fundamental que a legislação que regula a reabilitação do edificado antigo se estenda para além da conservação da fachada, criando condições e eventuais contrapartidas para os interessados em preservar e reabilitar o edifício na sua globalidade, e com às técnicas e soluções construtivas originais. Parece claro que existem ainda situações em que as políticas e as estratégias atuais de incentivo à reabilitação urbana não conseguem dar uma resposta ótima ao binómio “segurança estrutural e sísmica - valor patrimonial”.

Uma avaliação rigorosa e competente da vulnerabilidade sísmica dos núcleos históricos antigos, complementada com soluções de reforço estrutural e sísmico adequadas, podem reduzir significativamente os danos e as perdas humanas e económicas decorrentes de futuros eventos. Através de projetos de reabilitação bem concebidos, baseados, nomeadamente, nos princípios definidos pelos principais standards internacionais, é possível, sem um acréscimo significativo dos custos globais da empreitada, promover a reabilitação estrutural e sísmica do património edificado.

2.3. Reforço Sísmico de Edifícios Antigos: O Núcleo Urbano Antigo da Cidade da Horta

As conclusões que se retiram do trabalho apresentado no Capítulo 5, dedicada ao reforço sísmico de edifícios antigos, vão ao encontro da necessidade de melhorar a perceção pública, educação e investigação relacionada com a mitigação do risco sísmico. Os resultados obtidos em termos de perdas e danos para o núcleo urbano antigo da cidade da Horta não são tão gravosos como no caso do Bairro Ribeirinho de Faro, isto porque o índice de vulnerabilidade médio do edificado apresenta uma grande influência sobre as formulações aqui utilizadas para tais estimativas. Ainda assim, estes resultados podem dizer-se bem ajustados ao dano observado em toda a área de estudo, após o 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, traduzida pelo decréscimo 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 global dos edifícios (“*box-behaviour*”).

Finalmente, no que diz respeito às perdas económicas, é importante sublinhar que as várias soluções de reforço considerados neste estudo apresentaram uma boa relação custo-benefício, principalmente para as intensidades macrossísmicas mais elevadas, $I_{EMS-98} = IX$ a XII.

2.4. Análise Numérica do Comportamento Sísmico de Edifícios Antigos

O Capítulo 6 apresenta a análise do comportamento sísmico não-linear de um edifício tradicional em alvenaria de pedra, modelado com recurso ao software comercial 3Muri®.

De uma forma global e excluindo o efeito de excentricidade das análises executadas, apenas a solução que simula o efeito da aplicação de rebocos armados no edifício verifica as exigências normativas recomendadas em termos de Estado Limite Último, quer pelo Eurocódigo 8, quer pela norma Italiana NTC. Apesar de ainda carecerem de validação e aplicação a outros edifícios representativos de tipologias diferentes, os resultados obtidos parecem confirmar a influência muito pronunciada da qualidade da alvenaria no desempenho sísmico da estrutura. Por outro lado, vale a pena referir que o facto de ter sido ignorada a presença das escadas exteriores em alvenaria (que estruturalmente se

comportam como corpos rígidos) poderá ter agravado os resultados obtidos.

Assim, recomenda-se que sejam realizadas futuras análises com recurso a outras ferramentas, com o objetivo de avaliar o efeito destes corpos rígidos no desempenho global da estrutura e a influência das soluções de reforço aqui apresentadas no comportamento para fora do plano da estrutura.

2.5. Perceção e Comunicação do Risco

Finalmente, o trabalho apresentado no Capítulo 7 desta publicação permitiu avaliar o nível de perceção da população residente na cidade de Faro em relação ao risco sísmico. Os resultados obtidos apontam para que essa perceção do risco seja efetivamente baixa, e, neste sentido, parece óbvio que as autoridades responsáveis têm ainda muito trabalho a fazer, a vários níveis, no sentido de contrariar esta tendência. De várias possíveis ações, refira-se: a realização de cursos técnicos de prevenção de desastres e emergência; o reforço da educação, através desenvolvendo e implementação de mecanismos e protocolos com o objetivo de minorar os efeitos dos desastres naturais; e a realização de campanhas públicas de informação ao nível das cidades, tendo em vista a educação da população para as problemáticas do risco, nomeadamente no que toca à prevenção e ao comportamento em caso de catástrofe.





3. COMENTÁRIO FINAL

Como comentário final, saliente-se a importância que este tipo de trabalhos de investigação assume, numa temática em que a necessidade e a urgência de intervenção está cada vez mais patente, a nível nacional e internacional. É absolutamente fundamental avaliar o atual estado de conservação e a vulnerabilidade sísmica do nosso edificado antigo, implementando políticas de intervenção à escala nacional, regional e municipal. Caso contrário, os nossos edifícios antigos, de elevado e reconhecido valor patrimonial, permanecerão em processo acelerado de degradação, contribuindo para a degeneração da identidade cultural e patrimonial das nossas cidades.

Refira-se ainda que a intervenção num edifício antigo requer necessariamente a participação de uma equipa multidisciplinar, uma vez que a formação em engenharia não é (ou não tem sido), em geral, suficiente para cultivar o respeito pelas construções antigas. Nesse sentido é também extremamente importante promover e fomentar a formação continuada de técnicos, dotando-os de competências teóricas e práticas nas atividades de reabilitação, manutenção e reforço do edificado antigo.

