

**A ESTABILIDADE ESTRUTURAL E A
VULNERABILIDADE DOS EDIFÍCIOS EM CENTROS
HISTÓRICOS FACE AO RISCO SÍSMICO**
**THE STRUCTURAL INTEGRITY AND
VULNERABILITY TO SEISMIC RISK OF BUILDINGS
IN HISTORIC CENTRES**

Romeu Vicente

Universidade de Aveiro (Portugal)
romvic@ua.pt

Rui Maio

Universidade do Minho (Portugal)
ruiamai@ua.pt

Tiago Miguel Ferreira

Universidade do Minho (Portugal)
tmferreira@civil.uminho.pt

João Estevão

Universidade do Algarve (Portugal)
jestevas@ualg.pt

Hugo Rodrigues

Instituto Politécnico de Leiria (Portugal)
hugo.f.rodrigues@ipleiria.pt

Resumo: Presentemente os países europeus estão a despertar para uma cultura da gestão de risco integrado, quer aa nível nacional quer em termos municipais. A gestão de risco é um processo que engloba uma série de ações que apoiam a implementação de medidas que reduzam o potencial de perda na ocorrência de um evento, por exemplo, de natureza sísmica. Porém, a avaliação do risco sísmico é apenas uma das tarefas da teia complexa da gestão de risco e definição de estratégias de intervenção e controlo de um sistema urbano. De entre muitos objetivos que se perspetivam no âmbito do planeamento e gestão urbana, com este artigo abordar a avaliação de risco no domínio específico da segurança estrutural, com enfoque na avaliação do risco sísmico, cujas graves consequências fazem parte da nossa memória

coletiva e, infelizmente, em alguns casos, da memória viva de diversas comunidades. A gravidade dos danos que deles decorrem é motivo suficiente para uma forte valorização das estratégias de prevenção, planeamento e mitigação que diminuam a sua probabilidade, limitem as suas consequências e permitam uma ação continuada de melhoria, já que só utopicamente se poderá considerar a possibilidade de transformação integral e imediata das realidades urbanas em situações de risco “zero”.

Palavras-chave: Gestão de risco sísmico, vulnerabilidade sísmica, centros históricos, cenários de dano, estratégias de intervenção.

Abstract: Several cities in Europe are coming around to a culture of risk-integrated management and assessment at national and city scale. Risk management is a process that covers a series of actions that support the implementation of measures to reduce the potential loss in the wake of catastrophic events like earthquakes, for example. However, vulnerability and risk assessment consist of a complex web of actions and strategic decisions relating to urban systems. Urban planning and management can cover many objectives, but the scope of this paper concerns risk assessment in the specific area of structural safety. It focuses on earthquake risk assessment, whose serious consequences are sometimes unfortunately part of the collective memory of communities. The severe potential loss caused by these events is a good enough reason for valuing prevention and preparedness strategies, and mitigation and planning measures, all of which might help reduce the physical, economic and social consequences and allow continued improvement actions, since a zero-risk environment is a utopian dream.

Keywords: Seismic risk management, seismic vulnerability, historic centres, damage scenarios, intervention strategies.

Introdução e Enquadramento

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. Mais recentemente, em Agosto de 2018, uma nova Resolução da Assembleia da República recomendou ao Governo que fosse obrigatório o estudo da resistência sísmica em obras de reabilitação (Portugal, 2018). Deste modo, é essencial o desenvolvimento de metodologias que permitam a avaliação socioeconómica das consequências dos sismos.

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 tsunamis é uma ameaça real e que deve ser minimizado de forma proactiva através de uma estreita colaboração entre todas as entidades intervenientes neste processo.

A vulnerabilidade dos núcleos urbanos antigos, no contexto da avaliação e mitigação do risco sísmico e outros fenómenos naturais, é uma temática que tem vindo a ganhar cada vez mais força nas últimas décadas, considerada essencial para a definição e implementação de estratégias de planeamento, gestão e requalificação ur-

bana. A avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios existentes deve colocar-se não só em relação aos edifícios isolados de relevante importância histórica e cultural, mas também, em relação aos aglomerados de construções em centros urbanos.

A análise do desempenho de edifícios em sismos recentemente ocorridos, tem permitido identificar os aspetos estruturais e não estruturais que mais influenciam a sua vulnerabilidade, e consequentemente tipificação dos mecanismos de dano mais frequentes. Neste artigo serão apresentados os resultados de avaliação da vulnerabilidade segundo uma metodologia validada, baseada num índice de vulnerabilidade que consequentemente permite a avaliação do dano e criação de cenários de perda (económicas e humanas). Neste sentido, para além de tecer algumas considerações gerais sobre o risco sísmico do território nacional, nomeadamente da região do algarve, e ainda da a nossa perceção coletiva do risco, são apresentados e discutidos neste artigo a aplicação da metodologia proposta, e sua integração numa plataforma de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

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

Nos núcleos urbanos antigos, são peças fundamentais deste desafio a garantia de segurança, de conforto e de salubridade, num equilíbrio (que se deseja sustentado e sustentável) com a preservação das memórias e da cultura local, e que não se esgota na manutenção, reabilitação e valorização do património edificado, mas que nele encontra fortes razões e raízes. Debatermo-nos presentemente com a questão da reabilitação urbana, que se espera possa vir a contribuir, como desejado, para uma progressiva melhoria da qualidade de vida das cidades e respetivas comunidades, e para uma valorização sustentada dos núcleos urbanos antigos. No entanto, antecede a este grande desígnio a articulação com outras medidas e ações, nomeadamente, a avaliação de riscos, formulando a questão: Avaliação de Riscos: O Primeiro Passo para a Reabilitação Urbana?

Risco Sísmico: Lições, percepção e comunicação, sismicidade do território

Por definição, o risco sísmico resulta da convolução (ou do produto, de uma forma mais simplificada) entre a perigosidade sísmica, a vulnerabilidade sísmica e a exposição ao fenómeno. De entre estes três fatores, o risco sísmico é passível de ser reduzido através da diminuição da vulnerabilidade ou a exposição, dado que a perigosidade sísmica é algo inerente ao local, e não podendo ser por isso ser reduzida através da atividade humana, em situações correntes. No campo teórico, o risco sísmico de qualquer construção nova realizada num qualquer local de Portugal deveria, ou poderia ser, igual. Para tal, seria necessário que as construções a realizar em locais de maior perigosidade sísmica apresentassem uma menor vulnerabilidade sísmica, para que o risco seja igual, admitindo neste caso uma igual exposição ao fenómeno.

O facto dos sismos destruidores que têm afetado a região algarvia apresentarem normalmente grandes períodos de retorno, cria as condições para que as populações negligenciem o risco sísmico, por se perder a memória histórica dos eventos sísmicos do passado. Assim, é de grande importância a realização de estudos científicos sobre a problemática dos sismos, assim como comunicar às populações os resultados, de uma forma clara e intuitiva.

Percepção e comunicação do risco: público geral e comunidade técnica

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 e 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.

Embora a percepção para o risco depende de inúmeros fatores, 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 6.0 na escala de Richter , para sismos afastados, e a 5.0 para sismos próximos), facto que contribuiu decisivamente para a baixa perceção do risco sísmico por parte da população portuguesa. Importa, no entanto, ressalvar o caso do arquipélago do Açores onde existe uma cultura sísmica estabelecida e enraizada, decorrente de uma atividade sísmica mais frequente e do registo de magnitudes mais elevadas (superiores a 5.0 na escala de Richter).

Apenas com base na promoção de programas de educação e sensibilização é possível capacitar a população para a necessária perceção do risco. A incorporação deste tópico nos currículos escolares e nas ações de informação motivará a médio prazo outros movimentos e associações com programas e objetivos na construção de comunidades mais resilientes. No Japão, as crianças em idade pré-escolar são recetoras de formação e informação de como reagir e atuar em caso de sismo. As autoridades japonesas alegam que este investimento salvou imensas vidas nos sismos mais recentes.

A educação e formação são fundamentais na preparação de entidades públicas, tais como polícia, bombeiros, autoridades municipais, equipas médicas, professores, entre outros, na resposta em caso de desastre. As organizações não governamentais (NGOs) são também entidades com importante papel nas operações pós-sismo. Deve existir um programa de formação atualizada e com uma periodicidade anual que contemple eventos nacionais de consciencialização para o risco de terramoto, como sucede no caso de muitos países que sofreram perdas humanas e económicas devastadoras. Estes aspetos, da sensibilização, educação e formação para o Risco terá necessariamente de corresponder a uma longa e persistente campanha de informação transversal a várias áreas funcionais da sociedade da designada “roda da resiliência” (ver fig. 1), uma vez que, contrariamente ao que sucede em países frequentemente atingidos por terremotos, a ausência de eventos com impacto significativo em Portugal continental nas últimas décadas, tende a induzir um relaxamento natural nos níveis de preocupação e de prevenção da população em geral.

Foi realizado um trabalho para avaliar o nível a percepção e comunicação na mitigação do risco de terramoto com base na discussão de um conjunto alargado de resultados obtidos através de uma campanha de sensibilização e recolha de informação realizada no âmbito do projeto de investigação “URBSIS: Avaliação e Gestão do Risco Sísmico à Escala Urbana”, os quais permitiram avaliar o nível de percepção dos residentes no Bairro Ribeirinho da cidade de Faro para a temática. De acordo com este trabalho (Maio *et al.*, 2018), a percepção da comunidade em relação ao risco de terramoto e à sua mitigação é insuficiente. Esta insuficiência pode ser combatida, à semelhança do que tem vindo a ser feito em vários países, através da implementação de projetos à escala nacional e pela realização de campanhas de informação e educação para o risco sísmico. De entre os vários projetos passíveis de serem referenciados, salienta-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 de terramoto. 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.

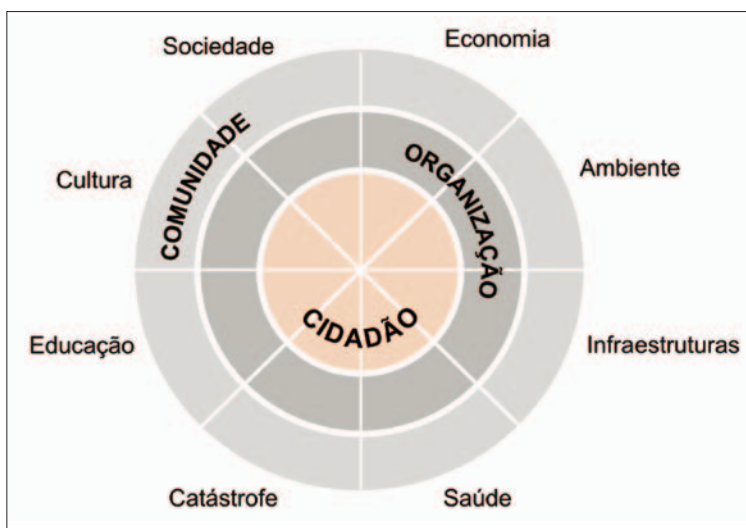


Fig. 1 - Roda de Resiliência.

Fig. 1 - Resilience wheel.

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.

Risco sísmico da região do Algarve

Ao longo da história, o Algarve tem sido sujeito aos efeitos destrutivos de sucessivos sismos, o que influenciou o tecido urbano das localidades afetadas por esses eventos naturais, cujos centros históricos correspondem a muitas das Áreas de Reabilitação Urbana hoje existentes na região (Estevão, 2017). Destes, podemos destacar os sismos do século XVIII (Chester e Chester, 2010), designadamente os ocorridos em 1719 (com maior incidência de danos na zona de Portimão), em 1722 (que afetou o Algarve de forma generalizada, mas com maior gravidade entre Tavira e Albufeira), e o grande sismo de 1755 (que causou destruição massiva um pouco por todo o Algarve). Contudo, existem relatos históricos de outros sismos ainda mais antigos, designadamente desde o ano 60 AC (que terá afetado todo o território de Portugal continental), com destaque para os sismos ocorridos em 382 e em 1356 (Mendonça, 1758), que terão afetado bastante o Algarve. Em 1856, também ocorreu um sismo que provocou danos em Loulé (Estevão, 2017). O último sismo a provocar destruição no Algarve ocorreu em 1969, e apresentou maior incidência de danos entre Sagres e Lagos, tendo ocorrido alguns colapsos em construções de alvenaria tradicional (Marécos e Castanheta, 1970).

Não existe consenso na comunidade científica sobre qual é o grau do risco sísmico do Algarve, designadamente em face das incertezas sobre a sua real perigosidade sísmica, tendo sido publicados muitos estudos contraditórios ao longo dos anos. Existem estudos que apontam para valores muito baixos referentes às máximas intensidades observadas

no Algarve ao longo da história (Caldeira *et al.*, 2014), enquanto que outros apresentam intensidades máximas generalizadas de X (Teves-Costa *et al.*, 2019), o que corresponde a um grau de destruição máximo já muito elevado. Por outro lado, também os estudos probabilísticos realizados para o Algarve apresentam enormes diferenças quanto aos valores de aceleração de pico associados a um determinado período de retorno (normalmente 475 anos). No limite inferior dos resultados podemos dar como exemplo o estudo realizado no contexto do projeto internacional SHARE (Giardini *et al.*, 2014), onde a perigosidade sísmica do Algarve aparece como sendo menor do que a de Lisboa, e no limite superior podemos considerar o mapa de perigosidade definido na NP EN 1998-1:2010 (CEN, 1998), que estabelece o Algarve como sendo a região de Portugal com maior valor de aceleração de cálculo de referência, designadamente entre Sagres e Portimão, que foram, por exemplo, as zonas mais afetadas pelo sismo de 1969 (Marécos e Castanheta, 1970). No entanto, também foram realizados muitos outros estudos de perigosidade sísmica para o Algarve (Estevão, 2014), com diferentes abordagens ao problema e modelos matemáticos, cujos resultados podem ser considerados, grosso modo, enquadrados dentro deste intervalo de resultados.

Existe ainda uma elevada incerteza em relação à possível existência e localização das falhas ativas que influenciam a perigosidade sísmica do Algarve. No entanto, nos últimos anos a evolução do conhecimento nesta matéria tem sido notável, e hoje já temos um maior entendimento sobre os mecanismos focais dos sismos que têm ocorrido nos últimos anos (Custódio *et al.*, 2016). A utilização de redes sismográficas submarinas tem possibilitado verificar que a sismicidade observada em algumas zonas não é aleatória, mas que está associada a zonas de geração específicas (Silva *et al.* 2017), tais como a zona do Canhão de São Vicente (a zona mais próxima do Algarve), a zona da Bacia Abissal da Ferradura, ou a zona do Banco de Gorringe, localizadas no mar a sudoeste do Algarve. O elevado número de perfis sísmicos realizados no fundo do mar nas últimas décadas, inclusive no contexto da prospeção de gaz natural, também tem levado ao surgimento de novas teorias sobre a sismotectónica do Algarve e zona envolvente (Ramos *et al.*, 2017). Já em relação à sismicidade existente na região do Algarve, esta é essencialmente difusa, com exceção da zona do maciço de Monchique (Veludo *et al.*, 2017), não sendo evidente uma associação da sismicidade observada às falhas classificadas como ativas em documentos oficiais.

Um outro fator que tem muita influência na perigosidade sísmica dos centros históricos do Algarve, está relacionado com os efeitos geológicos locais, sendo que os terrenos de fundação mais brandos, possuidores de menores valores de velocidade de propagação das ondas S, aqueles que apresentam uma maior perigosidade, principalmente quando esses solos estão depositados sobre um substrato rochoso com elevado contraste de impedância, originando grande amplificação das vibrações sísmicas (Estevão, 2017).

Em relação à vulnerabilidade sísmica do edificado construído no Algarve, muito embora ainda exista muito incerteza sobre o assunto, essa incerteza é claramente inferior quando comparada com a referente à perigosidade sísmica da região. O valor medio da vulnerabilidade sísmica dos edifícios está muito relacionado com a época em que foram construídos, designadamente tendo em conta o código sísmico em vigor na altura, assim como o sistema estrutural usado, sendo que os edifícios de alvenaria tradicional normalmente apresentam uma maior vulnerabilidade sísmica, pois foram executados ainda antes dos primeiros códigos sísmicos portugueses. No entanto, as características resistentes das paredes de alvenaria de pedra das construções tradicionais do Algarve também são muito dependentes das características da geologia da região, dado que os materiais de construção provinham diretamente da natureza. Assim, tendencialmente, as construções tradicionais existentes na serra algarvia apresentam menor vulnerabilidade do que as existentes em zonas do litoral, nomeadamente em muitos dos centros históricos das cidades com zonas ribeirinhas (Estevão, 2017).

Lições de eventos sísmicos anteriores

Das lições aprendidas da ocorrência de vários eventos sísmicos das últimas quatro décadas, nomeadamente na Europa, conseguimos identificar e encontrar semelhanças a vários níveis, desde da tipologia construtiva, características sociais da população, níveis de perceção do risco sísmico, ordenamento urbano, sistema governativo e de proteção civil. Muitas medidas/ações necessárias não podem ser

tomadas de forma individualizada, mas sim de modo integrado num processo de planeamento a médio prazo para a estratégia nacional de redução do risco e vulnerabilidade, influenciando o desenvolvimento regional e urbano, bem como do edificado, rede de infraestruturas e sistemas de informação e alerta à sociedade (ver fig. 2). São muitas as referências, conferências e entidades mundiais, que já sistematizaram as ações essenciais com o objetivo de uma abordagem integrativa da gestão do risco (Estevão, 2017).



Fig. 2 - Dez principais linhas de ação de boas práticas no âmbito do risco sísmico.

Fig. 2 - Ten principal guidelines of good practice in the context of risk management.

Vulnerabilidade Sísmica do Edificado de Faro: Metodologias de Avaliação

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. Numa lógica de gestão de riscos à escala urbana, de entre as várias metodologias de avaliação baseadas na vulnerabilidade observada, modelos simplificados ou análise detalhada, as metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica aqui apresentadas, são capazes igualmente de avaliar um grande número de edifícios num curto espaço de tempo, são por isso muito interessantes pela adequabilidade da escala de avaliação e na possibilidade de utilização dos resultados no mapeamento espacial e na construção de cenários de dano e perda, bem como na gestão de riscos e apoio ao planeamento de emergência.

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.

Inicialmente, a cidade de Faro era composta por uma ilha muralhada, denominado Vila Adentro. Posteriormente, com a construção dos edifícios administrativos e religioso, houve a necessidade de expandir a cidade. Na sequência dessa expansão, surgiram os núcleos urbanos do Bairro da Mouraria e do Ribeirinho (Maio *et al.*, 2015). Atualmente, o centro histórico de Faro encontra-se subdividido em três núcleos edificados, associados às áreas de reabilitação urbana delimitadas pela Câmara Municipal de Faro. Na fig. 3 apresenta-se os 3 núcleos: Vila Adentro (zona A), Bairro da Mouraria (zona B) e Bairro Ribeirinho (zona C).

Na fig. 4 encontram-se representada as duas zonas urbanas que serão alvo de estudo, correspondente ao Bairro da Mouraria (B) e ao Bairro Ribeirinho (C).

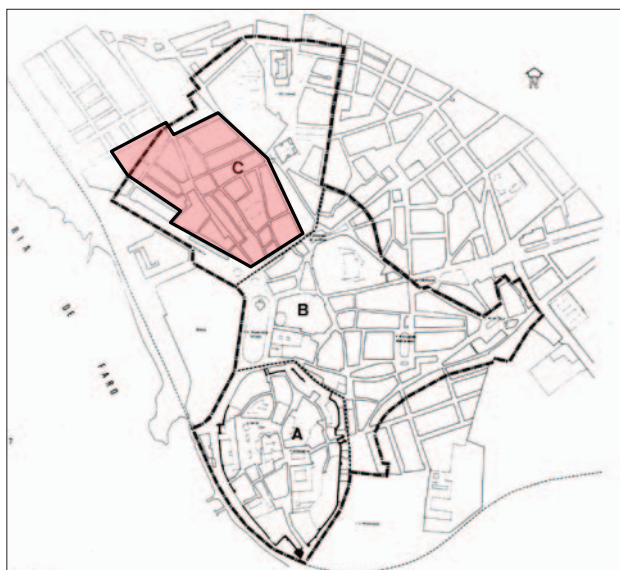


Fig. 3 - Localização dos 3 núcleos edificados: Vila Adentro (zona A), Bairro da Mouraria (zona B) e Bairro Ribeirinho (zona C).

Fig. 3 - Location of the 3 built-up areas: Vila Adentro (zone A), Bairro da Mouraria (zone B) and Bairro Ribeirinho (zone C).



Fig. 4 - Vista aérea do caso de estudo constituído pelo Bairro Ribeirinho (C) e pelo Bairro da Mouraria (B) (fonte: Google Street View).

Fig. 4 - Aerial view of the case study consisting of the Ribeirinho neighbourhood (C) and the Bairro da Mouraria (B) (source: Google Street View).

Vulnerabilidade sísmica de construções tradicionais em alvenaria

A formulação do índice de vulnerabilidade sísmica utilizada neste trabalho, apresentada de forma resumida na TABELA I, 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 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.*, 2013).

TABELA I - Formulação da metodologia do índice de vulnerabilidade.
TABLE I - Formulation of the vulnerability index method.

Parâmetros A		Classe C _{vi}				Peso	Peso relativo
		B	C	D	P _i		
Grupo 1. Sistema construtivo							
P1	Tipo de sistema resistente	0	5	20	50	0.75	46/100
P2	Qualidade do sistema resistente	0	5	20	50	1.00	
P3	Resistência convencional	0	5	20	50	1.50	
P4	Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0.50	
P5	Número de pisos	0	5	20	50	1.50	
P6	Fundações e tipo de solo	0	5	20	50	0.75	
Grupo 2. Irregularidades e interações							
P7	Posição e interação no agregado	0	5	20	50	1.50	27/100
P8	Configuração em planta	0	5	20	50	0.75	
P9	Regularidade em altura	0	5	20	50	0.75	
Grupo 3. Pavimentos e cobertura							
P10	Alinhamento de aberturas	0	5	20	50	0.50	15/100
P11	Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1.00	
P12	Sistema de cobertura	0	5	20	50	1.00	
Grupo 4. Estado de conservação e outros elementos							
P13	Patologias e estado de conservação	0	5	20	50	1.00	12/100
P14	Elementos não estruturais	0	5	20	50	0.50	

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 (ver Equação 1) 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.

Vulnerabilidade Sísmica da Construção em Betão Armado

A metodologia utilizada foi desenvolvida por Silva *et al.* (2016) onde é sugerido que a escolha da metodologia deve ter em atenção a natureza do edifício, a escala a que é aplicada e os recursos envolvidos no processo. Pretendendo fazer uma avaliação da vulnerabilidade sísmica à escala urbana, os métodos simplificados serão os que mais se adequam, não descurando o rigor e a confiança dos resultados do estudo. Na metodologia proposta é calculado um índice de vulnerabilidade para cada edifício, através de 8 parâmetros associados a diferentes características (ao tipo de solo, ao enquadramento urbano e ao edifício individual). Os parâmetros são classificados em 4 classes de vulnerabilidade, C_{vi} : A, B, C e D. A cada parâmetro é associado um peso, p_i , que poderá variar entre 0.50 e 2.00 dependendo da importância do parâmetro no cálculo do índice de vulnerabilidade (ver TABELA II). O valor do índice de vulnerabilidade, I_v^* é obtido através da soma ponderada, dada pela Equação 2, variando entre 0 e 600.

$$I_v^* = \sum_{i=1}^8 C_{vi} \times p_i \quad (2)$$

De forma a tornar mais fácil a sua utilização e interpretação, o valor do índice é posteriormente normalizado para variar entre 0 e 100, assumindo a designação, I_v .

TABELA II - Índice de vulnerabilidade, I_v^* : parâmetros e pesos associados.

TABLE II - Vulnerability index, I_v^ : parameters and assigned weights.*

Parâmetro		Classe de vulnerabilidade, C_{vi}				Peso, p_i
		A	B	C	D	
P1	Implantação do edifício	0	5	20	50	1.50
P2	Posição no quarteirão	0	5	20	50	0.50
P3	Idade do edifício	0	5	20	50	1.50
P4	Irregularidade em planta	0	5	20	50	2.00
P5	Irregularidade em altura	0	5	20	50	2.00
P6	Existência de mecanismo de <i>soft-storey</i>	0	5	20	50	2.00
P7	Presença de pilares curtos	0	5	20	50	2.00
P8	Outros elementos	0	5	20	50	0.50

Valorização dos resultados de avaliação da vulnerabilidade e mapeamento espacial

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm a capacidade de relacionar e gerir um vasto conjunto de informação, como por exemplo, características construtivas, identificação do valor patrimonial, vulnerabilidade do edificado e estimativa de dano. No presente trabalho utilizou-se software de Informação Geográfica (ESRI, 2005) de forma a analisar e a organizar espacialmente os resultados. O ambiente SIG combina informação gráfica georreferenciada (informação vetorizada e ortofotomapas) com informação em formato de tabelas, associada às entidades gráficas. Neste caso específico, um polígono, que corresponde a um edifício, está associado a uma série de atributos e características. O SIG criado permite uma visão global de toda a área de estudo.

Cenários de dano e perdas para edifícios de alvenaria tradicional

Dadas as dificuldades encontradas durante o período de inspeção e levantamento dos edifícios em construção tradicional 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.*, 2013). 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 fig. 5 (a), através do mapeamento do I_v para cada edifício. Já na fig. 5 (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).

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 3 e 4, desenvolvidas para esse fim por Bernardini *et al.* (2007):

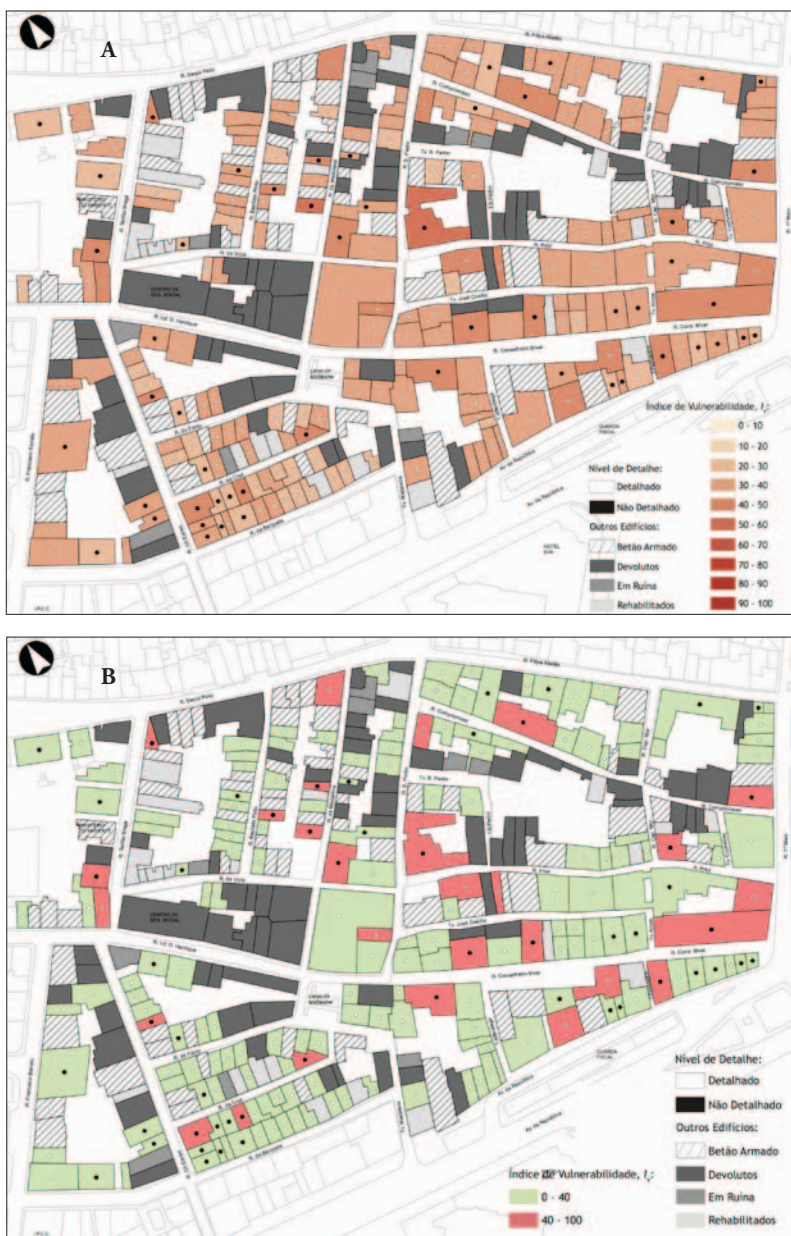


Fig. 5 - Mapeamento do índice de vulnerabilidade I_v para o Bairro Ribeirinho de Faro (a) e identificação dos edifícios com $I_v > 40$ (b).

Fig. 5 - Mapping of the vulnerability index I_v for the Bairro Ribeirinho in Faro (a) and identification of the buildings with $I_v > 40$ (b).

$$\mu_D = 2.5 \times \tanh \left[\frac{I + 6.25 \times V - 13.1}{Q} \right]; 0 \leq \mu_D \leq 5 \quad (3)$$

$$V = 0.592 + 0.0057 \times I_v \quad (4)$$

onde I representa a perigosidade sísmica descrita em termos de intensidade macrosísmica, 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 fig. 6 (a) e (b) apresenta os cenários de grau de dano médio obtidos para intensidade macrosísmicas, I, VIII e IX, respetivamente.

A estimativa de edifícios colapsados e inutilizáveis, resultado de extrema importância e utilidade para as entidades governamentais e de proteção civil, foi 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 fig. 7.

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 $I_{v,médio} = 34.12$, é apresentada na fig. 8. 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.

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 nº370/2013 (Portugal, 2013). Com base neste dado, a fig. 9 apresenta a estimativa global dos custos de reparação para o Bairro Ribeirinho de Faro.



Fig. 6 - Cenários de dano para intensidades $I_{(EMS-98)} = VIII$ (a) e $I_{(EMS-98)} = IX$ (b).

Fig. 6 - Damage scenarios for intensities $I_{(EMS-98)} = VIII$ (a) and $I_{(EMS-98)} = IX$ (b).

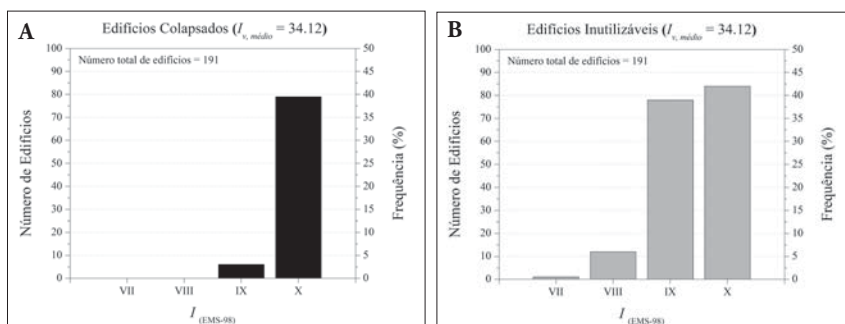


Fig. 7 - Estimativa do número de edifícios colapsados (a) e edifícios inutilizáveis (b).

Fig. 7 - Estimation of the number of collapsed buildings (a) and unusable buildings (b).

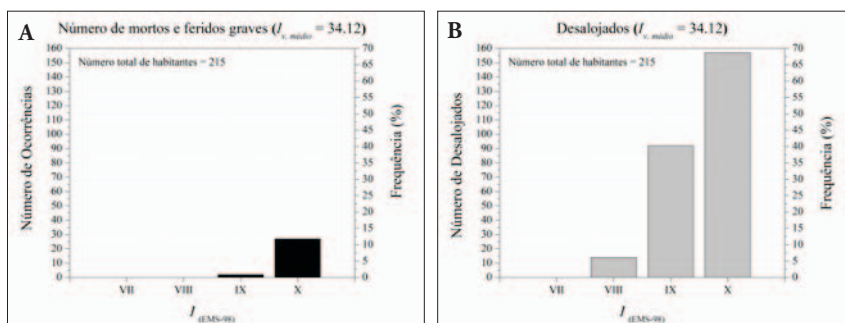


Fig. 8 - Estimativa do número de mortos e feridos graves (a) e desalojados (b).

Fig. 8 - Estimation of the number of deaths and seriously injured (a) and homeless (b).

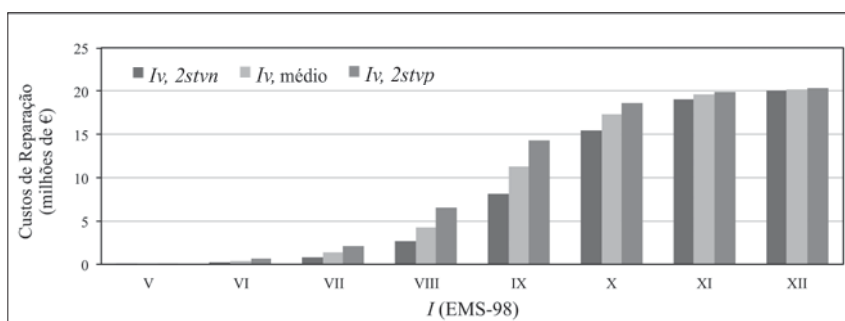


Fig. 9 - Estimativa do custo de reposição para diferentes intensidades macrosísmicas.

Fig. 9 - Estimation of replacement cost for different macroseismic intensities.

Cenários de dano e perdas para edifícios de betão armado

No caso do edificado em betão armado, aplicando a metodologia descrita na Seção 3.2 aos 166 edifícios identificados obteve-se um índice de vulnerabilidade médio $I_{v,médio}$ de 29.36. O desvio de padrão associado, σ , é aproximadamente 13.40. Cerca de 77% dos edifícios avaliados têm um índice de vulnerabilidade inferior a 40, sendo que apenas 5% dos edifícios apresentam um índice com valor superior a 50. O índice de vulnerabilidade máximo e mínimo obtido foi de 66.30 e 3.33, respetivamente. Na fig. 10 é representada a distribuição espacial dos índices de vulnerabilidade dos edifícios em betão armado avaliados. Através da escala de cores é possível perceber que grande parte dos edifícios tem um índice de vulnerabilidade relativamente baixo. O valor do índice de vulnerabilidade mais alto encontra-se associado a um edifício localizado no Bairro da Mouraria, na Rua Vasco da Gama, tendo 4 pisos visíveis, sendo que o rés-do-chão é destinado a uma zona comercial e os restantes pisos são de habitação. Para além disto, apresenta uma diferença entre alturas de piso e um recuo no último piso. Devido a estes fatores mais penalizadores, o índice de vulnerabilidade resulta no valor mais elevado em de todo o edificado avaliado. O menor índice de vulnerabilidade determinado é de 3.33 e corresponde a um edifício que está localizado, também ele, no Bairro da Mouraria, Largo de São Francisco. Constituído apenas por dois pisos, este edifício não tem qualquer zona comercial e não apresenta irregularidades em planta. Assim sendo, a maioria dos parâmetros têm classificação A, tendo isso influência direta no valor reduzido do índice de vulnerabilidade.

Após a determinação do índice de vulnerabilidade de cada edifício, foi estimado o grau de dano, μ_D , para cada estrutura e para diferentes intensidades macrosísmicas, $I_{(EMS-98)}$. Segundo a calibração feita por Silva *et al.* (2016), o grau de dano, variável entre 0 e 5, pode ser determinado através da Equação 5. Já o valor de V foi obtido através da Equação 6.

$$\mu_D = 2.839 \times \left[1 \times \tanh \left(\frac{I + 10.79 \times V - 11.6}{5} \right) \right] \quad (5)$$

$$V = -0.02 + I_v \times 0.0104 \quad (6)$$

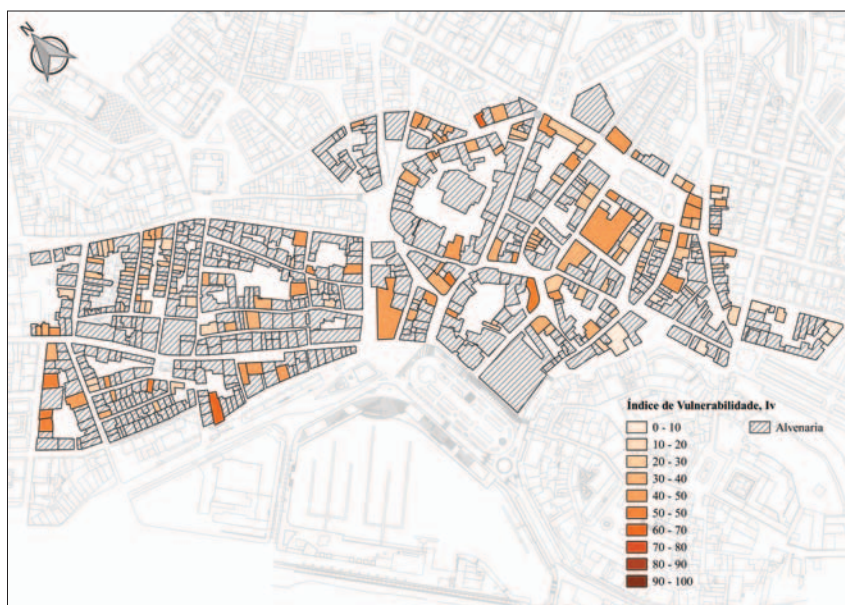


Fig. 10 - Distribuição espacial do Índice de Vulnerabilidade, I_v .

Fig. 10 - Spatial distribution of the vulnerability index, I_v .

Para as intensidades $I_{(EMS-98)}$ entre V a VIII, uma grande percentagem dos edifícios apresenta danos entre D1 e D3, ou seja, as estruturas poderão sofrer danos leves (danos não estruturais) até danos severos (danos estruturais moderados). Para as intensidades mais elevadas, entre VII e VIII, como já esperado, os edifícios poderão sofrer danos entre D3 e D5. Para $I_{(EMS-98)}$ igual a IX e X cerca de 20% e 72%, respetivamente, dos edifícios poderá sofrer dano que provoca colapso. Na secção seguinte é estudado o efeito de uma possível ação de reforço que conduzirá a uma redução do índice de vulnerabilidade das estruturas de betão armado, e consequentemente a estimativa do grau de dano também irá diminuir. Assim, pretende-se fazer uma análise comparativa entre os resultados de pré e pós-reforço das estruturas.

De acordo com a avaliação da vulnerabilidade sísmica descrita na secção anterior, os edifícios analisados que apresentam maior índice de vulnerabilidade estão sujeitos a eventuais mecanismos *soft-storey*. Assim, uma forma de reduzir a vulnerabilidade sísmica poderia passar por reduzir a probabilidade de ocorrência deste

mecanismo, introduzindo soluções de reforço. Desta forma, optou-se por aplicar uma solução de reforço a partir de dissipadores de energia no piso térreo. Esta solução, já estudada em detalhe para outros edifícios em (Furtado *et al.*, 2015) permite corrigir o mecanismo de *soft-storey*, com soluções leves e que se podem enquadrar na arquitetura dos edifícios, e se bem dimensionada não requerem o reforço das fundações. Assim sendo, foi considerada a implementação desta solução de reforço nos 101 edifícios que apresentavam esta fragilidade e que anteriormente foram avaliados com uma classe de vulnerabilidade D no parâmetro relativo ao mecanismo de *soft-storey* passando assim a sua classificação a classe A.

A alteração da classe de vulnerabilidade do parâmetro P6 conduz, naturalmente, a uma diminuição do índice de vulnerabilidade. Assim, obteve-se um $I_{v,médio}$ de 19.18 e um desvio de padrão, de 8.94, ou seja, o I_v e o $I_{v,médio}$ têm um decréscimo de aproximadamente 35% e 33%, respetivamente, em relação ao valor inicial. Na fig. 11 é apresentado o histograma de distribuição de valores dos índices de vulnerabilidade, pré- e pós-reforço.

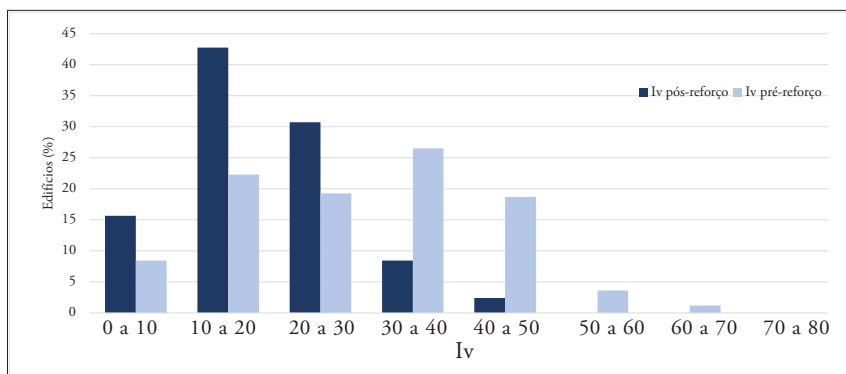


Fig. 11 - Comparação dos índices de vulnerabilidade de pré- e pós-reforço.

Fig. 11 - Comparison of vulnerability indexes pre- and post-strengthening.

Constata-se desta comparação que o índice de vulnerabilidade diminuiu de forma significativa. Cerca de 98% dos edifícios têm uma classe de vulnerabilidade inferior a 40, enquanto apenas 2% apresenta um I_v entre 40 e 50. O índice de vulnerabilidade máximo e mínimo é de 49.6 e 3.33, respetivamente.

Na fig. 12 apresenta-se a distribuição do grau de dano relativo, do pré e pós-reforço, para diferentes intensidades macrosísmicas. Como esperado, após reforço das estruturas, os graus de dano decrescem. Um dos exemplos, deste decréscimo mais significativo é para a intensidade macrosísmica XII. Neste caso, a percentagem de dano D5 pós-reforço é bastante mais baixa em relação aos valores iniciais, o que significa que diminui o número de edifícios que colapsam.

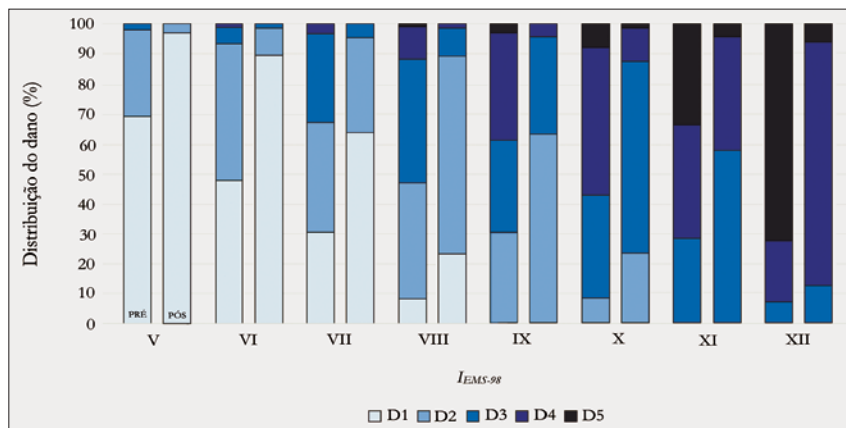


Fig. 12 - Distribuição dos graus de dano pelas diferentes intensidades macrosísmicas (PRÉ-R: pré-reforço e PÓS-R: pós-reforço).

Fig. 12 - Distribution of the degree of damage for different macroseismic intensities (PRÉ-R: pre-strengthening and PÓS-R: post-strengthening).

Na fig. 13 a 15 são apresentados os cenários de dano para ações sísmicas caracterizadas por intensidades macrosísmicas, $I_{(EMS-98)}$, entre VIII e X. Através da observação das figuras nota-se uma grande diferença na escala de cores para a mesma intensidade macrosísmica após aplicação da ação de reforço.

As curvas de fragilidade são outra forma de representar o dano esperado, definindo a probabilidade de excedência de um determinado grau. Estas são obtidas diretamente da função de densidade beta cumulativa, para um determinado valor do índice de vulnerabilidade. As curvas de fragilidade definem uma relação entre a intensidade sísmica e o dano, em termos de uma função de probabilidade contínua, expressando assim a probabilidade cumulativa condicional de atingir ou superar

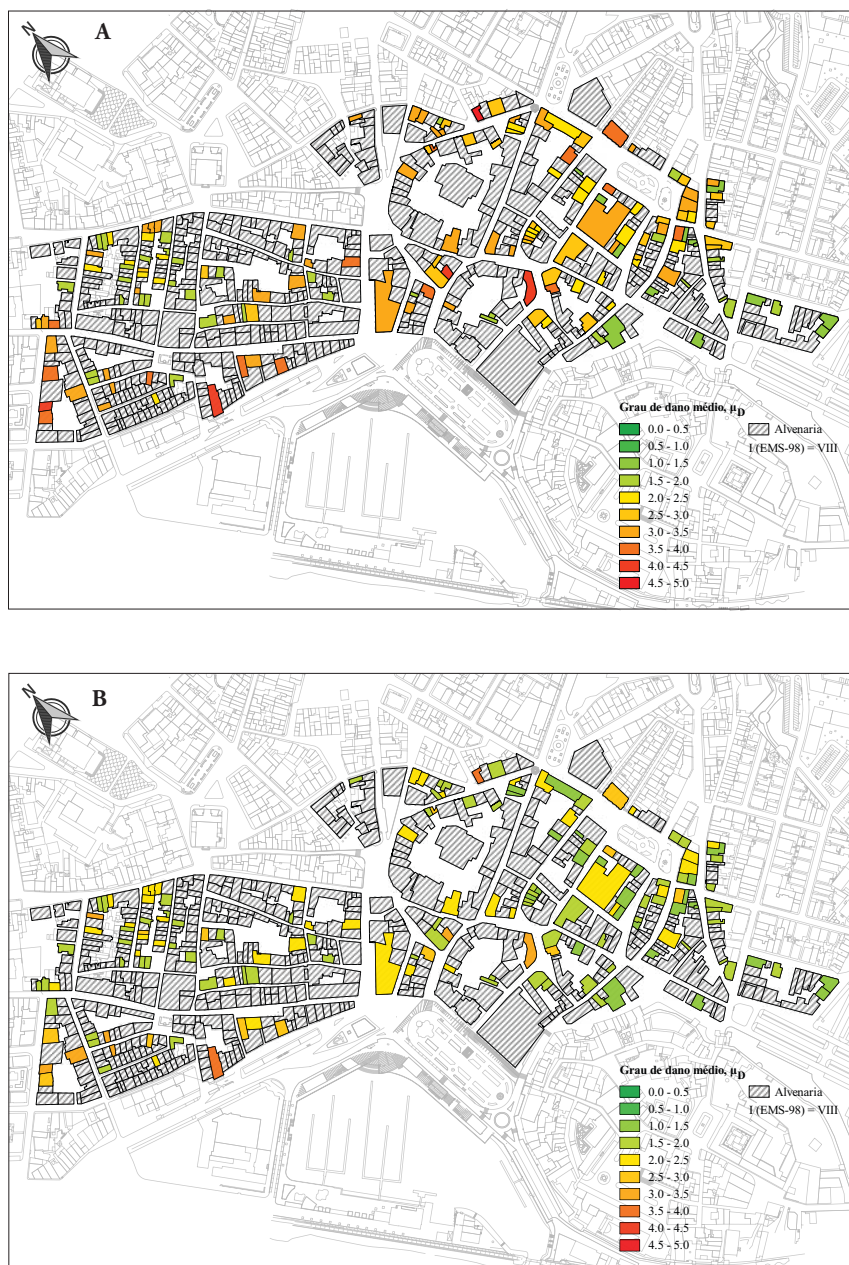


Fig. 13 - Cenário de dano para $I_{(EMS-98)}=VIII$, a) pré-reforço e b) pós-reforço.

Fig. 13 - Damage scenario for $I_{(EMS-98)}=VIII$, a) pre-strengthening and b) post-strengthening.

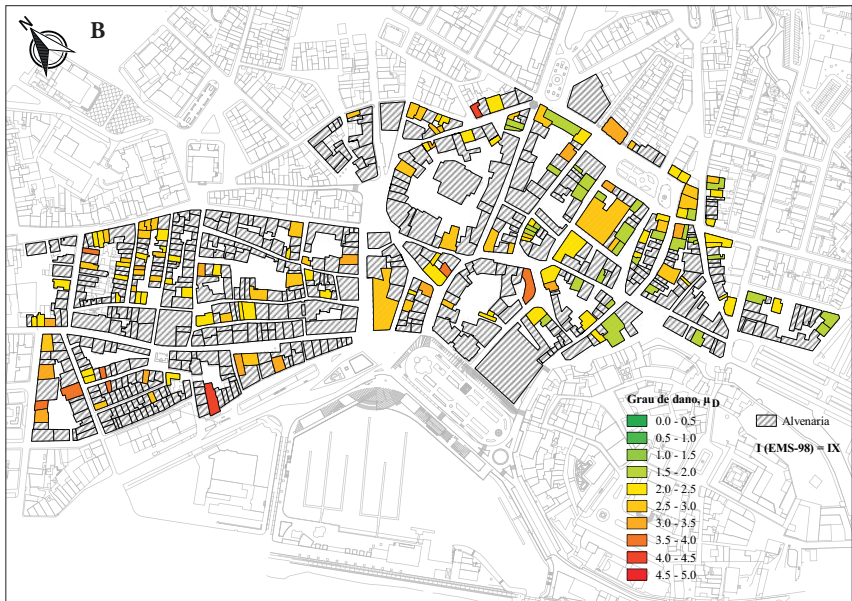
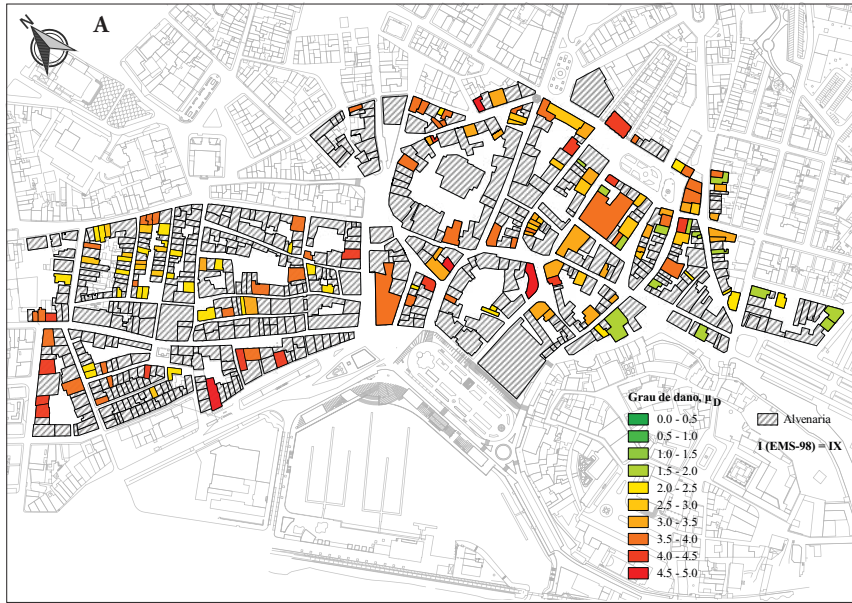


Fig. 14 - Cenário de dano para $I(EMS-98) = IX$, a) pré-reforço e b) pós-reforço.
Fig. 14 - Damage scenario for $I(EMS-98) = IX$, a) pre-strengthening and b) post-strengthening.

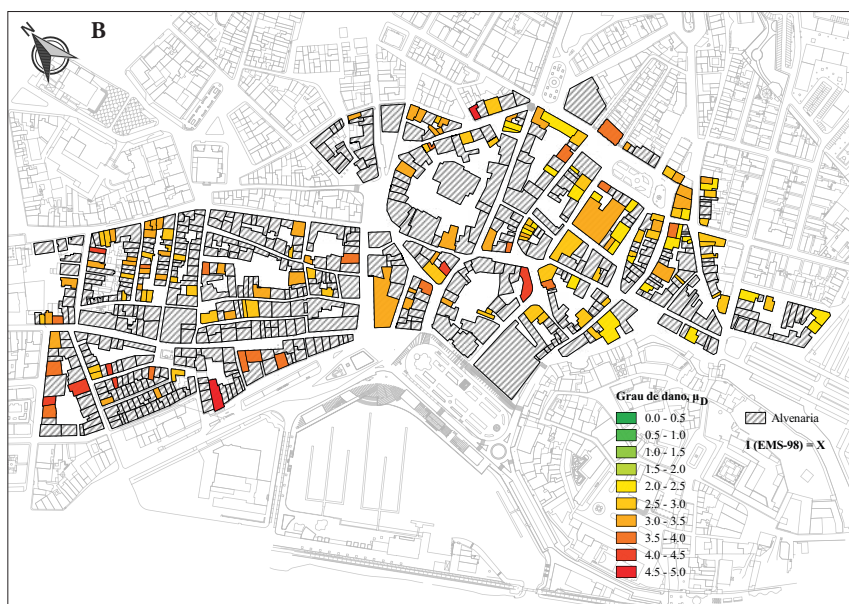
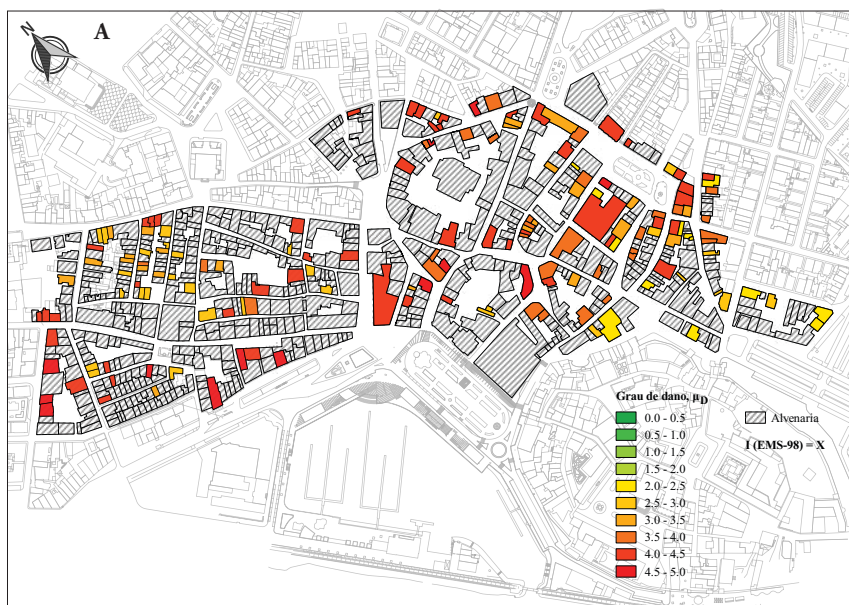


Fig. 15 - Cenário de dano para $I_{(EMS-98)} = X$, a) pré-reforço e b) pós-reforço.

Fig. 15 - Damage scenario for $I_{(EMS-98)} = X$, a) pre-strengthening and b) post-strengthening.

determinado estado de dano. As probabilidades discretas, $P(D_K=d)$, são obtidas pela diferença das probabilidades cumulativas, $PD (D_i \geq d)$, como representado na equação seguinte:

$$P(D_K = d) = PD[D_K \geq d] - PD[D_{K+1} \geq d] \quad (7)$$

Na fig. 16 apresenta-se as curvas de fragilidade para o índice de vulnerabilidade médio inicial pré-reforço igual a 29.36, e para um índice de vulnerabilidade médio pós-reforço de 19.18. Tal como se pode observar na fig. 17 e como já esperado, após reforço das estruturas, as probabilidades de excedência do grau de dano sofrem uma diminuição. A título de exemplo, a probabilidade de excedência do grau de dano D3 para um sismo com intensidade VIII diminui cerca de 30%.

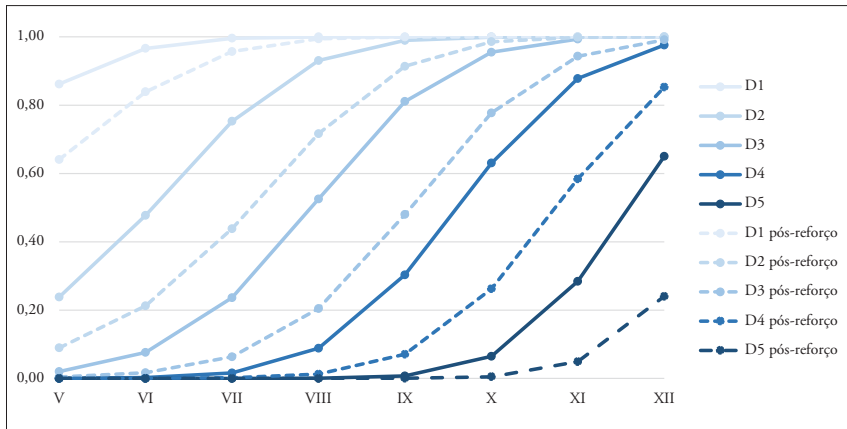


Fig. 16 - Comparação das curvas de fragilidade para $I_v = 29.36$ e $I_v = 19.18$.

Fig. 16 - Comparison of fragility curves for $I_v=29.36$ and $I_v=19.18$.

Pretende-se analisar a viabilidade económica de forma a comparar custos/benefícios da intervenção descrita anteriormente. O custo relativo é o quociente entre o custo total do reforço e o custo total da construção do edifício, como representado na equação seguinte.

$$\text{Custo relativo} = \frac{\text{Custo do reforço} \times \text{Área em planta}}{\text{Área de construção} \times \text{Custo de construção}} \quad (8)$$

Tendo em conta que o reforço das estruturas é uma intervenção feita apenas no piso de rés-do-chão a partir de dissipadores de energia (Furtado *et al.*, 2015), foi considerado um custo médio de 80€/m² para a solução de reforço em causa. Para custo de construção teve-se em conta o valor patrimonial médio dos edifícios. Assim, assumiu-se um valor de 750€/m². Na fig. 17 apresenta-se a distribuição do custo relativo de reparação dos edifícios pré-reforço e pós-reforço. Para além disso, representa-se o índice de vulnerabilidade dos 101 edifícios que foram reforçados, de modo a observar a redução do I_v após a intervenção. De forma a facilitar a análise, os edifícios encontram-se organizados pelo número de pisos. Através da fig. 17 observa-se que o custo relativo varia entre 1.5% e os 5.3%. As estruturas com menos pisos apresentam um custo relativo superior aos edifícios com mais pisos, isto resulta, naturalmente, do facto da intervenção ser feita apenas no rés-do-chão e da área de construção ser inferior. Assim, a relação entre o custo total do reforço e o valor total da construção tem valores superiores nos edifícios com menos pisos. Nos edifícios com 6 e 7 pisos, o custo relativo é inferior a 2% do valor da construção.

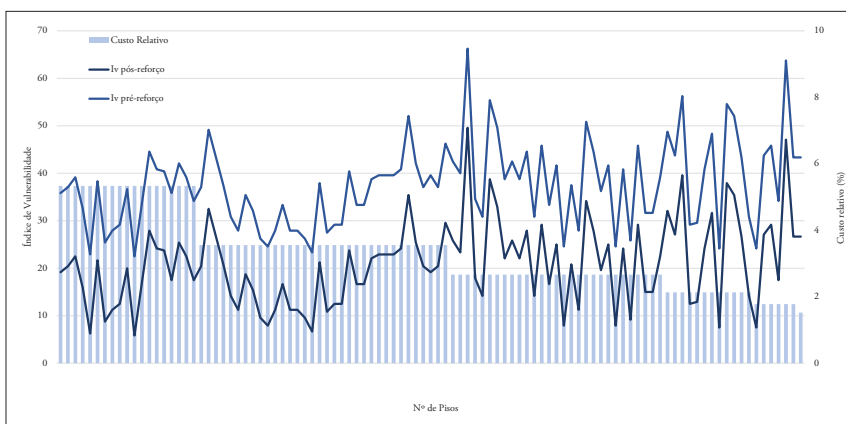


Fig. 17 - Custo relativo de reparação dos edifícios pré-reforço e pós-reforço.

Fig. 17 - Relative cost to repair the building pre- and post-strengthening.

Após a determinação do grau de dano médio é possível interpretar os dados através de um índice económico, aplicando-se quociente entre o custo

de reparação e o de substituição (Benedetti e Petrini, 1984). A correlação entre os graus de dano e os custos de reparação e reconstrução é obtida pelo processamento e tratamento de dados pós-sismos (Dolce *et al.*, 2006). É possível estimar os custos de reparação para um sismo de intensidade macro-sísmica $I_{(EMS-98)}$, através do produto da probabilidade condicionada do custo de reparação ao nível do dano, $P(R|D_K)$ e da probabilidade condicionada do dano à vulnerabilidade do edifício e à intensidade sísmica $P(D_K|I_v, I)$ (Ferreira *et al.*, 2013).

O custo de reparação associado foi estimado a partir dos valores médios dos índices de vulnerabilidade pré-reforço e pós-reforço, $I_{v,médio} = 29.36$, $I_{v,médio} = 19.18$, respetivamente. Na fig. 18 apresenta-se a estimativa do custo de reparação para os diferentes índices de vulnerabilidade para toda a área de estudo em função da intensidade sísmica. Para além disso representou-se a relação entre o grau de dano inicialmente estimado (μ_D) e o grau de dano após intervenção (μ_{Dint}).

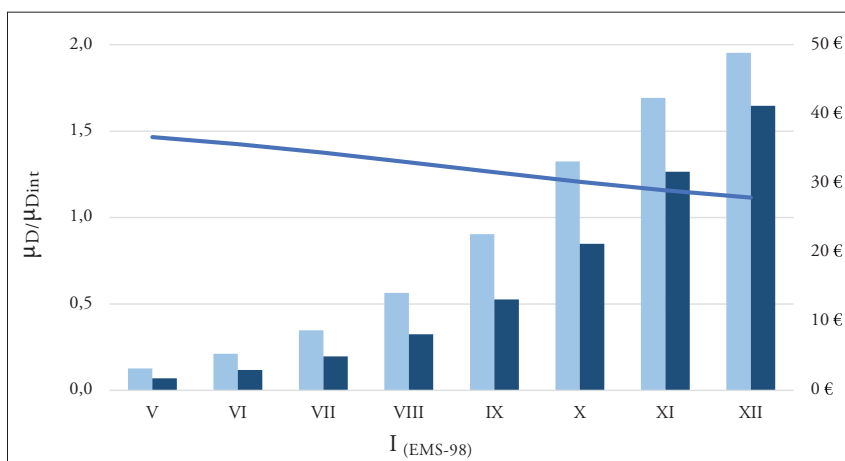


Fig. 18 - Estimativa do custo de reparação para diferentes intensidades macrosísmicas.

Fig. 18 - Estimation of repair costs for different macroseismic intensities.

Como se pode observar, a relação dos graus de dano pré-reforço e pós-reforço reduz à medida que a intensidade aumenta. Nas intensidades mais baixas, a re-

lação entre os graus de dano apresenta valores superiores, uma vez que o reforço das estruturas tem maior influência nestas intensidades. Após intervenção nos edifícios, a estimativa de custos de reparação reduz de forma significativa. A intensidade X merece particular atenção, uma vez que, para além de corresponder à intensidade histórica máxima registada na cidade de Faro, apresenta a maior diferença de custo de reparação entre os edifícios que não sofreram intervenção e os que sofreram. O balanço económico é a subtração entre o custo de reparação sem reforço, $C.R_{\text{pré-reforço}}$, e o custo total da reparação com reforço, sendo este determinado através da soma entre o custo de reparação com reforço, $C.R_{\text{pós-reforço}}$, e o custo do reforço, $C.Ref.$, como representado na Equação (9). Na fig. 19 apresenta-se os resultados do balanço económico de toda a área de estudo em função da intensidade macrosísmica.

$$\text{Balanço económico} = C.R_{\text{pré-reforço}} - [C.R_{\text{pós-reforço}} + C.Ref.] \quad (9)$$

Tal como se pode observar na fig. 19, a intensidade $I_{(EMS-98)} = X$ é onde se verifica um maior valor no balanço económico. Assim, conclui-se que para qualquer intensidade sísmica o reforço é eficiente e economicamente viável.

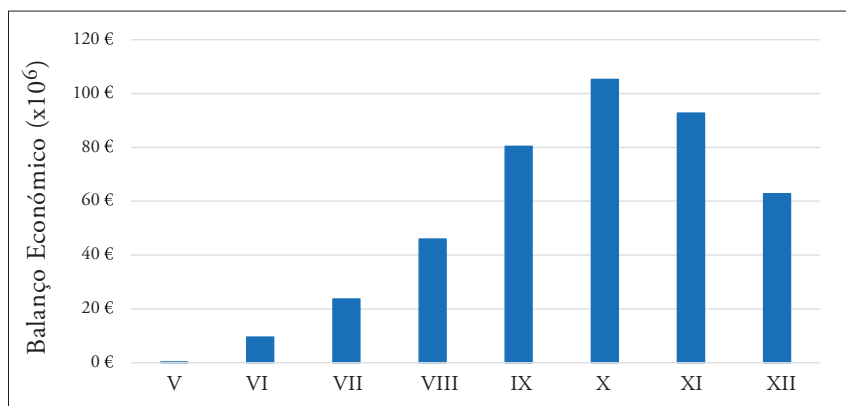


Fig. 19 - Balanço económico para toda a área de estudo.

Fig. 19 - Economic balance for the whole study area.

Conclusões

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

Importa sublinhar que os resultados produzidos com base neste tipo de metodologias simplificadas deverão ser interpretados estatisticamente, dada a incerteza associada à definição e avaliação dos parâmetros definidores da vulnerabilidade.

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. 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.

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 ações intrusivas e a 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, assegurando maior longevidade ao edificado associado à salvaguarda da vida humana, promover a reabilitação estrutural e sísmica do património edificado.

Bibliografia

- Athmani A. E., Gouasmia A., Ferreira T. M., Vicente, R., Khemis, A. (2014) Seismic vulnerability assessment of historical masonry buildings located in Annaba city (Algeria) using non ad-hoc data survey. *Bull Earthq Eng*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9717-7>
- Benedetti, D. & Petrini, V. (1984). *Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un metodo di valutazione*. L'industria delle Costruzioni.
- Bernardini A., Giovinnazzi 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., Pugliese, A., Romeo, R., & Sabetta, F. (1995.) *Rischio sismico del territorio italiano. Proposta per una metodologia e risultati preliminari*. Serv. Sism. Naz. Rapp. Tec. SSN/RT/95/01, Roma
- Caldeira, B., Ferrão, C., Borges, J. F., Bezzeghoud, M. (2016). The Seismicity of Portugal and Its Adjacent Atlantic Region from 1300 to 2014: Maximum Observed Intensity (MOI) Map. *Seismological Research Letters* 87, 743-750. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220150217>
- Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F., & Crowley, H. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET J Earthq Technol* 43:75–104.
- Chester, D. K., Chester, O. K.: (2010). The impact of eighteenth century earthquakes on the Algarve region, southern Portugal. *The Geographical Journal* 176, 350–370. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2010.00367.x>

- Custódio, S., Lima, V., Vales, D., Cesca, S., Carrilho, F. (2016). Imaging active faulting in a region of distributed deformation from the joint clustering of focal mechanisms and hypocentres: Application to the Azores–western Mediterranean region. *Tectonophysics* 676, 70–89.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.013>
- Dolce, M., Kappos, A., Masi, A., Penelis, G., & Vona, M. (2006). Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies. *Elsevier, Engineering Structures*, 28:357–371.
- ESRI (2005). *Geographic Information Systems*. 310 New York Street, Redlands, 92373-8100, USA
- Estêvão, J. M. C. (2014). Análise da perigosidade sísmica do Algarve: o passado e o futuro. In: *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas / Encontro Nacional Betão Estrutural 2014 / 9º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*, 1–16, CD93. LNEC.
- Estêvão, J. M. C. (2017). Segurança sísmica em áreas de reabilitação urbana localizadas em zonas ribeirinhas do Algarve. In: *CREPAT 2017 - Congresso da reabilitação do património*, 323–331. Universidade de Aveiro.
- 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. *Bull Earthq Eng* 11:1753–1773. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9447-2>
- Furtado, A., Rodrigues, H., Varum, H., & Costa, A. (2015). Evaluation of different strengthening techniques' efficiency for a soft storey building. *Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Giardini, D., Wössner, J., Danciu, L. (2014). *Mapping Europe's Seismic Hazard*. Eos, Transactions American Geophysical Union 95, 261–262. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014EO290001>
- 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.
- 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
- IPQ: NP EN 1998-1 (2010). *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
- Kung, Y. W., and Chen, S. H. (2012). Perception of Earthquake Risk in Taiwan: Effects of Gender and Past Earthquake Experience. *Risk Analysis*, 32(9), 1535–1546.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01760.x>
- Maio, R., Ferreira, T. M., Vicente, R. (2018). O Papel da Perceção e Comunicação na Mitigação do Risco de Terramoto | The Role of Perception and Communication in Mitigating Earthquake Risk. *Territorium: Revista da Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança*, nº. 25 (II), 2018, pp. 69–78. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_25-2_6
- Maio, R., Ferreira, T., Vicente, R. (2015). A morfologia dos núcleos urbanos antigos: levantamento arquitetónico e construtivo do Bairro Ribeirinho de Faro, Portugal; *Conservar Património*, nº21, 2015, 5–24, português. DOI: <https://doi.org/10.14568/cp2015002>
- Marécos, J. A. E., Castanheta, M. C. N. (1970). *Estudo do comportamento de estruturas sob a acção do sismo de 28 de Fevereiro de 1969*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- Mendonça, J. J. M. D. (1758). *Historia universal dos terremotos, que tem havido no mundo, de que há noticia, desde a sua criação até o seculo presente*. Na Offic. de Antonio Vicente da Silva, Lisboa

- Portugal (2010). Resolução Da Assembleia Da República N. 102/2010: Adopção de Medidas Para Reduzir Os Riscos Sísmicos. Diário Da República, 1a Série, N. 155 - 11 de Agosto. Portugal.
- 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, Portugal.
- Ramos, A., Fernández, O., Terrinha, P., Muñoz, J.A. (2017). Neogene to recent contraction and basin inversion along the Nubia-Iberia boundary in SW Iberia. *Tectonics* 36, 257-286.
DOI: <https://doi.org/10.1002/2016TC004262>
- Silva, J., Ferreira, T., Rodrigues, H., Vicente, R. (2016). Desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica do edificado existente em betão armado. In: *VI Euro-American Congress REHABEND 2016 - Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*. Paper code: 1.7.38, pp. 910-918. 24-27 May 2016. Burgos, Spain. ISBN: 978-84-608-7940-4 (Printed Book of Abstracts) ISBN: 978-84-608-7941-1 (Digital Book of Abstracts)
- Silva, S., Terrinha, P., Matias, L., Duarte, J. C., Roque, C., Ranero, C. R., Geissler, W. H., Zitellini, N. (2017). Micro-seismicity in the Gulf of Cadiz: Is there a link between micro-seismicity, high magnitude earthquakes and active faults? *Tectonophysics* 717, 226-241.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.07.026>
- Teves-Costa, P., Batlló, J., Matias, L., Catita, C., Jiménez, M. J., García-Fernández, M. (2019). Maximum intensity maps (MIM) for Portugal mainland. *Journal of Seismology*.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09814-5>
- Veludo, I., Dias, N. A., Fonseca, P. E., Matias, L., Carrilho, F., Haberland, C., Villaseñor, A. (2017). Crustal seismic structure beneath Portugal and southern Galicia (Western Iberia) and the role of Variscan inheritance. *Tectonophysics* 717, 645-664.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.08.018>
- Vicente, R. (2016). Risk assessment: first step towards urban rehabilitation?, In: *VI Euro-American Congress REHABEND 2016 - Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*. Keynote. 24-27 May 2016. Burgos, Spain. ISBN: 978-84-608-7940-4 (Printed Book of Abstracts) ISBN: 978-84-608-7941-1 (Digital Book of Abstracts)
- 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., Varum, H., Mendes Silva, J. A. R. (2011.) Seismic vulnerability and risk assessment: case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal. *Bull Earthq Eng* 9:1067–1096.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9233-3>