



AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE EDIFÍCIOS ANTIGOS E DO RISCO SÍSMICO À ESCALA DO CENTRO HISTÓRICO<sup>1\*</sup>

189

O CASO DA BAIXA DE COIMBRA (PORTUGAL)

R. Vicente

Dep. Engenharia Civil, Universidade de Aveiro  
[romvic@ua.pt](mailto:romvic@ua.pt)

H. Varum

Dep. Engenharia Civil, Universidade de Aveiro  
[hvarum@ua.pt](mailto:hvarum@ua.pt)

J. A. R. Mendes da Silva

Dep. Engenharia Civil, Universidade de Coimbra  
[raimundo@dec.uc.pt](mailto:raimundo@dec.uc.pt)

S. Lagomarsino

Dipartimento di Ingegneria, Università Génova  
[lagomarsino@diseg.unige.it](mailto:lagomarsino@diseg.unige.it)

SUMÁRIO

Nas últimas décadas, a avaliação do risco sísmico é de preocupação crescente, considerada essencial na actividade e definição de estratégias de planeamento e gestão urbana. A avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios existentes na perspectiva da mitigação do risco sísmico deve colocar-se não só em relação aos edifícios isolados de relevante importância histórica, mas também em relação aos aglomerados de construções em centros históricos.

**Palavras chave:** mitigação do risco, sismos, alvenaria

RESUMÈ

Au cours des dernières décennies, l'évaluation du risque séismique est devenue essentielle dans l'activité et la définition des stratégies de planification et gestion urbaine. L'évaluation de la vulnérabilité séismique des bâtiments dans la perspective de mitigation du risque séismique doit se faire, non seulement par rapport aux bâtiments qui constituent un patrimoine historique, mais aussi par rapport aux agglomérations dans les zones urbaines.

**Mots-clé:** mitigation du risque, séismes, maçonneries.

SUMMARY

In the last decades the evaluation of the seismic risk is, of rising concern, considered essential in the activity and definition of strategy planning and urban management. The evaluation of the seismic vulnerability of the existent building stock in the perspective of the seismic risk mitigation should not be placed only in relation to the isolated buildings of relevant historical importance, but also, in relation to the agglomerate of buildings in historical city centers.

**Key words:** risk mitigation, earthquakes, masonry

<sup>1\*</sup> O texto deste artigo corresponde à comunicação apresentada ao V Encontro Nacional e I Congresso Internacional de Riscos e foi submetido para revisão em 17-06-2009, tendo sido aceite para publicação em 31-03-2010.  
Este artigo é parte integrante da Revista Territorium, n.º 17, 2010, © Riscos, ISBN: 0872- 8941.

Introdução

Enquadramento

190

O risco sísmico das regiões edificadas está associado à perigosidade local, à vulnerabilidade do edificado e ao grau de exposição (ver Fig. 1). Dos três aspectos referidos, a vulnerabilidade é aquela que assume uma grande importância, não apenas devido às óbvias consequências físicas sobre o edificado na ocorrência de um evento sísmico, mas porque intervindo com adequadas soluções de reforço é possível melhorar as condições de segurança e comportamento estrutural das construções existentes, reduzindo o nível de vulnerabilidade sísmica e, conseqüentemente, o nível de eventual dano físico e perda, quer de natureza económica, quer de natureza humana.

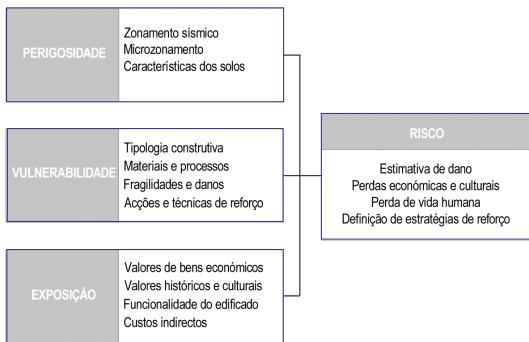


Fig. 1 - Sistematização dos aspectos na avaliação do risco sísmico (VICENTE et al. 2005)

Neste trabalho é proposta uma nova metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica. Esta metodologia é aplicada ao caso de estudo do centro histórico da Baixa de Coimbra. Os resultados da avaliação da vulnerabilidade, de acordo com esta nova metodologia são apresentados e, em consequência, são construídos cenários de dano e de perdas, integrados num ambiente SIG.

Metodologia de avaliação do risco sísmico

Na sua essência, a modelação matemática do risco sísmico é precedida por uma análise probabilística da perigosidade sísmica. De seguida, interpreta-se o nível de dano esperado condicionado a um determinado nível de severidade da acção, ou evento sísmico, e finalmente traduz-se o nível de dano em estimativa de perda (introduzindo o conceito de factor de dano em correspondência com cada grau de dano, permitindo a sua conversão), sejam estas económicas ou de outra natureza.

Na Figura 2 apresenta-se a esquematização e interpretação matemática do processo de avaliação

probabilística do risco. Primeiramente, é definida uma função densidade de probabilidade associada à perigosidade sísmica. Para um dado valor da perigosidade (a severidade da acção pode ser de forma simplificada, traduzida por um parâmetro como, por exemplo, a intensidade macrossísmica,  $I$ , ou aceleração de pico do solo, PGA) e conhecendo a vulnerabilidade,  $V$ , de uma tipologia construtiva (de um grupo de edifícios ou de um edifício isolado), obtém-se um valor médio do dano sobre a função de vulnerabilidade ( $E(D|h)_v$ ) e uma dispersão fornecida pelas curvas de fragilidade sísmica para a classe de vulnerabilidade da tipologia dos edifícios ou edifício de vulnerabilidade  $V$ .

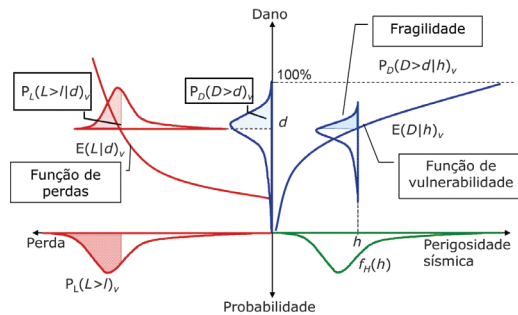


Fig. 2 - Esquema para a avaliação do risco sísmico (CAMPOS COSTA et al., 2007)

As curvas de fragilidade são definidas pelas funções de densidade de probabilidade condicional do dano. Procedendo à integração da probabilidade condicional do dano para toda, a possível, gama de variação da perigosidade sísmica e para uma dada tipologia construtiva com vulnerabilidade  $V$  (dada por  $P_D(D > d | h)_v$ ), obtém-se a função de densidade de probabilidade:

$$P_D(D > d)_v = \int_h P_D(D > d | h)_v f_H(h) dh \quad (1)$$

em que:  $f_H(h)$  é a função de densidade de probabilidade da perigosidade sísmica;  $P_D(D > d)_v$  é a função de densidade de probabilidade condicional de dano, resultante da integração da probabilidade condicional do dano para todos os valores de perigosidade sísmica, denominado de risco específico,  $S$ .

Finalmente, para avaliar o risco absoluto, isto é, para estimar o valor das perdas é necessário converter danos em perdas, utilizando factores de dano, que simplesmente permitem a conversão através da correspondência com cada grau de dano, condicionada à perigosidade sísmica. Por exemplo, na estimativa das perdas económicas, associa-se um custo de reparação a cada estado de dano, utilizando um factor de dano (grandeza adimensional) definido como o quociente

entre o custo de reparação e o custo de reposição. Assim, convertem-se os indicadores de dano em perdas usando uma função de perdas ( $E(L|d)_v$ ), e por fim, a distribuição de probabilidade das perdas é obtida e descrita pela sua função de densidade de probabilidade,  $P_L(L > l)_v$ , definida como:

$$P_L(L > l)_v = \int_d \int_h P(L > l|d)_v P(D > d|h)_v f_H(h) dh dd \quad (2)$$

em que:  $f_H(h)$  é a função de densidade de probabilidade da perigosidade sísmica;  $P_L(L > l)_v$  é a função de densidade de probabilidade de perda, resultante da integração da probabilidade condicional da perda e do dano para todos os valores de perigosidade sísmica, denominado de risco absoluto, R.

Neste trabalho segue-se uma abordagem determinística no que diz respeito à caracterização da perigosidade sísmica, e probabilística no que diz respeito à estimativa de danos e, consequentemente, na avaliação de perdas, como expor-se-á adiante nas Secções 3.2 e 3.3.

## Vulnerabilidade do edificado antigo da baixa de Coimbra

### Sismicidade da região de Coimbra

Segundo o actual zonamento sísmico, o distrito de Coimbra encontra-se numa zona de risco médio de acordo com a avaliação integrada e resultante da análise do Anexo Nacional para o EC8 (CEN, 2008). O distrito de Coimbra, no que respeita à intensidade sísmica, de acordo com informação em registos históricos, encontra-se numa zona caracterizada pela intensidade VII na escala de MERCALLI modificada, que corresponde ao valor máximo registado. Na TABELA I enumeram-se os sismos sentidos no distrito de Coimbra e arredores, com magnitude local superior a 2.0, desde 1996 [IM, 2007].

TABELA I - Sismos sentidos no distrito de Coimbra e arredores desde 1998 [IM, 2007]

Ano	Data	Local	Magnitude local (Grau)
1998	11 de Fevereiro	Pombal	2.0
1998	1 de Março	Soure	2.5
1998	25 de Abril	Leiria	2.3
1998	19 de Agosto	Leiria	2.2
1998	3 de Setembro	Leiria	2.4
1999	30 de Abril	S. Pedro de Moel	4.5 (IV/V)
1999	28 de Junho	Pombal	2.0
1999	18 de Agosto	Pombal	2.1
1999	22 de Setembro	Porto de Mós	3.4 (III)
2001	10 de Abril	Leiria	4.1 (IV)
2001	1 de Novembro	Mira	2.0
2003	14 de Março	Pombal	2.1
2005	1 de Dezembro	Soure	3.8 (III)
2005	23 de Abril	Anadia	2.4
2007	18 de Agosto	Pombal	2.1

### Avaliação da vulnerabilidade do edificado antigo da Baixa de Coimbra

Foi recolhida, numa acção de inspecção, identificação e caracterização detalhada do edificado, informação de cerca de 800 edifícios. No entanto, dificuldades no acesso às construções não permitiram inspecionar todas as construções com o mesmo nível de profundidade. O processo de renovação e reabilitação da Baixa de Coimbra constituiu uma oportunidade privilegiada na recolha de informação sobre os edifícios antigos através do conjunto de *check-lists*, informação esta que foi posteriormente organizada de forma a manipular adequadamente os seus dados na avaliação da vulnerabilidade sísmica. A forma de inventariação da informação é um processo chave na avaliação à escala do centro urbano (VICENTE, 2008). Na Figura 3, pode-se observar o perímetro da área em estudo, com definição e divisão em zonas.

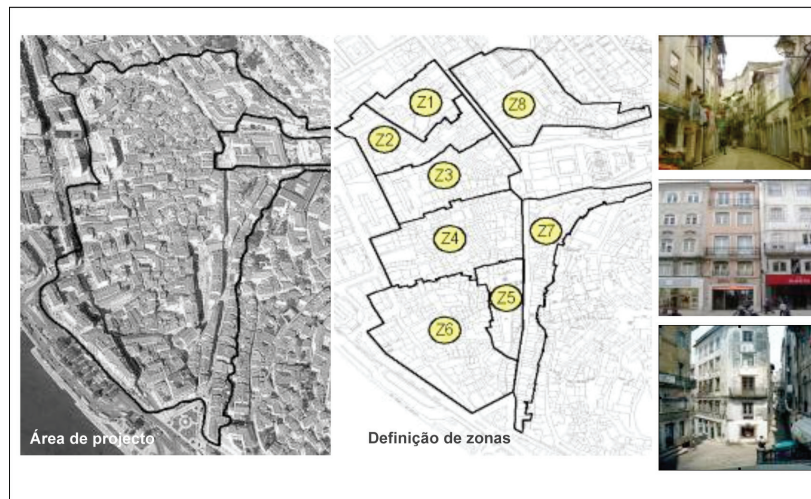


Fig. 3 - Perímetro do projecto, zonamento e edificado urbano.

### Implementação de um sistema integrado: desenvolvimento e operacionalidade

Em muitos casos, a gestão de risco dos centros urbanos é tratada sem nenhuma ferramenta de análise espacial que auxilie o planeamento geral de grandes áreas. Justifica-se assim, o interesse na utilização de ferramentas informáticas multi-propósito, como são os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), associadas a bases de dados relacionais, de forma a criar um aplicativo multidisciplinar com capacidade de relacionar e gerir informação, como por exemplo: características construtivas, identificação e classificação do valor patrimonial, vulnerabilidade do edificado, grau de degradação e necessidades de reabilitação, estimativa de danos e custos, avaliação de riscos e planos de acções de evacuação e resgate em caso de uma eventual catástrofe sísmica.

A aplicação informática de análise e organização espacial da informação utilizada neste estudo foi o ArcGis 9.2 da ESRI (ArcGis 9.2, 2005), que está conectado a uma base de dados principal, a partir da qual foi criada uma sub-base de dados, particularmente dirigida para gerir a informação sobre a caracterização e qualidade estrutural dos edifícios em alvenaria e apoiar o estudo desenvolvido de vulnerabilidade e risco sísmico associado (ver Figura 4).



Fig. 4 - Plataforma de gestão entre a base de dados e o SIG.

Desenvolveram-se vários módulos com diferentes objectivos: subrotinas para a visualização de zonas e subzonas, algoritmos de cálculo matemático para a determinação do índice de vulnerabilidade sísmica e estimativa do dano e cálculo de probabilidade de perdas (colapso, número de mortos, edifícios inutilizáveis, custos, etc.). Toda esta avaliação pode efectuar-se para diferentes níveis de acção sísmica, isto é, diferentes intensidades sísmicas, permitindo a construção de múltiplos cenários de dano e perda.

### Metodologia proposta - Índice de vulnerabilidade

A formulação da metodologia proposta, baseia-se nos princípios de semelhantes metodologias (GNDT-SSN, 1994; GIOVINAZZI, 2005), no entanto, goza de um nível de detalhe muito superior, devido ao levantamento exaustivo efectuado do edificado da Baixa.

A metodologia proposta baseia-se no cálculo de um índice de vulnerabilidade para cada edifício, como uma média ponderada de 14 parâmetros. Cada parâmetro é classificado em 4 classes de vulnerabilidade, nomeadamente: A, B, C e D. Cada parâmetro avalia um aspecto que influencia o desempenho sísmico do edifício (escolhendo a classe de vulnerabilidade que melhor a caracteriza). A cada parâmetro é associado um peso, variando desde 0.5, para os parâmetros menos importantes, até 1.5, para os parâmetros com maior importância na vulnerabilidade do edifício (ver TABELA II). O valor do índice de vulnerabilidade,  $I_v^*$ , varia entre 0 e 650, mas é mais comum usar-se o valor do índice de vulnerabilidade normalizado,  $I_v$ , variando no intervalo de 0 a 100 (soma ponderada normalizada). Este valor é na verdade uma pontuação atribuída ao edifício e constitui um passo intermédio na estimativa de dano associada a um nível de acção sísmica definido pela intensidade  $I$  (na escala macrosísmica EMS-98 (GRÜNTAL, 1998) ou pela aceleração de pico do solo (PGA). As diferenças em relação à metodologia original, GNDT II, são essencialmente: i) o maior nível de detalhe na avaliação de alguns parâmetros; ii) a redefinição e ajuste dos critérios de classificação dos parâmetros originais; e, iii) a introdução de três novos parâmetros considerados fundamentais na vulnerabilidade das construções de alvenaria.

TABELA II - Índice de vulnerabilidade proposto ( $I_v$ ), parâmetros e respectivos pesos associados

PARÂMETRO	Classe $C_{vi}$				Peso $p_i$	ÍNDICE DE VULNERABILIDADE
	A	B	C	D		
P1 Tipo e organização do sistema resistente	0	5	20	50	0.75	$I_v^* = \sum_{i=1}^n C_{vi} \times p_i$ $0 \leq I_v^* \leq 650$ (Índice normalizado, $0 \leq I_v \leq 100$ )
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	
P7 Localização e interacção	0	5	20	50	1.50	
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	
P11 Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1.00	
P12 Tipo de cobertura	0	5	20	50	1.00	
P13 Danos estruturais identificados	0	5	20	50	1.00	
P14 Elementos não-estruturais	0	0	20	50	0.50	

A inserção dos novos parâmetros P5, P7 e P10 introduz os seguintes aspectos: a altura do edifício (P5); a consideração do efeito de interacção entre construções vizinhas (P7), uma vez que em centros urbanos, tipicamente, os edifícios partilham paredes resistentes, constituindo agregados estruturais (apesar de em muitos casos serem construídos em períodos distintos), desta forma a sua resposta à acção sísmica não pode ser interpretada de forma individualizada; e o desalinhamento de aberturas (P10) na influência do caminho de carga e capacidade resistente das paredes de alvenaria.

É na definição e atribuição dos pesos aos parâmetros que reside a maior fonte de incerteza que, apesar de não ter sido tratada matematicamente, foi objecto de uma análise de sensibilidade onde os parâmetros foram agrupados por grau de importância, de forma a relativizar melhor, de entre todos os 14 parâmetros, os correspondentes pesos.

#### Validação da metodologia proposta

Nesta secção é apresentada de forma sumária a metodologia do GNDT II (GNDT-SSN, 1994) baseada em danos observados e a metodologia macrossísmica (GIOVINAZZI E LAGOMARSINO, 2004).

A metodologia proposta melhora a avaliação da vulnerabilidade relativamente à metodologia original do GNDT II (GNDT-SSN, 1994), mas na essência os parâmetros mais importantes são similares, permitindo que as correlações estabelecidas entre a vulnerabilidade avaliada e o dano, sejam válidas no caso da presente metodologia, já que não existem dados, nem correlações desta natureza para o edificado português. A metodologia desenvolvida por BENEDETTI E PETRINI (1984) utiliza um índice de vulnerabilidade,  $I_v$ , como um passo intermédio no processo de estimativa de dano para edifícios sujeitos a um determinado nível de acção sísmica. Esta correlação determinística entre a acção sísmica (expressa em termos de PGA) e o dano (expresso como um índice de dano, variando entre 0 e 1) representa o quociente entre o custo de reparação e reposição das condições originais não danificadas, referidas ao valor actual da construção. Considera-se que, para valores elevados do índice de dano económico de entre 0.8 e 1, corresponde o colapso e perda total.

Uma vez que se faz uso das curvas de vulnerabilidade da metodologia macrossísmica proposta por GIOVINAZZI E LAGOMARSINO (2004) é fundamental a sua correspondência com a metodologia do GNDT II pela semelhança deste com a metodologia proposta. Este confronto é a chave do processo de validação. A metodologia macrossísmica é baseada na definição de tipologias construtivas pertencentes a classes de vulnerabilidade, na classificação de danos e graus de intensidade, segundo a escala macrossísmica europeia EMS-98 definido por GRÜNTAL (1998).

A partir do índice de vulnerabilidade,  $V$ , é construída a função de vulnerabilidade, traduzida por uma expressão analítica para o edifício, ou tipologia de edifícios, para diferentes intensidades macrossísmicas, EMS-98 (GRÜNTAL). Obtêm-se assim a expressão 3, que permite calcular o grau de dano médio,  $m_D$ , definido de 0 a 5. A génese desta expressão semi-empírica deriva do ajuste dos valores das MPD completas, conduzindo a uma função hiperbólica para estimar dano físico. Ressalva-

se que trabalhos anteriores de SANDI E FLORICEL (1995) já propunham uma expressão do tipo hiperbólica, ajustada a resultados de danos observados:

$$\mu_D = 2.5 \times \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25 \times V - 13.1}{Q} \right) \right] ; \quad 0 \leq \mu_D \leq 5 \quad (3)$$

O valor do grau de dano médio calculado,  $m_D$ , depende do índice de vulnerabilidade,  $V$ , da intensidade macrossísmica,  $I$  (EMS-98) e de um coeficiente  $Q$  que traduz a ductilidade de uma determinada tipologia construtiva (que pode variar entre 1 e 4).

Como o índice de vulnerabilidade entre as duas metodologias não é avaliado da mesma forma, o confronto só é possível através da comparação do valor de dano médio, que corresponderá a um valor mais provável, isto é, corresponde a um valor médio representativo dos dois índices de vulnerabilidade ( $I_v$  e  $V$ ). Portanto, pela comparação das duas metodologias de estimativa de dano, é possível definir uma relação entre as duas formas de calcular os índices de vulnerabilidade,  $I_v$  e  $V$ . Pelo confronto das curvas de vulnerabilidade das duas metodologias em relação a um valor central de dano médio,  $m_D = 2.5$  como se observa na Figura 5.

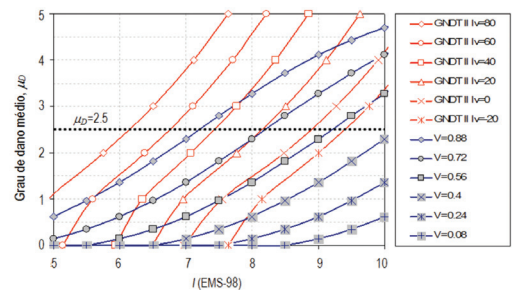


Fig. 5 - Confronto das curvas de vulnerabilidade do GNDT II e a metodologia macrossísmica.

Com base neste confronto, é possível definir uma correlação linear analítica entre os índices de vulnerabilidade das duas metodologias,  $V$  e  $I_v$ :

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

Esta equivalência na definição da vulnerabilidade entre as duas metodologias, valida também uma correspondência com a metodologia proposta neste trabalho, uma vez que existe semelhança entre o metodologia proposta e a metodologia do GNDT II (GNDT-SSN, 1994).

#### Complementar a avaliação da vulnerabilidade

Numa primeira fase, foi realizada uma avaliação do índice de vulnerabilidade,  $I_v$ , com a metodologia proposta a todos os edifícios para os quais existe informação detalhada e que, neste caso, representam a maioria do edificado da Baixa (410 dos 679 edifícios avaliados). Numa



segunda fase e para os restantes edifícios, em que não foi possível obter um nível de pormenor da informação, empregou-se um procedimento mais simples que utiliza a classificação média de alguns dos parâmetros e do índice de vulnerabilidade obtidos da avaliação detalhada da vulnerabilidade sísmica do edificado, uma vez que a tipologia é similar, partilhando as mesmas características construtivas e tecnológicas dos edifícios detalhadamente avaliados. Após processar os resultados da primeira fase de avaliação da vulnerabilidade, o valor médio do índice de vulnerabilidade obtido para os 410 edifícios com informação detalhada foi utilizado como um índice de vulnerabilidade tipológico assumido como ponto de partida, que é depois alterado por factores de modificação que reduzem ou agravam o índice de vulnerabilidade, para estimar o  $I_v$  de cada um dos restantes 269 edifícios (consultar VICENTE *et al.*, 2008).

## Resultados

### Vulnerabilidade da Baixa de Coimbra

Pretendendo-se uma classificação das construções tradicionais em alvenaria de pedra calcária da Baixa de Coimbra segundo a escala macrossísmica europeia, EMS-98 (GRÜNTHAL, 1998), obter-se-ia uma correspondência como apresentado na TABELA III.

TABELA III - Índice de vulnerabilidade,  $I_v$ , médio, classe de vulnerabilidade e tipologia estrutural

Índice de vulnerabilidade médio	Classe de vulnerabilidade, EMS-98	Tipologia estrutural, EMS-98
38.38	A e B (mais provável)	"Alvenaria de pedra irregular"

Refira-se que o índice de vulnerabilidade estimado, usando o procedimento detalhado (primeira fase) na avaliação de 410 edifícios, resultou num valor médio,  $I_{v,médio}$  de 38.13. Mas a introdução do procedimento complementar (segunda fase) na avaliação da vulnerabilidade dos restantes 269 edifícios, casos em que a informação não é completa, conduziu a um valor médio do índice de vulnerabilidade, que não sofreu uma variação significativa, subindo para  $I_{v,médio}$  de 38.38.

Na Figura 6-a e 6-b pode-se observar um histograma de distribuição e a respectiva função normal ajustada, para os resultados da avaliação detalhada (410 edifícios) e para a totalidade dos edifícios avaliados, completando a análise e utilizando o procedimento mais simplificado (679 edifícios). O valor médio do índice de vulnerabilidade ( $I_{v,médio}=38.38$ ) sugere que a vulnerabilidade do edificado é moderadamente elevada. Edifícios que apresentem um índice de vulnerabilidade superior a 45 devem ser reavaliados, caso se justifique, e devem ser objecto de uma análise ainda mais detalhada.

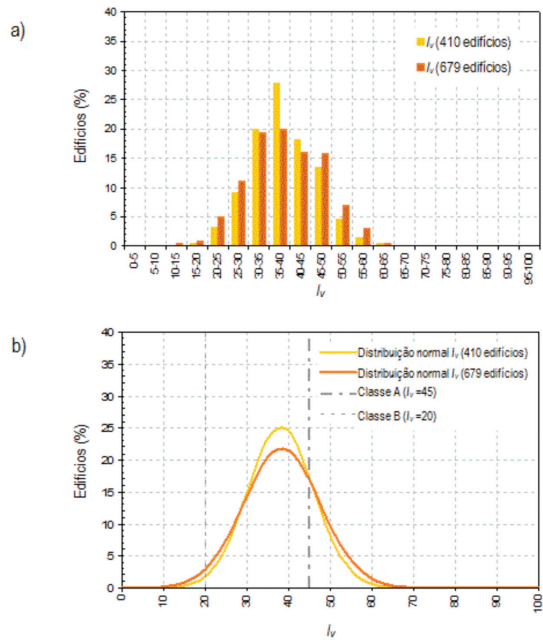


Fig. 6 - Índice de vulnerabilidade: a) Histograma; b) Curva gaussiana normal ajustada.

O desvio padrão,  $S_{Iv}$ , associado à avaliação com a metodologia proposta de forma detalhada é muito baixo, cerca de 9.12. Com a introdução dos restantes valores com recurso à metodologia expedita (segunda fase), o valor do desvio padrão decresce para 7.86, correspondendo a uma redução de 14%. O reduzido valor e baixa variabilidade do desvio padrão é um bom indicador de dois aspectos: revela sobretudo a homogeneidade da tipologia construtiva avaliada e ainda a fiabilidade dos resultados conseguidos.

Dos resultados da Figura 7 é ainda possível visualizar que os edifícios de gaveto e de banda extremo apresentam níveis do índice de vulnerabilidade mais elevado, sendo geralmente mais vulneráveis devido ao seu posicionamento no agregado, e assim, devem ser objecto de uma maior atenção, relativamente a eventuais prioridades de intervenção e acções de reforço.

Os resultados produzidos pela metodologia proposta devem ser sempre interpretados estatisticamente, isto é, identificando um valor médio representativo com a definição de limites superior e inferior relativamente aos resultados produzidos.

### Estimativa de danos

Após avaliação do índice de vulnerabilidade,  $I_v$ , com a metodologia proposta, foi estimado o grau de dano médio,  $m_D$ , para cada edifício, com recurso à expressão 3. A função de vulnerabilidade hiperbólica, também foi proposta originalmente nos estudos de SANDI *et al.* (1990)

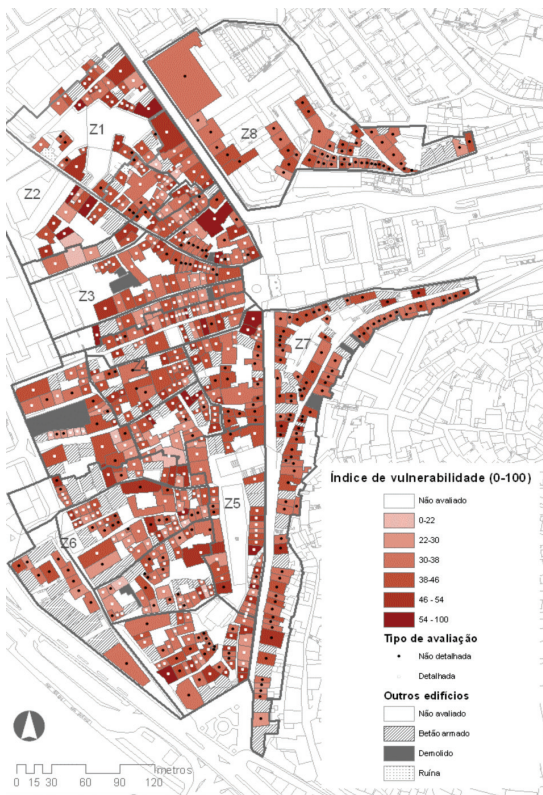


Fig. 7 - Mapeamento da vulnerabilidade estimada do edificado.

e de SANDI E FLORICEL (1995). GIOVINAZZI E LAGOMARSINO (2004) impulsionaram a sua tradução analítica pela validação baseada na vulnerabilidade observada, isto é, a partir das distribuições de dano contidas nas matrizes de probabilidade de dano, nomeadamente nas indicadas na escala EMS-98 (GRÜNTAL, 1998). Na Figura 8 são ilustradas as curvas de vulnerabilidade, no formato  $I_{EMS-98} - m_D$ , construídas para o valor médio do índice de vulnerabilidade médio ( $I_{v,médio}=38.38$ ), assim como para outros valores característicos da distribuição gaussiana, definidos pela adição e subtração, de uma e duas vezes do valor obtido para o desvio padrão ( $s_{Iv}=7.86$ ) (VICENTE *et al.*, 2007).

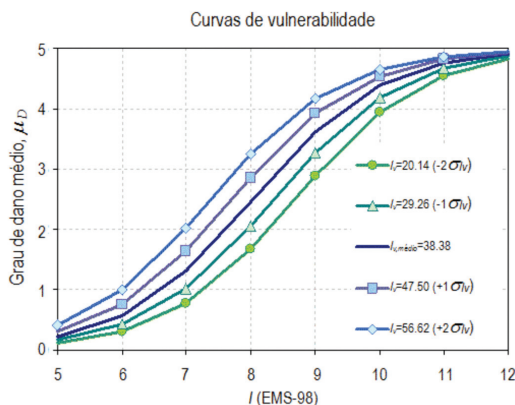


Fig. 8 - Curvas de vulnerabilidade para o edificado em alvenaria da Baixa de Coimbra.

Com o grau de dano médio,  $m_D$ , podem-se definir histogramas de dano para diferentes intensidades sísmicas e valores de vulnerabilidade com base probabilística. Frequentemente são utilizadas as funções de probabilidade binomial e *beta* na construção de histogramas de distribuição de dano (SPENCE *et al.*, 2003).

De seguida, é apresentada a distribuição dos valores do grau de dano médio,  $m_D$ , para cada um dos 679 edifícios com recurso à ferramenta SIG desenvolvida. Na Figura 9 observa-se cenários de dano para a acção sísmica caracterizada por uma intensidade que varia desde VII, (que corresponde à máxima intensidade sentida na região de Coimbra, terremoto de 1755), até à intensidade X (valor correspondente para a cidade de Lisboa, relativo ao mesmo evento sísmico). No entanto, esta estimativa de dano é apenas o primeiro passo na avaliação do risco. A avaliação das perdas físicas e humanas será efectuada na Secção seguinte.

Da observação da Figura 9 verifica-se que o grau de dano médio,  $m_D$ , estimado para o cenário com intensidade VIII, varia entre 1.3 e 3.6, e para o cenário com intensidade IX, entre 2.5 e 4.4. Estes resultados revelam valores preocupantes para os edifícios muito vulneráveis ( $I_v > I_{v,médio}$ ), para os quais são esperados danos moderados ( $2 \leq m_D < 3$ ), severos ( $3 \leq m_D < 4$ ) e em alguns casos o colapso,  $m_D \geq 4$ .

#### Avaliação de perdas

Nesta secção apresenta-se a avaliação das perdas a partir dos resultados da estimativa de dano. Existem vários métodos propostos para estimar perdas em função das probabilidades de ocorrência de determinado grau de dano. Os resultados relativamente à avaliação das perdas são expostos e discutidos de duas formas:

i) Construção de cenários de dano através de distribuições probabilísticas globais utilizando valores representativos do índice de vulnerabilidade dos 679 edifícios avaliados da Baixa de Coimbra ( $I_{v,médio} - 2s_{Iv}$ ;  $I_{v,médio} - 1s_{Iv}$ ;  $I_{v,médio}$ ;  $I_{v,médio} + 1s_{Iv}$ ;  $I_{v,médio} + 2s_{Iv}$ );

ii) Utilizando o sistema SIG, estimando as perdas edifício a edifício, visualizando cenários de perdas com a possibilidade de combinar ainda os resultados do cálculo probabilístico com outras características e aspectos do edificado. Os algoritmos de cálculo da vulnerabilidade, danos e perdas (funções probabilísticas) foram programadas e implementadas (criação de novos menus) na ferramenta SIG, permitindo para além de visualizar os resultados de forma espacial e célere, editar informação sobre o edificado e cruzar resultados e informação à escala do edifício.

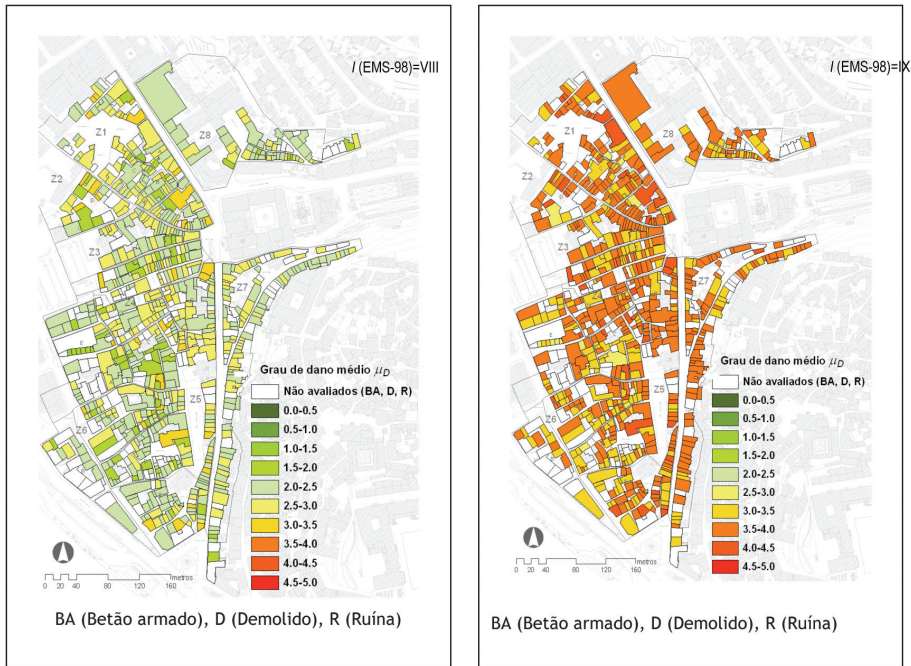


Fig. 9 - Cenário de dano para I (EMS-98)=VIII e para I (EMS-98)=IX.

Os modelos de estimativa de perdas são inevitavelmente dependentes do nível de dano físico, passando pela definição de correlações entre a probabilidade de atingir determinado nível de dano e a probabilidade de diferentes fenómenos de perda (como são as probabilidades de colapso dos edifícios, inutilização dos edifícios por falta de condições de segurança para desempenharem a sua função de habitabilidade, probabilidade de ocorrência de mortos e feridos, etc.).

(1) Colapso e inutilização dos edifícios

Neste trabalho e de entre as várias propostas, adoptou-se a do *Servizio Sismico Nazionale*, SSN (BRAMERINI *et al.*, 1995) para avaliar as probabilidades de colapso e inutilização dos edifícios para as funções que desempenhavam antes da ocorrência de um sismo. De forma a estimar as perdas, são estabelecidas expressões de carácter empírico, combinando os valores da probabilidade de ocorrência de determinados graus de dano associando-lhes pesos.

Basicamente, as probabilidades associadas à ocorrência de determinados graus de dano (ou até da probabilidade de excedência), são utilizadas na definição e estimativa das perdas afectadas de um peso que lhe é atribuído, variando de 0 a 1, que representa na verdade uma percentagem. O procedimento do SSN (BRAMERINI *et al.*, 1995) e HAZUS (1999) indica valores distintos para estes pesos. Neste trabalho optou-se pelo uso dos seguintes valores:  $W_{ei,3}=0.4$ ;  $W_{ei,4}=1.0$ ;  $W_{ei,5}=1.0$ .

Os graus de dano moderado ( $D_3$  e  $D_4$ ) estão associados à probabilidade dos edifícios ficarem inutilizáveis, e o elevado valor de dano ( $D_5$ ) à probabilidade de colapso. Para obtenção desta probabilidade de colapso ou da probabilidade da inutilização dos edifícios (isto é, que não permitem a sua reocupação após ocorrência do sismo), usaram-se as seguintes expressões:

$$P_{colapso} = P(D_5) \tag{5}$$

$$P_{edifícios\ inutilizáveis} = P(D_3) \times W_{e\beta} + P(D_4) \times W_{e\#} \tag{6}$$

em que:  $P(D_i)$  é a probabilidade de ocorrência de determinado nível de dano ( $D_1$  a  $D_5$ ); e,  $W_{ei,j}$  são os pesos, que indicam a percentagem de edifícios associados aos níveis de dano,  $D_i$ , que sofrem colapso ou que são considerados inutilizáveis.

Na Figura 10, expressam-se as probabilidade associadas a diferentes valores de vulnerabilidade (índice de vulnerabilidade médio,  $I_{v,médio}=38.38$ , e outros valores do índice de vulnerabilidade subtraídos ou somados do valor do desvio padrão da distribuição normal definida na Figura 8 ( $I_{v,médio}-2s_v$ ;  $I_{v,médio}-1s_v$ ;  $I_{v,médio}+1s_v$ ;  $I_{v,médio}+2s_v$ ). Refira-se que o número de edifícios inutilizáveis decresce com a intensidade à medida que o número de edifícios que sofrem colapso aumenta.



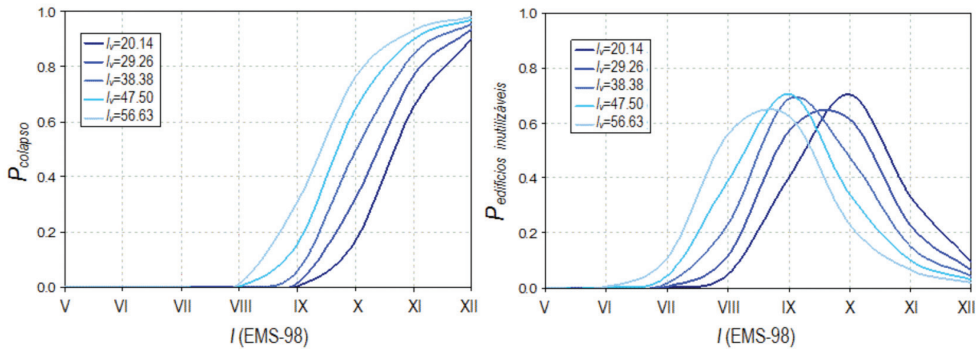


Fig. 10 - Probabilidade de colapso e inutilização dos edifícios para diferentes valores do  $I_v$ .

Para um sismo de moderada a alta intensidade, considerando as intensidades VII, VIII, IX e X na escala macrossísmica europeia, EMS-98 (GRÜNTAL, 1998), e para o valor médio da vulnerabilidade estimado para os 679 edifícios da Baixa de Coimbra ( $I_{v,média}=38.38$ ), calcularam-se os efeitos resultantes do produto da probabilidade pelo número de edifícios, expressando-os em termos de número total (ver na TABELA IV).

É possível combinar informação, como se pode observar na Figura 11, onde se cruzam as perdas estimadas (cálculo de probabilidades), com o número de habitantes e tipo de utilização dos edifícios. São especialmente preocupantes os resultados que combinam elevadas taxas de ocupação dos edifícios e probabilidade de colapso acima dos 70%.

TABELA IV - Resultados da estimativa de colapsos e edifícios inutilizáveis

Número total de edifícios:	Intensidade sísmica, $I$ (EMS-98)			
	VII	VIII	IX	X
679				
Colapsos	0	1 (0.14%)	39 (5.74%)	334 (49.1%)
Edifícios inutilizáveis	11 (1.62%)	158 (23.2%)	468 (68.9%)	324 (47.7%)

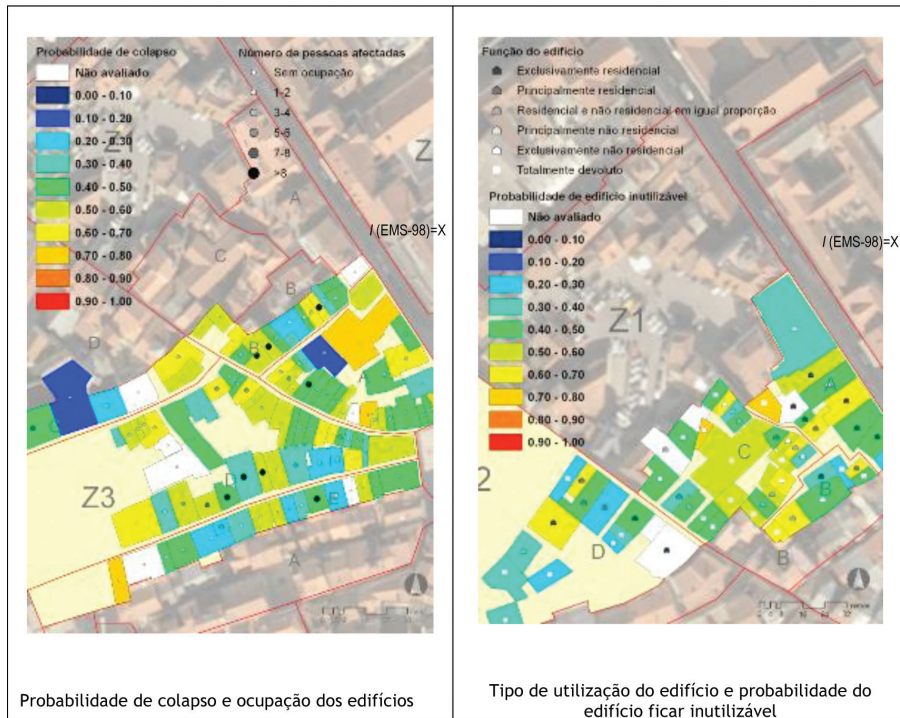


Fig. 11 - Cenários de perda (probabilidade de colapso e inutilização dos edifícios).

## (2) Perdas humanas e desalojamento

As metodologias para estimar o número de mortos e feridos graves não são uma matéria consensual, reconhecendo-se que, mesmo de forma empírica, o seu conhecimento é de fulcral interesse na protecção da vida e naturalmente no planeamento de situações de emergência. As formas de estimativa de perda de vida humana e de número de feridos têm sido propostos por vários autores como função directa da intensidade ou magnitude da acção sísmica, ou através de correlações com o dano físico sofrido pelos edifícios, à semelhança do que foi exposto na secção anterior. De entre as várias metodologias propostas para estimar a mortalidade e o número de feridos, referem-se as mais conhecidas neste domínio, nomeadamente: COBURN E SPENCE (2002), TIEDEMANN (1989), HAZUS (1999), BRAMERINI *et al.* (1995).

Por uma questão de coerência e consistência dos resultados, foi utilizada a proposta do *Servizio Sismico Nazionale* (BRAMERINI *et al.*, 1995) para estimar o número de mortos/feridos graves e de desalojados. A estimativa destas taxas pode também ser calculada em função da probabilidade de ocorrência de determinado grau de dano, pelas expressões seguintes:

$$P_{\text{mortos e feridos graves}} = 0.3 \times P(D_5) \quad (7)$$

$$P_{\text{desalojamento}} = P(D_3) \times W_{ei3} + P(D_4) \times W_{ei4} + 0.7 \times P(D_5) \quad (8)$$

Interpretando a expressão 7, considera-se que 30% dos residentes que habitam em edifícios que venham a colapsar (probabilidade de atingir ou exceder o grau de dano 5) sucumbam ou ficam gravemente feridos, enquanto que a probabilidade de pessoas a precisar de abrigo provisório é exprimida pela expressão 8 que considera que 100% das pessoas residentes em edifícios considerados inutilizáveis e os restantes 70% dos residentes dos edifícios que colapsam, não poderão reocupar suas habitações após a ocorrência de um sismo, considerando-se estes desalojados.

Analisam-se quatro cenários, com intensidade sísmica de VII, VIII, IX e X, de acordo com a escala macrossísmica, fornecendo resultados relativos ao número e percentagem de mortos e feridos graves, bem como da população residente desalojada (ver TABELA V). Note-se a elevada

percentagem de residentes que podem ficar desalojados, para intensidades sísmicas de VIII, revelando a importância que deve ser dada e a preocupação da capacidade de resposta, por parte das entidades competentes, no que diz respeito à necessidade de realojamento temporário no caso de ocorrência de um sismo de intensidade superior a VII.

Na Figura 12, podem observar-se exemplos de cruzamento de informação entre a probabilidade de perda de vida humana e as taxas de ocupação dos edifícios (resultante do levantamento socio-demográfico da área de estudo).

### Conclusões finais

A metodologia de avaliação da vulnerabilidade proposta e desenvolvida, revela-se muito fiável em consequência do elevado nível de informação e análise das características dos edifícios. O uso e implementação desta metodologia permitiu uma avaliação detalhada num grande número de edifícios da Baixa de Coimbra, e a possibilidade de esta ser complementada para os outros edifícios da mesma tipologia com um grau de informação disponível inferior, o que permitiu a construção de cenários completos, necessários na gestão e mitigação do risco sísmico. Esta metodologia proposta é aplicável a construções em alvenaria de outras regiões, mas salvaguarda-se a eventual necessidade de ser adaptada, ou ligeiramente modificada, para ter em conta características muito específicas das construções a avaliar.

Os cenários de dano estudados permitem afirmar que existe uma boa correlação com as fragilidades e características estruturais identificadas nos edifícios. Mesmo numa região de baixa a moderada perigosidade, como é o caso de Coimbra, o nível de dano poderá ser elevado, uma vez que a vulnerabilidade do edificado é elevada e relevante para uma zona com valor patrimonial e histórico.

Os resultados assim expostos, com recurso à ferramenta SIG desenvolvida, são claramente importantes na valorização dos mesmos e na criação de valor no processo de planeamento e gestão urbana, como no apoio de definição de estratégias de intervenção prioritária (reforço e reabilitação do património), protecção e planeamento de emergência.

TABELA V - Resultados da estimativa de mortos, feridos graves e desalojados

Número total de pessoas: 1800	Intensidade sísmica, I (EMS-98)			
	VII	VIII	IX	X
Desalojados	30 (1.67%)	419 (23.3%)	1313 (72.9%)	1478 (82.1%)
Mortos e feridos graves	0	0	31 (1.72%)	265 (14.7%)

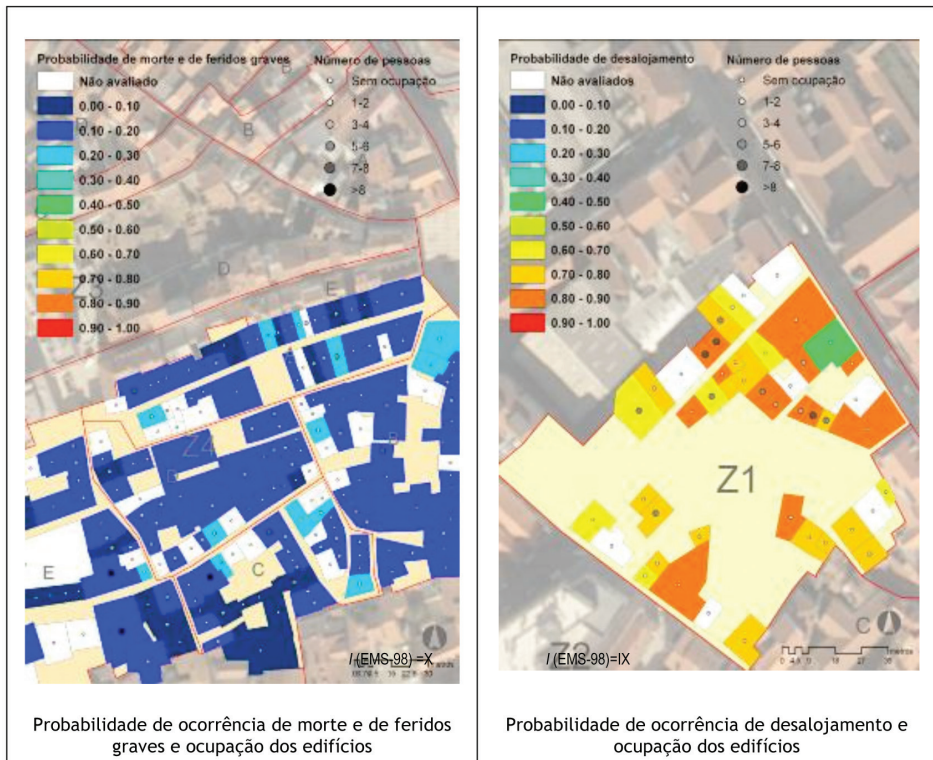


Fig. 12 - Cenários de perda (probabilidade de ocorrência de mortos/feridos e desalojamento).

Espera-se que futuramente se observem impactos deste caso de estudo, nomeadamente: i) no desenvolvimento de plataformas de gestão de dados e análise, integradas com outras ferramentas como o SIG; ii) no estabelecimento de um procedimento modular, quer em termos de inspeção e caracterização do edificado, quer em termos de avaliação de vulnerabilidade, estimativa de perdas e avaliação de danos; e, iii) na utilização e atualização da informação compilada por parte das autoridades responsáveis da gestão do edificado.

#### Referências bibliográficas

- ArcGis 9.2 (2005) - *Geographic Information Systems*, 310 New York Street, Redlands, 92373-8100, USA, ESRI®.
- BENEDETTI, D.; PETRINI, V. (1984) - "On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure". *The industry of constructions*. Vol.18, pp. 66-78.
- BRAMERINI, F.; DI PASQUALE, G.; ORSINI, A.; PUGLIESI, A.; ROMEO, R.; SABETTA, F. (1995) - *Rischio sismico del territorio italiano. Proposta per una metodologia e risultati preliminari*. Rapporto tecnico del Servizio Sismico Nazionale, SSN/RT/95/01, Roma.
- CAMPOS COSTA, A.; SOUSA, M.L.; CARVALHO, A.; COELHO, E. (2007) - "Seismic risk and mitigation analysis of the metropolitan area of Lisbon". *7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sismica*, FEUP, Porto, p. 3-16.
- CEN (2008) - *Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance - Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- COBURN, A.W.; SPENCE, R. (2002) - *Earthquake Protection*. Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd.
- GIOVINAZZI, S. (2005) - *The vulnerability assessment and damage scenario in seismic risk analysis*; PhD Thesis, International doctorate, University of Florence, Technical University of Carolo-Wilhelmina.
- GIOVINAZZI, S.; LAGOMARSINO, S. (2004) - "A Macro seismic Model for the vulnerability assessment of buildings". *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada.
- GNDT-SSN (1994). *Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo livello e secondo livello (muratura e cemento armato)*. Roma, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.

- GRÜNTAL, G. (1998) - *European Macroseismic Scale*. Luxembourg, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15.
- HAZUS (1999) - *Earthquake Loss Estimation Methodology*. Washington, D.C., Federal Emergency Management Agency, Technical and User Manuals.
- SANDI, H.; DOLCE, M.; COBURN, A.W.; GOSCHY, B. (1990) - "EEAE Working Group on Vulnerability and Risk Analysis, Report on the 9th ECEE". *Proceedings of the 9th ECEE*, Moscow.
- SANDI, H.; FLORICEL, I. (1995) - "Analysis of seismic risk affecting the existing IX building stock"; *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, p. 1105-1110.
- SPENCE, R.; BOMMER, J.; DEL RE, D.; BIRD, J.; AYDINOGLU, N.; TABUCHI, S. (2003) - "Comparison Loss Estimation with Observed Damage: A study of the 1999 Kocaceli Earthquake in Turkey". *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 1, p. 83-113.
- TIEDEMANN, H. (1989) - "Casualties as a function of building quality and earthquake intensity". *Proceedings of the International Workshop on Earthquake Injury Epidemiology for Mitigation and response*, 10-12 July, Baltimore, Maryland, Johns Hopkins University, p. 420-434.
- VICENTE, R. S. (2008) - *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.
- VICENTE, R.; VARUM, H.; MENDES DA SILVA, J.A.R. (2005) - "Seismic vulnerability assessment of buildings in the old city centre of Coimbra". *Proceedings of the International Conference 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake*, 1-4 of November, p. 206-213.
- VICENTE, R.; VARUM, H.; LAGOMARSINO, S.; PARODI, S.; MENDES DA SILVA, J.A.R. (2007) - "Metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios antigos à escala do centro histórico". *Proceedings of the 7º Congresso de Engenharia Sísmica*, 26-28 de September, FEUP, Porto.
- VICENTE, R.; PARODI, S.; LAGOMARSINO, S.; VARUM, S.; MENDES DA SILVA, J.A.R (2008) - "Seismic vulnerability assessment, damage scenarios and loss estimation. Case study of the old city centre of Coimbra, Portugal", Paper ID 09-01-0123; Session 09, *Earthquake Risk Reduction for Urban and Rural Areas: Urban Areas*, 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Sítio na Internet
- IM (2004). Instituto de Meteorologia. Lisboa. <http://www.meteo.pt/Sismologia/default.htm/>. (consulta em Dezembro de 2007).