

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DE EDIFÍCIOS ANTIGOS À ESCALA DO CENTRO HISTÓRICO

R. VICENTE

Assistente
DEC-UA
Aveiro-Portugal

H. VARUM

Prof. Auxiliar
DEC-UA
Aveiro-Portugal

J.A.R.M DA SILVA

Prof. Auxiliar
DEC-FCTUC
Coimbra-Portugal

S. LAGOMARSINO

Prof. Catedrático
UNIGE-DICAT
Génova-Itália

S. PARODI

Investigadora
UNIGE-DICAT
Génova-Itália

SUMÁRIO

A avaliação do risco sísmico associado aos edifícios existentes está relacionada com a causalidade sísmica local, a vulnerabilidade do edificado e a exposição. A avaliação da vulnerabilidade das construções é especialmente importante na avaliação do risco sísmico, particularmente para edifícios antigos em centros históricos, onde esta poderá ser um factor condicionante para o risco. O grau e o detalhe da avaliação da vulnerabilidade devem ser estabelecidos de acordo com a natureza e o nível de exposição dos edifícios, requerendo-se, tipicamente, um nível mais elevado em edifícios de maior valor patrimonial ou estratégico. A avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios existentes na perspectiva da redução do risco associado deve colocar-se não só em relação aos edifícios isolados de relevante importância histórica e cultural, mas também, em relação aos aglomerados de construções antigas em centros urbanos. A análise do desempenho de edifícios em sismos recentemente ocorridos na Europa tem permitido identificar os aspectos estruturais que mais influenciam na vulnerabilidade, e consequentemente nos danos. Propõe-se uma metodologia simplificada para avaliação da vulnerabilidade das construções antigas, e aplica-se a um núcleo urbano histórico, a Baixa de Coimbra. O método proposto, que constitui uma extensão de uma metodologia proposta por outros autores, calcula um índice de vulnerabilidade para cada construção com base em 14 parâmetros. São introduzidos três novos parâmetros na actual proposta. Esta é uma metodologia de primeiro nível, que poderá servir para identificar os edifícios mais vulneráveis do ponto de vista estrutural, que deverão assim ser analisados de forma mais detalhada, com recurso a outras ferramentas mais refinadas. A formulação proposta foi adoptada no estudo da vulnerabilidade sísmica de edifícios em alvenaria do centro urbano de Coimbra. Este estudo é precedido da observação, inspecção e registo de informação detalhada sobre os edifícios, ao nível da caracterização das construções (geometria, tecnologia construtiva, caracterização mecânica das estruturas de alvenaria, etc.) e levantamento de anomalias.

1. INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO

Países com baixo a moderado risco sísmico tem sofrido em fortes sismos recentes que causaram danos consideráveis e um nível importante de perda de vidas humanas. No caso do território nacional um sismo de intensidade moderada poderá causar importantes perdas económicas e nestas zonas de baixa a moderada perigosidade, onde as construções de alvenaria apresentam fragilidades estruturais, poderão correr risco de dano severo. Desde os anos 70, processos e programas de reabilitação urbana, nomeadamente de centros históricos tem sido objecto de atenção política e de acções de investigação como consequência de uma consciencialização lenta da sustentabilidade urbana e na promoção pública destes conjuntos de património arquitectónico. Vários aspectos no âmbito destes processos tem sido analisados: reabilitação, higiene e condições de habitabilidade, lei das rendas, sustentabilidade energética e autenticidade arquitectónica. Porém, a avaliação da segurança e vulnerabilidade destas construções face à acção sísmica não é considerada com a importância premente dada a ausência de eventos sísmicos de importante escala. A avaliação da vulnerabilidade dos edifícios à escala urbana é um exercício complexo, uma vez que a inspecção e diagnóstico de determinados aspectos destes edifícios

deverão ser registados com o maior rigor possível de forma a reduzir a variabilidade intrínseca de um levantamento e registo à escala urbana.

Metodologias simplificadas de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios tem sido desenvolvidas por vários autores ao longo dos últimos anos, “Rapid screening method” do ATC-21 [1], Ficha GNDT II [2] e “Macroseismic method” [3], com especial intensidade em países com fortes níveis de perigosidade como a Itália, Japão e nos Estados Unidos. Na avaliação do parque construído e particularmente de construções antigas em alvenaria isenta de cuidados de construção anti-sísmica, representa uma parte significativa dos edifícios em centros históricos, deve ser objecto de um avaliação denominada de primeiro nível. O documento proposto no âmbito de um projecto europeu, RiskUE [4] classifica as metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica essencialmente em 3 categorias em respeito ao grau de profundidade pretendida, à escala da avaliação e aos recursos e dados disponíveis. O primeiro nível de avaliação da vulnerabilidade, do qual é tratada neste artigo, é feita com recurso a informação de natureza qualitativa e quantitativa acerca de um grande número de edifícios, o segundo nível de avaliação envolve modelos mecânicos que necessitam de informação mais detalhada em termos de geometria e constituição da construção e, o terceiro nível em modelos numéricos com elevado detalhe estrutural.

1.1. Objectivos

O processo de Reabilitação Urbana da Baixa de Coimbra iniciou-se, com o levantamento exaustivo da realidade existente. A identificação completa e inspecção da área de intervenção foram levadas a efeito por três equipas em domínios diferentes: Arquitectura, Sociologia e Engenharia Civil, com objectivos específicos porém interdisciplinares: (i) levantamento arquitectónico, identificação de tipologias e valor patrimonial, (ii) caracterização construtiva e levantamento de anomalias do edificado, (iii) caracterização sócio-demográfica. Uma quarta equipa de sistemas de gestão de informação desenvolveu e concebeu um sistema de organização do enorme volume de dados recolhidos permitindo o seu armazenamento, interrelacionamento e análise [5]. Toda a informação utilizada na avaliação da vulnerabilidade foi possível através de uma inspecção, identificação e caracterização detalhada do edificado, constituindo uma base de todo o processo, pelo conhecimento e identificação dos parâmetros mais importantes na avaliação da vulnerabilidade conduzindo a uma análise credível. Este levantamento permitiu recolher informação acerca de 809 edifícios. No entanto, salienta-se que a limitação da acessibilidade de várias construções não permitiram inspecionar com detalhe alguns edifícios.

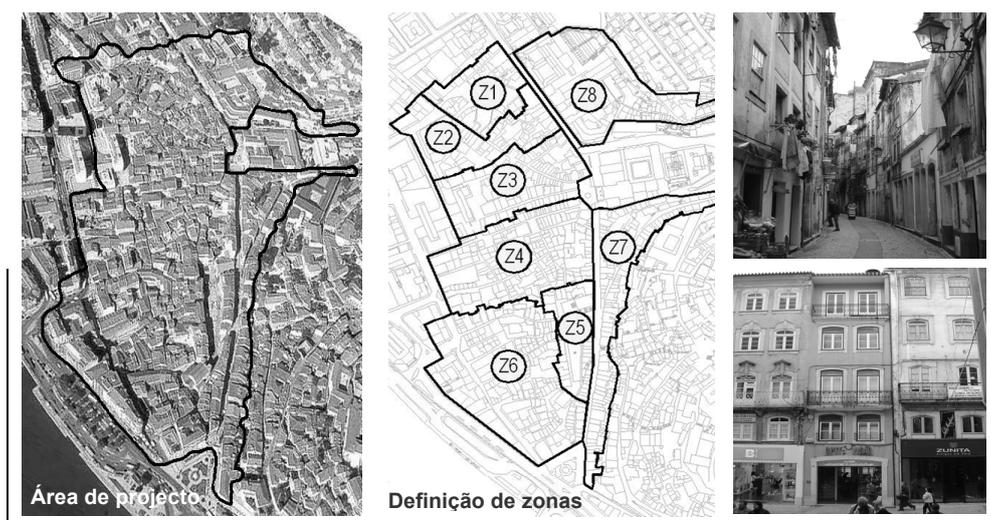


Figura 1: Perímetro do projecto, zonas e edificado urbano.

2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA – I_v

A metodologia desenvolvida para avaliar a vulnerabilidade do centro histórico de Coimbra, teve em conta a escala e número de edifícios a avaliar e é baseada no tratamento da informação recolhida no terreno durante o processo de inspeção e levantamento. A formulação da metodologia é semelhante às outras anteriormente expostas [2, 3] porém melhorada e adaptada à realidade local e com um nível de detalhe superior devido à informação resultante do levantamento exaustivo efectuado do edificado da Baixa. Note-se que o detalhe utilizada nesta metodologia foi possível pelo facto de este estudo estar inserido num processo com outros objectivos ao nível da renovação urbana, aproveitando recursos e destacando-se das metodologias de primeiro nível pela avaliação quantitativa e rigorosa de alguns parâmetros.

A metodologia baseia-se no cálculo de um índice de vulnerabilidade, como a média ponderada de 14 parâmetros. Estes parâmetros são classificáveis em 4 classes de vulnerabilidade: A, B, C e D. Cada parâmetro avalia um aspecto que influencia a resposta sísmica do edifício, estimando-se a classe de vulnerabilidade que a caracteriza. É associado a cada parâmetro, um peso que varia de 0.5 para os parâmetros menos importantes e de 1.5 para os parâmetros mais importantes no cálculo do índice de vulnerabilidade (ver tabela 1). O índice de vulnerabilidade de um edifício poderá variar entre 0 e 650, mas o valor desta soma ponderada pode ser normalizado a um intervalo entre 0 e 100. Definindo uma pontuação que é depois usada na estimativa de dano e perdas, considerado assim um método indirecto no qual é avaliado um índice de vulnerabilidade como um passo intermédio na estimativa de cenários de dano associados a níveis de acção sísmica definidos pela intensidade, I-EMS-98 [6] ou aceleração do solo (PGA).

Na tabela 1 são listados os 14 parâmetros usados na formulação do índice de vulnerabilidade, bem como as classes e os pesos de cada parâmetro. É na definição e atribuição dos pesos aos parâmetros que reside a fonte de incerteza que foi objecto de uma análise de sensibilidade como se expõe no ponto seguinte 2.1.

Na Figura 2 é ilustrada a distribuição de alguns parâmetros e ainda a influência destes na definição do índice de vulnerabilidade no caso da Baixa de Coimbra. De todos os parâmetros avaliados, os mais influentes são os parâmetros: 3, 6, 9, 11, 12 e 13 (ver Figura 2). Esta avaliação é importante porque permite identificar quais os parâmetros que podem ser alterados pela definição de acções de reforço, revelando-se os mais interessantes na redução da vulnerabilidade do edificado.

Tabela 1 – Índice de vulnerabilidade (I_v)

PARÂMETROS	Classe C_{vi}				Peso	Índice de Vulnerabilidade
	A	B	C	D	p_i	
1 Organização do sistema resistente	0	5	20	50	0.75	$I_v = \sum_{i=1}^{11} C_{vi} \times p_i$
2 Qualidade do sistema resistente	0	5	20	50	1.00	
3 Resistência convencional	0	5	20	50	1.50	
4 Distancia máxima entre paredes	0	5	20	50	0.75	
5 Numero de pisos	0	5	20	50	1.50	
6 Posição do edifício e fundações	0	5	20	50	0.75	
7 Localização e interacção	0	5	20	50	1.50	
8 Irregularidade em planta	0	5	20	50	0.75	
9 Irregularidade em altura	0	5	20	50	0.75	$0 \leq I_v \leq 650$
10 Aberturas e alinhamento	0	5	20	50	0.50	
11 Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1.00	
12 Tipo de cobertura	0	5	20	50	1.00	Índice normalizado $0 \leq I_v \leq 100$
13 Danos estruturais e estado de conservação	0	5	20	50	1.00	
14 Elementos não-estruturais	0	5	20	50	0.50	

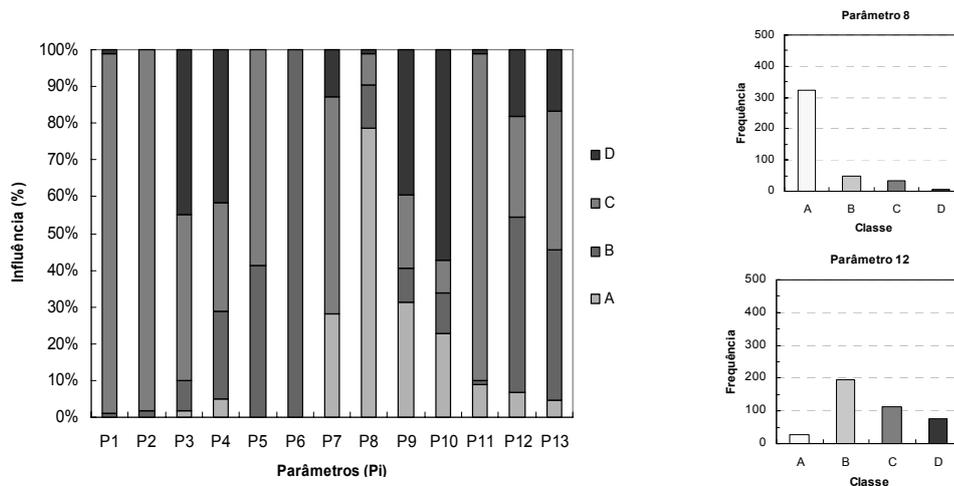


Figura 2: Influência de cada parâmetro no cálculo de I_v e distribuição de alguns parâmetros (8 e 12).

2.1. Validação da metodologia

A metodologia proposta é semelhante à da avaliação feita com a ficha de segundo nível, GNDT II [2], em que também é definido um índice de vulnerabilidade como a soma ponderada de vários parâmetros. A metodologia criada melhora a avaliação da vulnerabilidade introduzindo novos parâmetros e refinando alguns dos existentes, contudo os parâmetros mais importantes não são significativamente modificados em relação à metodologia do GNDT permitindo que as relações estabelecidas entre a vulnerabilidade avaliada e os danos observados sejam válidas no caso da presente metodologia, já que não existem dados, nem correlações desta natureza para o edificado português. A metodologia de avaliação da vulnerabilidade e estimativa de danos, desenvolvida por Petrini e Benedetti [7] define uma correlação determinística entre a acção sísmica, expressa em PGA, e o nível de dano expresso pelo índice económico. Esta correlação entre a severidade da acção sísmica e o dano avaliado através de um índice de vulnerabilidade, é baseada em observações de danos infringidos sobre construções em alvenaria em vários sismos ocorridos no território italiano. Em geral, esta relação é traduzida através de uma curva com a configuração típica da ilustrada na Figura 3, caracterizada por um fase inicial em que se instala apenas dano ligeiro (y_i) com reduzida fissuração, evoluindo de forma aproximadamente linear o dano sofrido pela construção até um ponto (y_c) em que depois a cedência é muito próxima do colapso final [8].

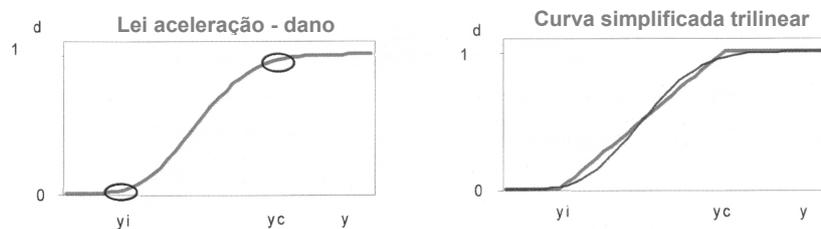


Figura 3: Relação entre aceleração de pico (PGA) e índice de dano (d) e aproximação por curva simplificada [8].

De forma a simplificar este processo de avaliação do nível de dano, é assumida uma função trilinear aproximada de forma que para qualquer valor do índice de vulnerabilidade, a correlação é definida por ramos lineares delimitados pelos valores respectivos de aceleração y_i e y_c que correspondem aos valores de aceleração que introduzem os primeiros danos e o colapso da estrutura. A adopção da aceleração máxima ao nível do solo (PGA) como parâmetro definidor da severidade da acção sísmica baseia-se no facto de assim se poder usar um parâmetro contínuo, no entanto, em avaliações de grande escala, o recurso à intensidade sísmica é mais comum. Mesmo que os dados fossem expressos e referentes em termos de outra medida caracterizadora da acção, como a

intensidade macrosísmica (MCS), é possível estabelecer a relação entre as intensidades e correspondentes acelerações de solo com recurso à lei de Guagenti and Petrini (1989) [8], traduzida pela expressão seguinte:

$$\ln(y) = a \times I_{MCS} - b \quad \text{com } a = 0.602 \text{ e } b = 7.073 \quad (1)$$

Para converter estas curvas para outra escala de intensidade, I_{EMS-98} , a aceleração (y) pode ser convertida para a escala MCS (I_{MCS}), usando a equação (1) e pela comparação entre as duas leis I-PGA, propostas por Margottini *et al.* [9], uma em termos de MCS e outra em termos de MSK, e atendendo à equivalência entre as escalas MSK e EMS-98, ($I_{MSK} = I_{EMS-98}$) é possível correlacionar estas duas escalas macrosísmicas.

$$I_{MSK} = 0.7344 + 0.8136 \times I_{MCS} \quad (2)$$

Esta metodologia permite assim estimar o nível de dano, traduzido por um índice de dano, d , para determinados níveis de intensidade definidos pela escala macrosísmica europeia de 1998 [6]. No entanto, esta metodologia aplicada a uma maioria do edificado da Baixa de Coimbra, como já referido, exige um nível de detalhe na informação dos edifícios, que nem sempre é possível por diversas dificuldades nomeadamente: falta de acessibilidade ao interior do edificado, falta de informação, etc. Nestes casos, um procedimento mais simples pode ser utilizado em função dos valores médios obtidos para o edificado em que foi efectuada uma análise detalhada desde que partilhem das mesmas características construtivas e tipológicas. Para conseguir uma avaliação completa da vulnerabilidade do edificado dentro do perímetro de estudo distinguindo o nível de detalhe, para uma minoria de edifícios não possíveis de inspecionar foi usada uma metodologia semelhante à já utilizada por Giovinazzi e Lagomarsino [3], que consiste basicamente numa metodologia tipo “rapid screening”, que facilmente se aplica com o conhecimento de algumas características e informação básica (altura do edifício, posição do edifício, irregularidade em altura, irregularidade em planta, etc.). Esta metodologia parte da definição de um valor de vulnerabilidade inicial, em função da tipologia estrutural do edifício. Este valor do índice de vulnerabilidade, V , é depois completo por parâmetros modificadores dependentes das características singulares do edifício [10]. A partir deste valor de vulnerabilidade, definida entre 0 a 1, é construída a curva de vulnerabilidade do edifício, ou tipologia de edifício para diferentes intensidades sísmicas de acordo com a escala EMS-98 [6], permitindo obter o grau de dano médio, μ_D , definido entre 0 a 5. A estimativa de dano de Petrini e Benedetti [7] é na verdade um índice de dano económico que varia de 0 a 1, e que define a relação entre o custo de reparação e o valor da construção. Este índice de dano económico é correlacionável com um grau de dano médio, μ_D , usando os valores apresentados na tabela 2, permitindo uma correlação com dano físico, por graus de dano D_k com k variando entre 0 e 5.

$$\mu_D = \sum_{k=0}^5 p_k \times D_k \quad (3)$$

Onde: p_k é a probabilidade associada a um grau de dano, D_k , com $k \in [0; 5]$ e μ_D , o grau de dano médio, representando o valor baricêntrico de uma distribuição discreta de dano.

Tabela 2 – Correlações entre graus de dano e índice de dano económico (várias propostas).

Grau de dano, D_k		0	1	2	3	4	5
Nível de dano		Sem dano	Ligeiro	Moderado	Severo	Muito severo	Destruição
Índice de dano económico, d	HAZUS []	0	0.02	0.1	0.5	1	1
	ATC13 []	0	0.05	0.2	0.55	0.9	1
	SSN []	0	0.01	0.1	0.35	0.75	1
	Dolce []	0	0.035	0.145	0.305	0.8	1

A correlação estabelecida pelo ATC-13 [11] foi considerada a mais realística, uma vez que para valores de dano, (D_k) baixos, o índice de dano económico não é igualmente baixo uma vez que os custos associados a pequenas reparações de fissuras não são normalmente desprezáveis. Por outro lado, para graus de dano (D_k) elevados, os custos de reparação associados a estruturas muito danificadas, correspondendo a graus de dano elevados (D_4),

podem ser maiores do que a demolição e reconstrução da mesma e, daí, esta correlação levar a menores diferenças de índice de dano, d , para estados de dano elevados.

Estas correlações entre o índice de dano económico, d , e o grau de dano médio, μ_D , são obtidas estabelecendo uma matriz de probabilidade de dano (MPD), obtida através de uma distribuição beta, discretizada em 5 graus de dano com o parâmetro da distribuição $t=4.36$. Assim o valor de d , é obtido por:

$$d = \sum_{k=0}^5 p_k \times f_d; \quad (4)$$

Onde: p_k é a probabilidade associada a um grau de dano, D_k , com $k \in [0; 5]$ e, f_d , como valores do índice de dano indicados na tabela 2. e A relação entre d , e μ_D pode ser traduzida numericamente através de uma correlação dada aproximadamente pela expressão seguinte:

$$\mu_D = 5 \times d^{0.78} \quad (5)$$

Pela metodologia macrosísmica de Giovinazzi & Lagomarsino [10], a estimativa e avaliação de dano é conseguida pela função analítica seguinte, baseada na formulação proposta de Sandi [12]:

$$\mu_D = \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 \times V - 13.1}{Q} \right) \right] \quad 0 \leq \mu_D \leq 5 \quad (6)$$

O grau de dano médio calculado depende do índice de vulnerabilidade, V , definido entre 0 e 1, da intensidade macrosísmica, I (EMS-98), e do factor Q , que tem em conta a ductilidade de cada tipo de construções. Uma vez definidas as transformações da aceleração (y) em intensidade (I_{EMS98}) e em índice de dano económico, d , para grau de dano médio μ_D , é possível fazer o confronto das curvas de vulnerabilidade de Benedetti-Petrini [7] no formato $I - \mu_D$ com as do método macrosísmico [10], observe-se a Figura 4. Pelo confronto das curvas de vulnerabilidade das duas metodologias em relação a um valor central de dano médio ($\mu_D = 2.5$) pode-se observar a correspondência apresentada na tabela 3. Esta equivalência na definição da vulnerabilidade entre as duas metodologias (GNDT II e método macrosísmico) valida também uma correspondência com o método proposto e aqui apresentado com o mesmo método macrosísmico [10] uma vez que existe semelhança entre o método proposto e o método do GNDT II [2]. Na base deste confronto define-se analiticamente:

$$V = 0.58 + 0.0064 \times I_V \quad (7)$$

Tabela 3 – Correlação entre os índices de vulnerabilidade das duas metodologias.

Método macrosísmico	Classe A ($V = 0.90$)	Classe B ($V = 0.74$)	Classe C ($V = 0.58$)
GNDT II	$I_V = 50$	$I_V = 25$	$I_V = 0$

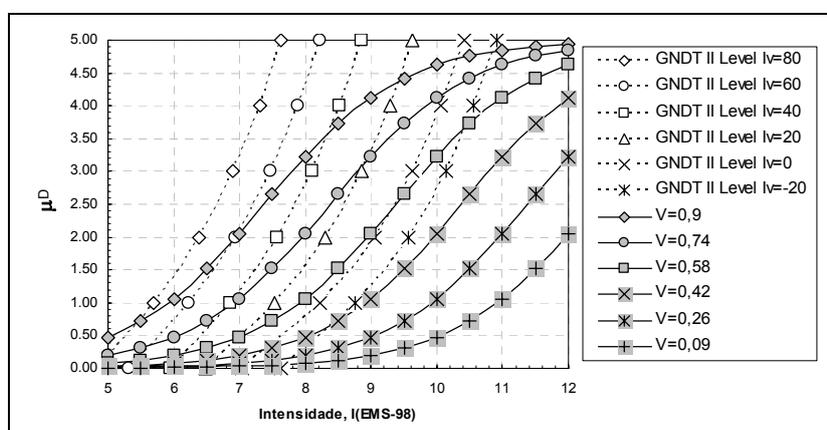


Figura 4: Confronto das curvas de vulnerabilidade do GNDT nível II, e a metodologia macrosísmica.

3. RESULTADOS DA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE

A avaliação da vulnerabilidade foi efectuada em duas fases. Numa primeira fase a avaliação da vulnerabilidade para os edifícios com informação detalhada, numa segunda fase a avaliação da vulnerabilidade do edificado, sem informação detalhada é desenvolvida, de forma mais expedita com base nos resultados médios obtidos da avaliação previamente feita, na primeira fase, e com recurso a factores de modificação, completando assim a avaliação de toda a área do projecto. Dos resultados da avaliação da Baixa de Coimbra foi obtido um valor médio de vulnerabilidade de 38.13, valor este que não varia substancialmente quando adicionando os resultados da avaliação da vulnerabilidade não detalhada, reduzindo um pouco a dispersão à volta deste valor médio, como se ilustra na Figura 5.

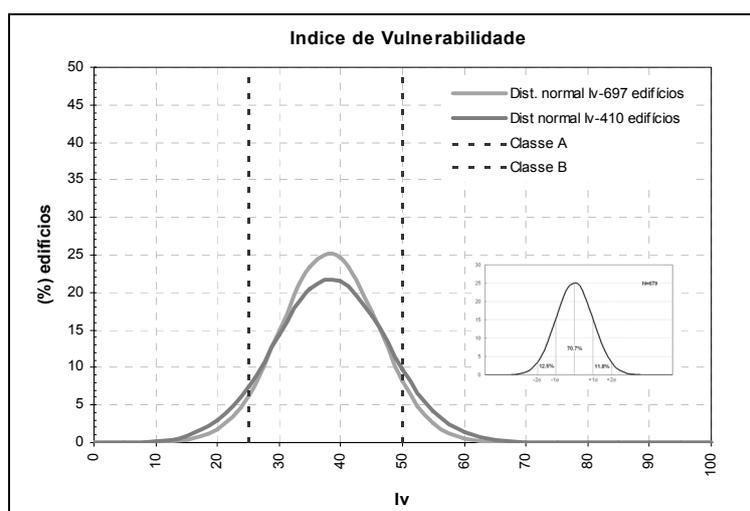


Figura 5: Distribuição dos valores do Índice de vulnerabilidade (I_v).

Verifica-se que cerca de 40% do edificado tem um valor do índice de vulnerabilidade acima dos 40 e cerca de 10% acima dos 50 (ver Figura 5). Apenas 8% dos edifícios tem um I_v abaixo dos 25. De todos valores de I_v calculados o máximo e mínimo obtidos são respectivamente 60.58 e 12.12.

3.1. Ferramenta SIG

Para tratar, trabalhar e representar os resultados recorreu-se a uma ferramenta de representação espacial, o ArcGis 9.2 [13], ligada a uma base de dados relacional com características do edificado e, particularmente, dos dados utilizados na avaliação da vulnerabilidade sísmica associada. O uso de um sistema de informação georeferenciada permite associar a disposição e localização dos edifícios com a informação da vulnerabilidade, o cruzamento com outros níveis de informação e outras variáveis, bem como a visualização de cenários de risco e, ainda o desenvolvimento de análises de sensibilidade. Na Figura 6 são ilustrados os resultados da análise de vulnerabilidade efectuada e indicado o nível de detalhe na sua avaliação. Fazem-se de seguida alguns comentários aos resultados apresentados neste ponto (ver Figura 6):

- O desvio padrão da distribuição do índice de vulnerabilidade (σ_{I_v}) associado somente à avaliação detalhada e à avaliação integral com recurso ao procedimento expedito para a avaliação difere muito pouco, de 9.12 para 7.86, representando uma variação de 26%, apesar do valor médio variar muito pouco de 38.13 para 38.38.
- O procedimento expedito utilizado apresenta-se muito fiável para avaliar a vulnerabilidade de uma determinada zona de estudo quando existente um número considerável de edifícios com avaliações detalhadas e com um bom nível de qualidade de informação.

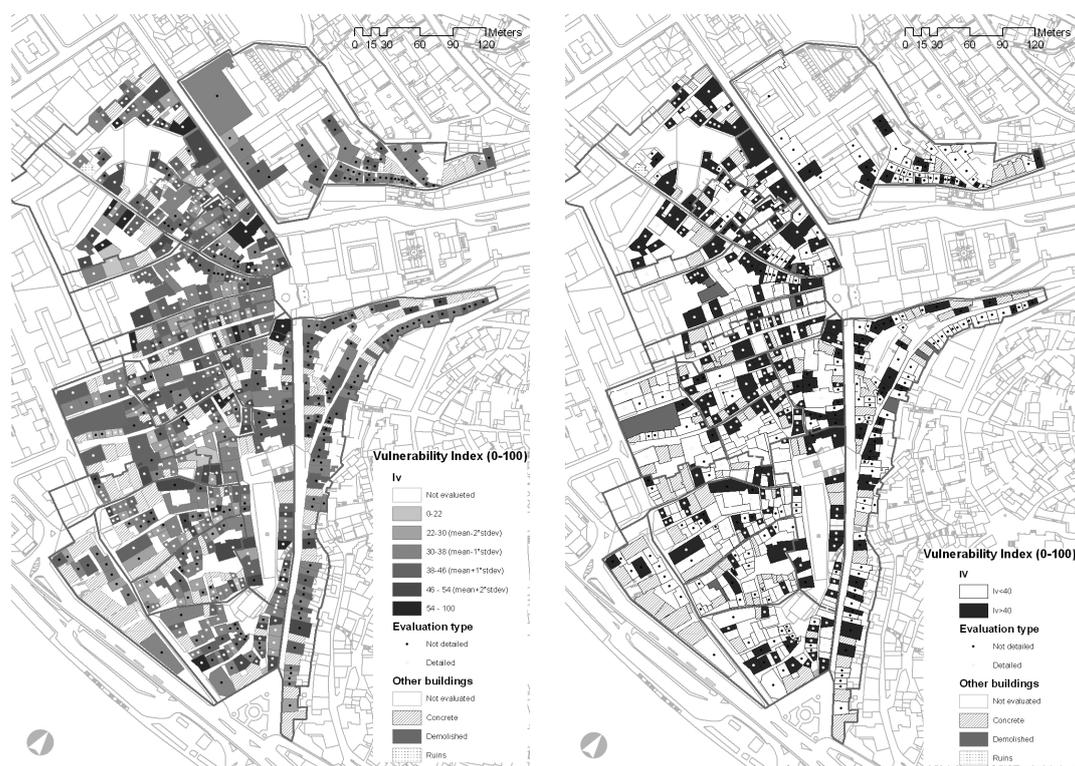


Figura 6: Mapeamento de resultados (índice de vulnerabilidade).

4. ESTIMATIVA E CENÁRIOS DE DANO

A estimativa de danos físicos é baseada no valor dado pela expressão 6. Esta expressão, de comportamento hiperbólico, é derivada da formulação de Sandi [12] e baseada na interpolação de resultados de dano médio resultantes de distribuições de dano sugeridas das matrizes de probabilidade de dano completas (MPD) da escala EMS-98 [6]. O valor de dano médio, que varia entre 0 e 5, depende do índice de vulnerabilidade definido, V (0 a 1) e da intensidade, I , definida pela escala macrosísmica EMS-98 [6], e a ductilidade é controlada pelo valor de Q , característica de uma tipologia ou grupo de construções e que toma um valor entre 1.5 e 3, no caso de construções em alvenaria. Os valores do índice de vulnerabilidade, I_v , poderão ser utilizados na equação 6, pela correlação entre índices, como definido na equação 7 e que pode ser expressa também na seguinte forma:

$$I_v = 156.25 \times V - 90.625 \quad (8)$$

O índice de vulnerabilidade, I_v , determina a posição da curva de vulnerabilidade por incrementos que definem mudança de classe de vulnerabilidade e o factor de ductilidade Q , determina a inclinação da curva de vulnerabilidade, isto é o incremento de dano com a intensidade. Para o caso de estudo apresentado, o factor de ductilidade utilizado foi de 2.0 (estudos feitos por Sandi [12] sugerem ainda que o valor de 2.0 para edifícios em alvenaria com moderada ductilidade). Este é o valor que conduz ao melhor ajuste entre as curvas de vulnerabilidade do método GNDT e as curvas de vulnerabilidade do método macrosísmico na escala EMS-98. Na Figura 7 são ilustradas as curvas de vulnerabilidade construídas, para o valor médio do índice de vulnerabilidade, para os edifícios em alvenaria da Baixa de Coimbra e ainda curvas para o valor médio mais e menos um ou dois desvio padrão característica da distribuição do índice de vulnerabilidade.

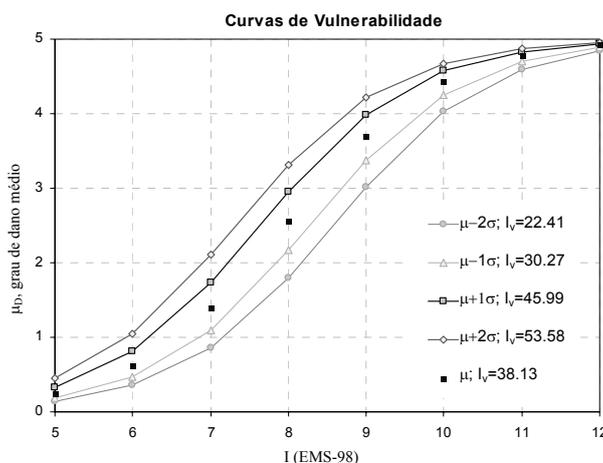


Figura 7: Curvas de vulnerabilidade para o edificado em alvenaria do centro histórico de Coimbra.

Dos valores do grau de dano médio, μ_D , podem-se definir diferentes histogramas de dano, para diferentes intensidades e valores de vulnerabilidade representativa, numa base probabilística. Normalmente são utilizadas as funções de distribuição de probabilidade binomial e beta. A probabilidade associada a uma função de distribuição de cada grau de dano, D_k , com $k \in [0; 5]$ pode ser calculada pela expressão seguinte:

$$PMF : p_k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \times d^k \times (1-d)^{n-k} \quad \text{com } n \geq 0 \quad \text{e} \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (9)$$

O uso da função binomial é justificada pela proximidade a resultados de tratamento estatístico dos dados recolhidos de eventos sísmicos. Porém a sua elevada dispersão conduz a resultados sobrestimados ou subestimados em função do valor de grau de dano médio, μ_D .

As distribuições de dano apresentadas são construídas a partir de uma função de densidade de probabilidade beta. Os estudos de Giovinazzi [10] demonstraram que o uso de uma distribuição beta apresenta-se mais versátil, podendo controlar a geometria da distribuição, pelos parâmetros que definem a geometria t e r , permitindo ajustar-se a distribuições de dano mais ou menos dispersas usando a expressão seguinte:

$$PDF : p_\beta(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \times \frac{(x-a)^{r-1} (b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}}; \quad a \leq x \leq b \quad (10)$$

Esta expressão define a função de densidade de probabilidade contínua, em que: r e t são parâmetros que controlam a geometria da distribuição; a e b os limites da distribuição; e, Γ a função gamma. Pretendendo-se uma distribuição discreta, pode-se definir a probabilidade associada a cada grau de dano (D_k , com k entre 0 e 5) da seguinte forma:

$$\begin{aligned} P(0) &= \int_0^{0.5} p_\beta(x) dx \\ P(k) &= p_\beta(x) dx \\ P(5) &= \int_{4.5}^5 p_\beta(x) dx \end{aligned} \quad (11)$$

A distribuição discreta de dano é assim caracterizada pelo valor do grau de dano médio, μ_D , e a variância, σ_D^2 . Assumindo uma relação análoga entre os parâmetros da distribuição beta discreta e a contínua, da equação (12) é obtida a seguinte expressão, que define a variância da distribuição de dano:

$$\sigma^2 = \frac{\mu_D \times (b + a - \mu_D) - b \times a}{t + 1} \quad (12)$$

O valor de μ_D é definido em função da vulnerabilidade e da intensidade, no entanto na base dos mesmos parâmetros não é definido σ^2_D . A variância é definida em função do grau de dano médio e dos parâmetros, a, b e t. O valor adoptado nesta avaliação para t foi de 12. Tal valor foi escolhido porque conduz a uma variância semelhante intrínseca da completação das matrizes de probabilidade de dano da escala EMS-98, como proposto pelo método macrosísmico para diferentes intensidades e em função do valor da média e do desvio padrão que caracterizam essas distribuições, é avaliada o valor de t. Na Figura 8 observam-se cenários de dano, para uma acção sísmica caracterizada por intensidades de VIII e IX, que corresponde à máxima intensidade histórica sentida e registada na região de Coimbra (terramoto de 1755). Os valores de dano para a intensidade VIII variam entre 1.3 e 3.6, e entre 2.5 a 4.4 para o outro cenário, com intensidade IX.

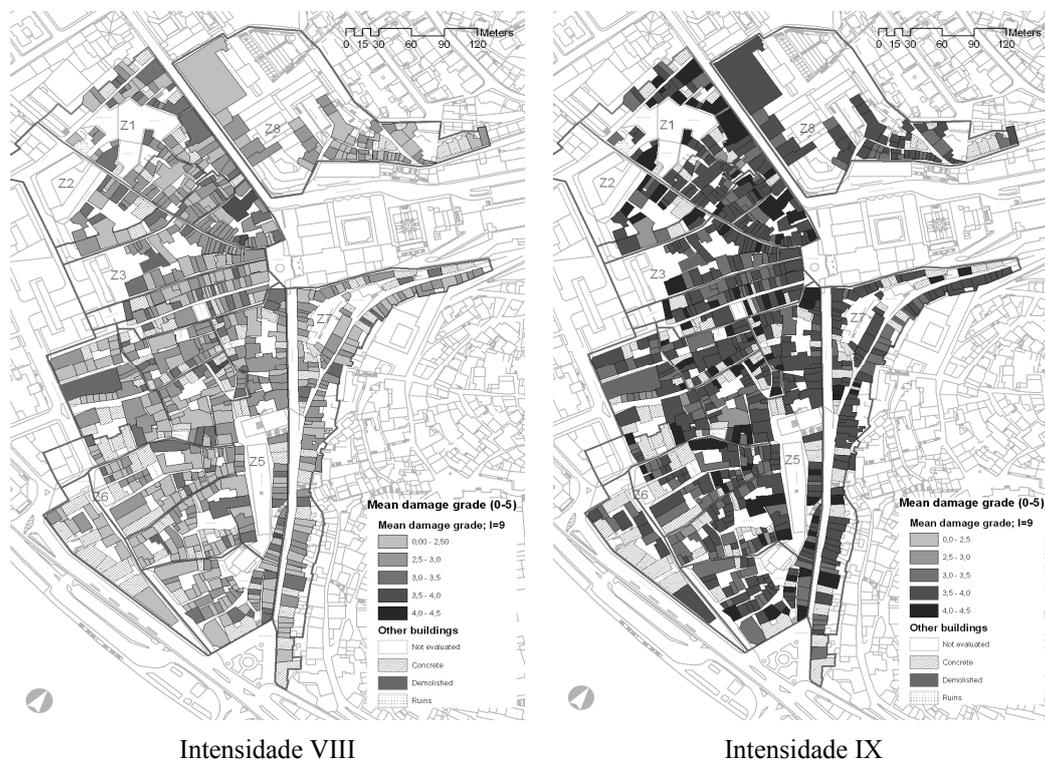


Figure 8: Análise especial dos danos para dois cenários de diferente intensidade sísmica VIII e IX.

5. AVALIAÇÃO DE CUSTOS

Os danos podem ser interpretados como uma medida económica, como definido por Petrini [7] através de um índice que representa o quociente entre o custo de reparação e de substituição. Tentativas de correlação entre os graus de dano e os custos de reparação e reconstrução tem sido propostas por vários autores como fruto de processamento de dados pós-sismo (ver tabela 4).

A relação mais razoável e fiável, ou seja aquela que assume um valor do índice de dano mais próximo para os graus de dano 4 e 5 e para graus de dano baixos 1 e 2, valores mais elevados do índice de dano como corroborado pelo trabalho de Di Pasquale e Goretti [16] no tratamento de informação pós-sismo.

Tabela 4 – Correlação entre os níveis de dano e o índice de dano.

Grau de dano, D_k	0	1	2	3	4	5
Bramerini, SSN []	0.000	0.010	0.100	0.350	0.750	1.000
ATC13	0.000	0.05	0.200	0.550	0.900	1.000
Dolce <i>et al.</i>	0.005	0.035	0.145	0.305	0.800	0.950

As correlações do ATC-13 [11] e de Dolce [17] são as que estão mais de acordo com este critério. A correlação estabelecida por Dolce *et al* [17] é o produto do tratamento de resultados dos inquéritos dos eventos sísmicos de Umbria-Marché em 1997, e Pollino, em 1998 em informação de ações de intervenção, avaliando os custos globais de reparação em mais de 50.000 edifícios. Note-se que estes valores consideram um custo de reforço intrínseco aos custos de reparação e que dificilmente são dissecados. A estimativa de custos de reparação resultam de um produto da probabilidade condicionada do custo de reparação ao nível de dano, $P[R|D_k]$ (expressa em termos dos valores apresentados na tabela 4) e a probabilidade condicionada do dano à vulnerabilidade do edifício e da intensidade sísmica, $P[D_k|V, I]$ podendo-se escrever da seguinte forma:

$$\Pr[R|I] = \sum_{D_k=1}^5 \sum_{I_v=0}^{100} \Pr[R|D_k] \times \Pr[D_k|I_v, I] \quad (13)$$

Calculando os custos para valores de vulnerabilidade média e limites superior e inferior ($I_{vmédio}$, $I_{vmédio}+2\sigma$, $I_{vmédio}-2\sigma$), os custos de reparação estimados para o edificado relativamente à sua área e valor imobiliário médio (1000€/m²) são representados na Figura 9, em função da intensidade sísmica.

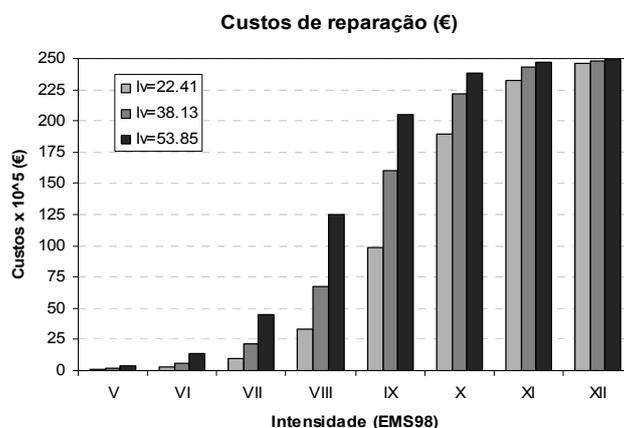


Figure 9: Estimativa de custos de reparação (milhões euros).

Observa-se que para as intensidades sísmicas de V a IX a diferença dos custos de reparação, para os valor médio, máximo e mínimo é substancialmente diferente. Para intensidades mais elevadas esta diferença é menor devido à severidade da ação, que conduz a valores de dano elevados mesmo para valores de vulnerabilidade moderada. Tendo em conta a perigosidade sísmica da região de Coimbra, devem ser considerados os resultados para o intervalo de intensidades entre VII e VIII

6. CONCLUSÕES

A metodologia de avaliação da vulnerabilidade desenvolvida revela-se muito fiável em consequência do bom nível de informação utilizada e da refinada análise das características dos edifícios. O uso e implementação de uma ferramenta que combine uma avaliação com detalhe para a maioria dos edifícios, complementada com um grau de detalhe menor para outros edifícios, permitindo construir cenários completos, necessários na avaliação ,

gestão e mitigação do risco sísmico. Esta metodologia é aplicável a construções em alvenaria de outras regiões ou territórios, salvaguarda-se necessários ajustes. Os cenários de dano estimados permitem afirmar que existe uma boa correlação com as fragilidades identificadas e características estruturais dos edifícios estudados. As ações de análise de vulnerabilidade à escala dos centros históricos, criação de cenários de danos, estimativa de perdas e custos são seguramente importantes na definição de estratégias e prioridades para a redução de risco de perda de valor patrimonial, por vezes de incalculável valor cultural e histórico, parte da identidade nacional.

7. AGRADECIMENTOS

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da "FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia", Portugal.

8. REFERÊNCIAS

- [1] ATC 21 (1988). Rapid Visual Screening of building for Potential Seismic Hazards: a Handbook. Applied Technology Council, FEMA-145, Redwood City, California.
- [2] GNDT, (1994). Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo livello e secondo livello (muratura e cemento armato). Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma (in Italian).
- [3] Giovinazzi S., Lagomarsino S. (2004). A Macroseismic Model for the vulnerability assessment of buildings. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada.
- [4] RISK-UE Project (2001-2004), An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European cities, Website: <http://www.risk-ue.net>
- [5] Vicente R. S, 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, 1st-4th of November*, pp. 206-213.
- [6] Grunthal G. (1998). *European Macroseismic Scale*. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg. Vol. 15.
- [7] 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.
- [8] Guagenti E., Petrini V. (1989). Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità. *Proc. of 4th Italian Conference on Earthquake Engineering*, Milano, Vol. I, pp. 145-153.
- [9] Margottini C., Molin D., Narcisi B., Serva L. (1992). Intensity versus ground motion: a new approach using Italian data. *Engineering Geology*, vol.33, pp. 45-48.
- [10] 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.
- [11] ATC-13 (1987). *Earthquake damage evaluation data for California*. Applied Technology Council, Redwood City, California.
- [12] Sandi H., Floricel I. (1995). Analysis of seismic risk affecting the existing IX building stock. *Proc. of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, pp. 1105-1110.
- [13] ArcGis 9.1 (2005), Geographic Information Systems, 310 New York Street, Redlands, 92373-8100, USA, ESRI®
- [14] 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*. Rapporto tecnico del Servizio Sismico Nazionale, SSN/RT/95/01, Roma (in Italian).
- [15] HAZUS (1999). *Earthquake Loss Estimation Methodology - Technical and User Manuals*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [16] Di Pasquale G, Goretti A. (2001). Economic and functional vulnerability of residential buildings stricken by Italian recent seismic events. In: *Proceedings of the 10th Italian national conference on earthquake engineering*; [in Italian].
- [17] Dolce M., Kappos A., Masi A., Penelis G., Vona, M. (2005). Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies, Elsevier, *Engineering Structures*, vol. 28, pp. 357-371.