

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA: CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO MACROSSÍSMICA

Romeu Vicente*

Professor Auxiliar
Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal
romvic@ua.pt

Tiago M. Ferreira

Investigador
Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal
tmferreira@ua.pt

Rui Maio

Investigador
Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal
ruimaio@ua.pt

Alexandre A. Costa

Professor Adjunto
Instituto Superior de
Engenharia do Porto
Porto, Portugal
alc@isep.ipp.pt

João Estêvão

Professor Adjunto
Instituto Superior de
Engenharia da
Universidade do Algarve
Faro, Portugal
jestevao@ualg.pt

Humberto Varum

Professor Catedrático
Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto
Porto, Portugal
h.varum@fe.up.pt

Aníbal A. Costa

Professor Catedrático
Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal
agc@ua.pt

Carlos S. Oliveira

Professor Catedrático
Instituto Superior Técnico
da Universidade Técnica
de Lisboa
Lisboa, Portugal
csoliv@civil.ist.utl.pt

SUMÁRIO

As metodologias disponíveis para estudar a vulnerabilidade sísmica do edificado tradicional de alvenaria em centros urbanos antigos, atendendo à escala e ao número de edifícios a avaliar, diferenciam-se marcadamente pelo volume de trabalho associado ao levantamento de informação, e seu tratamento, decorrente do processo de inspeção e do nível de detalhe associado. A metodologia aqui apresentada para a avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios em alvenaria é baseada em estudos e levantamentos de danos pós-sismo, que evidenciam algumas das características que governam o comportamento das estruturas de alvenaria de edifícios antigos quando sujeitos à ação sísmica. Estas características são posteriormente tratadas como parâmetros a analisar na definição e construção de um índice de vulnerabilidade. Assim, neste artigo, a metodologia original apresentada é calibrada com base na informação recolhida após o sismo dos Açores de 1998, que infligiu graves danos em grande parte do edificado da Ilha do Faial. Esta calibração permitiu redefinir os pesos dos parâmetros e reclassificar as classes de vulnerabilidade de alguns dos parâmetros da metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica.

Palavras-chave: Mitigação do risco, avaliação da vulnerabilidade sísmica, paredes de fachada de edifícios, calibração, danos sísmicos.

1. INTRODUÇÃO

Às metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica do edificado antigo a uma dimensão urbana estão naturalmente associadas abordagens mais expeditas que filtram apenas as características e informações mais revelantes sobre cada edifício. Assim, a natureza qualitativa ou quantitativa da abordagem a adotar em cada situação condiciona a formulação destas metodologias e respetivo nível de detalhe da inspeção e levantamento a ser realizado. Diferentes abordagens podem ser utilizadas na avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios: as metodologias empíricas, baseadas na observação de danos pós-sismo associados a diferentes tipologias estruturais e intensidades sísmicas, e as metodologias analíticas, que implicam por sua vez a modelação e computação da resposta de uma estrutura representativa de uma dada tipologia face a uma determinada intensidade da ação sísmica. Existe ainda uma diferente abordagem, as metodologias heurísticas, onde a vulnerabilidade dos edifícios é atribuída com base no conhecimento e experiência de especialistas.

No presente artigo foi aplicada e calibrada uma metodologia empírica (macrossísmica) baseada no cálculo de um índice de vulnerabilidade [1], por ser manifestamente mais apropriada para uma avaliação à escala urbana. Entre outros, um dos grandes interesses em otimizar este tipo de metodologias reside na possibilidade de se fazer uma primeira avaliação relativa à vulnerabilidade sísmica, não de um, mas de vários edifícios através de uma formulação transversal a todos os edifícios antigos em alvenaria. Assim, esta abordagem expedita permite às entidades competentes o estabelecimento de medidas pró-ativas na mitigação do risco sísmico e na preservação e conservação deste património edificado, através da identificação dos edifícios mais vulneráveis e do consequente estabelecimento de estratégias e de prioridades em termos de estratégias de reabilitação e/ou reforço. Adicionalmente, a avaliação probabilística de perdas humanas, ambientais e económicas estimadas com base na vulnerabilidade do edificado é também de redobrada utilidade para a preparação dos organismos de proteção civil face à eventualidade de ocorrência de um sismo, nomeadamente no que diz respeito às estratégias de evacuação e emergência, realojamento temporário de desalojados, número de feridos e mortos.

São vários os mecanismos de dano que ocorrem nos edifícios tradicionais de alvenaria durante um evento sísmico, sendo que um dos mais frequentes é o movimento ou colapso para fora do plano da parede de fachada dos edifícios, que depende naturalmente da eficiência de ligação da fachada às paredes ortogonais e aos diafragmas horizontais, por exemplo, e pode ser avaliado através da utilização de modelos mecânicos [2,3,4]. Estes mecanismos de colapso para fora do plano são caracterizados por um comportamento frágil e por isso constituem uma forte ameaça para a salvaguarda da segurança das populações, bastando-nos remontar a 1908 e 1990, por exemplo, datas relativas aos sismos de Messina e de Carlentini, respetivamente, onde grande parte do número de vítimas mortais se deveu precisamente ao colapso das paredes de fachada dos edifícios de alvenaria [5]. No caso dos

núcleos urbanos antigos, em que as acessibilidades a determinadas zonas são já por si altamente limitadas devido à reduzida largura dos arruamentos, a ocorrência deste tipo de mecanismo de dano revela-se absolutamente determinante pois irá comprometer o sucesso de qualquer estratégia de evacuação e emergência nesses arruamentos. Desta forma, torna-se pertinente o estudo e a validação de uma metodologia simplificada para a avaliação da vulnerabilidade sísmica das paredes de fachadas do edificado antigo que implique uma interpretação competente de informação qualitativa e quantitativa fidedigna [1].

No seguimento dos parágrafos anteriores, neste artigo será apresentada uma proposta de calibração para a metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica das paredes de fachada de edifícios antigos em alvenaria, originalmente proposta por Ferreira *et al.* [1], recorrendo a uma vasta base de dados criada na sequência do sismo dos Açores de 1998 [6].

2. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DAS PAREDES DE FACHADA DE EDIFÍCIOS À ESCALA URBANA

2.1 Formulação original da metodologia do índice de vulnerabilidade

A metodologia do índice de vulnerabilidade abordada neste artigo é baseada na soma de 10 parâmetros relacionados com as classes C_{vi} , A, B, C e D (ver Quadro 1). Cada um dos parâmetros avalia um aspeto relacionado com a resposta sísmica das paredes de fachada dos edifícios. A classe de vulnerabilidade C_{vi} é definida em função da análise de diferentes características intrínsecas à parede de fachada e ao edifício, nomeadamente a geometria, as propriedades mecânicas e estado de conservação. Por sua vez, os pesos p_i , variam entre 0,5 e 0,75, são atribuídos a cada parâmetro, dos menos para os mais importantes, respetivamente. Assim, o índice de vulnerabilidade da fachada, I_{vf}^* , pode ser calculado para uma qualquer parede de fachada em alvenaria através da seguinte Eq. (1):

$$I_{vf}^* = \sum_{i=1}^{10} C_i \times p_i \quad (1)$$

onde C_i representa a classe atribuída a cada parâmetro i , e p_i , representa o respetivo peso. De forma a tornar a interpretação dos resultados mais imediata, o anterior valor de I_{vf}^* foi normalizado através de uma soma ponderada, I_{vf} , variando desta forma entre 0 e 100. Obviamente, quanto menor o valor de I_{vf} , menor será a vulnerabilidade sísmica associada à parede de fachada em questão. Apesar da descrição extensiva desta metodologia poder ser consultada em [7], importa no entanto referir que a avaliação de cada um dos seguintes parâmetros é realizada através de uma inspeção detalhada *in-situ* complementada com um levantamento geométrico rigoroso, concentrando e limitando as incertezas associadas a este tipo de avaliações ao nível dos pesos de arranque p_i , que por sua vez foram definidos com base em *expertise* de especialistas.

Quadro 1. Formulação da metodologia do índice de vulnerabilidade em [1].

Parâmetros	Classe C_{vi}				Peso	Peso relativo
	A	B	C	D	p_i	
Grupo 1. Geometria e aberturas da fachada do edifício						
P1	Geometria da fachada do edifício				0,50	36,4/100
P2	Espessura da parede de fachada do edifício				0,50	
P3	Dimensões das aberturas				0,50	
P4	Desalinhamento de aberturas				0,50	
Grupo 2. Materiais e estado de conservação da alvenaria						
P5	Qualidade da alvenaria				0,75	27,3/100
P6	Estado de conservação da alvenaria				0,75	
Grupo 3. Eficiência das ligações						
P7	Ligação às paredes ortogonais				0,50	27,3/100
P8	Ligação aos diafragmas horizontais				0,50	
P9	Ligação ao sistema estrutural da cobertura				0,50	
Grupo 4. Elementos ligados à fachada do edifício						
P10	Elementos não estruturais				0,50	9,0/100

2.2 Avaliação de danos

Partindo do índice de vulnerabilidade calculado anteriormente é possível efetuar uma estimativa de danos ao nível das paredes de fachada do edificado em análise, com base numa metodologia macrossísmica definida em função da escala macrossísmica europeia EMS-98 [8]. A génese desta metodologia foi desenvolvida inicialmente por Lagomarsino e Giovinazzi [9] para edifícios tradicionais de alvenaria, e posteriormente adaptada ao edificado em Portugal por Vicente [10]. À semelhança do que foi feito nestes estudos pioneiros, reconhecidos internacionalmente pela comunidade científica, Ferreira *et al.* desenvolveu uma proposta de idêntica formulação, adaptada para as paredes de fachada de edifícios tradicionais de alvenaria [1]. Neste sentido, através do valor do índice de vulnerabilidade da fachada, I_{vf} é possível efetuar uma estimativa do grau de dano médio, μ_D , que assume os valores inteiros entre 0 e 5 para diferentes intensidades na escala macrossísmica europeia (EMS-98). Para isso, torna-se necessário recorrer à expressão analítica da Eq. (2), que correlaciona a perigosidade sísmica e o grau de dano médio [1]:

$$\mu_D = 2,51 + 2,5 \times \tanh\left(\frac{I + 5,25 \times V - 11,6}{Q}\right) \quad (2)$$

onde, I representa a perigosidade em termos de intensidade macrossísmica I_{EMS-98} [8], V representa o valor de vulnerabilidade resultante da aplicação da Eq. (3) e Q o fator de ductilidade que varia entre 1 e 4, e aqui assumiu o valor de 2,0, à semelhança do valor que vem sendo usado em trabalhos anteriores [1] para construções com ductilidade semelhante.

$$V = 0,592 + 0,0057 I_v \quad (3)$$

Deve notar-se que a Eq. (2), é proposta em [1] com base no levantamento e tratamento de informação dos danos em paredes de fachada verificados após o sismo de *L'Aquila* de 2009, que foi posteriormente usada na adaptação das definições e descrições originais da escala macrossísmica europeia às paredes de fachada de edifícios, apresentada na Tabela 2.

Quadro 2. Graus de dano para paredes de fachada, adaptado de [1].

Grau de dano	Descrição
Grau 0 – Ausência de dano	Sem sinais de dano
Grau 1 – Dano ligeiro	Fissuração de pequena abertura ao nível do revestimento
Grau 2 – Dano moderado	Fissuração junto às aberturas. Fragilização e destacamento de revestimentos
Grau 3 – Dano extensivo	Fissuração diagonal extensiva. Fissuração significativa dos parapeitos e platibandas. Fragilização da ligação entre a fachada e os diafragmas horizontais. Destacamento generalizado de revestimentos
Grau 4 – Dano grave	Fissuração diagonal grave e extensiva de grande amplitude. Colapso parcial da fachada (desagregação local grave de cunhais e tímpanos de empena). Desaprumo da parede
Grade 5 – Destruição	Colapso total no plano ou para fora do plano

3. CALIBRAÇÃO DA FORMULAÇÃO ORIGINAL

3.1 Introdução e caracterização da amostra

Em Portugal, por volta de 2008, surgiram os primeiros estudos relacionados com a calibração deste tipo de metodologias macrossísmicas, nomeadamente com trabalho desenvolvido por Mota de Sá *et al.* [11], que efetuou um exercício de ajustamento aos valores originais dos parâmetros da equação que define o grau de dano médio em função da intensidade I_{EMS-98} e de um índice de vulnerabilidade, proposta por Lagomarsino e Giovinazzi em [9], para posterior calibração de modelos de simulação de cenários sísmicos, com base na observação de danos em edifícios, após o sismo dos Açores de 1998.

Também neste artigo, e tal como referido anteriormente, recorreu-se à vasta informação disponível em arquivo sobre a caracterização do edificado e dos danos causados pelo sismo dos Açores de 1998, de magnitude 6,2, que afetou particularmente a ilha do Faial, para proceder à calibração da metodologia proposta na Secção 2.1, para a avaliação da vulnerabilidade sísmica das paredes de fachada de edifícios em alvenaria. No entanto, ao contrário do exercício desenvolvido por Mota de Sá em [11], neste trabalho, partimos do princípio que os parâmetros curva da Eq. (2) encontram-se bem ajustados aos edifícios tradicionais de alvenaria, calibrando assim a metodologia do índice de vulnerabilidade, através do ajuste dos pesos de cada parâmetro (ver Secção 3.2).

Assim, numa fase inicial, a formulação original da Secção 2.1 foi aplicada a 90 edifícios considerados representativos da construção tradicional Açoriana, distribuídos pela ilha do Faial e para os quais foi possível aceder a informação processual detalhada, desde relatórios de inspeção e diagnóstico aos relatórios de dano resultantes do sismo, com a devida reportagem fotográfica (ver Quadro 3). Estes edifícios foram selecionados tendo em conta o detalhe processual com já referimos, mas também de forma a incluir edifícios de carácter urbano e rural, cujas tipologias construtivas, diferindo principalmente no número de pisos e na qualidade construtiva da alvenaria utilizada, conduzem a distintos graus de dano médio, μ_D . Comparando esta avaliação de dano efetuada pela observação e consulta dos processos detalhados de cada um dos 90 edifícios avaliados, através da adaptação da definição e classificação de dano da escala macrossísmica europeia para as paredes de fachada (Quadro 2), com os resultados obtidos pela aplicação direta da formulação original do índice de vulnerabilidade da fachada, foi possível calibrar esta metodologia.

Quadro 3. Distribuição da classificação de dano observado nos 90 edifícios avaliados, agrupados pelas freguesias da ilha do Faial.

Freguesia	Número de pisos					Dano observado, μ_D				
	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5
Angústias	(2)	(4)	(1)	-	-	(7)	-	-	-	-
Castelo Branco	(2)	(3)	-	-	-	(1)	(3)	(1)	-	-
Cedros	(2)	(4)	-	-	-	(3)	(3)	-	-	-
Conceição	(5)	(3)	(4)	-	(1)	(8)	(2)	(1)	-	-
Feteira	(2)	(3)	-	-	-	(3)	(1)	(1)	-	-
Flamengos	(2)	(3)	-	-	-	-	(2)	(1)	(2)	-
Matriz	-	(3)	(11)	(2)	(1)	(13)	(2)	-	-	-
Pedro Miguel	(1)	(4)	-	-	-	-	-	(2)	(2)	(1)
Praia de Almoxarife	(9)	(7)	-	-	-	(7)	(5)	(4)	-	-
Ribeirinha	(5)	(2)	-	-	-	-	-	(3)	(2)	(2)
Salão	(1)	(4)	-	-	-	(2)	(1)	(1)	(1)	-

3.2 Resultados da aplicação da formulação original

A aplicação da formulação original para os 90 edifícios referidos anteriormente resultou na determinação de um valor médio do índice de vulnerabilidade da fachada, $I_{vf,m}$, igual a 28,68, ao qual está associado um desvio padrão, $\sigma_{I_{vf,m}}$, de 10,62. Aproximadamente 16% dos edifícios desta amostra apresentam I_{vf} maior do que 40 e apenas 9% acima de 45. Sucede ainda que 21% dos edifícios apresenta um valor de I_{vf} menor do que 20. A Figura 1 apresenta o histograma e a curva de distribuição normal de melhor ajuste para os valores obtidos de I_{vf} , assim como a influência de cada uma das classes C_{vi} no valor do I_{vf} .

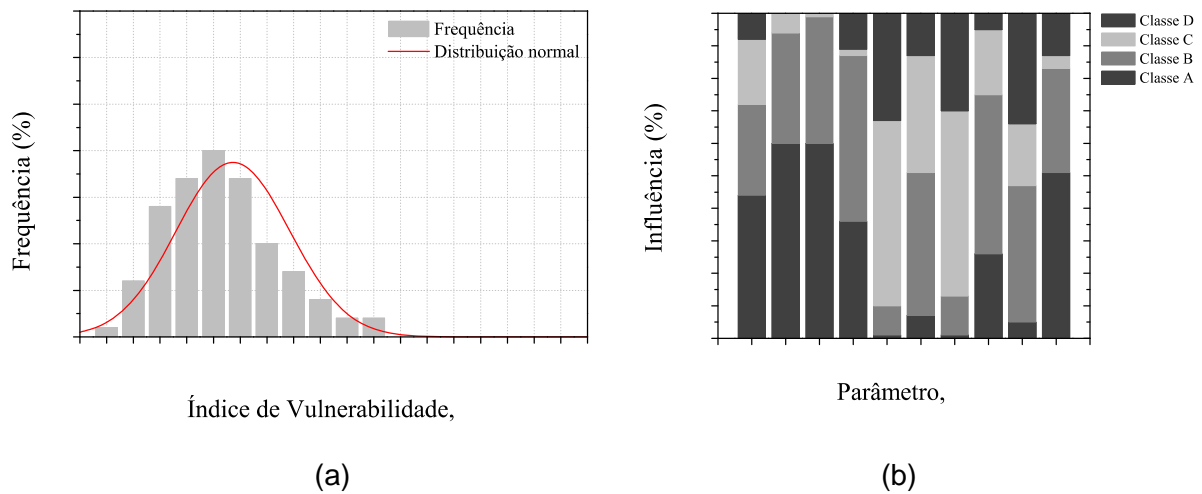


Figura 1. Distribuição do índice de vulnerabilidade da fachada (a) e a influência de cada parâmetro no valor final do I_{vf} .

Numa segunda fase, estes edifícios foram localizados e agrupados por intensidade no mapa da Figura 2. A cada edifício foi atribuído um grau de dano médio, μ_D , em função da avaliação dos danos observados nos processos e informação recolhida.

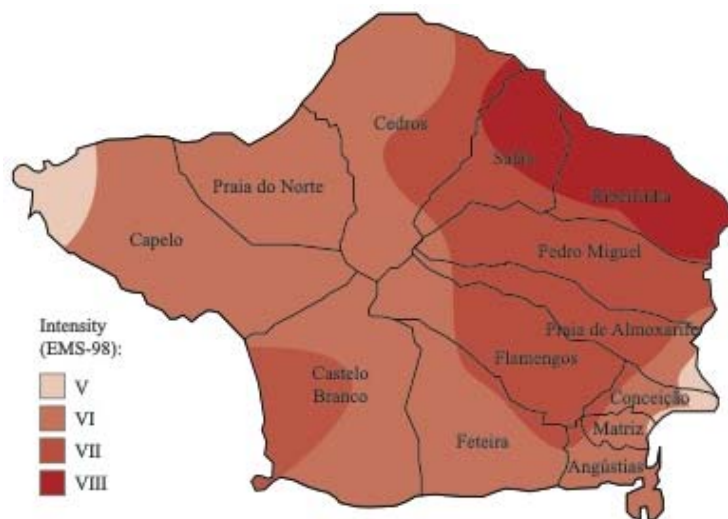


Figura 2. Mapa de intensidades da ilha do Faial na escala $EMS-98$, adaptado de [12].

Através deste procedimento, foi possível construir os histogramas da Figura 3, para cada uma das intensidades macrossísmicas consideradas ($I_{EMS-98} = V, VI, VII$ e $VIII$). No que respeita às distribuições parciais associadas aos histogramas da Figura 3, os seguintes valores médios do índice de vulnerabilidade da fachada de 25,95, 26,65, 30,78 e 33,09 foram obtidos para as intensidades $I_{EMS-98} = V, VI, VII$ e $VIII$, respetivamente. Da mesma forma, os respetivos valores obtidos para o desvio padrão, $\sigma_{I_{vf}}$, foram 7,63, 8,24, 12,69 e 13,22.

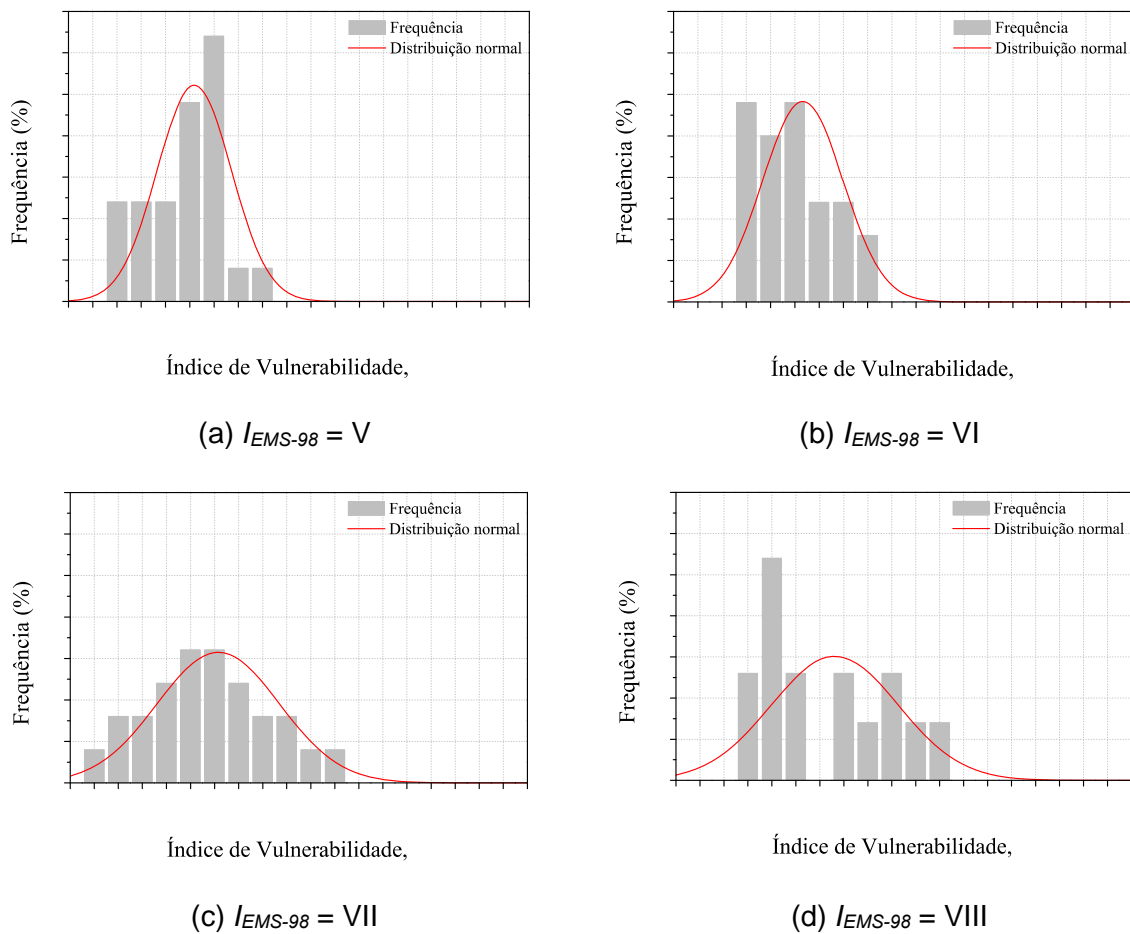


Figura 3. Histogramas e distribuições de melhor ajuste para cada intensidade I_{EMS-98} .

Foi ainda possível estabelecer as respetivas correlações e funções de vulnerabilidade dadas pela Eq. (2), bem como a posterior comparação entre os resultados parciais (por intensidade) e as curvas de vulnerabilidade resultantes da aplicação da formulação original da metodologia aqui apresentada (ver Figura 4). Estes resultados revelam, de um modo geral, uma aproximação entre a curva de vulnerabilidade e a nuvem de pontos da amostra fraca. De facto, alguns pontos encontram-se significativamente afastados da respetiva curva, levantando-se a hipótese de um mau ajustamento dos pesos iniciais atribuídos aquando da avaliação de cada parâmetro. Também a incerteza associada na atribuição das intensidades da escala $EMS-98$ aos edifícios avaliados (na Figura 2) poderá estar na origem da fraca aproximação obtida, hipótese levantada pelos próprios autores em [12] e devidamente sustentada através da interpretação dos coeficientes de determinação, R^2 , correspondentes às intensidades $I_{EMS-98} = V$ e $I_{EMS-98} = VI$ (na Figura 4), calculados de acordo com a Eq. (4):

$$R^2 = \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (4)$$

onde SS_{res} representa a soma dos quadrados residuais e SS_{tot} a soma total dos quadrados, ambos avaliados a partir das aproximações ilustradas na Figura 4. Deve notar-se que, embora em termos absolutos e considerando a interpretação matemática deste coeficiente de determinação os valores obtidos não apresentem nenhuma expressão relevante, em termos relativos estes podem ser usados no exercício de avaliação e calibração deste tipo de correlações. Este é o princípio em que se baseia a calibração apresentada na próxima Secção 3.2.

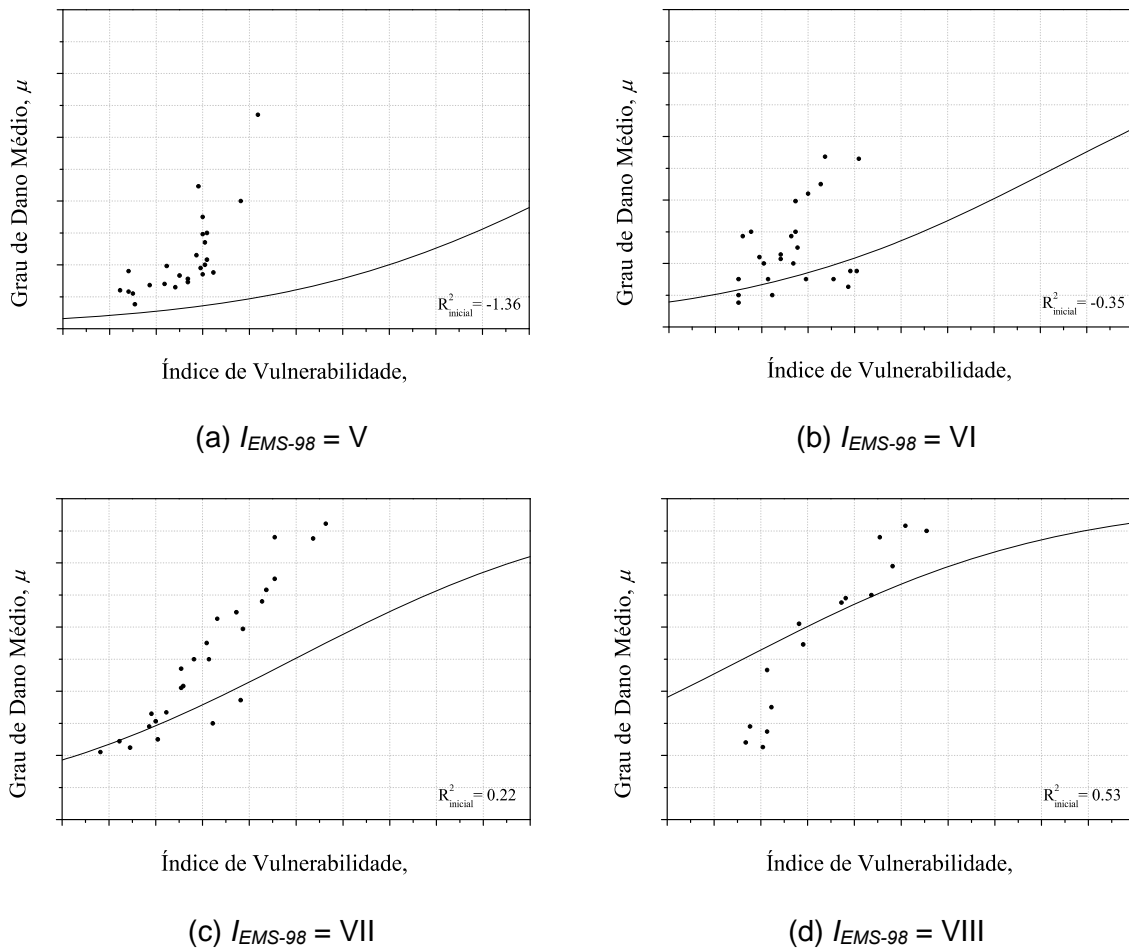


Figura 4. Curvas analíticas resultantes da observação de dano para cada intensidade I_{EMS-98} , obtidas através da aplicação da Equação (2).

3.3 Calibração dos pesos originais

A aproximação entre os a nuvem de pontos não caibrados e as curvas de vulnerabilidade apresentadas acima foram otimizadas nesta secção através de um processo de variação individual de cada um dos 10 pesos, p_i , associados à avaliação dos parâmetros que compõem o índice de vulnerabilidade, I_{vf} (apresentados no Quadro 1). Seguindo este procedimento será então possível obter os pesos que, para cada uma das quatro intensidades macrossísmicas I_{EMS-98} conduzem ao melhor coeficiente de determinação, R^2 .

Para tal, foi desenvolvida uma rotina em MATLAB®, programada para o efeito em ambiente MATLAB R2012a, através da qual foram calculados os valores ótimos de p_i , aqui sumariados no Quadro 4. Para além dos valores finais obtidos para os pesos, p_i , os correspondentes coeficientes de determinação, R^2 , obtidos para cada uma das intensidades macrossísmicas foram ainda incluídos no mesmo quadro.

Quadro 4. Pesos que conduzem à melhor aproximação (R^2) entre o dano observado e o valor de dano obtido analiticamente.

Intensidade I_{EMS-98}	Pesos ótimos para cada parâmetro, p_i										R^2
	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$P5$	$P6$	$P7$	$P8$	$P9$	$P10$	
$I_{EMS-98} = V$	1,00	0,50	0,50	0,50	1,50	0,50	2,00	0,50	2,00	0,50	-0,93
$I_{EMS-98} = VI$	1,00	0,50	0,50	1,50	2,00	2,00	2,00	0,50	0,50	0,50	0,07
$I_{EMS-98} = VII$	0,50	0,50	0,50	0,50	2,00	2,00	2,00	0,50	2,00	0,50	0,74
$I_{EMS-98} = VIII$	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	2,00	0,50	0,50	2,00	1,00	0,67

Encontrado o valor ótimo para cada parâmetro, o desafio passou por obter o peso que, sendo comum às quatro intensidades I_{EMS-98} , conduz ao melhor valor final médio de R^2 . Seguindo este caminho, os pesos obtidos serão tais que, globalmente, conduzirão à melhor aproximação final entre o dano observado e o dano obtido analiticamente, através das curvas de vulnerabilidade para cada intensidade. Para atingir este objetivo, programou-se um nova rotina em MATLAB® onde os pesos ótimos associados a cada parâmetro (no Quadro 4) foram utilizados como valores limite (máximo e mínimo) para os novos pesos finais calibrados. No Quadro 5 apresentam-se os 10 parâmetros de avaliação da vulnerabilidade sísmica de paredes de fachada, com os respetivos pesos calibrados através do procedimento acima descrito.

De forma geral os novos pesos apresentados no Quadro 5 são coincidentes com a importância relativa desse parâmetro para o comportamento sísmico padrão da parede de fachada, com os parâmetros relativos à qualidade da alvenaria, ao estado de conservação e à eficiência das ligações entre elementos estruturais a assumirem-se como sendo aqueles que regem o resposta sísmica. Pese embora este facto, importa notar que o parâmetro P8, relativo à ligação entre a parede de fachada e os diafragmas horizontais (pavimentos), contraria esta tendência, mantendo o seu peso inicial $p_i = 0,5$.

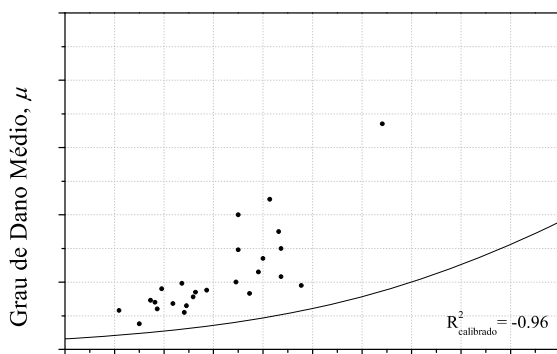
Duas razões fundamentais podem estar na origem desta situação; por um lado, porque a todos edifícios com um piso foi atribuída classe A e B (em cerca de 75%) na análise realizada, assumindo desta forma a efetividade destas ligações, e por outro lado, porque este parâmetro é, na grande maioria dos casos, de difícil avaliação, tanto *in-situ*, como com base em observação de dano pós-sismo. Vale a pena acrescentar ainda que, quanto à primeira razão, existem outros parâmetros para os quais esta justificação seria também aplicável, nomeadamente os parâmetros pertencentes ao Grupo 1 e que medem a

geometria e as aberturas da fachada. A Figura 5 apresenta o confronto para os resultados obtidos através da aplicação da metodologia com dos pesos finais calibrados.

Quadro 5. Metodologia do índice de vulnerabilidade com novos pesos calibrados.

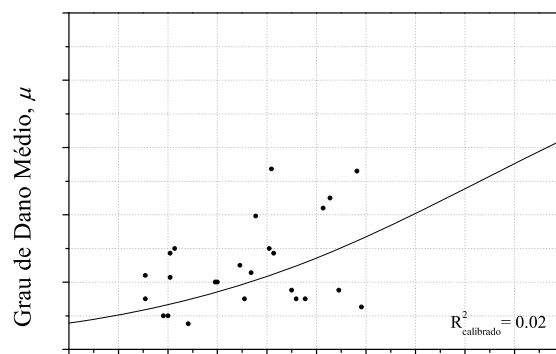
Parâmetros	Classe C_{vi}				Peso	Peso relativo	
	A	B	C	D	p_i		
Grupo 1. Geometria e aberturas da fachada do edifício							
P1	Geometria da fachada do edifício	0	5	20	50	0,50	18,2/100
P2	Espessura da parede de fachada do edifício	0	5	20	50	0,50	
P3	Dimensões das aberturas	0	5	20	50	0,50	
P4	Desalinhamento de aberturas	0	5	20	50	0,50	
Grupo 2. Materiais e estado de conservação da alvenaria							
P5	Qualidade da alvenaria	0	5	20	50	2,00	36,4/100
P6	Estado de conservação da alvenaria	0	5	20	50	2,00	
Grupo 3. Eficiência das ligações							
P7	Ligação às paredes ortogonais	0	5	20	50	2,00	40,9/100
P8	Ligação aos diafragmas horizontais	0	5	20	50	0,50	
P9	Ligação ao sistema estrutural da cobertura	0	5	20	50	2,00	
Grupo 4. Elementos ligados à fachada do edifício							
P10	Elementos não estruturais	0	5	20	50	0,50	4,5/100

Como se pode observar na Figura 5, a melhor aproximação foi obtida para $I_{EMS-98} = VII$ com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,74$, valor que traduz uma relação muito boa entre o dano observado e a aplicação analítica da metodologia do índice de vulnerabilidade, I_{vf} . É ainda importante destacar o valor final do coeficiente de determinação obtido para $I_{EMS-98} = VIII$, $R^2 = 0,04$, o qual representa uma correlação ligeira.



Índice de Vulnerabilidade,

(a) $I_{EMS-98} = V$



Índice de Vulnerabilidade,

(b) $I_{EMS-98} = VI$

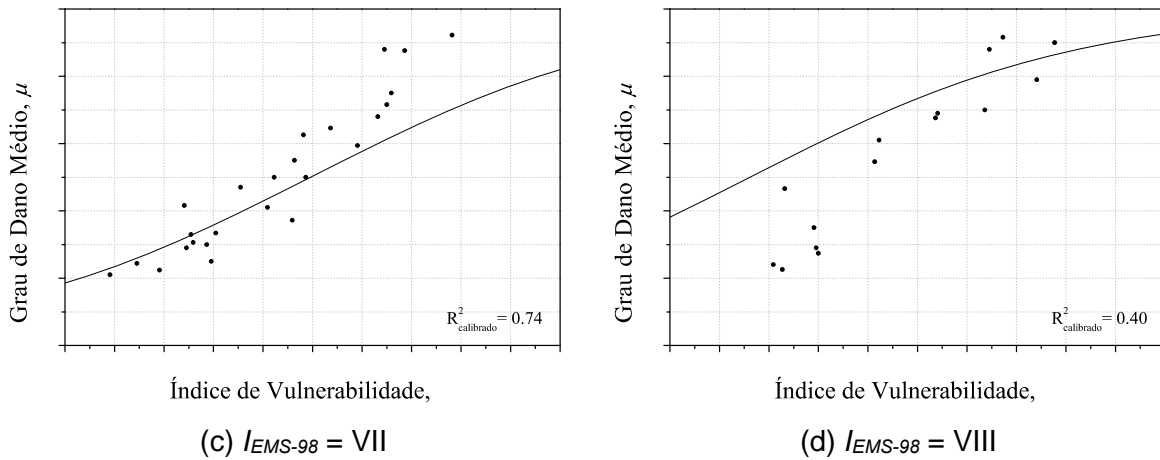


Figura 5. Resultados calibrados versus as respectivas curvas de vulnerabilidade.

A nível global, o valor médio do coeficiente de determinação obtido a partir da aplicação da versão original e calibrada da metodologia, aumentou de $R^2_{m, original} = -0,42$ para $R^2_{m, calibrado} = 0,05$, o que representa, em termos relativos, uma melhoria significativa dos resultados. A comparação entre os resultados globais obtidos a partir da metodologia original e calibrada encontram-se apresentados lado a lado na Figura 6.

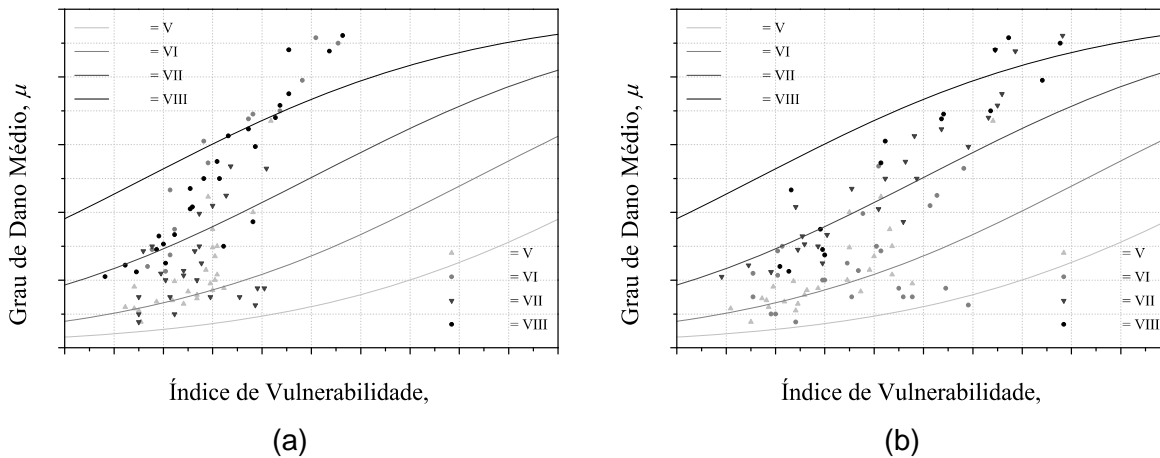


Figura 6. Comparação global entre os resultados originais (a) e calibrados (b).

Finalmente a Figura 7 apresenta a comparação entre as distribuições normais associadas à aplicação da metodologia original e calibrada ao conjunto dos 90 edifícios que compõem a amostra utilizada neste trabalho.

Os resultados apresentados na Figura 7 refletem bem as melhorias conseguidas a partir da calibração dos parâmetros associados a cada parâmetro do I_{vf} . Os valores médios do índice de vulnerabilidade, $I_{vf,m}$, calculados a partir distribuições normais associadas à aplicação da metodologia calibrada são 31,16, 35,91, 42,29 e 46,27, com os seguintes valores de desvio padrão, $\sigma_{I_{vf,m}}$: 12,51, 13,82, 18,98 e 19,94, respetivamente para intensidades macrossísmicas de $I_{EMS-98} = V, VI, VII$ e $VIII$.

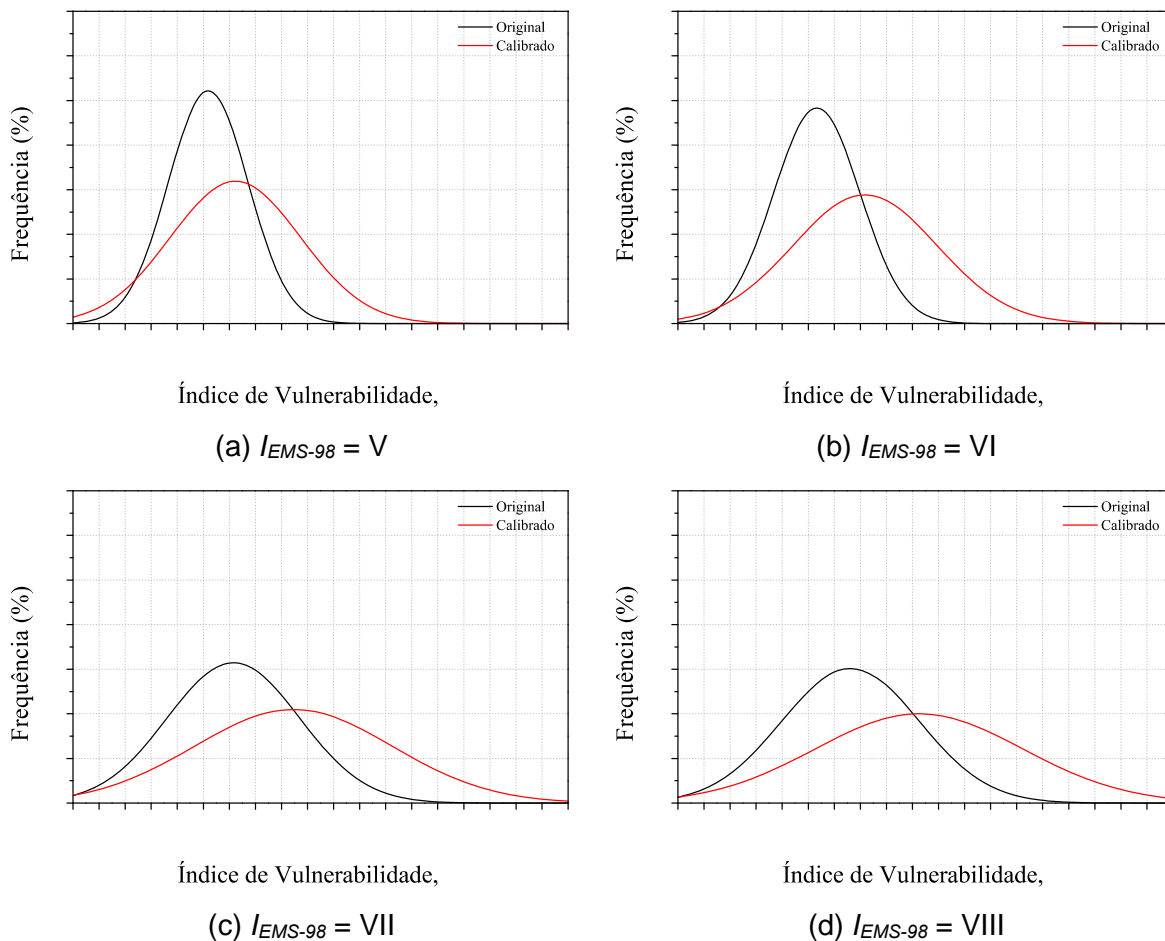


Figura 7. Confronto entre histogramas obtidos através da aplicação da metodologia.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Este artigo apresenta e discute a calibração de uma metodologia simplificada de avaliação da vulnerabilidade sísmica de paredes de fachada. Esta calibração foi realizada com base num vasto conjunto de informação de dano pós-sismo, obtido na sequência do sismo que abalou o arquipélago dos Açores em 1998, a qual foi comparada com os resultados analíticos obtidos a partir da aplicação da referida metodologia a 90 edifícios considerados representativos da construção tradicional do arquipélago e para os quais foi possível obter informação detalhada (plantas de arquitetura, informação fotográfica pós sismo, etc.).

Adicionalmente, de forma a completar este objetivo, os autores programaram duas rotinas em MATLAB® com diferentes propósitos, as quais foram utilizadas para obter um novo conjunto de pesos que, para cada um dos 10 parâmetros que compõem o índice de vulnerabilidade I_{vf} , conduz à melhor aproximação entre os danos observados e os danos obtidos analiticamente através do método. Tal como discutido no artigo, os pesos obtidos a através deste processo de calibração encontram-se melhor ajustados à resposta sísmica real das paredes de fachada. Este facto foi comprovado matematicamente pela melhoria

global dos valores associados aos coeficientes de determinação, R^2 , os quais foram aqui utilizados para medir o ajuste parcial (por intensidade macrossísmica) e global entre o dano observado e o dano obtido através da aplicação do método.

AGRADECIMENTOS

Este artigo reporta investigação suportada financeiramente pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através do projeto “URBSIS: Assessing Vulnerability and Managing Earthquake Risk at Urban Scale” – PTDC(ECM-URB/2564/2012).

REFERÊNCIAS

- [1] Ferreira, T.M.; Vicente R.; e Varum, H. - “Seismic vulnerability assessment of masonry facade walls: development, application and validation of a new scoring method”, *Struct. Eng. Mech.*, Vol. 50, No. 4, 2014, p. 541–561.
- [2] Pagnini, L.C.; Vicente, R.; Lagomarsino, S. e Varum, H. - “A mechanical model for the seismic vulnerability assessment of old masonry buildings”, *Earthq. Struct.*, 2(1), 2011, p. 25-42.
- [3] Shi, Y.; D’Ayala, D. e Prateek, J. - “Analysis of out-of-plane damage behaviour of unreinforced masonry walls”, In Proceedings of the 14th *International Brick & Block Masonry Conference*, Sydney, February, 2008.
- [4] D’Ayala, D. e Speranza, E. - “Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historic masonry buildings”, *Earthq. Spectra*, 19, 2003, p. 479-509.
- [5] Giuffrè, A. - “Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso di Ortigia”, Editori Laterza, Bari, Italy, 2003.
- [6] Neves, F.; Costa, A.; Vicente, R.; Oliveira, C.S. e Varum, H. - “Seismic vulnerability assessment and characterisation of the buildings on Faial Island, Azores,” *Bull. Earthq. Eng.*, Vol. 10, No. 1, 2012, p. 27–44.
- [7] Ferreira, T. - “Avaliação da vulnerabilidade sísmica de núcleos urbanos antigos. Aplicação ao núcleo urbano antigo do Seixal”, Tese do Programa de Estudos Avançados em Reabilitação do Património Edificado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [8] Grünthal, G. - “Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et Séismologie: Volume 15 - European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)”. *Eur. Cent. Geodyn. Seismol. Luxemb.*, 1998.
- [9] Lagomarsino, S.; Giovinazzi, S. – “Macroseismic and mechanical models for the vulnerability assessment of current buildings”, *Bull. Earthquake Eng.*, Special Issue “Risk-Ue Project”, Vol. 4, No. 4, November, 2006, DOI 10.1007/s10518-006-9024-z.

- [10] Vicente, R. – “Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra”, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2008.
- [11] Mota de Sá, F.; Oliveira, C.S.; Ferreira, S.A. – “Danos observados nos edifícios aquando do sismo de 9 de Julho de 1998. Um contributo para a calibração de cenários sísmicos”, Em *Sismo 1998 – Açores. Uma década depois*. Ed. C.S. Oliveira *et al.*, Governo dos Açores/SPRHI, S.A.
- [12] Zonno, G.; Oliveira, C.S.; Ferreira, M.; Musacchio, G.; Meroni, F.; Mota de Sá, F. e Neves, F. - “Assessing seismic damage through stochastic simulation of ground shaking: the case of the 1998 Faial Earthquake (Azores Islands)”, *Surv. Geophys.*, Vol. 31, No. 3, 2010, p. 351–381.