

Danos observados nos edifícios aquando do sismo de 9 de Julho de 1998. Um contributo para a calibração de simuladores de cenários sísmicos

Damaged observed on the building stock during the 1998 earthquake and calibration of seismic scenario simulators

Francisco Mota de Sá⁽¹⁾, Carlos Sousa Oliveira⁽²⁾, Mónica Amaral Ferreira⁽²⁾

⁽¹⁾Fuzzy, Engenharia de Sistemas e Decisão Lda, ⁽²⁾Instituto Superior Técnico, UTL

Abstract

The present chapter addresses to the comparison between the real data on damaged buildings obtained during the follow-up of the July 9 earthquake and a scenario simulator. The main objective was to formulate different alternative models and select the one which better explains the real damage observed. Among the multiples parameters influencing the simulation are: (i) the possible skewness in the classification of damages especially for the low intensity values; (ii) the influence of soil in the acceleration amplification; (iii) the influence of fault geometry in the wave propagation and (iv) the parameters defining the damage models. After the selection of the model a new simulation was made for the 1926 earthquake which caused generalized damage in the City of Horta, and in the rural areas of Almoxarife, Flamengos, Feteira and Castelo Branco.

1. Introdução

O presente estudo consiste na comparação dos dados reais registados em processos de reconstrução, recolhidos na sequência da destruição provocada pelo sismo de 9 de Julho de 1988, com os resultados de modelos de simulação de cenários de danos. O objectivo principal foi de formular e calibrar modelações alternativas e, destas, seleccionar as que melhor explicam os resultados reais. Entre os múltiplos factores que influenciam a simulação, foram abordados: (i) um possível enviesamento na classificação (observação) de danos quando os mesmos são de fraca amplitude; (ii) a importância da influência dos solos na amplificação das acelerações; (iii) a influência da geometria da falha sismogénica no modelo de propagação da onda sísmica no substrato rochoso, e (iv) os parâmetros dos modelos de cálculo de danos nos edifícios. Uma vez identificado o modelo que melhor explica os danos reais, o mesmo foi utilizado para simular os danos ocorridos no sismo que em 31 de Agosto de 1926 provocou uma destruição generalizada na cidade da Horta, com grandes danos nas freguesias de Praia de Almoxarife, Flamengos, Feteira e Castelo Branco.

Figura 1
Distribuição de danos segundo a amostra em estudo.

2. Selecção da amostra

Ao abrigo do Projecto da FCT intitulado “*USuET- Urban System under Earthquake Threat. Análise Sistémica do Risco Sísmico: Uma Versão Integrada. Aplicação a Centros Urbanos nos Açores*”, foi possível a consulta a um total de 3909 processos de reconstrução (3004 referentes à Ilha do Faial e os restantes 905 referentes ao Pico), instruídos na sequência do sismo de 1998. Destes, foi extraída uma amostra de 2094 casos, os quais foram seleccionados unicamente pelo facto de se terem podido geo-referenciar, ie, localizar sobre mapas digitais associados a um sistema de coordenadas geográficas conhecido e bem identificado. Deste último conjunto foram seleccionados os 1663 casos nos quais foram observados danos (1288 casos no Faial e 375 no Pico) (D1 a D5, ver Ferreira, 2008). A amostra assim recolhida, representando 79% dos casos, foi considerada representativa do parque que sofreu danos.

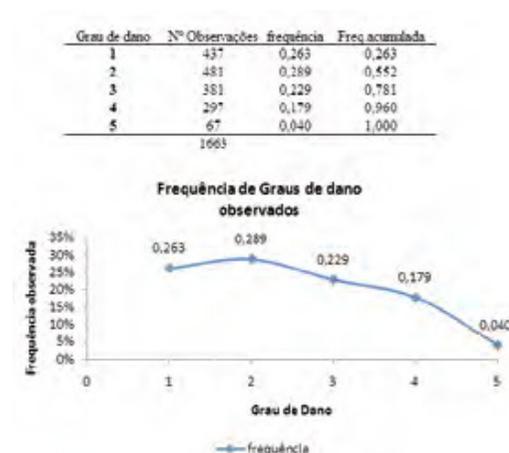
3. Danos observados

A 1ª análise aos dados revelou uma distribuição de danos como indicado na Figura 1. Uma vez que a amostra se compõe apenas de edificações danificadas pelo sismo, passíveis de justificar um processo de reconstrução, pareceu-nos de difícil explicação a presença de uma tão elevada percentagem de edifícios com grau de dano 1 (D1) ou mesmo 2 (D2). Uma discussão sobre esta matéria pode ser vista em “Impacto do sismo de 1998 no território dos Açores. Principais consequências e indicadores” (Oliveira et al., 2008) neste volume.

4. Construção do modelo de simulação

O processo de simulação de cenários sísmicos envolve fundamentalmente 3 componentes principais:

- Um modelo de previsão dos movimentos intensos do solo, explicados pela modo como



se processa a propagação das ondas sísmicas através do substrato rochoso, desde a fonte sísmogénica até ao local, normalmente designado por **Lei de Atenuação**.

- Um modelo de amplificação nas camadas superficiais, reflectindo o efeito do solo desde o substrato rochoso até à superfície (camadas essas que, se menos rijas que a rocha, tendem a amplificar as acelerações), normalmente designado como **Efeito de Sítio**.
- Um modelo de **Previsão de danos**.¹

Assim, estes três processos serão aqui brevemente abordados, seleccionando-se posteriormente, alternativas que se venham a mostrar melhor ajustadas,

¹ Normalmente a previsão de danos engloba sempre o parque habitacional, como no presente caso. No entanto, estes modelos podem ser complementados com outros, de forma a se obter uma previsão de danos mais alargada, contemplando outros objectos ou construções expostas como: infraestruturas de transportes, incluindo obras-de-arte, aéreas ou subterrâneas, infraestruturas enterradas como cabos, condutas de água, gás ou de saneamento básico, infra-estruturas críticas como depósitos de água, centrais de produção de energia, estações de transformação de energia eléctrica, sistemas de telecomunicações, cabos submarinos, ou ainda infra-estruturas perigosas como depósitos de materiais tóxicos ou explosivos.



Figura 2 Campos de aceleração: a) “Circular”, b) “Elíptico”, c) “Longilíneo”.

ou que melhor expliquem os danos reais. Por fim aplicar-se-á o modelo seleccionado para reproduzir o sismo de 1926.

4.1. Lei de atenuação

Já em trabalhos anteriores, se tinha calibrado e utilizado uma a lei de atenuação indicada na equação a seguir indicada.

$$\ln(Pga_{[g]}) = -4,5 + 0,9.M - \ln(\sqrt{Df^2 + M^2}) - \frac{Df}{2.(M + 7)^2}; M \leq 4,5 \quad (4.1)$$

$$\ln(Pga_{[g]}) = -5,0 + 0,9.M - \ln(\sqrt{Df^2 + M^2}) - \frac{Df}{2.(M + 7)^2}; M > 4,5$$

Contudo, em vez da Distância Focal, Df , muitos autores (Boore *et al.*, 1996), (Toro, 1994), (Carvalho *et al.*, 2004) têm sugerido a utilização da *Distância mais curta à projecção da falha à superfície*; mais recentemente, um outro estudo (Zonno, 2008), utilizando um modelo de ruptura progressiva, propôs um campo de acelerações com uma configuração *Elíptica*, intermédia entre uma propagação *Circular*, em torno do epicentro, e uma configuração *Longilínea* associada à menor distância à falha, R . A geometria da falha parece, com efeito, influenciar o campo de acelerações na sua proximidade, determinando por isso distribuições de danos que convirá reproduzir. Assim, por exemplo, em (Carvalho *et al.*, 2004), é sugerido como componente geométrica da lei de atenuação a utilização de um factor $1/R$ para distâncias ≤ 70 km, $1/R^0$ para distâncias entre 70 e 130 km e $1/R^{0,5}$ para distâncias maiores do que 130 km. Já (Boore *et al.*, 1996) recomendam distintos factores de modificação de R para $R < 5$ km, $5 \leq R \leq 20$ km e $R > 20$ km. Naturalmente, há que considerar explici-

tamente a influência da geometria da falha sobre o campo de acelerações, influência essa que se espera mais forte na proximidade do epicentro, diminuindo progressivamente à medida que nos afastamos da falha. Estas três hipóteses encontram-se ilustradas, para o presente caso na Figura 2.

À semelhança do que já anteriormente tinha sido feito (Ferreira *et al.*, 2007), foram utilizados os registos de acelerações máximas (PGA) na rede acelerométrica dos Açores (dados da rede ESD, Imperial College, 2005), aos quais se adicionaram as acelerações obtidas no estudo recente efectuados pela modelação estocástica da ruptura, tendo-se obtido a Lei de atenuação indicada na eq. (Figuras 3 e 4).

$$\log(Pga_{[cm/seg^2]}) = -1,09 + 0,66.M_w - 0,004.R_e - 0,62.l \quad (4.2)$$

Onde

M_w é a Magnitude de Momento,

R_e é a Distancia Elíptica, [km], definida como a distância à falha (e ao epicentro), de um ponto para o qual a aceleração no substrato rochoso é dada pela lei de atenuação referida, situado sobre o semi-eixo menor de uma elipse centrada no epicentro, com o seu eixo maior coincidente com a projecção da linha de ruptura à superfície e que passa pelos pontos considerados.

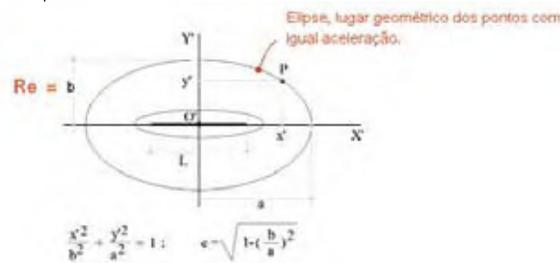
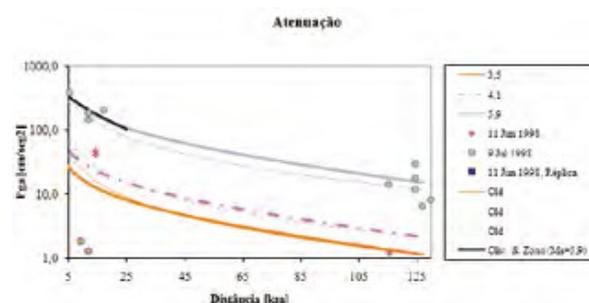


Figura 3 Distância elíptica.

Figura 4
Atenuações para sismos de magnitudes 3,5;5,9 e 4,1 utilizando a lei agora calibrada.



Para o caso em estudo verificou-se que a excentricidade, e , das elipses de igual aceleração, se degrada logaritmicamente à medida que nos afastamos da falha, acabando por tomar um valor nulo ($e=0$) a partir de aproximadamente 20 km, distância a partir da qual o campo de acelerações assume uma forma circular, ie, $R_e = D_f$ (Distância Focal).

Desta forma, procurou-se introduzir a influência da proximidade da falha, considerando que a mesma se degrada à medida que dela nos afastamos, sem contudo introduzir uma amplificação tão acentuada para as acelerações como acontece na propagação longilínea.

4.2. Influência dos solos ou efeito de sítio

Sabe-se que a destruição provocada por este sismo, como por qualquer outro, é fortemente influenciada pela presença de camadas de solos superficiais mais macios, os quais aumentam as acelerações registadas nas camadas inferiores, rochosas. Assim, também à semelhança do que já tinha sido feito em (Ferreira *et al.*, 2007), os solos presentes foram classificados em Classes {B, C e D, segundo o EC-8}, e a cada classe foi associado um Factor de Solo (ou de amplificação), F_s como indicado no Quadro I e Figura 5.

Quadro I – Adaptado da classificação geotécnica das formações geológicas dos Açores, (Forjaz, 2001)

Tipo de solo	Classe EC8	F_s
Escoadas lávicas basálticas s.l.	B	1,35
Escoadas lávicas traquíticas s.l. (incluindo domos)		
Tufos surtseianos (hialoclastitos),	C	1,6
Depósitos de vertente, aluviões e areias de praia		
Ignimbritos não soldados e lahars	D	2,0
Escórias basálticas s.l. (bagacina)		
Pedra pomes e materiais pomíticos indiferenciados		

Logo aqui se pode observar a presença de solos brandos nas Freguesias de Salão, Cedros e Ribeirinha, o que, associado a uma grande proximidade da falha, desde logo explica a grande destruição que ali se verificou. A Freguesia de Flamengos e Castelo Branco aparecem com amplificações intermédias elevadas e a Cidade da Horta com amplificações mais baixas.

O Factor de Amplificação das acelerações registadas no substrato rochoso, F_s , não é mais do que o valor do parâmetro S dos espectros de resposta elásticos da acção sísmica Tipo 2, indicados na proposta Nacional para o Eurocódigo 8.

Considera-se assim que, uma vez obtido o valor da aceleração no substrato rochoso, o valor desta à superfície pode ser aproximada pela expressão

$$PGA_{sup} = PGA_{sr} \cdot S_k \quad (4.3)$$

Onde:

PGA_{sup} é o valor estimado da aceleração à superfície,
 PGA_{sr} é o valor estimado da aceleração no substrato rochoso, obtido por (4.2),
 S_k é o valor do parâmetro S correspondente ao Solo k .

Na Figura 6 pode-se também, desde já, observar a diferença de comportamento das edificações devido ao efeito de amplificação das acelerações na presença de solos mais macios. Com efeito, na Freguesia da Matriz, mais a SE, onde os solos são mais rijos (Classe B, verde claro), predominam os tons de

azul dos edifícios, indicando danos abaixo dos valores médios observados. Em contraste com estes, embora a uma mesma distância da falha e do epicentro, na Freguesia de Flamengos, mais a N, na presença de solos mais brandos (Classe C, verde intermédio) os tons predominantes dos edifícios passam a situar-se na gama dos amarelos e laranjas, indicando danos acima dos valores médios.

Não obstante mais afastados do epicentro e da falha, os edifícios mais a W, localizados sobre os solos brandos (verde escuro) da Freguesia da Feteira, surgem graus de dano mais elevados (edifícios a vermelho e laranja forte).

Na Figura 6 é ainda possível observar a localização da Estação Meteorológica da Horta, (Triângulo vermelho maior e mais a SE), onde, durante o sismo de 1988, foram registadas acelerações da ordem dos 400 cm/seg^2 o que, a aproximadamente 17 km do epicentro, e para uma Magnitude de 5,9 [Richter] se explica pela forte amplificação devido à presença de solos brandos da Classe D.

4.3. Estimção de danos nos edifícios.

Conhecida a aceleração à superfície, resta por agora, baseado nessa informação, estimar os danos passíveis de serem provocados nos edifícios. Havendo vários métodos para o fazer, vamos aqui utilizar uma metodologia recente, apresentada pela 1ª vez em 2003 (Giovinazzi *et al.*, 2003) e mais recentemente actualizada, em Maio de 2007 (Bernardini *et al.*, 2007). A escolha deste processo deve-se sobretudo à sua fácil interpretação e implementação, bem como ao facto de se basear na Escala de Intensidades Europeia, EMS-98.

Este método, para estimar os danos passíveis de ocorrerem nos edifícios, recorre à Intensidade Macrossísmica medida na escala EMS-98. Recorre também a um conceito próprio de caracterização do edificado no que se refere à sua capacidade para resistir à acção sísmica, conceito esse materializado

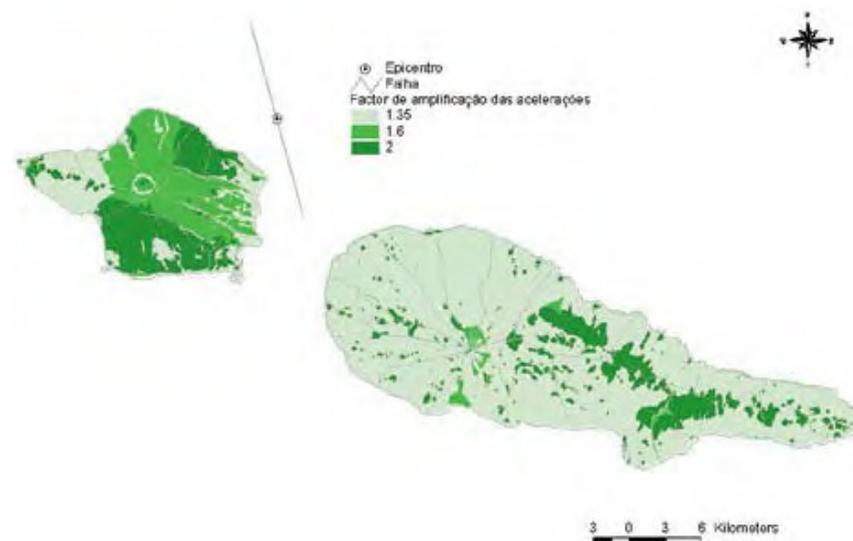


Figura 5
Solos e Factor de Amplificação das acelerações.



Figura 6
Efeitos de sítio nas proximidades da cidade da Horta (Danos Registados).

no que se entendeu designar por Índice de Vulnerabilidade do Edificado ou, mais simplesmente **Índice de Vulnerabilidade, Vu**.

4.3.1. Intensidade macrossísmica e acelerações de pico no solo

Assim, porque precisamos de converter acelerações em Intensidades, vamos usar uma lei também recentemente proposta, a qual se traduz pela eq. 4.4. e Figura 7, e que tem a particularidade de se auto-ajustar a acções sísmicas com características diferentes (acções próximas, frequentes de baixa magnitude e acções longínquas, pouco frequentes e de grande magnitude) (Atkinson *et al.*, 2007).

$$I = c_1 + c_2 \cdot \log(Pga) + \Delta I; \log(Pga) \leq 1,69;$$

$$I = c_3 + c_4 \cdot \log(Pga) + \Delta I; \log(Pga) \geq 1,69;$$

$$\Delta I = c_5 + c_6 \cdot M_w + c_7 \cdot \log(R) \quad (4.4)$$

$$c1 = 2,65; c2 = 1,39; c3 = -1,91; c4 = 4,09; c5 = -1,96; c6 = 0,02;$$

$$Pga[\text{cm / seg}^2]; R[\text{Km}]$$

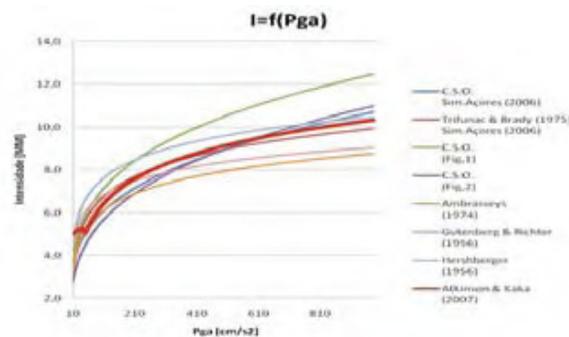


Figura 7
Outras relações Intensidades-PGA possíveis.

4.3.2. Vulnerabilidade dos edifícios à acção sísmica

Como já referido, foi necessário caracterizar o edificado, por forma a encontrar classes que de um modo sistemático se verifique possam representar diferentes comportamentos quando sujeitas a uma acção sísmica, associando-se por fim, a cada classe, um indicador de vulnerabilidade definido por um parâmetro V_u , compreendido entre {0 e 1}, correspondendo o valor mais baixo ($V_u=0$) a classes com o melhor comportamento, e o valor máximo ($V_u=1$) a classes com o comportamento pior. Para tanto, foram considerados os parâmetros:

- Tipo de estrutura,

- Tipo de Pavimento,
- Tipo da Estrutura da cobertura,
- Tipo de paredes, interiores e exteriores.

Este processo é normalmente levado a cabo recorrendo a peritos que, pelo seu conhecimento das matérias envolvidas, os quais, utilizando procedimentos variados, identificam o valor do indicador que depois será utilizado na simulação. No presente caso, as Classes de Vulnerabilidade e os indicadores a elas associados podem ser observadas nos quadros Quadro II e Quadro III.

Quadro II – Tipologias representativas do edificado das Ilhas do Faial e do Pico, à data de 1998, adaptado de (Ferreira, *et al.*, 2007)

Tipo Construtivo	Estrutura	Pavimento	Estrutura da Cobertura	Paredes interiores/exteriores
CT	Alvenaria de pedra	Madeira	Madeira	Tábua de madeira
CTA	Alvenaria de pedra	Laje de betão armado	Madeira	Tabique de madeira
CM1	Pilares e vigas de betão armado	Laje de betão armado	Madeira	Blocos de cimento (interior) e alvenaria de pedra no exterior
CM2	Pilares e vigas de betão armado	Madeira e laje de betão armado parcial (nas zonas húmidas)	Madeira	Blocos de cimento (no interior e exterior quando existe ampliações da casa)
CM3	Pilares e vigas de betão armado	Laje de betão armado	Madeira ou betão armado	Blocos de cimento
CC	Resistente em betão armado	Laje de betão armado	Madeira ou betão armado	Blocos de cimento

Estas tipologias, num total de 1663 edifícios, encontram-se distribuídas na amostra, como seguidamente se indica:

- CT 1020 edifícios
- CM1 18 "
- CM2 489 "
- CM3 89 "
- CC 29 "
- CTA 18 "

No Quadro III pode-se observar o posicionamento destas tipologias, relativamente às tipologias referidas na EMS-98, bem como os valores das vulnerabilidades propostas (Giovinazzi *et al.*, 2003) e as adoptadas no presente trabalho para as tipologias construtivas indicadas no Quadro II.

Quadro III – Tipologias tipo e parâmetro de Vulnerabilidade, V_u , associado

Tipologia Construtiva		V_u
Classe tipológica de referências	A	0,900
Alvenarias de pedra solta e adobe	M1	0,900
Alvenarias de adobe	M2	0,840
Eixos de Faial e Pico, Construção Tradicional Alivada	CTA	0,883
Eixos de Faial e Pico, Construção Tradicional	CT	0,801
Alvenarias de pedra simples	M3	0,767
Classe tipológica de referências	B	0,740
Alvenaria de tipo não reforçada	M5	0,740
Eixos de Faial e Pico, Construção Mista 1	CM1	0,700
Pórtico de betão armado sem design anti-sísmico	PC1	0,644
Eixos de Faial e Pico, Construção Mista 2	CM2	0,638
Alvenarias de pedra maciças	M4	0,616
Alvenaria de tipo não reforçada, com placa	M6	0,616
Classe tipológica de referências	C	0,580
Eixos de Faial e Pico, Construção Mista 3	CM3	0,587
Paredes de betão armado sem design anti-sísmico	PC4	0,544
Eixos de Faial e Pico, Construção Corrente	CC	0,510
Pórtico de betão armado com design anti-sísmico moderado	PC2	0,447
Estruturas de madeira	W	0,447
Classe tipológica de referências	D	0,420
Alvenaria reforçada ou confinada	M7	0,384
Paredes de betão armado com design anti-sísmico moderado	PC5	0,384
Pórtico de betão armado com elevado design anti-sísmico	PC3	0,349
Estruturas de aço	S	0,287
Classe tipológica de referências	E	0,260
Paredes de betão armado com elevado design anti-sísmico	PC6	0,224
Classe tipológica de referências	F	0,100

4.3.3. Modelo de previsão de danos nos edifícios

Como referido em 4.3, a **fragilidade** do edificado (probabilidade de as construções de uma dada classe de vulnerabilidade atingirem ou superarem um determinado grau de danos quando submetidos a um dado nível da acção sísmica) (Figura 8) será modelada por uma função de densidade de probabilidade β , função do **Índice de Vulnerabilidade** V_u , e da **Intensidade Macrossísmica** I , cujos parâmetros seguidamente se indicam:

$$\mu_D = 2,5 + 3 \cdot \text{Tanh}\left(\frac{I + 6,25 \cdot V_u - 12,7}{3}\right) \cdot \begin{cases} e^{\frac{V_u}{2}(I-7)} & \text{se } I \leq 7 \\ 1 & \text{se } I > 7 \end{cases} \quad (4.5)$$

$$p = \frac{8}{5} \cdot \mu_D; q = 8 - p$$

e a fragilidade virá então dada por

$$P[GD \geq k] = 1 - \beta(k; p; q; 0; 5) \quad (4.6)$$

A probabilidade de um edifício de vulnerabilidade V_u , quando sujeito a uma Intensidade sísmica I , se encontrar no grau de dano k , será então dada por

$$P[GD = 0] = P_\beta(0, 5)$$

$$P[GD = k] = P_\beta(k + 0, 5) - P_\beta(k) \quad \text{para } 1 \leq k < 5;$$

$$P[GD = 5] = 1 - P_\beta(4, 5) \quad (4.7)$$

$$P_\beta(k) = \beta(k; p; q; 0; 5)$$

Onde

- μ_D é o Grau de Dano Médio Esperado
- V_u é o índice de vulnerabilidade do edificado
- I é o valor da Intensidade Macrossísmica
- GD é o grau de dano alcançado
- k é um grau de dano específico ($0 \leq k \leq 5$)
- p, q são os parâmetros de forma da função β

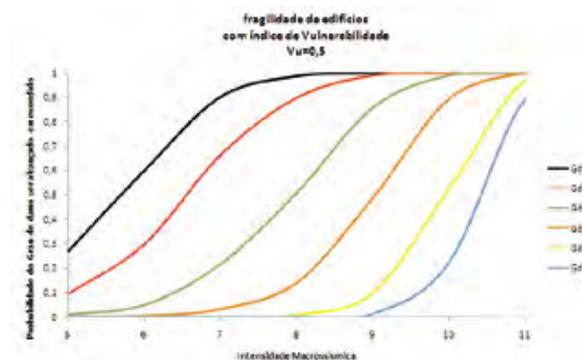


Figura 8 Exemplo de Curvas de fragilidade.

Será também utilizada uma outra formulação diferente desta, pela qual a função de fragilidade será construída com base numa distribuição LogNormal como seguidamente se indica.

$$P[GD \geq k] = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{Pga}{\mu}\right)}{\beta} \right] \quad (4.8)$$

Figura 9
Campo de acelerações
[cm/seg²].

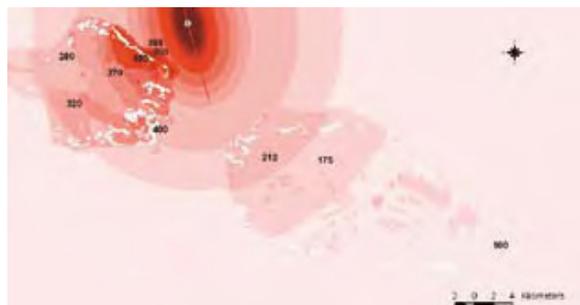
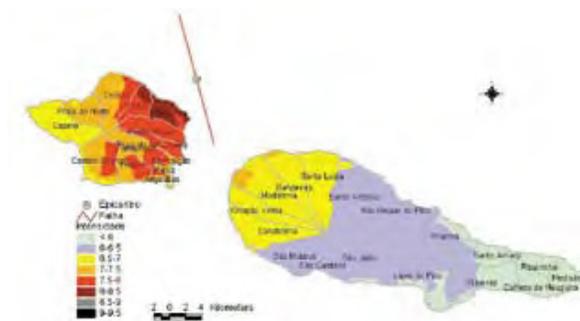


Figura 10
Campo de Intensidades.



Figura 11
Campo de Intensidades
(representação alternativa).



Onde

- ϕ É a função de densidade de probabilidade LogNormal, cumulativa,
- P_{ga} É a aceleração de Pico à superfície [g],
- μ É o valor característico da Mediana da Distribuição para a classe de fragilidade k ,
- β É o Desvio Padrão

Enquanto que na formulação anterior se têm as tipologias caracterizadas por um valor do seu índice de vulnerabilidade, aqui, são as mesmas caracte-

rizadas pelo valor da sua Mediana e pelo Desvio Padrão.

5. Aplicação do modelo ao caso do sismo de 1998

Para efeitos de simulação, considerou-se uma Magnitude de Momento, $M_w=6,2$, com o epicentro localizado em $38^\circ 38,25' N$, $28^\circ 35,36' W$, e a falha, com um comprimento de rotura de aproximadamente 16 km e no Azimute $105,068^\circ$ como indicado nas imagens seguintes.

5.1. Campo de acelerações

Calculado pela eq. (4.2), obteve-se um campo de acelerações no qual as mesmas chegam a atingir (Figura 9), à superfície, valores de 700 cm/seg^2 no Farol e de 400 cm/seg^2 no Observatório Meteorológico da Horta, (380 cm/seg^2 e 202 cm/seg^2 no substrato rochoso) reproduzindo fielmente os dados utilizados para calibração da lei de atenuação.

5.2. Campo de intensidades

Utilizando a eq. (4.4), estas acelerações foram convertidas em Intensidades, tendo-se obtido o mapa de Intensidades como mostrado nas Figuras 10 e 11, na qual, para efeito de melhor compreensão, se utilizou uma escala de $\frac{1}{2}$ grau, em vez da tradicional escala de intervalos inteiros.

5.3. Danos nos edifícios e análise comparativa dos resultados

A partir das Intensidades, através da eqs, e foram calculados os danos esperados, pelo modelo, com vista à sua comparação com os danos realmente observados.

Assim, embora a eq. forneça o valor *médio* do grau de dano esperado, utilizou-se em vez deste o

valor da *moda* (valor mais frequente), o qual, para esta distribuição, se obtém pela eq.

$$M(\beta) = \frac{8 \cdot \mu - 5}{6} \quad (4.9)$$

e, para cada grau de dano, foram calculadas as frequências de ocorrência procedendo-se em seguida à comparação das suas distribuições. O resultado inicialmente obtido, encontra-se representado na Figura 12.

Desde logo se pode observar que há uma divergência não aceitável entre os danos observados e os previstos pelo modelo teórico de simulação.

Com efeito, um grande número de parâmetros influenciam o resultado final, tendo-se observado que a modelação se afigura extremamente sensível à quase totalidade dos parâmetros envolvidos o que, naturalmente dificulta a tarefa de calibração.

Procedendo-se, num 1º passo à análise dos campos de acelerações e de intensidades, concluiu-se que não seriam eles os mais prováveis causadores dos desvios observados já que, os valores apresentados parecem bastante coincidentes, não apenas com o que se entende razoável esperar como também com a grande parte dos estudos publicados sobre este sismo, e ainda com os próprios valores observados utilizados na calibração da função de atenuação. Assim, ficavam por estudar outras fontes de erro. De entre estas, decidiu-se investigar os parâmetros da eq. , já que em trabalhos anteriores se tinha observado que um conjunto de valores destes parâmetros, ligeiramente diferente dos propostos pelos autores do modelo, pareciam levar a melhores ajustamentos daquela equação aos valores preconizado na EMS-98. Com essa nova parametrização, a qual se reflecte na eq. , as distribuições de danos obtidas foram as observadas na Figura 13, a qual representa uma melhoria significativa quando comparada com o anteriormente obtido.

$$u_D = 2,12 + 2,69 \cdot \text{Tanh} \left(\frac{I + 5,38 \cdot I_u - 11,72}{1,95} \right) \cdot \begin{cases} e^{\frac{I_u}{2} (I-7)} & \text{se } I \leq 7 \\ 1 & \text{se } > 7 \end{cases} \quad (4.10)$$

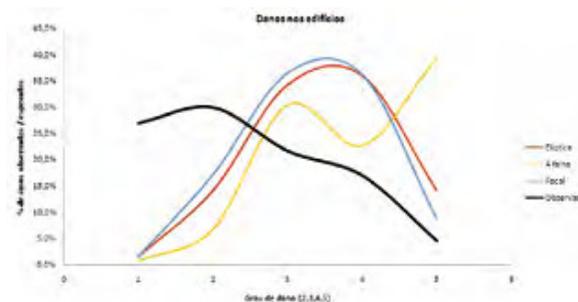


Figura 12 Distribuição dos graus de dano, (parâmetros iniciais de simulação).

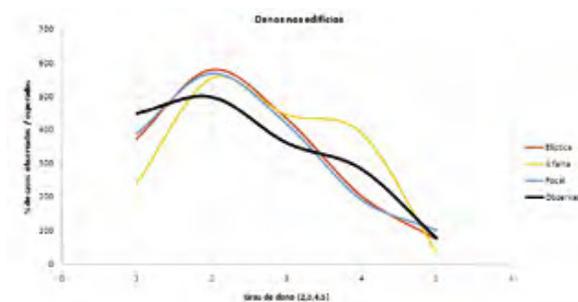


Figura 13 Distribuição de danos calculada com parametrização da função de danos modificada.

Embora não passando um teste de ajustamento χ^2 , as novas parametrizações, designadamente as consideradas pela propagação elíptica ($\chi^2 = 69,8$) e pela propagação circular ($\chi^2 = 75,1$), pareceram-nos por agora suficientemente ajustadas para prosseguir com a utilização deste modelo na simulação de outros sismos. Com efeito, a análise de resíduos efectuada ao erro medido pela diferença entre o grau de dano esperado observar, calculado, como já referido pelo valor da *Moda* da distribuição $M(\beta)$, e o valor observado, passa um teste T para um valor nulo do erro médio. Com efeito, para o modelo de propagação elíptica obteve-se um erro médio compreendido num intervalo $\{-0,0284 \dots 0,0908\}$ com 95% de confiança, e para uma propagação circular obteve-se igualmente a média do erro compreendida num intervalo de confiança de 95% entre $\{-0,0383 \dots 0,0782\}$.

Difícil, ou por explicar fica a variância deste erro ou a variância das observações feitas. Assim, embora

Figura 14

Danos observados em edifícios de construção tradicional, (escala {1...5}), exibindo uma variabilidade dificilmente explicada pelo modelo (sobre campo de acelerações).

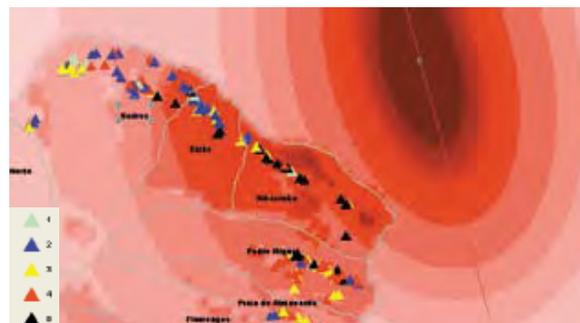
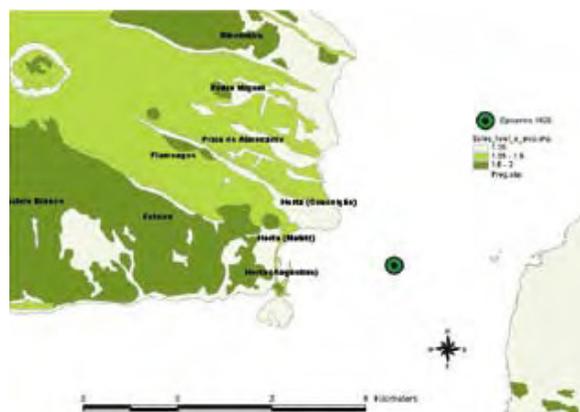


Figura 15

Solos e epicentro do sismo de 1926.



com média nula, o erro do modelo continua com desvios padrões da ordem de 1,2 (graus de dano), valor que consideramos ainda muito alto. Contudo, um seguramente forte contributo para esta variação reside no facto de a mesma se encontrar presente em edifícios com igual Vulnerabilidade Sísmica (pelo menos com tipologias e características construtivas praticamente iguais). Isto mesmo se pode observar na Figura 14, onde edifícios construídos sobre um mesmo tipo de solo e a igual distância da fonte sismogénica, logo sujeitos a iguais acelerações e intensidades, apresentaram graus de danos completamente diferentes, cobrindo toda a gama da escala {1..5}.

6. Utilização do modelo para simulação do sismo de 1926

Como último exercício, procurámos explicar, por via do modelo assim construído, os danos relatados do sismo de 31 de Agosto de 1926, que causou enorme destruição na Cidade da Horta e freguesias adjacentes. Do Catálogo Sísmico da Região dos Açores (Nunes *et al.*, 2004), obtivemos as coordenadas do epicentro (Lat 38,533° N, Long 28,583° W), que o situa a uma distância da Cidade da Horta de aproximadamente 4 km, bem como uma Magnitude Local de 5,6.

Porque não temos a geometria da falha, utilizámos esta Distância Focal na lei de Atenuação, eq. , o que nos indica acelerações da ordem dos 289 cm/seg² no substrato rochoso da Horta. Com factores de amplificação de efeitos de sítio entre 1,6 e 2 (Figura 15), facilmente se obtêm acelerações à superfície superiores a 500 cm/seg².

Usando a expressão , obtemos para a Intensidade o valor $I=8$ (MM ou EMS).

Considerando um tecido edificado de tipologia tradicional ou tradicional alterada, com uma vulnerabilidade próxima de $V_u=0,85$, obteríamos graus médios de dano nos edifícios, calculados pela expressão de $G_{md}=4,2$ o que leva a que o grau de dano mais provável de observar (moda) seja 4,8 ou seja, a destruição quase que generalizada.

Esta estimativa condiz totalmente com os relatos escritos da época. De um desses relatos, ou da sua reprodução em (As Calamidades dos Açores no séc. XX, www.minerva.uevora.pt) pode-se por exemplo citar:

"A 31 de Agosto, pelas 8h 42min., a ilha foi sacudida por um violento sismo que provocou 8 mortos, mais de 200 feridos e destruição generalizada na cidade da Horta, especialmente na freguesia da Conceição, e nas freguesias de Praia do Almoxarife (onde das 220 casas apenas 16 ficaram habitáveis), Flamengos, Feteira e Castelo Branco e na zona compreendida entre a Lomba do Pilar e o Salão.

Ao todo ficaram derrubadas, total ou parcialmente, 4138 casas.”

Esperamos sinceramente que tal se não volte a repetir. Mas se tal acontecer, esperamos também que a simulação de cenários sísmicos, como o que aqui foi apresentado, possa atempadamente contribuir para um significativo reforço da nossa capacidade para enfrentar estas catástrofes. Tal esperança constitui a nossa motivação para o estudo destas matérias, para o qual, inequivocamente constituem património de inestimável valor um adequado registo de dados sobre casos reais.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente realizado ao abrigo do Projecto da FCT intitulado *“USuET-Urban System under Earthquake Threat. Análise Sistémica do Risco Sísmico: Uma Versão Integrada. Aplicação a Centros Urbanos nos Açores”*, POCI/CTE-GIN/58095/2004/DG.

