

## INCERTEZAS NA SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE SISMOS: O CASO DOS AÇORES



João M.C. Estêvão

Professor Adjunto  
DEC-ISE-UAIf  
Faro  
jestevao@ualg.pt



Alexandra Carvalho

Investigadora Auxiliar  
LNEC  
Lisboa  
xana.carvalho@lnec.pt

### SUMÁRIO

A simulação estocástica tem sido utilizada, com algum grau de sucesso, para a obtenção de acelerogramas em zonas onde não existem muitos registos instrumentais de sismos intensos ocorridos no passado, e pode ser uma ferramenta importante nesse contexto. Contudo, essas simulações deverão, necessariamente, ser previamente validadas através de registos de sismos ocorridos no passado, dada a grande incerteza associada à definição de cenários sísmicos. É muito difícil prever qualquer um dos processos, complexos, de geração do sismo, de propagação da energia e dos efeitos locais, nomeadamente as características da rotura, designadamente o padrão de deslizamentos e a queda de tensão média no plano da falha, a atenuação das ondas sísmicas ao longo do percurso de propagação e a obtenção da amplificação local das camadas de solo superficial.

Neste trabalho, são apresentados os resultados de diversas simulações estocásticas do sismo ocorrido nos Açores em 1998, considerando diferentes localizações da rotura, juntamente com os respetivos parâmetros, variação das características da atenuação e diferentes condições geológicas locais. Os acelerogramas simulados, e correspondentes espectros de resposta, foram comparados com os registos instrumentais do sismo, e com os resultados de leis de atenuação obtidas para a Europa e, em particular, para o arquipélago dos Açores.

**Palavras-chave:** Simulação estocástica, Açores, sismo de 1998.

## 1. INTRODUÇÃO

As incertezas relativas aos sismos são normalmente grandes e pesam nas tomadas de decisão por parte de quem tem, de alguma forma, responsabilidades diretas ou indiretas na mitigação do risco sísmico. A dificuldade na tomada de decisão tem como uma das principais razões associadas o facto dos grandes sismos serem eventos raros, logo a ocorrência do fenómeno durante o horizonte de aplicação dessas decisões é incerta, assim como é limitada a experiência passada sobre a recorrência dos eventos, suas características e efeitos. Outra razão é que as perdas económicas e sociais resultantes da ocorrência de sismos é dependente de muitos fatores e variáveis, que ainda são pouco conhecidas. Ao longo do tempo, a base de informação tem vindo a ser expandida, os modelos (de recorrência dos sismos, da propagação das ondas sísmicas, dos efeitos locais, entre outros), têm vindo a tornar-se mais precisos mas ainda se perspectiva que as incertezas se mantenham grandes por muito tempo [1].

No contexto dos estudos de perigosidade sísmica, o conceito de incerteza tem sido decomposto em duas parcelas distintas: a incerteza epistémica e a incerteza aleatória. As incertezas epistémicas estão associadas ao deficiente conhecimento do fenómeno, enquanto que as incertezas aleatórias estão associadas ao cariz imprevisível dos sismos, e são incertezas que não podem ser reduzidas [2].

As incertezas epistémicas podem resultar da combinação das incertezas nos dados e das incertezas nos modelos adotados.

As variáveis básicas usadas nos modelos podem ser divididas em três categorias principais [2]:

- No primeiro grupo podem ser incluídas as variáveis que descrevem a fonte sísmica, como seja a magnitude do evento, o momento sísmico, a distância epicentral, a profundidade e as dimensões da fonte sísmica e o tipo de mecanismo focal;
- No segundo grupo podem ser incluídas as variáveis que caracterizam o local, designadamente a distância à fonte e as condições do local (a geologia e topografia desse local);
- No terceiro grupo é possível incluir as variáveis que descrevem o processo de propagação e as propriedades do caminho dos raios sísmicos desde a fonte até ao local, bem como as propriedades mecânicas do material ao longo do percurso de propagação, incluindo o amortecimento.

A consideração das incertezas relativas aos sismos (epistémicas e aleatórias) nos estudos de risco sísmico, é de enorme importância, pois existem estudos que indicam que, para níveis elevados de vibração, a variabilidade nos movimentos sísmicos contribui mais para a variabilidade do comportamento das estruturas do que a variabilidade das características dessa estrutura [3].

Uma das maiores incertezas epistémicas na análise da perigosidade sísmica e na avaliação do risco sísmico, e uma questão-chave nesses estudos, é a equação de previsão dos movimentos sísmicos, também designada de lei de atenuação, necessária para estimar o nível de vibração induzido pela ocorrência de um sismo com determinadas características, e num local de estudo.

Quando se recorre a uma típica lei de atenuação moderna, a amplitude dos movimentos sísmicos num determinado local poderá ser função da magnitude do sismo, da distância à falha, do mecanismo focal e dos efeitos locais. Algumas destas leis permitem determinar os valores de aceleração espectral, para além da aceleração de pico [4].

As leis de atenuação correspondem a funções obtidas por regressão dos resultados de um conjunto de registos, e normalmente correspondem a valores médios de aceleração, estando associadas a essas leis de atenuação um valor de desvio padrão.

Alguns estudos têm demonstrado que existem diferenças não negligenciáveis entre os resultados de diferentes leis de atenuação para a Europa, o que reflete a incerteza epistémica na previsão dos movimentos sísmicos, pelo que é usual que os estudos de perigosidade sísmica usem diferentes leis de atenuação numa estrutura de árvore lógica. Importa referir, que a maior parte das leis de atenuação existentes na literatura não incorporam os efeitos do comportamento não-linear dos solos [5].

Existem leis de atenuação que resultam de regressões de resultados de simuladores estocásticos, como complemento de bases de dados de sismos incompletas (por não existirem sismos de grandes magnitudes, por exemplo), ou em sua substituição, usando a geração estocástica de sismos com fontes pontuais ou com modelos de falhas-finitas [6-8].

Alguns estudos que recorreram a modelos estocásticos tentaram incorporar as incertezas de diversas formas [7-9].

Tem sido evidente que as incertezas relativas ao valor da queda de tensão média tem uma grande influência nos resultados das simulações estocásticas [10, 11]. Por outro lado, a simulação de sismos tem a vantagem de possibilitar a incorporação da existência de asperezas no plano da falha, e criar leis de atenuação que reflitam esse facto [12]. É importante salientar que tanto as incertezas relacionadas com a queda de tensão, como as relacionadas com o padrão de deslizamentos no plano da falha, deverão ser classificadas como incertezas aleatórias associadas ao fenómeno natural, que nunca poderão ser eliminadas. Contudo, será desejável incorporar essas incertezas nos estudos de perigosidade sísmica de um território.

A simulação estocástica, contemplando o comportamento não linear dos solos, tem sido realizada para Portugal com relativo sucesso [8, 13-15], designadamente na simulação do sismo dos Açores de 1980 [15].

Existem também muitas incertezas quanto à importância dos efeitos locais nos resultados da perigosidade sísmica. A generalidade dessas incertezas poderão ser classificadas como

epistémicas, e estão relacionadas com o desconhecimento das características dos terrenos de fundação, e com a validade dos modelos de comportamento dos solos que constituem esses locais. Dificilmente, num futuro relativamente próximo, será possível mapear, com elevado rigor, as características das formações geológicas existentes numa localidade, incluindo o substrato rochoso e o relevo topográfico, pelo que se torna difícil minimizar o efeito das incertezas inerentes a esse facto. As incertezas relativas aos resultados dos modelos de comportamento não-linear dos terrenos de fundação também é evidente (sejam eles unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais), e dependem muito dos dados que alimentam esses modelos.

O registo obtido em Portugal com a aceleração de pico mais elevada foi obtido na cidade da Horta, e em resultado do sismo ocorrido em 1998 [16]. Da comparação dos espectros de resposta dos registos (Fig. 1) com os espectros de resposta que constam no "Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes" (RSAEEP) [17], ainda em vigor, e com os espectros do Anexo Nacional ao Eurocódigo 8 (EC8) [18], torna-se evidente as grandes incertezas ainda inerentes à definição da ação sísmica para Portugal, designadamente para os Açores, e a necessidade do assunto continuar a ser estudado. Em virtude do reduzido número de registos intensos existentes no território nacional, e que tenham interesse para o domínio da Engenharia de Estruturas, a simulação estocástica parece ser uma opção válida para suprimir essa evidente falta de dados. Contudo, é importante o conhecimento de como as incertezas, designadamente as incertezas aleatórias, influenciam os resultados das simulações estocásticas.

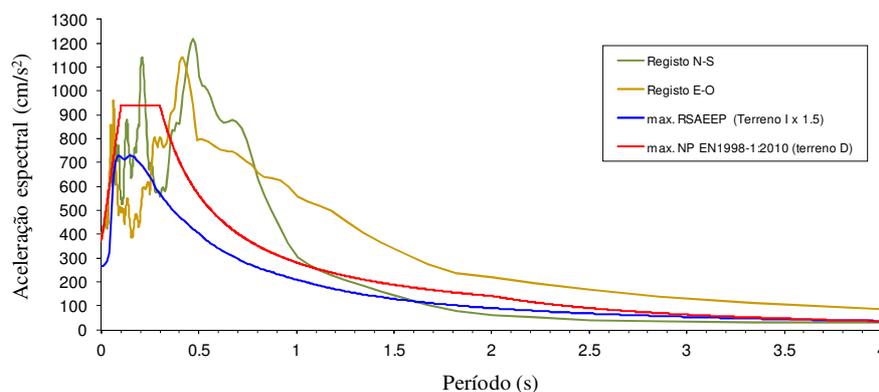


Figura 1. Comparação dos espectros de resposta do sismo dos Açores de 1998, com os espectros máximos previstos no RSAEEP e na NP EN1998-1:2010.

Neste trabalho, são apresentados os resultados de diversas simulações estocásticas do sismo ocorrido nos Açores em 1998, realizadas para a cidade da Horta, na ilha do Faial, testando diferentes fontes sísmicas que são propostas por diversos autores. Também são testados os efeitos da incerteza relativa a alguns parâmetros da fonte, para diferentes condições geológicas locais. Os acelerogramas simulados, e correspondentes espectros de resposta, são apresentados e comparados com os registos instrumentais do sismo, e com

os resultados de leis de atenuação obtidas para a Europa e, em particular, para o arquipélago dos Açores.

## 2. SISMO DOS AÇORES DE 1998

O sismo ocorrido a 9 de julho de 1998 foi um violento sismo que se fez sentir em seis ilhas dos Açores, com particular incidência na ilha do Faial, tendo atingindo intensidades máximas na ordem de VIII/IX [19].

Este evento sísmico permite ilustrar o nível de incerteza associada à estimativa da ação sísmica nos Açores.

Para ilustrar o grau de incerteza associada à simulação estocástica de um sismo ocorrido no passado, como é o caso do sismo dos Açores de 1998, considera-se, em primeiro lugar, a influência da incerteza relativa à magnitude do sismo, à localização do foco, às características do plano da rotura, entre outros parâmetros necessários à simulação, pois existem diversas propostas distintas para este sismo [20-23].

Simulações estocásticas realizadas no passado para o sismo dos Açores de 1998, revelaram a dificuldade de reproduzir a ação sísmica registada quando não são contemplados os efeitos geológicos locais [24], outra incerteza de grau muito elevado.

### 2.1 Resultados da simulação estocástica

Neste trabalho, em primeiro lugar foram testadas duas possíveis soluções (casos 1 e 2) para os parâmetros da fonte [23], que estão apresentadas na Fig. 2 ( $M_w = 6.1$ ).

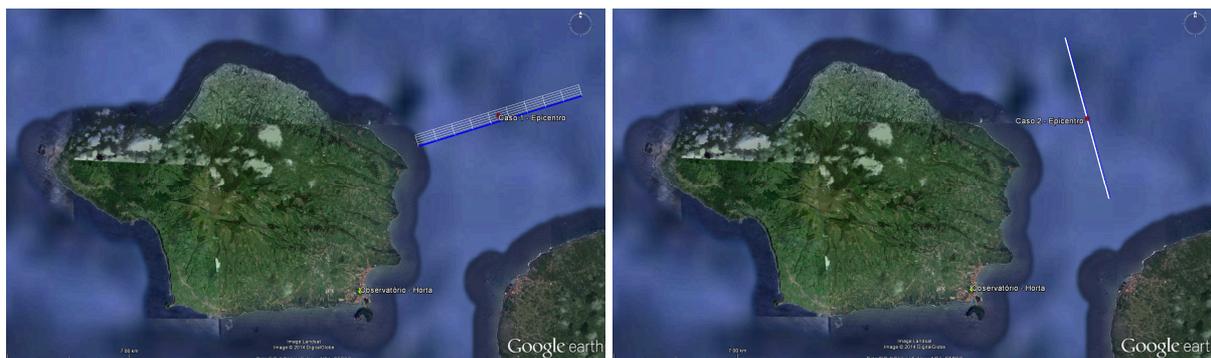


Figura 2. Possíveis fontes do sismo dos Açores de 1998 [23], adotadas na realização das simulações estocásticas dos casos 1 e 2.

Os parâmetros usados na realização das simulações para o sismo dos Açores de 1998, foram os limites superiores dos propostos para os Açores, resultantes de estudos recentes [25], com exceção do parâmetro de alta frequência ( $k_0$ ), que foi considerado nulo. Foi utilizada uma frequência máxima de 50 Hz no filtro de alta frequência [15]. A velocidade de rotura considerada foi de 2.8 km/s. A duração das simulações foi obtida de forma análoga à

quantificada em simulações estocásticas realizadas anteriormente para o sismo dos Açores de 1980 [15].

De forma a minimizar os problemas observados em simulações realizadas no passado e que foram atribuídos aos efeitos geológicos locais [24], foi considerado o perfil estratigráfico considerado na realização da simulação do sismo dos Açores de 1980 no Observatório Príncipe do Mónaco, na cidade da Horta, na ilha do Faial [15].

Os espectros de resposta médios obtidos de 100 simulações realizadas com o programa SIMULSIS [14] estão apresentados nas Figs. 3 e 4, juntamente com os espectros obtidos para as componentes N-S e E-O do registo do sismo, para comparação.

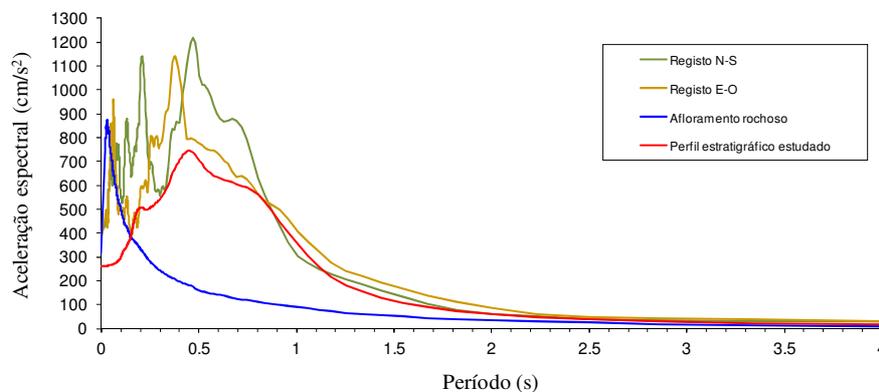


Figura 3. Resultados das simulações realizadas para o Caso 1.

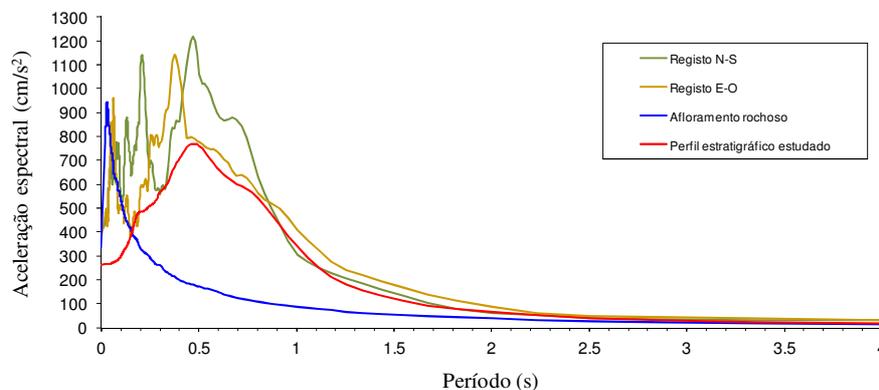


Figura 4. Resultados das simulações realizadas para o Caso 2.

Para o caso 1, os valores médios obtidos para as acelerações de pico, foram de  $316.3 \text{ cm/s}^2$  e  $260.9 \text{ cm/s}^2$ , respetivamente para o afloramento rochoso e para o perfil estratigráfico escolhido. Já em relação ao caso 2, podemos observar um ligeiro aumento das acelerações de pico, para  $333.6 \text{ cm/s}^2$  e  $263.2 \text{ cm/s}^2$ , respetivamente.

Também foi considerado um caso 3, correspondente ao caso (b) que foi adotado em simulações estocásticas anteriormente realizadas para o sismo dos Açores de 1998 [24], mas usando os parâmetros das simulações recentemente determinados para os Açores [25], com exceção da queda média de tensão (foi aumentada de 130 bar [25] para 200 bar [24]).

A localização da rotura está apresentada na Fig. 5 (neste caso com uma magnitude um pouco superior  $M_w = 6.2$ ).

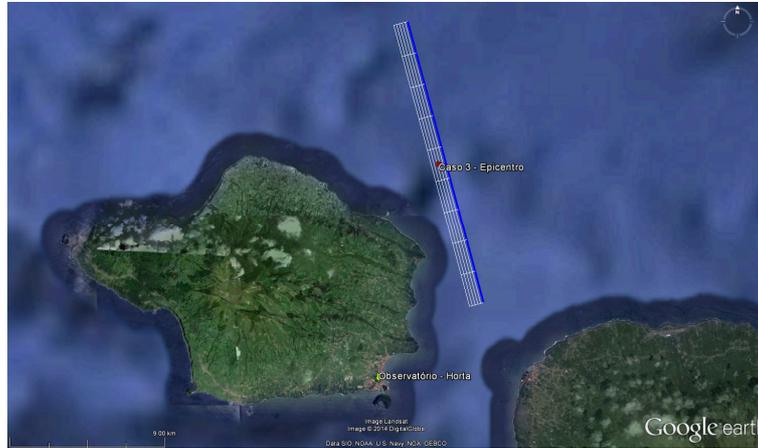


Figura 5. Possível fonte do sismo dos Açores de 1998 [24], adotada na realização das simulações estocásticas do caso 3.

Os espectros de resposta médios obtidos de 100 simulações estão apresentados na Fig. 6.

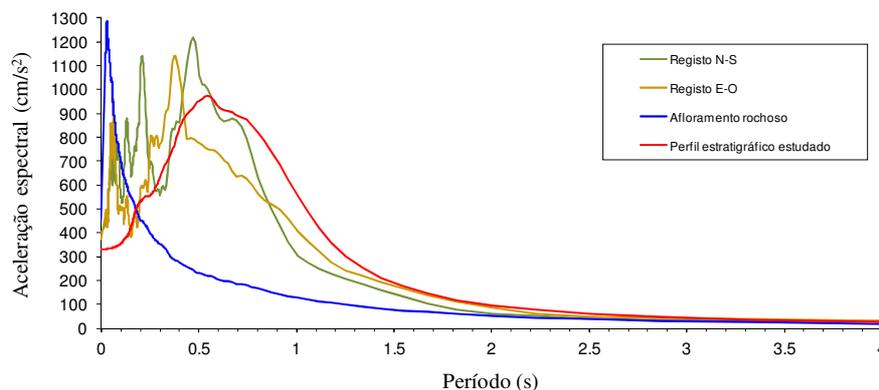


Figura 6. Resultados das simulações realizadas para o Caso 3.

Os valores médios obtidos para o caso 3 foram mais elevados do que os obtidos para os casos anteriores. As acelerações de pico obtidas corresponderam a  $452,7 \text{ cm/s}^2$  e  $331,2 \text{ cm/s}^2$ , respetivamente para o afloramento rochoso e para o perfil estratigráfico escolhido.

As diferenças obtidas nos resultados das simulações estocásticas realizadas para os três casos estudados evidenciam a influência das incertezas relativas às características da fonte nos resultados dos estudos.

## 2.2 Resultados de leis de atenuação

De modo a possibilitar o esclarecimento de quais as abordagens mais influenciadas pelas incertezas referentes às características da fonte, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos com leis de atenuação estabelecidas para a Europa [4] e, mais recentemente, para o Arquipélago dos Açores [26], e os registos do sismo dos Açores de

1998 obtidos na ilha do Faial. Os resultados obtidos para os três casos, considerando uma distância igual ao menor comprimento à projeção da falha à superfície, estão apresentados nas Figs. 7, 8 e 9, para rocha e para um solo genérico.

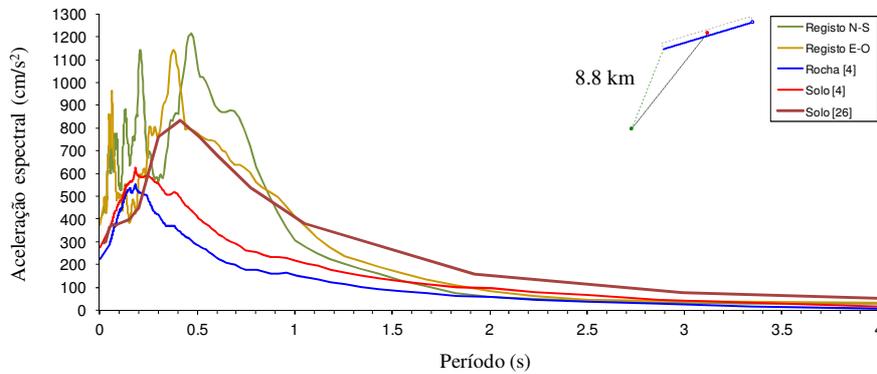


Figura 7. Resultados das Leis de Atenuação [4, 26], obtidos para o Caso 1 (8.8 km).

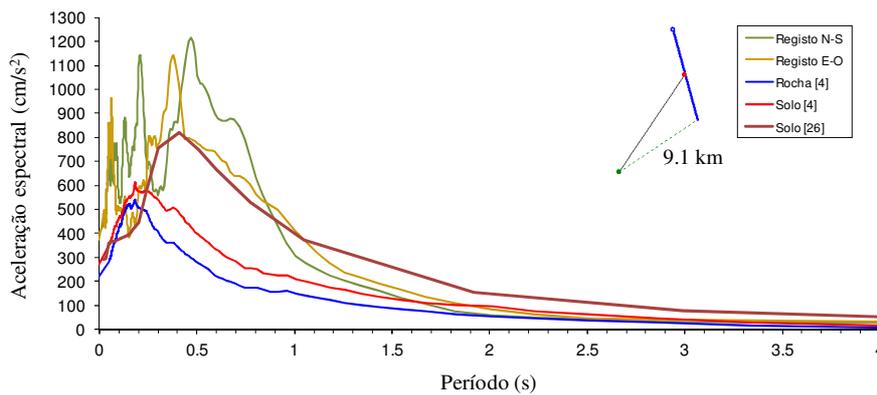


Figura 8. Resultados das Leis de Atenuação [4, 26], obtidos para o Caso 2 (9.1 km).

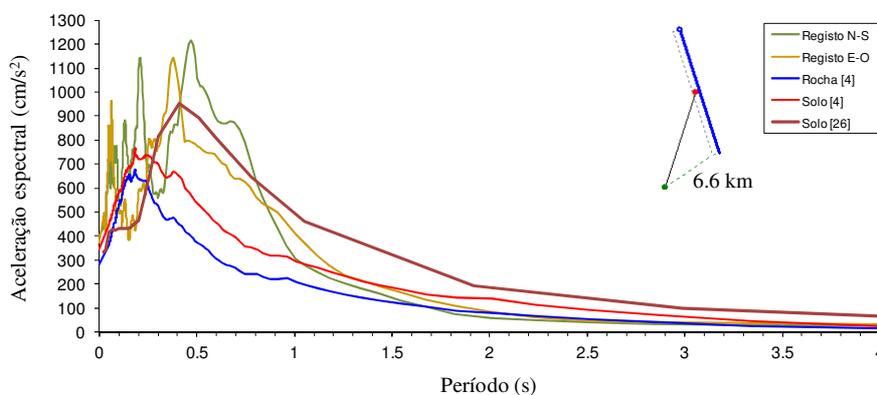


Figura 9. Resultados das Leis de Atenuação [4, 26], obtidos para o Caso 3 (6.6 km).

As acelerações de pico obtidas para rocha, com as leis de atenuação genéricas para a Europa [4], foram de  $226.0 \text{ cm/s}^2$ ,  $220.9 \text{ cm/s}^2$ , e  $281.9 \text{ cm/s}^2$ , respetivamente para os casos

1, 2 e 3. Os correspondentes valores obtidos para um solo genérico, foram, respetivamente,  $276.1 \text{ cm/s}^2$ ,  $269.9 \text{ cm/s}^2$ , e  $344.4 \text{ cm/s}^2$ .

Os valores obtidos com as leis de atenuação estabelecidas para os Açores [26] (para um solo do tipo III), e para um período de 0.02 s, foram de  $297.3 \text{ cm/s}^2$ ,  $293.0 \text{ cm/s}^2$ , e  $335.2 \text{ cm/s}^2$ , respetivamente para os casos 1, 2 e 3.

### 3. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Da observação dos gráficos das Figs. 3, 4 e 6, é possível constatar a influência das incertezas relativas às características da fonte nos resultados das simulações estocásticas. A definição dos planos de rotura, o valor da magnitude e a queda de tensão média no plano da falha podem originar grandes diferenças nos resultados das simulações. Contudo, como se pode depreender dos resultados das múltiplas simulações realizadas, é o efeito da geologia superficial a originar maior variabilidade nos resultados.

Quando comparados os resultados das simulações realizadas, com os registos do sismo ocorrido nos Açores em 1998, podemos concluir que o caso 3 é aquele que apresenta os melhores resultados. Contudo, os espectros de resposta obtidos das simulações apresentam desvios muito significativos, quer em termos de aceleração de pico, quer em termos de valores espectrais. Nos baixos períodos (altas frequências) os resultados obtidos para o afloramento rochoso de referência são mais próximos dos registos. Nos períodos intermédios e nos períodos mais elevados, são os resultados obtidos com o perfil estratigráfico adotado, que mais se aproximam dos registos do sismo. Provavelmente, as reais características do terreno do local onde foram obtidos os registos (Observatório Príncipe do Mónaco, na cidade da Horta, Faial), são algo intermédias entre o afloramento rochoso e o perfil estratigráfico considerado.

Os resultados obtidos com as leis de atenuação genéricas para a Europa adotadas neste estudo [4], apresentaram valores inferiores aos do registo do sismo dos Açores de 1998, para todos os três casos estudados, tanto para a aceleração de pico como para os valores das acelerações espectrais. O caso 3 foi também aquele que apresentou melhores resultados, quando comparados com os registos do sismo. As diferenças obtidas para rocha e para um solo genérico são pouco significativas, e não refletem as grandes diferenças de valores que têm sido observadas em sismos recentes [27]. As leis de atenuação com a inclusão dos efeitos da geologia superficial estabelecidas para os Açores [26] apresentam uma melhor aproximação aos registos.

As incertezas relativas às características dos sismos parecem influenciar a precisão dos resultados obtidos, tanto com as simulações estocásticas como com as leis de atenuação. Contudo, existido uma boa caracterização dos perfis estratigráficos tipo dos terrenos de uma área de estudo, os resultados deste trabalho apontam no sentido de que os estudos de perigosidade sísmica recorrendo a simulações estocásticas conduzem a melhores

resultados do que os obtidos com leis de atenuação genéricas, não ajustadas às especificidades de cada local.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto "Caracterização da ação sísmica no Arquipélago dos Açores – SiGMA" (PTDC/CTE-GIX/121957/2010), instituição a quem se presta o agradecimento pelo apoio prestado.

## REFERÊNCIAS

- [1] Wen, Y.K.; Ellingwood, B.R.; Veneziano, D.; Bracci, J. – Uncertainty Modeling in Earthquake Engineering, M. Center, Project FD-2 Report, 2003, p. 113.
- [2] Sigbjörnsson, R.; Ambraseys, N.N. – "Uncertainty Analysis of Strong-Motion and Seismic Hazard", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 1 (3), 2003, p. 321-347. 10.1023/B:BEEE.0000021424.14259.9d
- [3] Kwon, O.S.; Elnashai, A. – "The effect of material and ground motion uncertainty on the seismic vulnerability curves of RC structure", Engineering Structures, Vol. 28 (2), 2006, p. 289-303.
- [4] Ambraseys, N.N.; Douglas, J.; Sarma, S.K.; Smit, P.M. – "Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 3 (1), 2005, p. 1-53. 10.1007/s10518-005-0183-0
- [5] Bommer, J.; Stafford, P.; Akkar, S. – "Current empirical ground-motion prediction equations for Europe and their application to Eurocode 8", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 8 (1), 2010, p. 5-26. 10.1007/s10518-009-9122-9
- [6] Atkinson, G.M.; Boore, D.M. – "Ground-Motion Relations for Eastern North America", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85 (1), 1995, p. 17-30.
- [7] Atkinson, G.M.; Boore, D.M. – "Earthquake ground-motion prediction equations for eastern North America", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96 (6), 2006, p. 2181-2205.
- [8] Carvalho, A. - Modelação estocástica da acção sísmica em Portugal continental. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, 2007.
- [9] Jalayer, F.; Beck, J.L. – "Effects of two alternative representations of ground-motion uncertainty on probabilistic seismic demand assessment of structures", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 37 (1), 2008, p. 61-79. 10.1002/eqe.745

- [10] Estêvão, J.M.C.; Oliveira, C.S. – "Ground motion simulation for dynamic structural analysis: pros and cons", Proceedings da 15th World Conference on Earthquake Engineering, SPES, Lisbon, 2012, p. 1-10, paper 1527.
- [11] Prieto, G.A.; Parker, R.L.; Vernon, F.L.; Shearer, P.M.; Thomson, D.J. – "Uncertainties in Earthquake Source Spectrum Estimation Using Empirical Green Functions", em Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting Ed. por, American Geophysical Union, 2013, p. 69-74.
- [12] Irikura, K.; Miyake, H. – "Recipe for predicting strong ground motions: the state of the art and future prospects", Proceedings da 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI, San Francisco, California, 2006, p. 1-10, Paper No. 744.
- [13] Carvalho, A.; Zonno, G.; Franceschina, G.; Serra, J.B.; Costa, A.C. – "Earthquake shaking scenarios for the metropolitan area of Lisbon", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 28 (5), 2008, p. 347-364.
- [14] Estêvão, J.M.C. - Efeitos da ação sísmica no comportamento de edifícios de betão armado com alvenarias de enchimento. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, UTL, Lisboa, Portugal, 2012.
- [15] Estêvão, J.M.C.; Oliveira, C.S. – "Point and fault rupture stochastic methods for generating simulated accelerograms considering soil effects for structural analysis", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 43, 2012, p. 329-341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.07.019>
- [16] Oliveira, C.S. – "Os registos do movimento sísmico obtidos na rede acelerográfica dos Açores. Comparação com outros indicadores do movimento sísmico", em Sismo 1998 - Açores. Uma década depois Ed. por C.S. Oliveira, A. Costa, J.C. Nunes (Eds.), Governo dos Açores/SPRHI, S.A, Horta, 2008, p. 119-136.
- [17] RSAEEP – Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes. Decreto-Lei nº 235/83, de 31 de Maio., Imprensa Nacional-Casa da Moeda, E.P., Lisboa, 1983.
- [18] IPQ – NP EN 1998-1. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios, Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 2010.
- [19] Malheiro, A. – "Geological hazards in the Azores archipelago: Volcanic terrain instability and human vulnerability", Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 156 (1-2), 2006, p. 158-171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.012>
- [20] Matias, L.; Dias, N.A.; Morais, I.; Vales, D.; Carrilho, F.; Madeira, J.; Gaspar, J.L.; Senos, L.; Silveira, A.B. – "The 9th of July 1998 Faial Island (Azores, North Atlantic) seismic sequence", J Seismol, Vol. 11 (3), 2007, p. 275-298. [10.1007/s10950-007-9052-4](http://dx.doi.org/10.1007/s10950-007-9052-4)

- [21] Borges, J.F.; Bezzeghoud, M.; Buforn, E.; Pro, C.; Fitas, A. – "The 1980, 1997 and 1998 Azores earthquakes and some seismo-tectonic implications", *Tectonophysics*, Vol. 435 (1-4), 2007, p. 37-54.
- [22] Catita, C.; Feigl, K.L.; Catalão, J.; Miranda, J.M.; Victor, L.M. – "InSAR time series analysis of the 9 July 1998 Azores earthquake", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26 (13), 2005, p. 2715-2729. 10.1080/01431160512331337835
- [23] Fernandes, R.M.S.; Miranda, J.M.; Catalão, J.; Luis, J.F.; Bastos, L.; Ambrosius, B.A.C. – "Coseismic displacements of the MW = 6.1, July 9, 1998, Faial earthquake (Azores, North Atlantic)", *Geophysical Research Letters*, Vol. 29 (16), 2002, p. 21-21-21-24. 10.1029/2001GL014415
- [24] Zonno, G.; Oliveira, C.S.; Ferreira, M.A.; Musacchio, G.; Meroni, F.; Mota-de-Sá, F.; Neves, F. – "Assessing Seismic Damage Through Stochastic Simulation of Ground Shaking: The Case of the 1998 Faial Earthquake (Azores Islands)", *Surv Geophys*, Vol. 31 (3), 2010, p. 361-381. 10.1007/s10712-009-9091-1
- [25] Carvalho, A.; Reis, C.; Vales, D. – " Source and path parameters for Azores area, for stochastic finite-fault modeling", *Proceedings da Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, 2014*, p. 1-3.
- [26] Malfeito, N.; Carvalho, A.; Bilé Serra, J. – "Equações de previsão dos movimentos sísmicos à superfície para o Arquipélago dos Açores", *Proceedings das 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, 2014*.
- [27] Ghofrani, H.; Atkinson, G.; Goda, K. – "Implications of the 2011 M9.0 Tohoku Japan earthquake for the treatment of site effects in large earthquakes", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 11 (1), 2013, p. 171-203. 10.1007/s10518-012-9413-4