

# O PAPEL DOS EFEITOS LOCAIS E DAS CARACTERÍSTICAS DA FONTE NA RESPOSTA SÍSMICA DE ESTRUTURAS AFETADAS POR SÍSMOS NOS AÇORES

## THE INFLUENCE OF SITE AND SOURCE CHARACTERISTICS ON THE SEISMIC RESPONSE OF STRUCTURES AFFECTED BY AZORES EARTHQUAKES

J. M. C. Estêvão<sup>1</sup>, A. Carvalho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEPAC, Departamento de Engenharia Civil, ISE, Universidade do Algarve

<sup>2</sup>Investigadora, LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil



### RESUMO

*Os sismos que ocorreram nos Açores em 1980 e 1998, demonstraram o poder destrutivo destes fenómenos naturais sobre as construções existentes. Neste contexto, é de grande importância a caracterização da ação sísmica sobre os edifícios. Contudo, não é fácil identificar qual a influência individual das características da fonte e das condições geológicas locais nas distribuições de danos nas construções, a partir de acelerogramas registados em eventos sísmicos. Para ultrapassar esta dificuldade, foram usados sismos simulados na análise sísmica de estruturas. Assim, foram gerados diversos acelerogramas, resultantes de diferentes características da fonte, designadamente com diferentes padrões de deslizamento no plano da falha, e queda de tensão média, assim como diferentes perfis estratigráficos de solos de fundação típicos das ilhas dos Açores. Esses acelerogramas foram usados na análise não linear de uma estrutura de betão armado, permitindo entender quais as características da ação que mais influenciam os danos estruturais. Os resultados parecem evidenciar a importância das características dos terrenos de fundação na amplitude das vibrações sísmicas e no conteúdo espectral da ação.*

### ABSTRACT

*The 1980 and 1998 Azores earthquakes have shown the destructive power against the existent constructions. In this context, it is very important to characterize the buildings seismic action. However, it is not easy to identify the influence of source characteristics and site conditions on structural damage, when using earthquake records. To overcome this difficulty, structural analysis were carried out using simulated earthquakes. The simulated accelerograms were obtained using different source characteristics, namely different slip distributions and stress drops, and also using typical Azores soil conditions. The simulated accelerograms were used for the non-linear structural analysis of a concrete structure, allowing to understand which seismic action characteristics are more important for structural damage. Results seem to show the importance of geological site conditions on peak acceleration and spectral content.*

## 1. INTRODUÇÃO

Estimar o nível de vibração a que uma estrutura foi sujeita, sem que existam registos dessas vibrações locais, é uma tarefa

muito difícil. Essa dificuldade está associada ao facto do valor dessas vibrações depender das características da rotura (designadamente da magnitude do sismo,

do tipo de falha, do padrão de deslizamentos ocorridos e da queda de tensão média), das características da propagação das ondas sísmicas e das condições locais dos terrenos de fundação (designadamente do perfil estratigráfico do local das características do substrato rochoso e das camadas de solo, assim como da existência de efeitos de bacia e de efeitos topográficos).

O problema da definição da ação sísmica tem sido evidenciado pelos sismos ocorridos um pouco um pouco por todo mundo. Por exemplo, no sismo de L'Aquila de 2009 a ação sísmica ultrapassou, em muito, o valor preconizado no código sísmico italiano (Masi et al. 2011).

Por outro lado, também se afigura complexa a análise da resposta sísmica das estruturas, pois esta depende das características dinâmicas da estrutura, assim como da real capacidade resistente dos elementos estruturais, que depende do projeto sísmico dessa estrutura (se existir, o que não é o caso das construções mais antigas), e da qualidade da sua execução (muito difícil de avaliar com rigor). Estas incertezas também foram evidentes no comportamento das construções em resposta ao sismo de L'Aquila (2009), onde muitos edifícios sujeitos, em princípio, a uma ação muito superior ao valor considerado no seu projeto, resistiram ao sismo sem danos, enquanto outros foram severamente afetados ou colapsaram (Rossetto et al. 2011).

Em Portugal, também foram evidentes diferenças de comportamento nas estruturas afetadas pelo sismo dos Açores de 1980 (Oliveira 1992; Oliveira et al. 1992).

Quando se observam os danos existentes numa construção afetada por um sismo, é difícil avaliar quais os fatores que mais contribuíram para esses danos.

Assim, parece ser importante a existência de uma rede de aparelhos de registo de movimentos sísmicos intensos suficientemente densa, que estes estejam localizados em terrenos de diferentes características e que estas sejam perfeitamente conhecidas até ao substrato

rochoso. Só com um número alargado de registos de sismos intensos é que é possível minimizar as incertezas subjacentes à caracterização da ação sísmica.

De uma forma complementar, o recurso a sismos simulados pode ser de grande utilidade, pois possibilita o estudo da contribuição de cada variável no nível da ação sísmica, designadamente com recurso à simulação estocástica. Este tipo de métodos já foi usado, com relativo sucesso, para simular o sismo dos Açores de 1980 (Estêvão 2012).

Neste trabalho, foram realizadas diversas simulações estocásticas de sismos, mudando alguns parâmetros das simulações, de modo a ser possível verificar o impacto desses parâmetros na resposta não-linear de uma estrutura de betão armado que sobreviveu ao sismo dos Açores de 1980.

## **2. SIMULAÇÃO DE SISMOS**

### **2.1. Simulação estocástica**

Existem diversos métodos para a simulação de sismos. A simulação estocástica pode ser considerada como sendo a abordagem mais próxima da visão da engenharia sobre essa problemática (Erdik e Durukal 2006).

Nesse contexto, em Portugal têm vindo a ser desenvolvidos diversos programas informáticos de simulação estocástica com vista à definição da ação sísmica e para a análise sísmica de estruturas, como são o caso dos programas RSSIM (Carvalho 2007) e SIMULSIS (Estêvão 2012).

Os referidos programas têm sido usados na realização de simulações de sismos ocorridos no passado com algum grau de sucesso, quando comparados com os registos desses sismos (Carvalho et al. 2008; Estêvão 2012; Estêvão e Oliveira 2012a; Estêvão e Oliveira 2012b).

O programa informático SIMULSIS foi desenvolvido, essencialmente, com vista à análise sísmica de estruturas. Na versão atual, para além da geração de acelero-

gramas simulados, contemplando o efeito do comportamento não-linear dos terrenos de fundação, também permite a realização de análises estruturais sísmicas não-lineares, desde que lhe seja fornecido um espectro de capacidade resistente, e os resultados das análises dinâmicas modais. Neste programa, as falhas são divididas num número finito ( $N_F$ ) de fontes pontuais, sendo os acelerogramas gerados a partir da sobreposição de um conjunto de  $N_\omega$  harmónicas, cujos ângulos de fase ( $\theta_{n,i}$ ) são gerados aleatoriamente entre 0 e  $2\pi$ , sendo iguais a

$$a_{g(t)} = \sum_{i=1}^{N_F} \sum_{n=1}^{N_\omega} A_{i,n}(\Delta t_i) \cos(\omega_n \Delta t_i + \theta_{n,i}) \quad (1)$$

As amplitudes das harmónicas  $A_{i,n}(\Delta t_i)$  dependem de diversos fatores, designadamente da magnitude do sismo, da queda de tensão média, do padrão de deslizamentos no plano da falha, da atenuação das ondas com a distância. Essas amplitudes também têm em consideração o desfasamento temporal das diferentes fontes pontuais, que são função das velocidades de rotura no plano da falha.

## 2.1. Sismo dos Açores de 1980

O sismo ocorrido nas ilhas dos Açores a 1 de janeiro de 1980 ( $M_W = 6.8$ ), já foi simulado com relativo sucesso no passado, quando comparado com os registos, através do SIMULSIS e considerando uma queda de tensão média  $\Delta\sigma = 30$  bar, cuja rotura está localizada na Fig. 1 (Estêvão 2012).

Neste trabalho, foi realizada a simulação do sismo de 1980 com o recurso ao SIMULSIS e com os parâmetros propostos por Estêvão e Oliveira (2012b), mas em nove locais di-

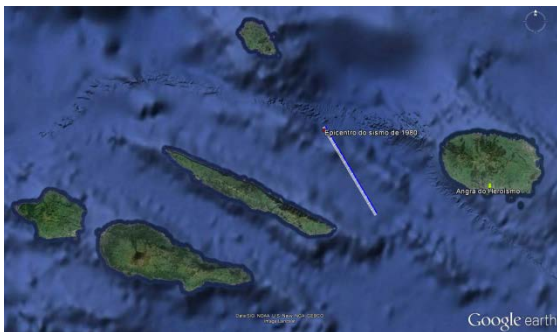


Fig. 1 – Localização da rotura adotada para o sismo dos Açores de 1980.

ferentes de Angra do Heroísmo, cujas características geológicas foram alvo de um estudo anterior (Teves-Costa e Veludo 2013), e com dois valores de queda de tensão média ( $\Delta\sigma = 30$  e  $\Delta\sigma = 100$  bar). Os perfis de velocidades das ondas S ( $v_s$ ) dos locais de estudo estão apresentados na Fig. 2.

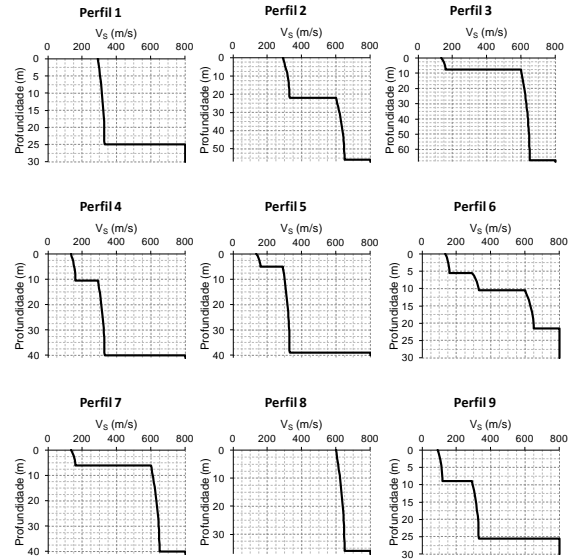


Fig. 2 – Perfis de velocidades dos locais de estudo adotados para as simulações.

Com base nas velocidades médias dos 30 m superficiais ( $v_{s,30}$ ), os perfis 2, 6, 7 e 8 podem ser classificados de acordo com o EC8 (NP-EN1998 2010) como sendo terrenos de tipo B, e os restantes de tipo C.

Nas Figs. 3 e 4 estão apresentados os espectros de resposta médios (com coeficiente de amortecimento  $\xi = 5\%$ ) de 100 simulações realizadas para cada local com  $\Delta\sigma = 30$  bar e  $\Delta\sigma = 100$  bar, assim como para um afloramento rochoso de referência (tipo A de acordo com o EC8).

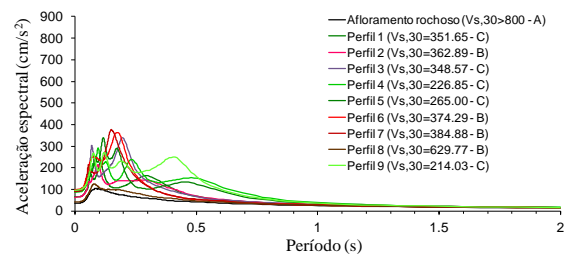
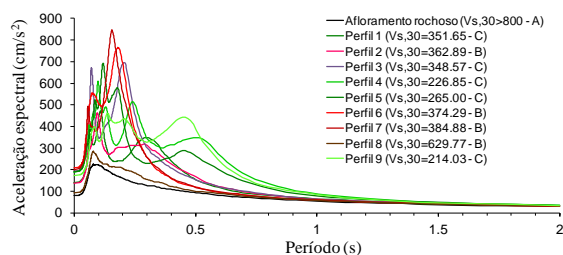


Fig. 3 – Espectros de resposta médios obtidos para o sismo de 1980 com  $\Delta\sigma = 30$  bar.



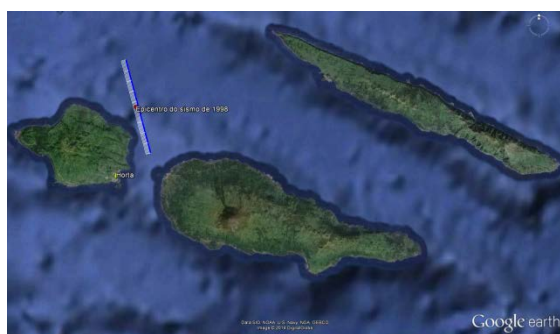
**Fig. 4** – Espectros de resposta médios obtidos para o sismo de 1980 com  $\Delta\sigma = 100$  bar.

## 2.2. Sismo dos Açores de 1998

No passado, já foram realizados estudos referentes à simulação estocástica do sismo ocorrido nos Açores a 9 de julho de 1998 ( $M_W = 6.2$ ), e que provocou elevada destruição na ilha do Faial (Zonno et al. 2010). Esse estudo foi realizado com o programa EXSIM (Motazedian e Atkinson 2005), com  $\Delta\sigma = 200$  bar, e não teve em conta os efeitos da geologia superficial. Nas conclusões, esse trabalho recomendava que fosse realizado um novo estudo que contemplasse esses efeitos locais.

Assim, neste estudo foram adotados as mesmas características da fonte adotadas por Zonno et al. (2010) para a localização da rotura EP2 (Fig. 5), mas considerando os efeitos geológicos locais e os parâmetros de atenuação adotados por Estêvão e Oliveira (2012b) para a cidade da Horta, de modo a facilitar a comparação dos efeitos da fonte.

As simulações foram realizadas para o local do Observatório Príncipe do Mónaco, na cidade da Horta, com base no programa SIMULSIS. Foram usados os perfis de velocidades das ondas S das camadas de solo superficial da Fig. 2, para possibilitar a comparação do efeito dos dois sismos nos

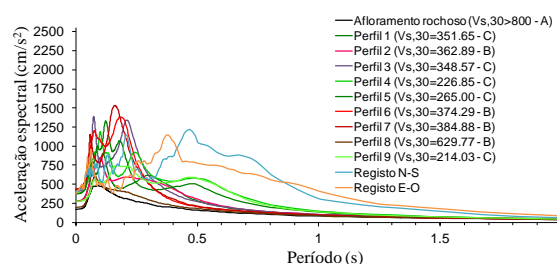


**Fig. 5** – Localização da rotura adotada para a simulação do sismo dos Açores de 1998.

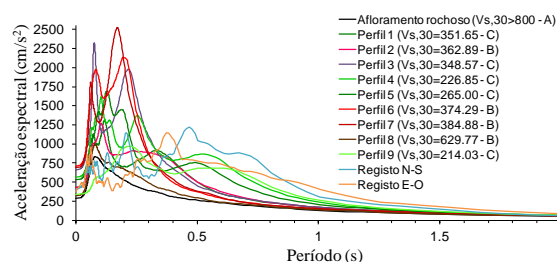
mesmos tipos de terrenos de fundação. Também foram realizadas simulações para um afloramento rochoso de referência (tipo A).

Os resultados médios de 100 simulações estão apresentados nas Fig. 6 e 7 (com  $\xi = 5\%$ ), para dois valores de queda de tensão média ( $\Delta\sigma = 200$  bar e  $\Delta\sigma = 100$  bar).

Nas Fig. 6 e 7 também estão apresentados os espectros de resposta correspondente ao registo analógico obtido no Observatório Príncipe do Mónaco (Oliveira 2008).



**Fig. 6** – Espectros de resposta médios obtidos para o sismo de 1998 com  $\Delta\sigma = 100$  bar.



**Fig. 7** – Espectros de resposta médios obtidos para o sismo de 1998 com  $\Delta\sigma = 200$  bar.

## 3. RESPOSTA ESTRUTURAL

Foi realizada uma análise sísmica não-linear de uma estrutura de betão armado que sobreviveu ao sismo dos Açores de 1980. A estrutura considerada corresponde aos "Semáforos do Monte Brasil" (Fig. 8), localizados em Angra do Heroísmo, e foi alvo de um estudo detalhado no passado (Oliveira et al. 1992). A curva de capacidade (Fig. 9), que relaciona os deslocamentos (m) e as forças (kN), foi obtida por intermédio do programa SeismoStruct (Seismosoft 2013).

A determinação da resposta sísmica não-linear foi realizada com base no método proposto no ATC-40 (ATC 1996). Essa análise foi realizada de uma forma automática com

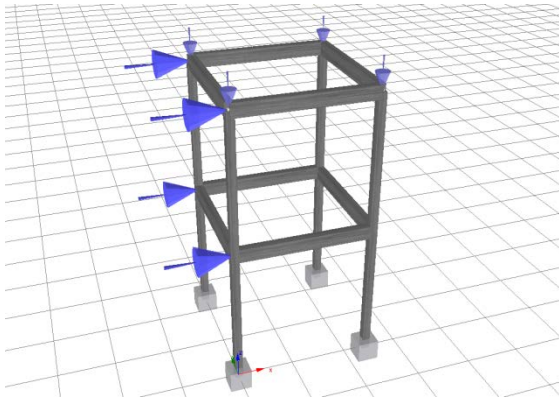


Fig. 8 – Modelo estrutural adotado na análise da estrutura dos "Semáforos do Monte Brasil".

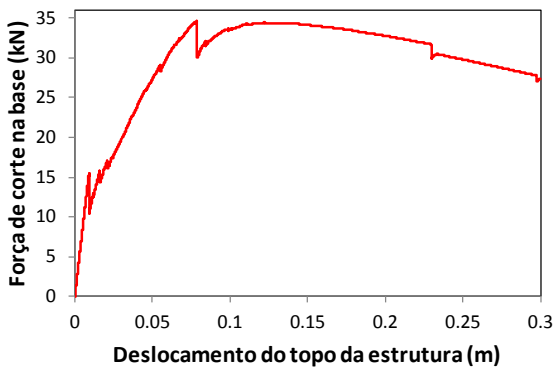


Fig. 9 – Curva de capacidade obtida para a estrutura dos "Semáforos do Monte Brasil".

recurso a um conjunto de rotinas informáticas desenvolvidas para o efeito (Estêvão 2012).

Os gráficos dos espectros de capacidade e dos espectros de resposta inelástica, no formato deslocamento espectral ( $S_d$ ) versus aceleração espectral ( $S_a$ ), obtidos com as situações menos e mais gravosas, estão apresentados nas Figs. 10 a 17.

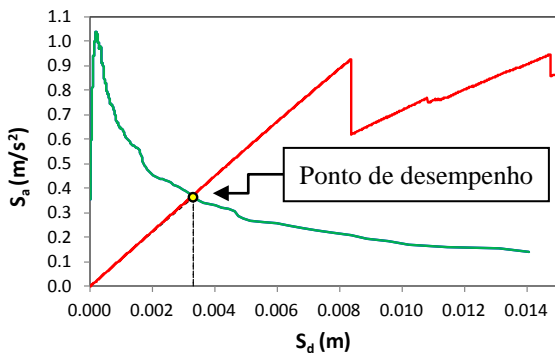


Fig. 10 – Situação menos gravosa para o sismo de 1980 e com  $\Delta\sigma = 30$  bar (rocha).

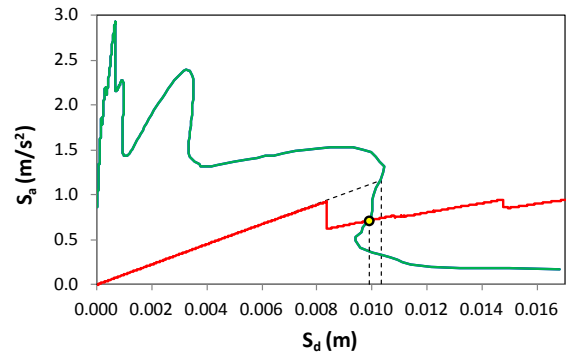


Fig. 11 – Situação mais gravosa para o sismo de 1980 e com  $\Delta\sigma = 30$  bar (perfil 4).

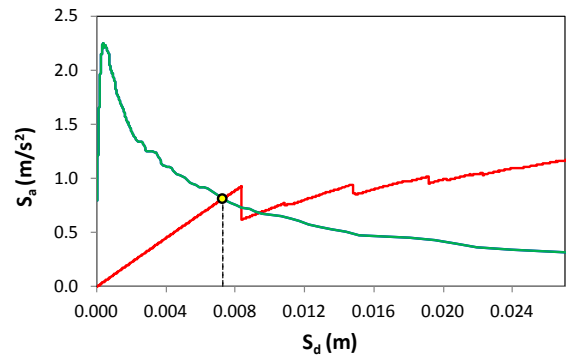


Fig. 12 – Situação menos gravosa para o sismo de 1980 e com  $\Delta\sigma = 100$  bar (rocha).

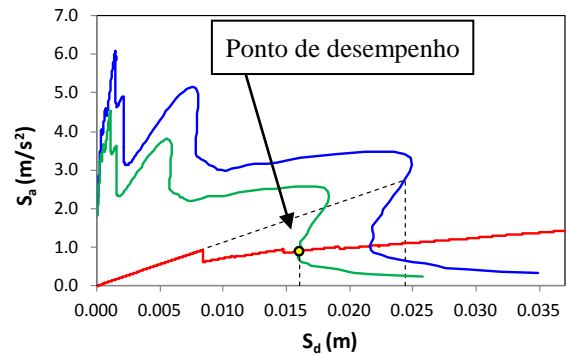


Fig. 13 – Situação mais gravosa para o sismo de 1980 e com  $\Delta\sigma = 100$  bar (perfil 4).

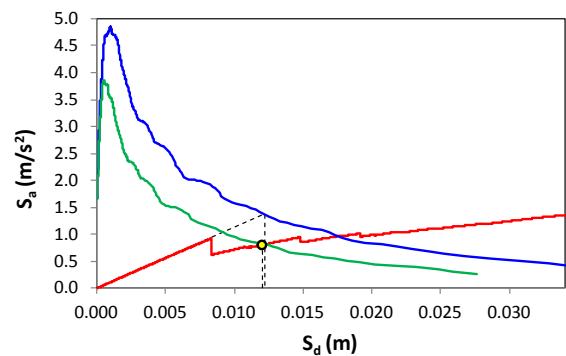


Fig. 14 – Situação menos gravosa para o sismo de 1998 e com  $\Delta\sigma = 100$  bar (rocha).

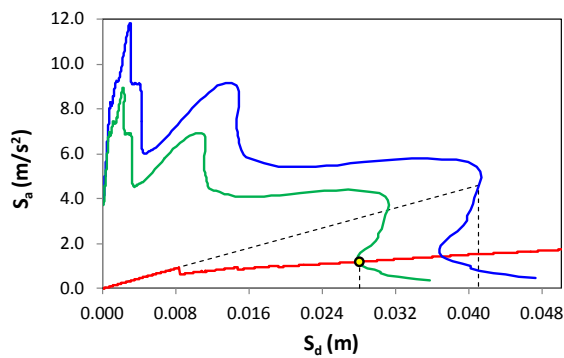


Fig. 15 – Situação mais gravosa para o sismo de 1998 e com  $\Delta\sigma = 100$  bar (perfil 4).

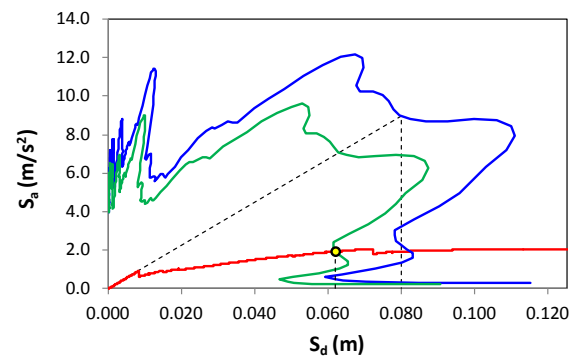


Fig. 18 – Situação para o registro N-S do sismo de 1998 obtido na cidade da Horta.

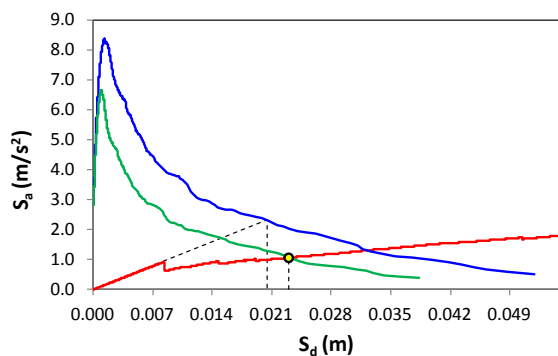


Fig. 16 – Situação menos gravosa para o sismo de 1998 e com  $\Delta\sigma = 200$  bar (rocha).

Na Fig. 18 também está apresentado o ponto de desempenho para o registro N-S (o mais gravoso) obtido na cidade da Horta. O ponto de desempenho da estrutura corresponde à interceção do espectro de capacidade com o espectro de resposta inelástica.

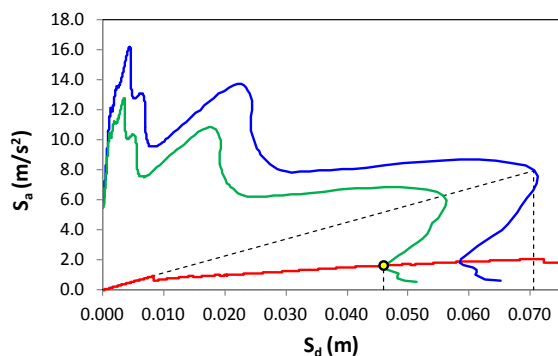


Fig. 17 – Situação mais gravosa para o sismo de 1998 e com  $\Delta\sigma = 200$  bar (perfil 4).

O nível de danos na estrutura depende do valor do deslocamento associado ao ponto de desempenho.

#### 4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Das simulações realizadas para os sismos dos Açores de 1980 e de 1998, é possível constatar o efeito das características dos terrenos de fundação no agravamento da ação sísmica (Figs. 3, 4, 6 e 7). As características dos perfis estratigráficos parecem influenciar a forma do espectro de resposta, o valor de aceleração de pico e o máximo valor espectral.

Usando as simulações do sismo dos Açores de 1980 com  $\Delta\sigma = 30$  bar como referência, foi possível observar que, em relação à aceleração de pico obtida no afloramento rochoso, o fator de amplificação dos solos ficou compreendido entre 1.17 (no perfil 8, que corresponde ao terreno com solos mais rígidos) e 2.73 (no perfil 6). Também foi possível constatar que o aumento da queda de tensão média de 30 para 100 bar, originou um aumento da aceleração de pico com um fator compreendido entre 2.23 (no afloramento rochoso de referência) e 1.80 (no perfil 9, que corresponde ao terreno com solos mais brandos). Esse aumento de  $\Delta\sigma$  também alterou o valor obtido para o fator de amplificação dos solos, que reduziu ligeiramente, tendo ficado entre 1.15 (no perfil 8) e 2.61 (no perfil 6).

Em relação às simulações realizadas para o sismo dos Açores de 1998, foi possível verificar que os valores obtidos para a aceleração de pico (entre  $168 \text{ cm/s}^2$  e  $436 \text{ cm/s}^2$ , para  $\Delta\sigma = 100$  bar, e entre  $288 \text{ cm/s}^2$  e  $707 \text{ cm/s}^2$ , para  $\Delta\sigma = 200$  bar) estão

enquadrados no valor do registo do sismo ( $399 \text{ cm/s}^2$ ) da cidade da Horta. Contudo, os valores obtidos das simulações com  $\Delta\sigma = 100 \text{ bar}$  estão mais próximos dos valores registados. Os valores obtidos das simulações do sismo de 1998, no afloramento rochoso de referência, foram 4.72 e 8.08 vezes superiores aos obtidos para o sismo de 1980 (com  $\Delta\sigma = 30 \text{ bar}$ ), respetivamente para  $\Delta\sigma$  igual a 100 e 200 bar. Este aumento da aceleração de pico também se traduziu numa redução da amplificação dinâmica dos efeitos dos solos, que ficou compreendida entre 1.15 (no perfil 8) e 2.59 (no perfil 6) para  $\Delta\sigma$  igual a 100 bar, e entre 1.12 (no perfil 8) e 2.45 (no perfil 6) para  $\Delta\sigma$  igual a 200 bar.

Estes resultados parecem indicar que, para o sismo de 1998, o nível de amplificação dos solos não é muito influenciado pelo aumento da aceleração de pico, com exceção dos solos mais brandos, que apresentam uma maior redução dessa amplificação, sendo de salientar o caso do perfil 9 com um valor máximo de amplificação igual a 2.70 (sismo de 1980 e com  $\Delta\sigma = 30 \text{ bar}$ ) e um valor mínimo igual a 1.18 (sismo de 1998 e com  $\Delta\sigma = 200 \text{ bar}$ ), em virtude da resposta não-linear desses solos. Contudo, a nível espectral essa redução da amplificação não é tão evidente. Este facto pode ser comprovado pelo nível de amplificação observado nos registos obtidos no sismo do Japão de 2011, para níveis de aceleração de pico muito superiores aos obtidos nas simulações realizadas para os Açores (Estêvão 2012).

Relativamente aos resultados obtidos, é importante ressaltar que existe uma grande incerteza nas características de variação de amortecimento e rigidez com o nível de distorção, dos solos típicos dos Açores.

Em face dos resultados da resposta sísmica não-linear da estrutura analisada, é possível concluir que os danos nesta construção dependem, essencialmente, do nível de aceleração espectral na gama de períodos na proximidade do período fundamental da estrutura (assumindo que o primeiro modo de vibração é o que apresenta maior fator de participação), e

não da aceleração de pico. Dado que a estrutura estudada era muito flexível, portanto com um período fundamental relativamente alto, foram os terrenos mais brandos que mais afetaram este edifício.

Das simulações realizadas, é possível concluir que, tanto as características da fonte sísmica como as condições geológicas locais, têm uma grande influência no nível de danos observado nas estruturas, pelo que é essencial que a definição da ação sísmica de projeto reflita este comportamento estrutural.

## 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

- ATC 1996. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Volume 1, ATC-40 report, Applied Technology Council, Redwood City, Califórnia, 341 p.
- Carvalho, A. 2007. Modelação estocástica da ação sísmica em Portugal continental, 304 p., Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, UTL.
- Carvalho, A., Zonno, G., Franceschina, G., Serra, J.B., Costa, A.C. 2008. Earthquake shaking scenarios for the metropolitan area of Lisbon, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28(5), p. 347-364.
- Erdik, M., Durukal, E. 2006. Strong ground motions, Em: Ansal A (ed) Recent advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation, Springer, Dorrecht, p 67-100.
- Estêvão, J.M.C. 2012. Efeitos da ação sísmica no comportamento de edifícios de betão armado com alvenarias de enchimento, 452 p., Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, UTL.

- Estêvão, J.M.C., Oliveira, C.S. 2012a. Ground motion simulation for dynamic structural analysis: pros and cons, SPES, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, p 1-10, paper 1527.
- Estêvão, J.M.C., Oliveira, C.S. 2012b. Point and fault rupture stochastic methods for generating simulated accelerograms considering soil effects for structural analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43(0), p. 329-341.
- Masi, A., Chiauzzi, L., Braga, F., Mucciarelli, M., Vona, M., Ditommaso, R. 2011. Peak and integral seismic parameters of L'Aquila 2009 ground motions: observed versus code provision values, *Bull Earthquake Eng*, 9(1), p. 139-156.
- Motazedian, D., Atkinson, G.M. 2005. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3), p. 995-1010.
- NP EN1998-1 : NORMA PORTUGUESA 2010. 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, 230 p.
- Oliveira, C.S. 1992. Algumas considerações sobre o comportamento das edificações com elementos em betão armado, Em: Oliveira CS, Lucas ARA, Guedes JHC (eds) 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980, volume 2, Governo Regional dos Açores / LNEC, Lisboa, p 461-480.
- Oliveira, C.S. 2008. Os registos do movimento sísmico obtidos na rede acelerográfica dos Açores. Comparação com outros indicadores do movimento sísmico, Em: Oliveira CS, Costa A, Nunes JC (eds) Sismo 1998 - Açores. Uma década depois, Governo dos Açores/SPRHI, S.A, Horta, p 119-136.
- Oliveira, C.S., Corrêa, M.R., Martins, A. 1992. Comportamento dinâmico de algumas estruturas de betão armado durante o sismo, Em: Oliveira CS, Lucas ARA, Guedes JHC (eds) 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980, volume 2, Governo Regional dos Açores / LNEC, Lisboa, p 481-518.
- Rossetto, T., Peiris, N., Alarcon, J.E., So, E., Sargeant, S., Free, M., Sword-Daniels, V., Del Re, D., Libberton, C., Verrucci, E., Sammonds, P., Faure Walker, J. 2011. Field observations from the Aquila, Italy earthquake of April 6, 2009, *Bull Earthquake Eng*, 9(1), p. 11-37.
- Seismosoft 2013. SeismoStruct v6.5 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, available from <http://www.seismosoft.com>.
- Teves-Costa, P., Veludo, I. 2013. Soil characterization for seismic damage scenarios purposes: application to Angra do Heroísmo (Azores), *Bull Earthquake Eng*, 11(2), p. 401-421.
- Zonno, G., Oliveira, C.S., Ferreira, M.A., Musacchio, G., Meroni, F., Mota-de-Sá, F., Neves, F. 2010. Assessing Seismic Damage Through Stochastic Simulation of Ground Shaking: The Case of the 1998 Faial Earthquake (Azores Islands), *Surv Geophys*, 31(3), p. 361-381.