

# SHAKEMAP: COMBINAÇÃO DE OBSERVAÇÕES INSTRUMENTAIS E MACROSSÍSMICAS

## SHAKEMAP: COMBINING INSTRUMENTAL AND MACROSEISMIC OBSERVATIONS

C. Marreiros<sup>(1)</sup>, S. Carvalho<sup>(2)</sup>, P.M. Alves<sup>(1)</sup>, S. Custódio<sup>(2,3)</sup>, F. Carrilho<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Rua C ao Aeroporto, 1749-077 Lisboa  
celia.marreiros@meteo.pt

<sup>(2)</sup> Centro de Geofísica da Universidade de Coimbra, Observatório Astronómico da Universidade de Coimbra, Almas de Freire, 3040 - 004 Coimbra

<sup>(3)</sup> Instituto Dom Luis, Campo Grande, Edifício C8, 1749-016 Lisboa

### SUMMARY

Since 2008, the Portuguese seismological service, has implemented the ShakeMap software package provided by U.S. Geological Survey (USGS), in order to obtain reliable maps of peak ground motion parameters and seismic intensities for mainland Portugal. These maps identify the area affected by the earthquake and estimate the severity of ground shaking, thus providing important information for emergency response planning and for the general public. The maps are produced based on regional constraints from instrumental ground motions and site amplifications. In late 2009, USGS released a new version (V3.5) of ShakeMap software with added features. The new approach introduces several changes in the existing ShakeMap methodology, allowing the combination of direct observations (observed peak ground motion and seismic intensities), observations converted parameters and estimates. Some results are presented and discussed in this work.

### 1. Introdução

A implementação do *ShakeMap* na rede sísmica portuguesa tem como objetivo principal a obtenção de uma estimativa rápida de efeitos macrossísmicos em território nacional.

O *ShakeMap* é um sistema informático desenvolvido por Wald *et al.* (1999) para gerar automaticamente mapas de distribuição do movimento do solo e de intensidade sísmica após a ocorrência de um sismo.

O procedimento automático permite a geração de mapas em tempo quase real (poucos minutos após o sismo) com dados de *input* validados, permitindo caracterizar rapidamente o impacto de um sismo numa determinada região. O *ShakeMap* gera um conjunto de ficheiros de dados e mapas que fornecem informação sobre vários aspetos associados ao movimento do solo, tais como mapas de distribuição espacial de intensidade sísmica (intensidade instrumental), mapas de distribuição de aceleração de pico (PGA - *Peak ground acceleration*) e velocidade de pico (PGV - *Peak ground velocity*). Mapas de aceleração espectral (PSA - *Pseudo spectral acceleration*) podem ser também gerados, assim como uma série de outros produtos para utilizadores específicos.

Embora inicialmente concebido para a Califórnia, o sistema tem também sido implementado com sucesso em diversas outras regiões do globo, nomeadamente na Europa (Itália, Suíça, Islândia,

etc.). Atualmente, está implementado na rede sísmica portuguesa, gerando *ShakeMaps* em tempo quase real, para a região de Portugal continental, após a ocorrência de sismos relevantes. Além disso, a versão mais recente do sistema *ShakeMap* (V3.5) encontra-se em testes.

Na última versão, é aplicada uma aproximação desenvolvida por Worden *et al.*, (2010), onde a intensidade macrossísmica é tratada como qualquer outro parâmetro do movimento do solo.

De uma forma geral, a aplicação do *ShakeMap* a sismos que ocorreram recentemente na região de Portugal continental, tem permitido obter resultados concordantes com as observações macrossísmicas.

### 2. Metodologia e Calibração do Sistema

Um elemento básico da metodologia *ShakeMap* é a combinação de vários tipos de dados e estimativas. A introdução de observações de intensidade e a sua utilização para constrianger os mapas de distribuição de movimento do solo, levou ao aperfeiçoamento dos algoritmos de interpolação integrados no *ShakeMap*. Estes algoritmos permitem uma combinação natural de dados instrumentais e intensidades observadas com estimativas de movimento de pico, com um peso proporcional ao inverso das suas incertezas (Worden *et al.*, 2010).

O sistema *ShakeMap* é uma coleção de programas informáticos, grande parte deles escritos em linguagem de programação PERL, que são

executados sequencialmente, de modo a produzir mapas representativos do movimento do solo (imagens em formato *PostScript* e JPEG), assim como, páginas para a Web (Wald, 2005).

O *ShakeMap* implementado na rede sísmica portuguesa foi calibrado com elementos específicos para a região de Portugal continental e interage com a base de dados instrumental do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).

Na fig. 1 está representado o diagrama simplificado do processo utilizado para gerar mapas pelo *ShakeMap* (V3.5) no IPMA. Em termos práticos verifica-se que os mapas referidos são obtidos entre 5 a 7 minutos após registo do sismo na rede sísmica.

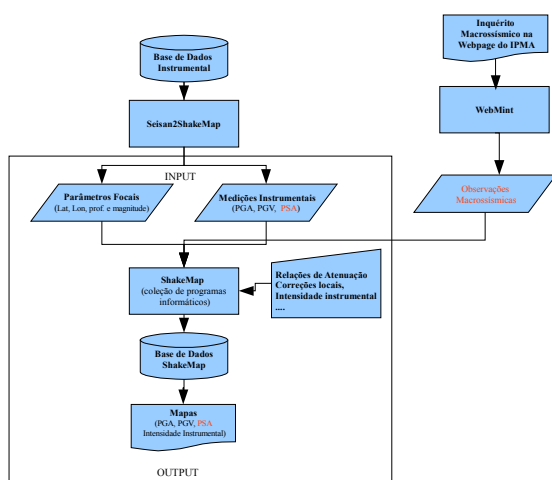


Fig. 1 – Fluxograma simplificado do *ShakeMap* (V3.5) no IPMA.

Para fazer a interface entre o *ShakeMap* e o sistema de análise e processamento sísmico *SEISAN* foi desenvolvida uma aplicação (*Seisan2ShakeMap*). Foram introduzidas novas funcionalidades que implicaram modificações a nível do código PERL do próprio *ShakeMap*, tais como, definição automática da área para a qual vão ser gerados os mapas, implementação de relações locais de atenuação e de relações de conversão de PGA/PGV em intensidade, novas opções para aplicação de correções (*bias*), etc. No que diz respeito a elementos específicos para Portugal continental, que foram integrados no sistema, com o propósito de se obter resultados realistas, podem destacar-se: 1) dados provenientes da rede sísmica; 2) observações macrossísmicas; 3) estimativas de parâmetros do movimento do solo e de intensidade; 4) condições locais.

### 2.1. Dados da rede sísmica

Os dados provenientes da rede sísmica que permitem constrear os mapas gerados para cada sismo, são: a) parâmetros focais (localização e magnitude); b) medições instrumentais realizadas em cada estação. De uma forma geral são utilizadas medições de PGA e PGV, mas podem também ser utilizadas medições de PSA (correspondentes aos períodos 0.3 s, 1.0 s e 3.0 s). Os dados observados instrumentalmente

constrengem os resultados finais, obtendo-se mapas mais realistas

Na fig. 2 estão representadas as estações da rede sísmica nacional que fornecem dados para o *ShakeMap* e um exemplo de registos de um sismo efetuados em 3 dessas estações.

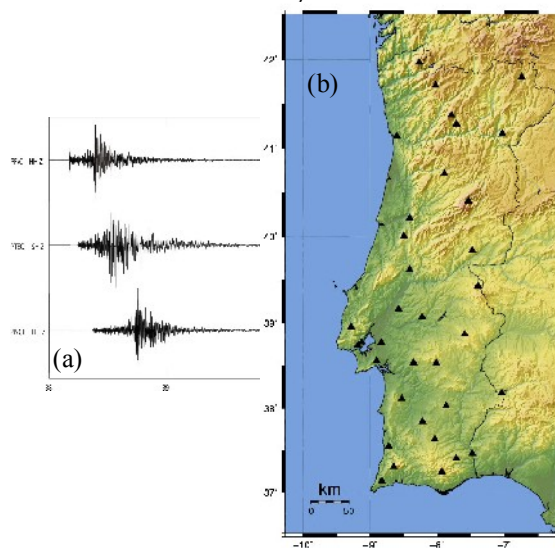


Fig. 2 – (a) Registos de um sismo efetuados em estações sísmicas da rede nacional; (b) Estações da rede sísmica nacional instaladas em Portugal continental (triângulos a preto).

### 2.2. Observações macrossísmicas

As observações macrossísmicas utilizadas para constrear alguns dos mapas apresentados neste trabalho, são provenientes de respostas ao inquérito que se encontra na página *web* do IPMA e que é dirigido a qualquer observador direto de um sismo. As respostas ao inquérito são entregues no centro operacional do IPMA via *e-mail*, onde são avaliadas de forma automática pela aplicação *Webmint* (WEB Macroseismic INTensity) que foi desenvolvida no IPMA para esse efeito (Alves *et al.*, 2012). Os resultados desse processo são apresentados sob a forma de intensidade sísmica por DCF (Distrito, Concelho, Freguesia). Na fig. 3 são apresentados os resultados obtidos no caso do sismo (ML=3.1) que ocorreu a 5 km E de Valongo, em 2013-02-13. Foram recebidas 174 respostas nas 24 horas após a ocorrência do sismo.

### 2.3. Estimativas de parâmetros do movimento do solo e de intensidade

No que diz respeito à lei de atenuação (GMPE) em termos de PGA, foi usada uma expressão que relaciona a aceleração do movimento do solo,  $a$  ( $\text{cm/s}^2$ ), com a distância epicentral,  $R$  (km) e magnitude,  $M$ , proposta por Miranda (*comunicação pessoal*) e válida para  $\text{Imm} < V$ . No gráfico da fig. 4 estão representadas as relações de atenuação com a distância, em termos de PGA (% g) aplicadas a 6 sismos recentes que ocorreram na região de Portugal continental, com magnitudes (*Richter*): ML=3.9; ML=4.0; ML=4.1; ML=4.8; ML=6.0. Estão também representados os valores medidos instrumentalmente

para cada caso.

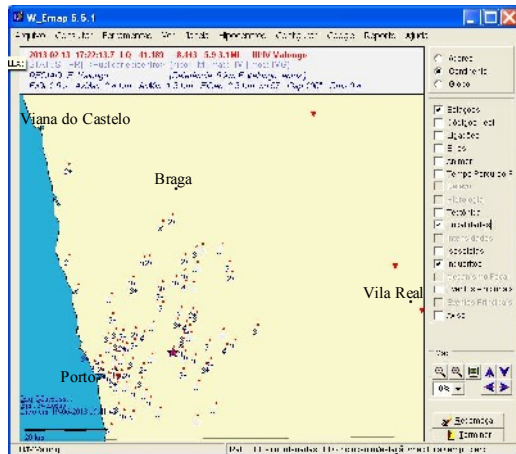


Fig. 3 – Resultados da avaliação macro sísmica automática efetuada pelo *Webmint* representados no *W-Emap* (programa informático utilizado no IPMA). Sismo a 5 km E de Valongo, em 2013-02-13, ML=3.1.

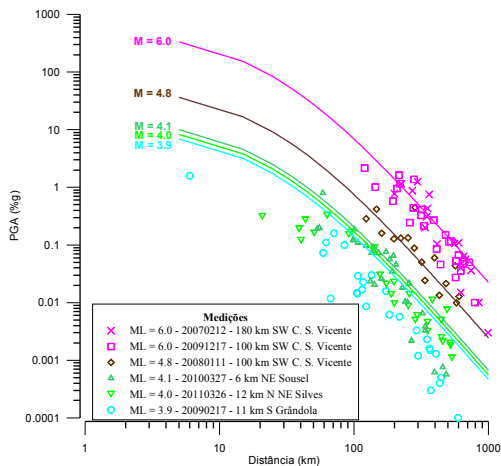


Fig. 4 – GMPE expressas em PGA, obtidas a partir da expressão proposta por Miranda (*comunicação pessoal*). Os símbolos representam os valores de PGA (%g) observados para cada um dos sismos indicados na legenda no canto inferior esquerdo do gráfico.

Observa-se, no gráfico, uma boa concordância entre os valores teóricos e os valores observados para os dois sismos de magnitude mais elevada (4.8ML [2008-01-11] e 6.0ML [2007-02-12]). No caso dos sismos de magnitude mais baixa (3.9ML, por exemplo) a tendência de decaimento da curva teórica é concordante com a distribuição dos dados observados existindo, no entanto, um problema de escala.

Relativamente à atenuação em termos de PGV, foi integrada no sistema uma expressão, que relaciona a velocidade do movimento do solo,  $v$  (cm/s), com a distância epicentral,  $R$  (km) e magnitude,  $M$ , proposta por Miranda (*comunicação pessoal*) e válida para  $Imm > VII$ . Esta expressão está representada no gráfico da fig. 5, aplicada a um sismo com magnitude  $ML=6.0$ . No mesmo gráfico, está representada outra expressão, que resulta da conjugação de expressões propostas para obtenção

de: 1) PGV [por Newmark & Hall (1982)]; 2) PSA [por A. Carvalho (2007)]. São também apresentados os valores medidos instrumentalmente para 2 sismos que ocorreram na região de Portugal continental, com magnitude  $ML=6.0$  (2007-02-12 e 2009-12-17).

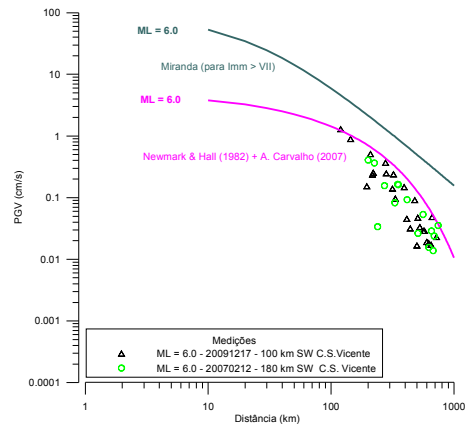


Fig. 5 – GMPE expressas em PGV, obtidas a partir de expressões propostas por: 1) Miranda (*comunicação pessoal*) para  $Imm > VII$ ; 2) Newmark & Hall (1982) e A. Carvalho (2007). Os símbolos representam os valores de PGV (cm/s) observados para cada um dos sismos indicados na legenda no canto inferior esquerdo do gráfico.

Note-se que a intensidade máxima associada a cada um destes sismos é inferior a VII, pelo que a comparação da primeira expressão com os dados instrumentais não é adequada. Observa-se uma boa aproximação entre os valores instrumentais e a segunda proposta de GMPE.

Para gerar os mapas de intensidade instrumental são aplicadas relações de conversão de PGA/PGV em intensidade (GMICE). Na prática as estimativas de intensidade são efetuadas com base em PGA [adaptação da expressão proposta por Atkinson & Kaka, (2007)] e quando o valor de intensidade superior a VII é usado o valor de intensidade obtido a partir de PGV [expressão proposta por Wald *et al*, (1999)].

#### 2.4. Condições locais

Nos locais onde não estão disponíveis medições instrumentais, os parâmetros do movimento do solo são estimados a partir de: 1) GMPE empíricas; 2) fatores de amplificação dependentes da geologia, para diferentes tipos de solo.

Por isso, é fundamental integrar no *ShakeMap* descrições realistas das amplificações que as características geológicas induzem (condições locais) no movimento do solo para que os resultados finais sejam fiáveis. A publicação, recente, da Carta Geológica de Portugal (LNEG), na escala 1:1.000.000, permitiu a incorporação de efeitos de sítio com dados geológicos no *ShakeMap*. Para esse efeito, foram integradas no sistema uma grelha de valores de  $V_s^{30}$  (velocidade média das ondas S nos 30 metros superficiais) e relações entre amplificação e  $V_s^{30}$  determinadas por Borcherd (1994). Desta forma, foi possível obter para a região de Portugal

continental, uma grelha de fatores de amplificação dependentes da geologia. Na fig. 6 está representado o mapa de distribuição de  $V_s^{30}$  para Portugal Continental (Teves-Costa *et al.*, 2011) utilizado como base para implementação das condições locais no *ShakeMap*.

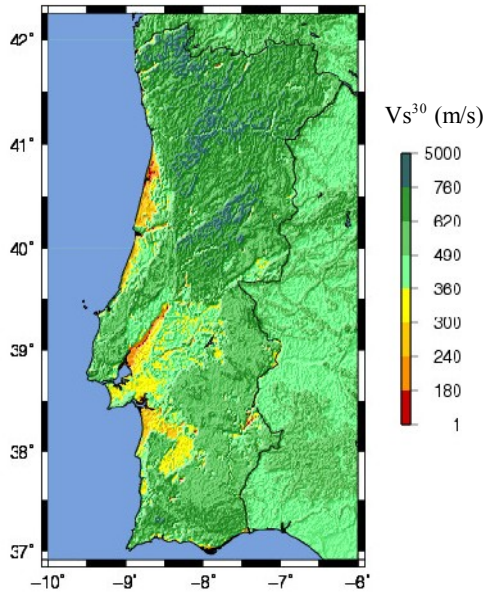


Fig. 6 – Mapa de  $V_s^{30}$  para Portugal Continental obtido a partir da Carta Geológica de Portugal (LNEG), na escala 1:1.000.000.

### 3. Exemplos de Aplicação do *ShakeMap* em Portugal Continental

A seguir são apresentados resultados da aplicação do *ShakeMap* ao sismo de 26 de Março de 2011, magnitude  $M_L=4.0$ , que ocorreu a cerca de 12 km a NNE de Silves. Na fig. 7 está representado o mapa de distribuição de intensidade instrumental estimada pelo *ShakeMap*.

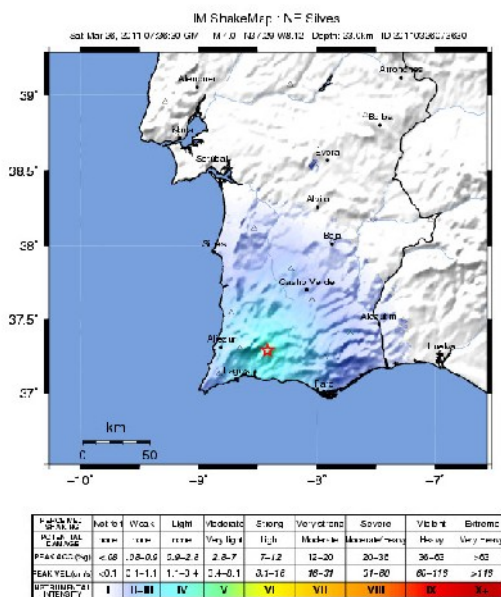


Fig. 7 – Mapa de intensidade instrumental gerado pelo *ShakeMap* para o sismo ocorrido em 26-03-2011,  $M_L=4.0$  (NNE Silves). A figura realça a zona de maior impacto do sismo

(próximo de Silves e Monchique) e ainda a variação do nível de percepção do sismo. De acordo com alguns relatos, este sismo foi sentido com intensidade máxima IV ( $I_{mm}$ ) em Monchique, Silves, Albufeira e Lagoa e com menor intensidade noutros locais do Algarve e do Alentejo.

A extensão do campo macrossísmico está de acordo com as observações macrossísmicas (fig. 8). Além disso, verifica-se que as estimativas do *ShakeMap* são concordantes com as observações, em particular, na zona de maior impacto do sismo. Na fig. 9 é apresentado um histograma com a distribuição de resíduos (diferença entre intensidade macrossísmica e intensidade estimada do *ShakeMap*). No caso deste sismo, de 71 resíduos, 46 têm menos que um grau de diferença.

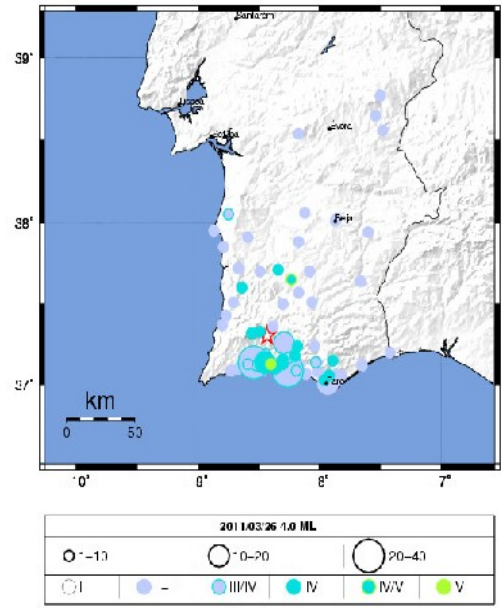


Fig. 8 – Mapa de distribuição de observações macrossísmicas para o sismo ocorrido em 26-03-2011,  $M_L=4.0$  (NNE Silves). O tamanho dos círculos (1ª linha) indica o número de respostas. A cor dos símbolos (2ª linha) indica o grau de intensidade sísmica.

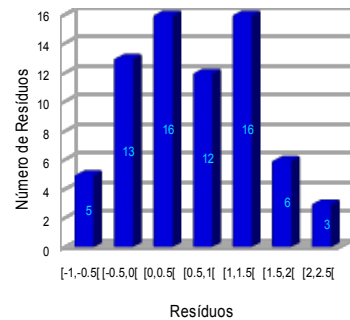
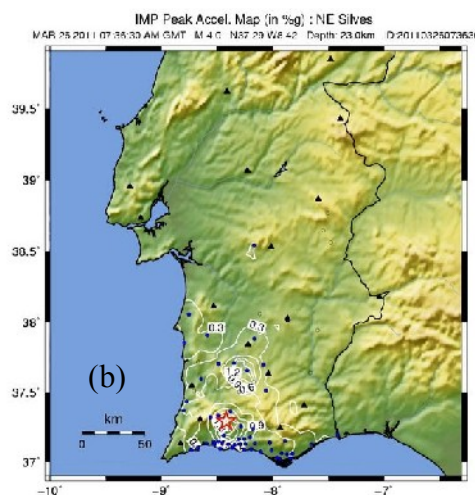
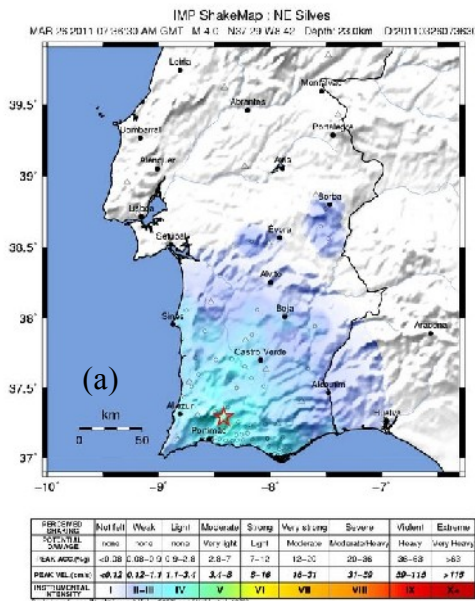


Fig. 9 – Distribuição de resíduos (observ. macross. – int. do *ShakeMap*).

Na fig. 10 são apresentados para o mesmo sismo os mapas obtidos utilizando a nova metodologia do *ShakeMap*, que combina observações de movimento do solo e observações macrossísmicas, com estimativas de movimento do solo. Na figura (a) está representado o mapa de distribuição de

intensidade instrumental. Na figura (b) os contornos representam a distribuição de PGA (%g) sobre o mapa topográfico da região.



que esta se irá deformar com maior amplitude, isto é, quando a energia sísmica absorvida é maior.

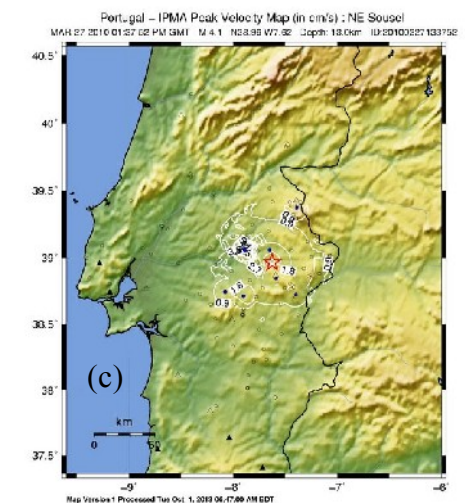
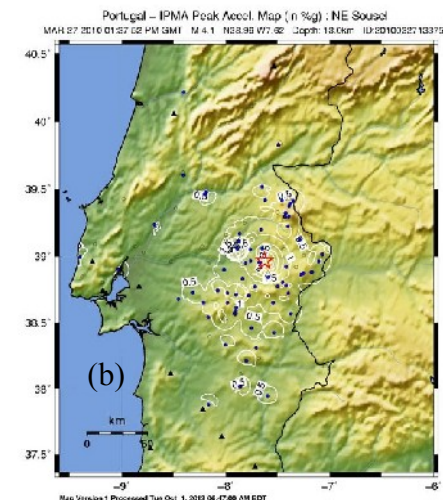
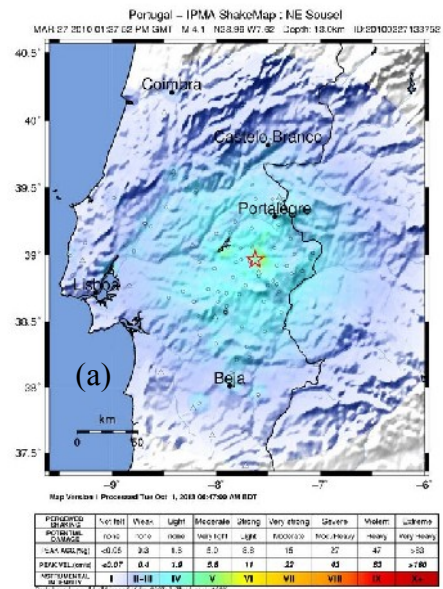


Fig. 10 - Mapas gerados utilizando a nova metodologia do *ShakeMap*, para o sismo ocorrido em 26-03-2011, ML= 4.0 (NNE Sousel): (a) Intensidade instrumental; (b) PGA. Os triângulos representam a localização das estações sísmicas e os pequenos círculos a localização das observações macro sísmicas.

Na fig. 11 é apresentado um conjunto de mapas gerado pelo *ShakeMap* (V3.5), para o sismo de 27 de Março de 2010, magnitude ML=4.1, que ocorreu a cerca de 6 km a NE de Sousel: (a) intensidade instrumental, (b) PGA, (c) PGV, (d) PSA (0.3 s), (e) PSA (1.0 s) e (f) PSA (3.0 s). Os mapas de PSA auxiliam engenheiros a determinar como as construções, por exemplo edifícios, reagem a movimentos causados por um sismo. As construções são modeladas como osciladores harmónicos com baixo amortecimento, habitualmente %5 ou 2%, que se movem num meio físico seguindo o modelo do pêndulo invertido. A resposta de uma construção é calculada na gama de frequências de oscilação em

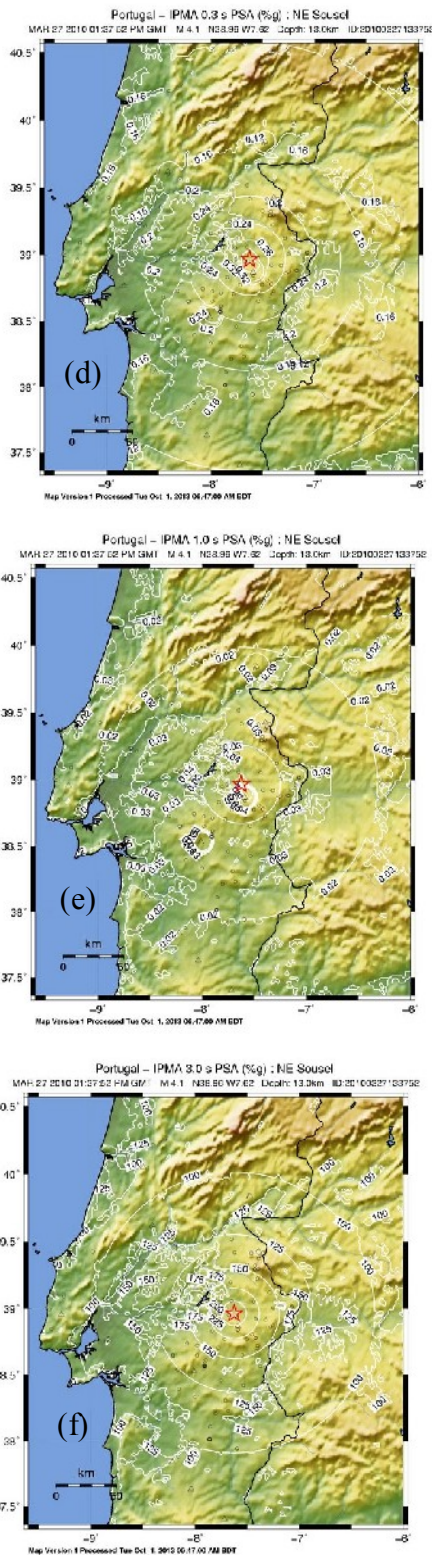


Fig.11 - Mapas gerados pelo *ShakeMap* para o sismo que ocorreu em 27-03-2010, ML=4.1 (NE Sousel): (a) intensidade instrumental; (b) PGA; (c) PGV; (d) PSA (0.3 s); (e) PSA (1.0 s); (f) PSA (3.0 s).

Dentro dessa gama de frequências, o *Uniform Building Code (UBC)* definiu como períodos de referência 0.3, 1.0 e 3.0 segundos. Como tal, os *ShakeMaps* de aceleração espectral são calculados

para osciladores harmônicos de um grau de liberdade, com um amortecimento de 5%, nos períodos de referência.

#### 4. Considerações Finais

O *ShakeMap* permite uma identificação/visualização rápida da zona de maior impacto do sismo. No sentido de melhorar a qualidade dos *ShakeMaps* produzidos para Portugal é importante proceder ao melhoramento das leis de atenuação de PGA e de PGV. Os mapas produzidos com integração de observações macrosísmicas são mais consistentes com estas observações e revelam alguns detalhes que não são visíveis nos mapas das versões anteriores. Além disso, a integração destes dados é particularmente útil para locais onde não existem medições instrumentais.

Em termos de trabalho futuro pretende-se que os resultados desta aplicação sejam publicados na *webpage* do IPMA logo que fiquem disponíveis. Além disso, pretende-se aplicar o *ShakeMap* à região dos Açores, o que implica o desenvolvimento de elementos específicos para a região (tais como leis de atenuação, expressões que relacionem parâmetros do movimento do solo com intensidade sísmica,...)

#### REFERÊNCIAS

Alves P.M., Marreiros C. e Carrilho F. (2012). "New Developments on Automatic Macroseismic Evaluation Based on Internet Questionnaires at I.M., I.P.", The 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisboa, Portugal, pp. 10.

Atkinson, G.M., and Kaka, S. (2007). "Relationships between Felt Intensity and Instrumental ground Motion in the Central United States and California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 497-510.

Borcherdt, R.D. (1994). "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)", *Earthquake Spectra*, 10, 617-654.

Carvalho, A. (2007). "Modelação estocástica da acção sísmica em Portugal Continental.", Tese de Doutoramento em Ciências da Engenharia, Universidade Técnica de Lisboa.

Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). (2010). Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000.000.

Marreiros C. e Carrilho F. (2012). "The ShakeMap at Instituto de Meteorologia, I.P.", The 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisboa, Portugal, pp. 8.

Newmark NM, Hall WJ. 1982. "Earthquake Spectra and Design", monograph, Earthquake Engineering Research Institute (EERI): Oakland, CA .

Teves-Costa P, IM Almeida, C Marreiros e C Catita (2011). "Metodologia para a estimativa e implementação de VS30 nos *shakemaps*." 7º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Setúbal, 28-30 Março.

Wald, D.J., B.C. Worden, V. Quitoriano and K.L. Pankow (2005). "ShakeMap Manual: Technical Manual, User's Guide, and Software Guide". USGS Techniques and Methods 12-A1, 156 pp., <http://pubs.usgs.gov/tm/2005/12A01/>.

Wald, D.J., V. Quitoriano, T.H. Heaton, H. Kanamori, C.W. Scrivner, and C.B. Worden (1999). "TriNet ``ShakeMaps'': Rapid Generation of Instrumental Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California". *Earthquake Spectra*, 15, 3, 537-556.

Wessel, P. and W. Smith, W. (2004). GMT version 4, Technical Reference and Cookbook.

Worden, C.B., Wald, D.J., Allen, T.I., Lin, K., Garcia, D., and Cua, G. (2010). A Revised Ground-Motion and Intensity Interpolation Scheme for ShakeMap, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 3083-3096.