

**CONTRIBUTOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE  
UM SIMULADOR NACIONAL DE RISCO SÍSMICO**  
**CONTRIBUTIONS TO THE DEVELOPMENT OF A  
NATIONAL SIMULATOR FOR SEISMIC RISK**

**Luis Sá**

Divisão de Riscos e Ordenamento, Autoridade Nacional de Proteção Civil  
luis.sa@prociv.pt

**Patrícia Pires**

Divisão de Riscos e Ordenamento, Autoridade Nacional de Proteção Civil  
patricia.pires@prociv.pt

**Paulo Henriques**

Serviço Municipal de Proteção Civil, Câmara Municipal de Lisboa  
paulo.franco@cm-lisboa.pt

**Maria João Telhado**

Serviço Municipal de Proteção Civil, Câmara Municipal de Lisboa  
joao.telhado@cm-lisboa.pt

**Sumário:** Face à inevitabilidade da ocorrência de sismos é inestimável a existência e a manutenção de um simulador de danos resultantes de um sismo com a capacidade de visualização de um cenário, com indicação de danos potenciais, cuja tipologia possui uma incerteza difícil de determinar empiricamente. Atendendo a essa necessidade a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC) e a Câmara Municipal de Lisboa (CML) desenvolveram um simulador de Risco Sísmico cujo campo de atuação é aplicável a todo o país.

**Palavras-chave:** Modelação, risco sísmico, Portugal

**Abstract:** Faced with the inevitability of the occurrence of earthquakes is invaluable the existence and maintenance of a simulator of damage resulting from an earthquake with the ability of viewing a scenario, with an indication of potential damage, whose typology has an uncertainty difficult to establish empirically. Facing that, the National Authority for Civil Protection (ANPC) and the Lisbon City Council (CML), developed a Seismic Risk Simulator whose field of expertise is applicable to the country as a whole.

**Keywords:** Modelling, seismic risk, Portugal

## Introdução

É inestimável a existência e a manutenção de um simulador de danos resultantes de um sismo com a capacidade de visualização de um cenário, com indicação de danos potenciais, cuja tipologia possui incerteza difícil de determinar empiricamente. Até ao presente só existiam duas regiões do país abrangidas por tais ferramentas geridas pela Proteção Civil, a Área Metropolitana de Lisboa e a região do Algarve, persistindo uma lacuna no que respeita ao restante território. Assim, numa tentativa de colmatar esta realidade, a ANPC e a CML, unindo esforços e conhecimento técnico, desenvolveram um protótipo de *Simulador Aplicável ao Continente* (SIRCO). Para tal foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- I. Recolher, compatibilizar e integrar no simulador dados e metodologias nacionais e internacionais desenvolvidas durante as últimas décadas na área do risco sísmico;
- II. Modelar o simulador com os principais protótipos de cálculo nas áreas de i) Leis de Atenuação, modelo de cálculo dos efeitos do solo na propagação da onda sísmica desde a rocha-mãe até superfície e da ação sísmica à superfície; ii) distribuição espacial, por subsecção estatística, da população móvel, “*in-house*” e “*out-house*” para cada

mês e ao longo de vários períodos do dia; iii) cálculo de danos para o edificado, população e para a componente financeira e iv) breve modelação de *Tsunamis*, sob a forma de altura de onda expectável.

## Desenvolvimento de cenários

Como pré-requisitos, foram utilizadas como fonte principal de informação diversas variáveis estudadas para a realização do *Estudo do Risco Sísmico da Área Metropolitana de Lisboa e Concelhos Limitrofes* (ERSAML-CL), do *Estudo do Risco Sísmico e Tsunamis do Algarve* (ERSTA) e do *simulador de risco sísmico do concelho de Lisboa*. Outras fontes de informação que merecem destaque são as notas técnicas apenas ao software HAZUS (FEMA, 2003) e ao projeto *de investigação EU FP-6 – NERIES* (Erdik et al., 2010).

Sendo desenvolvido e programado em Visual Basic, todos os scripts utilizados no SIRCO são editáveis por um utilizador credenciado, definido consoante o seu tipo de perfil.

Salienta-se que a construção da metodologia assentou na premissa que o risco sísmico é estimado em função do perigo de ocorrência de um fenómeno e da exposição dos elementos vulneráveis a essa ocorrência.

**Lei de Atenuação** - Esta análise foi baseada em leis de atenuação geradas com dados estatísticos de diferentes locais de estudo, incluindo a Península Ibérica. Através de uma metodologia iterativa assente numa combinação dessas leis de atenuação, obtiveram-se resultados que integram uma relação satisfatória entre magnitude, epicentro e a distância a este. Note-se que este simulador permite a introdução de diferentes leis de atenuação, bem como o uso de uma distribuição de intensidades pré-definida. Nesta âmbito merece especial destaque o estudo desenvolvido por Sousa e Oliveira (1997).

As leis de atenuação aplicadas seguiram a enunciação geral:

$$I_{MMI} = C_1 + C_2M_w + C_3 \ln(R_{epi}) + C_4R_{epi} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que  $\beta$  é a distância epicentral e C1 a C4 parâmetros adimensionais que são específicos à região em causa, e Mw é a magnitude do sismo.

**Impedância** - A modificação do movimento sísmico devido às condições topográficas e geotécnicas locais é chamada de efeito de sítio (Le Pense *et al*, 2011). Esta amplificação, ou atenuação é obtida comparando a resposta de um determinado sítio com a de um local de referência, isto é, um ponto localizado na rocha plana. O contraste de impedância entre sedimentos e rocha caracteriza as propriedades de um solo (Le Pense *et al*, 2011). Assim, quanto menor o contraste de impedância, mais brandos os sedimentos são quando comparados com o substrato rochoso (Le Pense *et al*, 2011). Foi considerado o caso simples de uma camada de solo horizontal ao longo de um espaço elástico (1D). A partir da rasterização da carta geológica de Portugal 1:1.000.000 e do cruzamento da informação associada com as subsecções estatísticas do INE, via geoprocessamento em SIG, foi possível identificar a formação geológica predominante por subsecção. Seguidamente obtiveram-se para cada uma delas os valores de referência para a velocidade de propagação de onda ( $V_s$ ) e para a densidade ( $\rho_s$ ), tendo-se estabelecido como rocha-mãe os valores de densidade ( $\rho_r$ ) e velocidade ( $V_r$ ) associados às formações do tipo rocha ígnea plutónica ou intrusiva como são o caso de Monchique, Sintra, Estrela e outras formações rochosas situadas mais a Norte. A partir destes dados foi possível obter uma classificação continental para as diferentes classes de contraste de impedância ( $\beta$ ).

$$\beta = \frac{\rho_s V_s}{\rho_r V_r} \quad (\text{Equação 2})$$

**Estimação da Vulnerabilidade** - A vulnerabilidade é definida como nível de danos de um elemento, ou conjunto de elementos expostos, resultante da ocorrência de um fenómeno natural ou tecnológico (Julião *et al*, 2009). Funções de vulnerabilidade (ou curvas de fragilidade) de um elemento exposto representam a probabilidade de que a sua resposta ao sismo excede os seus vários estados limites de desempenho com base em considerações físicas, económicas e sociais. Os procedimentos genéricos usados para o desenvolvimento de funções de fragilidade podem ser agrupadas como empíricos ou analíticos. Um exem-

plo interessante é o método proposto por Giovinazzi e Lagomarsino (2004) que leva à definição de funções de probabilidade de dano com base na escala EMS-98 (Grünthal, 1998).

**Curvas de Fragilidade** - A escala EMS-98 define descrições qualitativas de "poucos", "muitos" e "a maioria" para cinco graus de danos (D1 a D5) para os níveis de intensidade que variam de V a XII, por cinco classes, A a E (TABELA I), de vulnerabilidade (Teves-Costa *et al*, 2011).

**TABELA I** – Tipologia do Edificado (A/E).  
*TABLE I* – *Building typologies (A/E)*.

Data de Construção	Processo Construtivo		
	Betão	Alvenaria	Adobe/Outros
Antes de 1920	--	B	A
1920 – 1960	C	C	A
1961 - 1985	D	C	A
1986 – 2010	E	D	A

As matrizes de probabilidade de danos produzidas para cada classe de vulnerabilidade foram relacionadas com o parque edificado através da utilização de um índice de vulnerabilidade empírico que depende do edifício e sua tipologia, e as práticas de construção tipicamente utilizadas. As informações sobre o edificado nacional foram recolhidas a partir dos resultados dos Censos 2011 à escala da subsecção estatística. Um método para associar cada edifício a uma tipologia foi feito com base na EMS-98. Os valores mínimos, médios e máximos de índices de vulnerabilidade foram definidos por tipologia (TABELA II), levando em consideração Teves-Costa *et al*. (2011).

A partir do cruzamento das últimas duas tabelas, obteve-se um valor médio de vulnerabilidade ( $V_i$ ) para cada classe. Neste ponto, aplicou-se a expressão para obter  $\mu D$  que permite o cálculo do nível de vulnerabilidade (Giovinazzi & Lagomarsino, 2004).

$$\mu D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{1+6.25V_i-13.1}{2.3} \right) \right] \quad (\text{Equação 3})$$

**TABELA II** – Índices de Vulnerabilidade para cada Classe Tipológica (A/E).  
**TABLE II** – *Vulnerability Index for each building typology (A/E).*

Classe Tipológica	Mínimo $V_i$	Média $V_i$	Máximo $V_i$
<b>A</b>	0.686	0.807	0.927
<b>B</b>	0.633	0.745	0.857
<b>C</b>	0.583	0.698	0.803
<b>D</b>	0.539	0.634	0.729
<b>E</b>	0.462	0.544	0.626

Seguidamente a função dano é estimada, usando uma distribuição beta (Giovinazzi & Lagomarsino, 2004) de execução compatível com o software tipo Excel ou MiniTab. As curvas de fragilidade podem finalmente ser estimadas após o cálculo da função de densidade de probabilidade. Concomitantemente, no algoritmo utilizado para o cálculo da vulnerabilidade foram assumidas as funções de distribuição da da população móvel, “*in-house*” e “*out-house*” definidas no ERSTA. Também recorreu-se ainda ao método de Cambridge (Coburn and Spence, 2002) que, no caso dos edifícios efetivamente colapsados (colapso total), considera a taxa de mortalidade de 90%, e a taxa de feridos igual a 10%, seguindo uma distribuição análoga à preconizada no modelo original. Coburn e Spencer (2002) também propuseram um modelo global de estimativa de vítimas, considerando no momento do sismo, por edifício: o tipo de construção, o número de ocupantes discriminando os que se encontram presos no desabamento, a sua ocupação, o número de ocupantes presos, a distribuição das lesões em situações de colapso e a pós mortalidade em colapso. O cálculo da população móvel

**Estimativa do Risco** - O valor final de risco será calculado pela combinação do perigo (cálculo das intensidades macrossísmicas, via leis de atenuação) com a vulnerabilidade do edificado expressa em função de danos: i) nº de vítimas mortais; nº de vítimas com ferimentos ligeiros; nº de pessoas desalojadas; ii) nº edifícios colapsados; nº edifícios com danos severos; nº edifícios com danos moderados; nº edifícios com danos ligeiros; iii) perdas financeiras calculadas através da monetarização das perdas, onde partindo da superfície média dos pavimentos dos edifícios em risco que foi posteriormente multiplicada pelos

preços indicativos da construção estabelecidos por Portaria anual publicada em Diário da República (Sousa, 2007); e iv) altura de potencial *tsunami*, em caso de epicentro no oceano, via metodologia proposta por Gusakov (2011).

### Exemplo de Cenarização

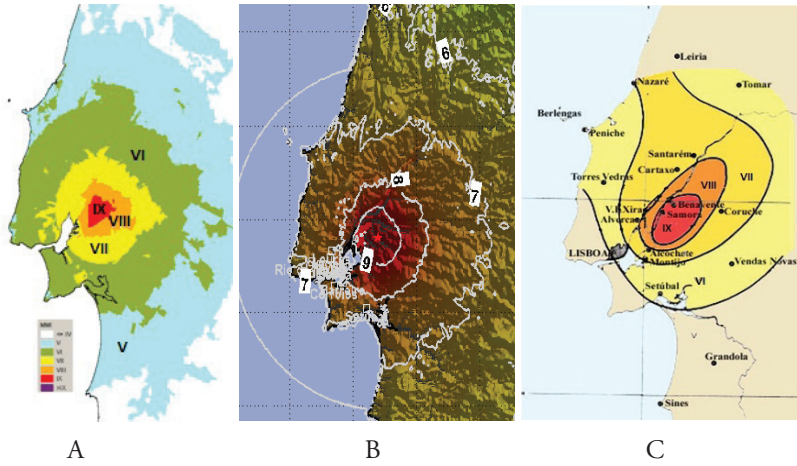
Como exemplo ilustrativo das capacidades deste simulador, optou-se por recriar sinteticamente o sismo de 23 de Abril de 1909, ocorrido em Benavente, procurando estimar quais as perdas associadas face à atual ocupação do solo. Para análise comparativa foi simultaneamente utilizado o software *Earthquake Loss Estimation Routine* (ELER) desenvolvido através do projeto JRC/EU FP-6 – NERIES para a área euro-mediterrânica (Erdik *et al*, 2010). Assim, para uma magnitude ( $M_w$ ) de 6.3 e um epicentro localizado em 37.10N e 8.90W, obtiveram-se os seguintes resultados:

#### Mapa de Isossistas

As intensidades obtidas foram então comparadas com o mapa de Moreira (1991) (fig.1-B) recriado através de análise de testemunhos escritos de quem viveu o evento presencialmente e dos danos no edificado que foram amplamente descritos em relatos coevos. Tanto a simulação ELER (fig. 1-A) (usando a lei de atenuação de Abrahamson & Silva, 1997) como o SIRCO (fig. 1-C) revelam uma razoável aproximação ao mapa recriado por Moreira (1991).

#### Danos em Edifícios e Pessoas

Da análise comparativa dos resultados dos modelos obtidos para os danos e perdas (TABELA III) foi identificada uma variável que não se encaixa no intervalo obtido pelo ELER, que é o valor agregado para os danos no edificado.



**Fig. 1** – Isossitas: A - obtidas via SIRCO; B - obtidas via ELER e C - recriadas por Moreira (1991).

*Fig. 1 – Isoseismal maps: A - obtained via SIRCO; B - obtained via ELER and C - recreated by Moreira(1991).*

No entanto, o valor é supervalorizado por apenas 10% (2143 vs. 2359), uma imprecisão que podemos classificar como aceitável, como observado em análises similares incidindo em outputs de diferentes simuladores de risco sísmico, feitas conforme descrito por Spence *et al.* (2008) e King&Rojahn (1996).

**TABELA III** – Perdas Actuais Estimadas para o Cenário de 1909.  
**TABLE III** – Current Estimated losses for the 1909 scenario.

	<i>Edifícios Não Recuperáveis</i>	<i>Feridos</i>	<i>Mortos</i>
<i>ELER Valor Mínimo (-15%)</i>	<i>1585</i>	<i>2938</i>	<i>735</i>
<i>Sirco Output</i>	<i>2359</i>	<i>3638</i>	<i>962</i>
<i>ELER Valor Máximo (+15%)</i>	<i>2143</i>	<i>3975</i>	<i>994</i>
<i>Desvio em relação ao intervalo ELER</i>	<i>+10%</i>	<i>0%</i>	<i>0%</i>



## Conclusão

Procurou-se com este trabalho proporcionar à ANPC um instrumento de suporte ao planeamento de emergência e de apoio às políticas de Prevenção e Resposta a situações de ocorrência de sismos de moderada a elevada intensidade. Embora aparentemente complexo, o simulador desenvolvido está desenhado por forma a, sem intervenção do utilizador, definir qualquer tipo de cenário, ativando um conjunto de opções pré-definidas, que constituem uma aproximação equilibrada a qualquer situação (Sá *et al.* 2014). Assim, o utilizador somente terá que fazer opções de formulações alternativas se assim o desejar e quando se sentir preparado para o fazer. Por fim, a introdução de um procedimento que gera de forma automática ficheiros de resultados estatísticos pré-formatados para cada um dos cenários escolhidos, constitui uma forma de, com extrema simplicidade, incorporar toda essa informação em textos, relatórios, mapas e apresentações ou outras formas de comunicação, estudo ou divulgação da informação produzida de apoio à mitigação do risco e à emergência.

## Bibliografia

- Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological research letters*, 68(1), 94-127.
- Baptista, M. A., Miranda, J. M., Batlo, J., & Ferreira, H. (2012). Tsunami flooding along Tagus estuary, Portugal, the 1531 event. *In EGU G.A. Conference Abstracts* (Vol. 14, p. 4910).
- Bernardini, A., Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., & Parodi, S. (2007). The vulnerability assessment of current buildings by a macroseismic approach derived from the EMS-98 scale.
- Carta Geológica de Portugal (2010). Carta Geológica de Portugal Continental à escala 1/1 000 000. Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Carvalho, E. C., Campos Costa, A., Sousa, M. L., Martins, A., Serra, J. B., Caldeira, L., & Coelho, A. G. (2002). Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras. Relatório final. Report280/02, G3ES.
- Coburn, A., Spence, R. (2002). *Earthquake Protection*, 2nd Edition ISBN: 978-0-470-84923-1
- Erdik, M., Sesetyan, K., Demircioglu, M., Hancilar, U., Zulfikar, C., Cakti, E. & Harmandar, E. (2010). Rapid earthquake hazard and loss assessment for Euro-Mediterranean region. *Acta Geophysica*, 58(5), 855-892.

- FEMA, H. M. (2003). MR3 Technical Manual. Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model.
- Giovinazzi, S., Lagomarsino, S. (2004). A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. *In 13<sup>th</sup> WCEE*, Vancouver, BC, Canada (pp. 1-6).
- Gusiakov, V. K. (2011). Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data. *Pure and Applied Geophysics*, 168(11), 2033-2041.
- Grünthal, G. (1998). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie: Volume 15–European Macroseismic Scale 1998. European Center for Geodynamics and Seismology, Luxembourg.
- INE, IP. “Censos 2011 Resultados Definitivos-Portugal.” Lisboa-Portugal: Instituto Nacional de Estatística, IP (2012).
- Julião, R. P., Nery, F., Ribeiro, J. L., Branco, M. C., & Zêzere, J. L. (2009). Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal. ANPC, Lisboa.
- King, S. A., Rojahn, C. (1996). A comparison of earthquakes damage and loss estimation methodologies. *In 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, CD ROM, paper (No. 1482).
- Le Pense, S., Gatmiri, B., & Maghoul, P. (2011). Influence of soil properties and geometrical characteristics of sediment-filled valleys on earthquake response spectra. *In 8<sup>th</sup> International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2011)* (pp. 130-136).
- Moreira, V.S. (1991). Sismicidade Histórica de Portugal Continental. *Revista do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica*.
- Oliveira, C. S., Pais, I. (1995). Technical approaches for earthquake emergency planning: Recent application to the city of Lisbon. London E and FN Spon, 58-72.
- Sá, L, Pires, P, Henriques, P; Telhado, M. (2014). Modelação E Análise de Perdas Associadas ao Risco Sísmico. *3º Congresso Internacional de Riscos*, Univ. Minho, Guimarães.
- Sousa, M.L. (2007). Hierarquização das regiões de Portugal Continental em função do seu risco sísmico”. *Sísmica 2007 – 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica*, 26-28 de Setembro, FEUP, Porto, Portugal.
- Sousa, M. L., Carvalho, A., Bilé Serra, J., Mateus, M., & Martins, A. (2008). Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve (ERSTA). Relatório final. LNEC technical report 295/2008.
- Sousa, M.L., Oliveira, C.S. (1997) Hazard assessment based on macroseismic data considering the influence of geological conditions. *Natural Hazards*. 14: 207-225, Kluwer Academic Publishers.
- Spence, R., So, E., Jenny, S., Castella, H., Ewald, M., & Booth, E. (2008). The Global Earthquake Vulnerability Estimation System (GEVES): an approach for earthquake risk assessment for insurance applications. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(3), 463-483.
- Teves-Costa, P, Barreira E, Omira R (2011). Estimativa de cenários de danos para a cidade de Lisboa. RISK-UE. [http://lrxrisk.cm-lisboa.pt/risco\\_sismico.html](http://lrxrisk.cm-lisboa.pt/risco_sismico.html) (acedido em Maio de 2015).