

*Contribuição para a avaliação do risco sísmico:
Aplicação à cidade de Faro.*

SÍSMICA 99

4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica
2^{ème} Rencontre en Génie Parasismique des Pays Méditerranéens.

Faro: Escola Superior de Tecnologia, UAlg. p 93-102.

1999



João M.C. Estêvão
Assistente
EST - UAlg



C.S. Oliveira
Prof. Catedrático
DECivil - IST

Contribuição para a avaliação do risco sísmico Aplicação à cidade de Faro

Resumo

O programa SRAPOR permite a realização de rápidas avaliações de risco sísmico de aglomerados habitacionais. A presente versão é constituída por uma base de dados de sismos, por um sistema simplificado de informação geográfica e por um módulo de avaliação da casualidade sísmica. A aplicação do programa é ilustrada com a análise da casualidade sísmica da cidade de Faro.

Abstract

SRAPOR is a computer program for seismic risk assessment. This version is built in with an earthquake database, a simple geographic information system and a seismic hazard analysis module. As an example, we used the program for the evaluation of the seismic hazard of Faro.

INTRODUÇÃO

O impacto negativo, económico e social, que a ocorrência de sismos tem sobre os aglomerados habitacionais, tem levado ao desenvolvimento generalizado de novas ferramentas de análise de risco sísmico, nomeadamente recorrendo às novas tecnologias, que permitam interligar toda a informação disponível. Nesse contexto, iniciou-se o desenvolvimento de um programa [1], destinado a computadores pessoais, em ambiente Windows, designado por SRAPOR (Seismic Risk Assessment - PORTugal), que permite a realização de estudos sobre o impacto dos sismos nas construções existentes e que poderá vir a contribuir para a mitigação do risco sísmico.

O programa consiste num sistema integrado de avaliação do risco sísmico, desenvolvido em Object Pascal, e é composto pelos seguintes módulos:

1. Base de dados;
2. Sistema de informação geográfica;
3. Módulo de análise da casualidade sísmica;
4. Módulo de análise da vulnerabilidade sísmica (em desenvolvimento).

Em virtude da complexidade e morosidade, envolvendo os estudos sobre o risco sísmico, o objectivo do programa é possibilitar o tratamento e correlação de grandes quantidades de dados, com grande rapidez e facilidade, dado que são facultados ao utilizador interfaces de comunicação muito simples. Estas características do programa permitem a realização de múltiplas análises de casualidade sísmica, com variação de diversos parâmetros e com um mínimo de esforço e tempo dispendido na obtenção dos resultados.

BASE DE DADOS

A base de dados contém informação sobre os eventos sísmicos, ocorridos na região que envolve Portugal Continental, e sobre a geologia, os edifícios e a rede viária dos aglomerados habitacionais. No presente momento, só estão introduzidos os eventos sísmicos correspondentes ao catálogo sísmico compilado por Sousa *et al.* [2], e que é constituído por sismos registados e por sismos históricos (cujos dados são baseados em parâmetros macrossísmicos).

O catálogo sísmico pode ser filtrado, por opção do utilizador, por intervalos de datas e magnitudes dos eventos sísmicos, com a possibilidade de não serem considerados os sismos históricos ou os sismos instrumentais.

Adicionalmente, é possibilitada a eliminação automática das réplicas, com base na filtragem do catálogo original, em função da magnitude do sismo principal, das diferenças temporais e epicentrais entre os eventos sísmicos.

SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Os sistemas de informação geográfica são ferramentas muito eficazes como suporte das análises da casualidade sísmica e do risco sísmico de zonas urbanas. Nessa perspectiva, o programa SRAPOR incorpora um simplificado sistema de informação geográfica (SIG) que efectua a gestão da manipulação dos mapas (de Portugal Continental, da região e do núcleo urbano seleccionado), efectuando a geo-referenciação da informação contida na base de dados e dos resultados das análises. Este sistema permite efectuar a representação cartográfica dos sismos da base de dados filtrada, obter os dados sobre qualquer sismo representado no mapa, assim como possibilita a delimitação interactiva (posicionando o cursor no local) das zonas de geração de eventos sísmicos, e a obtenção de gráficos e informações respeitantes a uma zona seleccionada (parâmetros da lei de Gutenberg-Richter, valores médios da profundidade focal, taxa anual de eventos, valores acumulados de energia libertada). Algumas dessas opções estão ilustradas na figura 1.

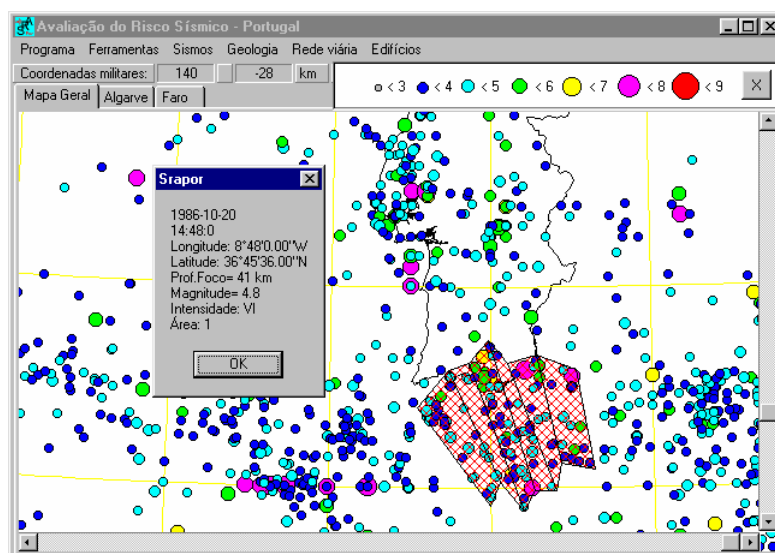


Fig. 1 : Exemplo da informação possibilitada pelo SIG.

ANÁLISE DA CASUALIDADE SÍSMICA

A análise da casualidade sísmica é uma parte fundamental de qualquer estudo de risco sísmico, e pode definir-se como sendo a probabilidade de ocorrer um evento sísmico que induza o atingir, ou a excedência, de um dado efeito no local em estudo.

O modelo proposto por Cornell [3], dada a sua simplicidade, foi o grande impulsionador da adopção de modelos probabilistas na generalidade dos estudos de casualidade sísmica que visam a aplicação a problemas de engenharia. Esse modelo pressupõe a definição de zonas geradoras de

eventos sísmicos, para as quais são definidos determinados parâmetros de sismicidade. Com base no teorema da probabilidade total, é possível obter-se a probabilidade de excedência de um efeito Z , no local em estudo, como sendo a soma das contribuições de todos os eventos (E_j) ocorridos nas zonas geradoras de eventos sísmicos. Assim, temos que

$$P[Z > z] = \sum_{j=1}^n P[Z > z | E_j] \cdot P[E_j] \quad (1)$$

com

$$P[Z > z | E_j] = \iint P_j[Z > z | M, R] \cdot f_j(M) \cdot f_j(R) \, dM \, dR \quad (2)$$

em que M é a magnitude e R a distância hipocentral do evento.

Admitindo que a ocorrência dos eventos sísmicos obedece a um processo homogêneo de Poisson de λ (taxa anual de ocorrência de eventos sísmicos), e que a probabilidade de ocorrência de um evento na zona j ($P[E_j]$) é proporcional a λ_j , então a probabilidade anual de excedência será

$$P_{1 \text{ ano}}[Z > z] = 1 - e^{-\sum_{j=1}^n \lambda_j P[Z > z | E_j]} \quad (4)$$

sendo o período de retorno o inverso desse valor.

Este modelo (“Point-source model”) pressupõe que toda a energia é libertada num ponto. Como tal, é necessária a adoção de leis de atenuação cuja distância seja calculada ao epicentro ou ao hipocentro. Tomando o valor médio, ou de um dado quantilho, da lei de atenuação, pode-se escrever que

$$P[Z > z | E_j] = \int P_j[Z > z | R = r] \cdot f_j(r) \, dr \quad (5)$$

com

$$P[Z > z | R = r] = P[M > m(z, r)] = 1 - F[m(z, r)] \quad (6)$$

sendo a magnitude $m(z, r)$ obtida da lei de atenuação e com

$$F(m) = \frac{1 - e^{-\beta(m - M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_U - M_0)}} \quad (7)$$

obtida da lei de Gutenberg-Richter, com truncatura superior e inferior da magnitude.

McGuire implementou no programa EQRISK [4] uma versão deste modelo, entrado em conta com a dispersão dos resultados associada às diversas leis de atenuação, em que

$$P[Z > z | E_j] = \iint \Phi^* \left\{ \frac{Z - z(m, r)}{\sigma_z} \right\} \cdot f_j(m) \cdot f_j(r) \, dm \, dr \quad (8)$$

com Φ^* representando a distribuição complementar de uma distribuição normal de Gauss, e $z(m, r)$ é o valor que se obtém da lei de atenuação.

Der Kiureghian e Ang [5] propuseram uma variante ao modelo de Cornell, tendo em conta que a energia libertada por um sismo é irradiada ao longo do comprimento de ruptura, em que

$$P[Z > z | E_j] = \frac{1}{A_j} \iiint P_j[Z > z | E_{j,m}] \cdot f_j(m) \, dm \, dy \, dx \quad (9)$$

O esquema geral deste modelo (“Fault-rupture model”), sem a consideração de uma orientação definida para a ruptura, está apresentado na figura 2.

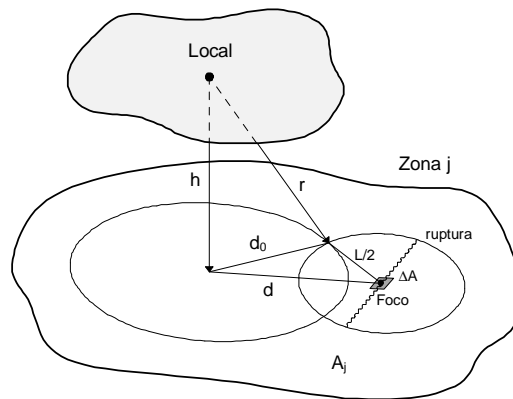


Fig. 2 : Zona geradora de eventos sísmicos sem orientação definida para as falhas [1].

A probabilidade $P[Z > z | E_{j,m}]$ depende da menor distância do local em estudo à ruptura, pelo que é necessária a adopção de leis de atenuação com base nessas distâncias. Na figura 3, estão apresentadas as diversas hipóteses de cálculo desta probabilidade, em que

$$d_0 = \sqrt{r^2 - h^2} \quad ; \quad d_1 = d_0 + \frac{L}{2} \quad ; \quad d_2 = \sqrt{r^2 - h^2 + \frac{L^2}{4}} \quad (10)$$

Este modelo foi adaptado por Bender [6] e implementado no programa SEISRISK III [7], recentemente utilizado em estudos de avaliação do risco sísmico na Europa.

Todos os modelos anteriores foram implementados no programa SRAPOR, que efectua a integração numérica das expressões (5), (8) e (9), no domínio das zonas geradoras de eventos sísmicos (constituídas por associações de quadriláteros convexos, com um lado comum). No caso das expressões (5) e (8), procede-se à divisão da área de cada zona em sub-áreas delimitadas por arcos de circunferência, com centro no local em estudo [1]. Em relação à expressão (9), é adoptado um processo análogo ao da transformação de coordenadas usada nos elementos isoparamétricos, nos modelos de análise por elementos finitos, como foi proposto por Oliveira [8] e Estêvão [1].

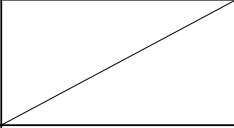
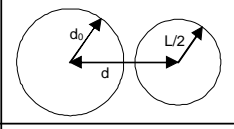
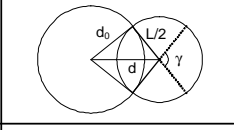
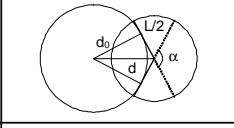
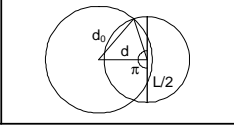
Situações	$P_j[Z > z E_{j,m}]$	Posições relativas
$r < h$	0.0	
$d_1 < d$	0.0	
$d_2 < d \leq d_1$	$\frac{\gamma}{\pi}$	
$d_0 < d \leq d_2$	$\frac{\alpha}{\pi}$	
$d \leq d_0$	1.0	

Fig. 3 : Valores da probabilidade $P[Z > z | E_{j,m}]$, em função da posição relativa entre o epicentro e o local em estudo, para um dado comprimento de ruptura [1].

APLICAÇÃO À CIDADE DE FARO

O modelo “Point-source” tem sido aplicado a Portugal por diversos investigadores [8, 9, 10], com base em leis de atenuação expressas em valores de intensidades sísmicas, definidas em função das distâncias epicentrais. A conversão para valores de aceleração de pico tem sido feita com base em expressões empíricas. As leis de atenuação, expressas em relação à aceleração de pico, existentes para Portugal Continental [11], não estão ajustadas para magnitudes elevadas (por inexistência de registos de sismos dessas magnitudes), pelo que não foram utilizadas na análise.

As leis de atenuação propostas por Ambraseys e Bommer [12] para rocha, válidas para a Europa, são apresentadas em função da menor distância à ruptura, pelo que só se ajustam ao modelo “Fault-rupture”. Esse modelo foi utilizado na análise da casualidade sísmica da cidade de Faro.

Neste trabalho utilizaram-se nove zonas de geração de eventos sísmicos (figura 4), adaptadas do estudo realizado por Fonseca *et al.* [13].

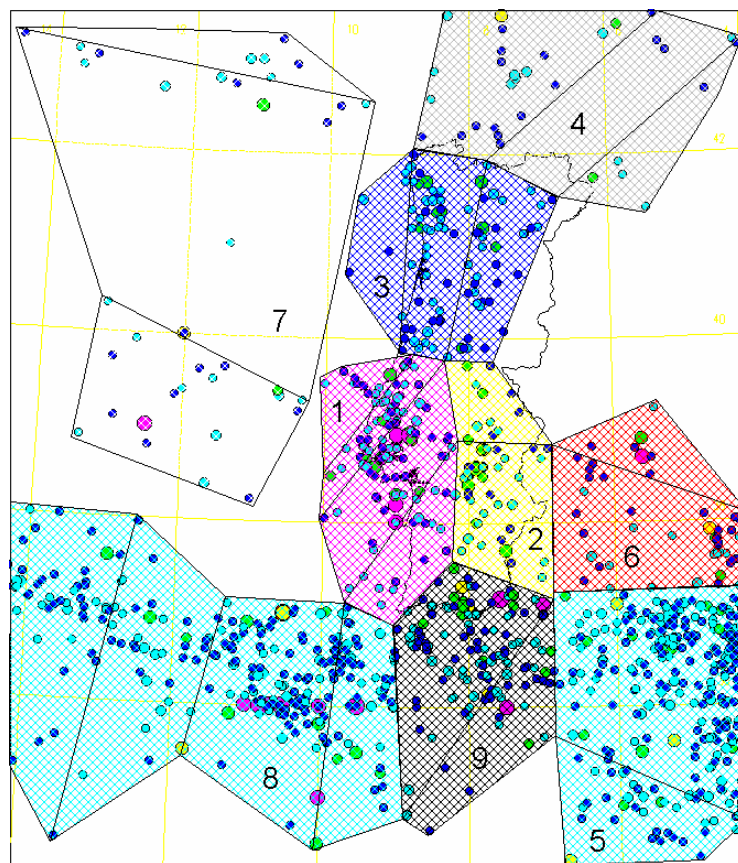


Fig. 4 : Definição das zonas de geração de eventos sísmicos.

Os parâmetros da lei de Gutenberg-Richter foram obtidos por regressão linear, com coeficientes de correlação superiores a 0.97, com todo o catálogo sísmico. A taxa anual de ocorrência de eventos sísmicos foi obtida só com o recurso aos sismos instrumentais. Os dados referentes às zonas estão apresentados na tabela 1.

O catálogo sísmico foi filtrado para um limite inferior da magnitude de 3.5 e foram eliminadas as réplicas de acordo com os valores médios sugeridos por Sousa [10], para o território Português. Efectuou-se uma truncatura superior da magnitude, correspondente ao máximo valor constante no catálogo filtrado, para cada uma das zonas. Os comprimentos das rupturas foram estimados com base na expressão empírica de Krinitzsky, aplicável a todo o mundo [5].

Os resultados das análises para os períodos de retorno de 475 e 1000 anos, foram obtidos com diversas profundidades de foco (valor médio de cada zona, valor da mediana de uma distribuição logonormal para cada zona e um valor constante $h = 12.32$ km em todas as zonas, correspondente ao valor da mediana de uma distribuição logonormal, para todos os sismos da base de dados com $M > 1$) e diversos quantilhos da lei de atenuação (tabela 2).

Para se efectuar uma análise de sensibilidade à ordem de grandeza dos resultados obtidos na tabela 2, foi realizada uma análise estatística de extremos, como é proposto por Oliveira [8]. Na figura 5, está apresentado o ajuste de uma curva de distribuição de extremos do tipo II (método dos mínimos quadrados), aos resultados obtidos para Faro, com as leis de atenuação de Ambraseys e Bommer, para os sismos instrumentais e sem consideração do comprimento de ruptura. Os valores de aceleração de pico, componente horizontal, obtidos para os períodos de retorno de 475 e 1000 anos foram, respectivamente, de 126 e 155 cm/s^2 .

Tab.1 : Dados sobre as zonas de geração de eventos sísmicos consideradas no estudo, nomeadamente, parâmetros da lei de Gutenberg-Richter, taxa anual de ocorrência de eventos sísmicos, profundidades de foco (km) e magnitudes máximas do catálogo sísmico.

ZONA Nº	Lei de Gutenberg-Richter		Taxa λ	Valores da mediana do foco		Magnitude máxima
	a	b		normal	Logonormal	
1	4.253	0.554	1.086	12.95	10.07	7.6
2	3.860	0.559	0.500	23.88	12.00	6.0
3	5.210	0.855	0.890	9.00	7.97	5.7
4	3.539	0.578	0.378	14.41	10.68	6.0
5	5.800	0.909	3.525	30.34	17.93	6.2
6	3.200	0.464	0.573	14.22	8.28	7.0
7	3.123	0.457	0.427	17.92	12.94	7.0
8	3.653	0.415	3.122	28.64	20.06	8.5
9	3.910	0.506	1.512	27.68	18.98	7.8

Tab.2 : Valores da aceleração de pico em cm/s^2 (componentes horizontal e vertical), obtidos para Faro, com o modelo probabilista de Der Kiureghian e Ang, recorrendo ao sistema integrado de avaliação do risco sísmico SRAPOR.

Profundidade de foco considerada	Atenuação (quantilho)	$T_r = 475$ anos		$T_r = 1000$ anos	
		a_h	a_v	a_h	a_v
Valor médio de cada zona	50 % (média)	153	73	181	85
	84 %	279	133	329	154
Valor da mediana de uma logonormal, de cada zona	50 % (média)	205	96	248	114
	84 %	373	175	451	208
Valor constante em todas as zonas $h = 12.32$ km	50 % (média)	278	159	348	160
	84 %	506	234	633	289

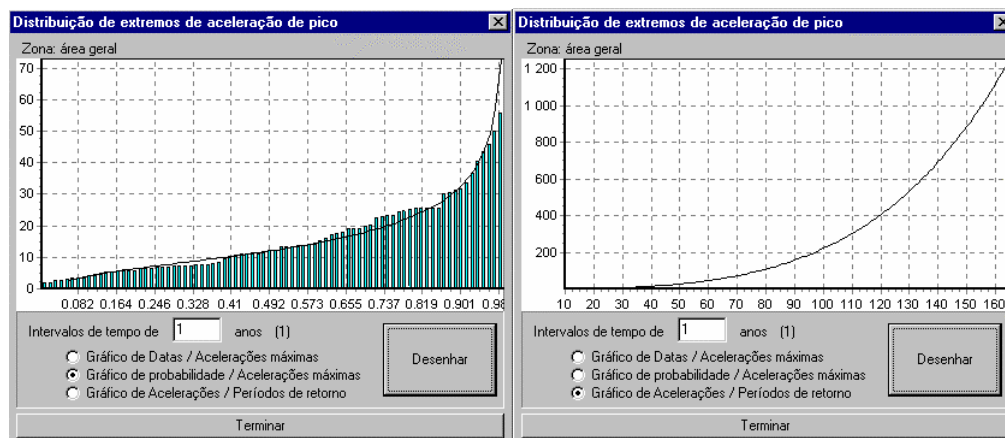


Fig. 5 : Distribuição de extremos de acelerações de pico obtidas para Faro.

CONCLUSÕES

Deste estudo, pode concluir-se que os sistemas integrados de avaliação do risco sísmico, como o SRAPOR, são ferramentas importantes na elaboração de estudos, em larga escala, contribuindo para o aumento do conhecimento no domínio da engenharia sísmica. A facilidade e rapidez de utilização deste tipo de programas, possibilita múltiplas análises, permitindo o aprofundamento do conhecimento do risco sísmico do território nacional, e a aferição do nível de segurança associado à regulamentação em vigor.

Quanto aos resultados da análise realizada para a cidade de Faro, é de salientar a elevada sensibilidade dos modelos apresentados em relação à profundidade do foco, pelo que é necessária alguma ponderação na escolha dos valores de aceleração de pico, a utilizar em análises do risco sísmico, ou na aferição da regulamentação Portuguesa, nomeadamente na adaptação ao Eurocódigo 8 [14]. Por outro lado, as dispersões associadas às leis de atenuação utilizadas, influenciam de forma marcante os resultados das análises. É de referir que o valor máximo da aceleração de pico (componente horizontal) inerente aos espectros de potência do Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes [15], para o terreno tipo I e sismo tipo 1, de, aproximadamente, 177 cm/s^2 , é inferior a todos os valores obtidos para $T_r = 1000$ anos. É de notar que a componente vertical apresenta valores de aceleração de pico inferiores a metade dos valores obtidos para a componente horizontal. Salienta-se o facto dos valores obtidos considerarem, conjuntamente, os efeitos dos sismos próximos e dos sismos distantes.

Os modelos a utilizar em estudos futuros, deverão ter em conta as incertezas relativas à profundidade do foco, dado que estas influenciam os resultados das análises da casualidade sísmica, nomeadamente na proximidade do local em estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] ESTÊVÃO, J. M. C. - *Modelo computacional de avaliação do risco sísmico de edifícios*. Lisboa: IST, Universidade Técnica de Lisboa, 1998. Dissertação de mestrado.
- [2] SOUSA, M. L. ; MARTINS, A. ; OLIVEIRA, C. S. - *Compilação de catálogos sísmicos da região Ibérica*. Relatório 36/92 - NDA. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1992.
- [3] CORNELL, C. A. - *Engineering seismic risk analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 58, nº 5 (1968), p. 1583-1606.
- [4] McGUIRE, R. K. - *EQRISK: Evaluation of earthquake risk to site*. Fortran computer program for seismic risk analysis. U. S. Geological Survey. Open File. Report 76-67, 1976.
- [5] Der KIUREGHIAN, A.; ANG, A. H.-S. - *A fault rupture model for seismic risk analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 67, nº 4 (1977), p. 1173-1194.
- [6] BENDER, B. - *Seismic hazard estimation using a finite-fault rupture model*. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 74, nº 5 (1984), p. 1899-1923.
- [7] BENDER, B. ; PERKINS, D. M. - *SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation*. U. S. Geological Survey Bulletin, 1772 (1987).
- [8] OLIVEIRA, C. S. - *Sismologia, sismicidade e risco sísmico*. Aplicações em Portugal. Relatório. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1977.
- [9] CAMPOS-COSTA, A. - *A acção dos sismos e o comportamento das estruturas*. Porto: FEUP, Universidade do Porto, 1993. Tese de doutoramento.
- [10] SOUSA, M. L. - *Modelos probabilistas para avaliação da casualidade sísmica em Portugal continental*. Lisboa: IST, Universidade Técnica de Lisboa, 1996. Dissertação de mestrado.
- [11] OLIVEIRA, C. S. ; PAULA, A. ; SOUSA, M. L. ; MARTINS, A. - *A rede acelerográfica do continente Português e os registos sísmicos obtidos em 1996 e 1997. Contribuição para a definição da acção sísmica e caracterização do comportamento de edifícios*. IX Asamblea Española de Geodesia y Geofísica / I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almeria: Universidad de Almeria e Instituto Geográfico Nacional, 1998.
- [12] AMBRASEYS, N. N. ; BOMMER, J. J. - *The attenuation of ground accelerations in Europe*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Vol. 20, nº 12 (1991), p. 1179-1202.
- [13] FONSECA, J. ; OLIVEIRA, C. S. ; VILANOVA, S. ; GUERREIRO, L. - *Estudo sísmológico de segurança das barragens de Ranhados, Marateca, Meimoa e Apartadura*. Relatório ICIST, EP nº 31/99. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 1999.
- [14] EUROCODE 8 - Design provisions for earthquake resistance of structures. ENV 1998-1-1, CEN/TC250/SC8/N.nn, 1994.
- [15] REGULAMENTO de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto-lei nº235/83, de 31 de Maio. Lisboa: Imprensa Nacional - Casa da Moeda, 1983.