

## LEIS DE ATENUAÇÃO SÍSMICA PARA PORTUGAL CONTINENTAL CONSIDERANDO O TIPO DE TERRENO



José Rodrigues

Estudante  
DECivil - IST  
Lisboa  
jose.m.rodrigues@  
tecnico.ulisboa.pt



Alexandra Carvalho

Investigadora Auxiliar  
DE/NESDE - LNEC  
Lisboa  
xana.carvalho@lnec.pt



Rita Delfim

Estudante  
DECivil - IST  
Lisboa  
rita.delfim@ist.utl.pt



Rui Gomes

Professor  
DECivil - IST  
Lisboa  
rui.carrilho.gomes  
@tecnico.ulisboa.pt

### SUMÁRIO

O presente trabalho tem como objectivo a dedução de leis de atenuação sísmica para Portugal Continental, considerando o tipo de terreno.

A avaliação da resposta sísmica do terreno foi realizada com uma abordagem estatística baseada na teoria dos processos estocásticos, assumindo-se um modelo unidimensional correspondente á propagação vertical de ondas S incidindo na direção vertical e através de um semi-espaco infinito elástico homogéneo e considerando-se o método linear equivalente para a consideração da não linearidade do comportamento do solo.

Foram aplicadas regressões lineares para a resposta sísmica agrupada por ambiente sísmico e tipo de solo, de forma a obter equações de previsão dos movimentos sísmicos para Portugal Continental.

**Palavras-chave:** método linear equivalente, leis de atenuação sísmica, efeitos de sítio

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos interesses da engenharia sísmica é o estudo dos efeitos de sismos nas estruturas. Para atingir este objectivo, a definição da ação sísmica envolve a estimativa da amplitude, do conteúdo em frequência e da variabilidade espacial dos movimentos intensos do solo.

A adequada caracterização dos movimentos sísmicos intensos não tem apenas como objetivo a atualização da regulamentação sismo-resistente aplicável a estruturas novas, mas também pretende analisar a perigosidade sísmica no território continental, cujo interesse e oportunidade reside na sua aplicação aos estudos de mitigação de risco sísmico, afetando áreas como o planeamento e gestão de emergência e o estabelecimento de estratégias para o reforço do parque habitacional existente.

Efectuando uma breve análise estatística do catálogo sísmico português, entre 63 A.C. e 2007, conclui-se que [1]:

- i) existem apenas dez sismos com magnitude superior ou igual a 7,5;
- ii) os sismos com magnitude inferior a 3,5 constituem 85,1% dos registos do catálogo;
- iii) a taxa média de ocorrências é de 104,5 sismos por ano, a partir de 1909, e de 0,2 sismos por ano até essa data.

Assim, o catálogo existente não descreve, de forma exaustiva, a sismicidade de Portugal Continental e os registos de sismos de magnitude e distâncias relevantes são escassos. Ora, a caracterização da ação sísmica, para efeitos de projecto e verificação de segurança das estruturas de engenharia civil, é realizada para valores de intensidade sísmica elevados quando comparados com os valores de intensidade sísmica sentidos frequentemente. Tal facto exige a consideração de períodos de retorno relativamente elevados o que impõe, para o caso de Portugal, o conhecimento da sismicidade histórica (bastante deficitário no que respeita ao nosso território). O problema torna-se mais grave pois, mesmo para a sismicidade instrumental, são poucos os registos instrumentais de relevo para uma caracterização completa dos movimentos sísmicos intensos nos locais. Assim, a base de dados existentes em Portugal não permite a dedução de leis estatísticas e, consequentemente, a definição da ação sísmica é feita com recurso a relações empíricas obtidas a partir de bases de dados internacionais, cuja aplicabilidade ao nosso território poderá ser questionável.

Carvalho [2] desenvolveu para Portugal modelos estocásticos especificamente dirigidos à caracterização da ação sísmica não só em termos de valores de pico dos movimentos sísmicos intensos, como também da distribuição da energia desses movimentos pelas ordenadas espectrais, tendo ainda em conta aspetos que refletem a definição de campo próximo e afastado. Os parâmetros necessários para a utilização destes modelos foram calibrados utilizando os registos obtidos na rede acelerográfica nacional. Foi possível, deste modo, simular os movimentos intensos do solo para uma grelha de magnitudes, distâncias e frequências de interesse para a engenharia, para os dois tipos de cenário preconizados no

Eurocódigo 8 (EC8) [3], obtendo-se uma base de dados sintética de registos sísmicos em Portugal Continental (no substrato rochoso), consistindo em:

- 13280 espetros de sismos de magnitude elevada com epicentro a sudoeste do Cabo São Vicente com uma distância ao epicentro entre 50 a 700 km e magnitudes entre 5,1 a 8,7, representativos da ação tipo 1 do EC8;

- 4843 espetros de sismos de magnitude moderada a curtas distâncias com uma distância ao epicentro inferior a 200 km e magnitudes entre 4,1 a 7,5, representativos da ação tipo 2 do EC8.

Esta base de dados foi utilizada como a ação sísmica indutora no substrato rochoso, que solicitará o terreno e permitirá a obtenção dos espetros à superfície e a posterior dedução de leis de atenuação considerando o tipo de terreno.

Para o estudo da influência das condições locais do terreno, foram reunidos 172 perfis geotécnicos da área metropolitana de Lisboa e do distrito de Algarve, obtidos no âmbito de dois projectos nacionais promovidos pela Autoridade Nacional da Protecção Civil [4,5], tendo sido posteriormente classificados de acordo com os tipos de terreno definidos no Anexo Nacional do Eurocódigo 8.

A propagação de ações sísmicas pelo terreno acima do substrato rochoso foi modelada pelo método linear equivalente, que tem em conta o comportamento não linear dos solos, traduzido pelas curvas de degradação da rigidez e do coeficiente de amortecimento do solo.

Esta modelação permitiu criar uma base de dados sintética de valores de aceleração à superfície, em função do ambiente sísmico, da magnitude do sismo, da distância ao epicentro e do tipo de terreno, à qual foi ajustada uma relação funcional simples com a magnitude e a distância como variáveis explicativas.

## 2. METODOLOGIA UTILIZADA

### 2.1 Propagação das ondas sísmicas

Para caracterizar a propagação das ondas sísmicas nas formações superficiais, utilizou-se o modelo de propagação vertical de ondas S em meio visco-elástico com estratificação horizontal sobrejacente a semi-espaço elástico [6].

Para se considerar a resposta não linear dos solos foi utilizado o modelo linear equivalente para a modelação da propagação das ondas S. A relação constitutiva do modelo linear equivalente expressa a dependência entre a tensão e a deformação de corte mediante uma parcela de rigidez elástica, representada pelo módulo de distorção,  $G$ , e uma parcela dissipativa associada à fração de amortecimento crítico,  $\xi$ .

O método linear equivalente é um processo iterativo, que compatibiliza as propriedades dinâmicas do solo com o nível de deformação em todas as camadas.

A dependência da rigidez de corte e do amortecimento relativamente à deformação é modelada através de curvas adimensionais, em função da distorção,  $G/G_0 - \gamma$  e amortecimento,  $\xi - \gamma$ , tendo-se utilizado curvas propostas por Darendeli [7].

O modelo de propagação vertical de ondas de corte que está inserido no LNECloss [5,9], ferramenta utilizada neste trabalho, utiliza uma abordagem estocástica [8] para a estimativa dos valores máximos da resposta ao longo do tempo.

Considera-se que o movimento excitador e as respostas dinâmicas podem ser expressas pela respetiva função de densidade espectral de potência. A função de densidade de resposta,  $S_r(\omega)$ , é obtida através da relação estocástica de sistemas lineares:

$$S_r(\omega) = S_a(\omega) \cdot |H_r(\omega)|^2 \quad (1)$$

em que  $H_r(\omega)$  representa a função de transferência complexa entre o movimento excitador e a resposta e  $S_a(\omega)$  a função de densidade espectral de potência da excitação,

Para cada profundidade de discretização, as funções de densidade espectral de potência da deformação de corte permitem obter os respectivos momentos espectrais de ordem 0 e 2, pela equação:

$$m_i = \int_0^{+\infty} \omega^i S_r(\omega) \quad (2)$$

sendo  $i$  a ordem, e por fim determinar os valores de pico da deformação associada ao percentil 100p (%):

$$E(p) = \sqrt{2m_0 \left[ \ln \left( \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \right) - \ln(-\ln(p)) \right]} \quad (3)$$

sendo  $T$  a duração do processo de resposta estacionário.

Estes valores de pico da deformação, para cada profundidade, são a chave do processo iterativo de ajuste aos valores de  $G$  e de  $\xi$ .

## 2.2 Relação funcional da lei de atenuação

De uma forma geral, a relação utilizada para representar o movimento do solo num dado local, dado a ocorrência na fonte sismogénica, pode ser representada por (4) [2]

$$\log_{10} S = f(M, R, P) + \varepsilon \quad (4)$$

em que:

- $S$  é a intensidade do movimento do solo que se pretende prever (como a aceleração espectral ou valores de pico da aceleração, velocidade ou deslocamento);
- $M$  é a variável que descreve a magnitude do sismo;
- $R$  é a distância entre a fonte e o local em análise (como a distância hipocentral ou menor distância à falha sísmica);
- $P$  é um conjunto de variáveis que caracteriza a fonte e/ou o local em análise (por exemplo mecanismo focal da fonte sísmica ou condições geológicas locais);
- $\varepsilon$  é uma variável aleatória que reflete a incerteza do movimento do solo e as características do modelo utilizado, que se traduz numa dispersão em relação ao valor previsto pelo modelo de atenuação. Admite-se que esta variável tem distribuição normal de média nula e variância  $\sigma_\varepsilon^2$ .

Para a obtenção das leis de atenuação para Portugal Continental, no topo do substrato rochoso, foram aplicadas regressões aos dados na relação funcional do tipo:

$$\log_{10} SA = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \log_{10} R + c_5 R + \sigma_\varepsilon \quad (5)$$

em que  $SA$  representa a aceleração espectral em  $\text{cm/s}^2$  e  $R$  a distância hipocentral, em km.

De modo a obter leis de atenuação para diferentes tipos de terreno, foi incluída uma função,  $f(S)$ , tal que a relação funcional tem a forma:

$$\log_{10} SA = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \log_{10} R + c_5 R + \sigma_\varepsilon + f(S) \quad (6)$$

sendo  $f(S)$  definida de acordo com o tipo de terreno (A a E, conforme EC8), na forma:

$$f(S) = \begin{cases} c_{1,soloA} + c_{2,soloA} M + c_{3,soloA} M^2 + c_{4,soloA} \log_{10} R + c_{5,soloA} R + \sigma_{\varepsilon,soloA}, & \text{se solo tipo A} \\ c_{1,soloB} + c_{2,soloB} M + c_{3,soloB} M^2 + c_{4,soloB} \log_{10} R + c_{5,soloB} R + \sigma_{\varepsilon,soloB}, & \text{se solo tipo B} \\ c_{1,soloC} + c_{2,soloC} M + c_{3,soloC} M^2 + c_{4,soloC} \log_{10} R + c_{5,soloC} R + \sigma_{\varepsilon,soloC}, & \text{se solo tipo C} \\ c_{1,soloD} + c_{2,soloD} M + c_{3,soloD} M^2 + c_{4,soloD} \log_{10} R + c_{5,soloD} R + \sigma_{\varepsilon,soloD}, & \text{se solo tipo D} \\ c_{1,soloE} + c_{2,soloE} M + c_{3,soloE} M^2 + c_{4,soloE} \log_{10} R + c_{5,soloE} R + \sigma_{\varepsilon,soloE}, & \text{se solo tipo E} \end{cases} \quad (7)$$

### 2.3 Distribuição dos perfis do terreno pelas classes de terreno tipo do Eurocódigo 8

A análise dos 172 perfis geotécnicos considerados [4,5] permitiu a sua classificação nos cinco tipos de terrenos apresentados no Anexo Nacional do Eurocódigo 8. A distribuição dos perfis pelos vários tipos de terreno está indicada na Fig. 3. Detalhes deste procedimento podem ser encontrados em [10].

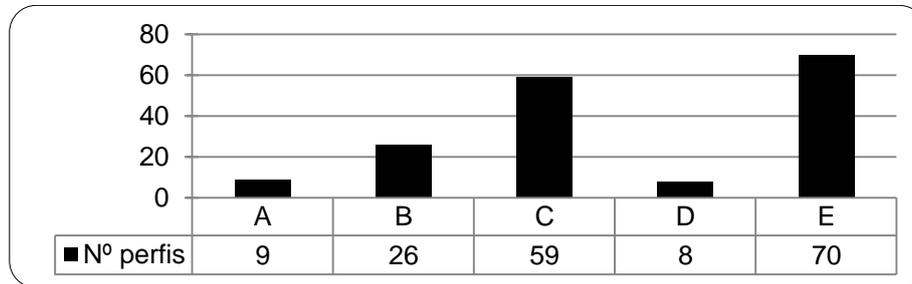


Figura 3. Classificação dos perfis de acordo com o Eurocódigo 8 [10].

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Leis de atenuação sísmica para Portugal Continental

A cada perfil geotécnico foi imposto cada um dos eventos sísmicos da base de dados sintética no substrato rochoso. Foi aplicada a via estocástica do método linear equivalente, através de modelação computacional, em que a variável  $p$ , apresentada na equação (3), corresponde ao percentil 50%.

Deste modo, obteve-se uma base de dados de séries ao topo da coluna de solo para os dois tipos de ação sísmica definidos no Eurocódigo 8, constituída por:

- 2 284 160 espetros para o cenário de sismo afastado (ação tipo 1 do EC8);
- 832 996 espetros para o cenário de sismo próximo (ação tipo 2 do EC8).

Foram, posteriormente, organizados os dados por tipo de terreno e frequência, de modo a serem aplicadas regressões lineares e a obter as relações funcionais das equações (6) e (7).

Os Quadros 2 a 7 apresentam os coeficientes obtidos e a Fig.4 apresenta um exemplo para um evento definido com uma magnitude e uma distância, para o sismo próximo e sismo afastado. O parâmetro  $c_{5,solo}$  não mostrou significado estatístico, pelo que não é aqui apresentado.

Por forma a analisar o comportamento dos solos (traduzido pela lei de atenuação obtida) para diferentes eventos sísmicos (caracterizados por uma magnitude e uma distância) as Figs. 5 e 6 apresentam o residual (razão) entre os valores das acelerações espectrais dos solos e a aceleração no substrato rochoso.

Quadro 2. Coeficientes da lei (6) para sismo afastado e próximo, para substrato rochoso

$f$ (Hz)	Sismo afastado						Sismo próximo					
	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$\sigma_\epsilon$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$\sigma_\epsilon$
0,201	-8,261	2,297	-0,110	-0,657	-0,001	0,205	-7,457	2,176	-0,090	-1,298	0,002	0,218
0,240	-8,178	2,313	-0,114	-0,617	-0,001	0,202	-7,765	2,329	-0,106	-1,235	0,002	0,218
0,334	-7,585	2,230	-0,112	-0,549	-0,001	0,201	-8,217	2,589	-0,133	-1,124	0,001	0,219
0,522	-5,875	1,872	-0,093	-0,465	-0,001	0,201	-7,983	2,686	-0,150	-0,991	0,000	0,221
0,954	-3,927	1,455	-0,069	-0,401	-0,002	0,208	-7,114	2,606	-0,154	-0,906	0,000	0,226
1,285	-2,898	1,237	-0,055	-0,410	-0,002	0,210	-6,256	2,411	-0,142	-0,879	-0,001	0,228
1,669	-1,431	0,926	-0,035	-0,478	-0,002	0,213	-5,371	2,192	-0,128	-0,866	-0,001	0,230
1,953	-0,986	0,832	-0,029	-0,489	-0,002	0,215	-4,765	2,036	-0,117	-0,867	-0,001	0,233
2,421	-0,591	0,747	-0,024	-0,494	-0,002	0,217	-3,953	1,821	-0,102	-0,875	-0,001	0,236
3,311	-0,241	0,672	-0,019	-0,492	-0,002	0,220	-2,992	1,571	-0,083	-0,893	-0,001	0,240
3,906	-0,116	0,645	-0,017	-0,489	-0,002	0,221	-2,522	1,447	-0,074	-0,910	-0,001	0,242
5,025	0,022	0,614	-0,015	-0,486	-0,003	0,222	-1,980	1,305	-0,064	-0,929	-0,001	0,245
6,250	0,110	0,595	-0,014	-0,482	-0,003	0,223	-1,562	1,202	-0,056	-0,963	-0,002	0,247
7,299	0,116	0,589	-0,014	-0,496	-0,003	0,223	-1,360	1,152	-0,052	-0,982	-0,002	0,249
8,403	0,120	0,585	-0,014	-0,510	-0,002	0,223	-1,211	1,113	-0,049	-0,994	-0,002	0,251
9,901	0,127	0,580	-0,013	-0,526	-0,002	0,223	-1,068	1,076	-0,046	-1,004	-0,002	0,254
12,5	0,138	0,573	-0,013	-0,548	-0,002	0,223	-1,037	1,067	-0,045	-1,036	-0,002	0,256
14,925	0,149	0,569	-0,012	-0,564	-0,002	0,224	-1,016	1,060	-0,045	-1,059	-0,002	0,258
20,0	0,167	0,562	-0,012	-0,588	-0,002	0,224	-0,985	1,050	-0,044	-1,091	-0,002	0,263
22,222	0,174	0,560	-0,012	-0,597	-0,002	0,225	-1,081	1,071	-0,045	-1,098	-0,002	0,261
25,0	0,183	0,557	-0,012	-0,607	-0,002	0,225	-1,210	1,101	-0,047	-1,107	-0,001	0,259
30,303	0,194	0,554	-0,011	-0,619	-0,002	0,226	-1,382	1,142	-0,050	-1,118	-0,001	0,256
40,0	0,210	0,549	-0,011	-0,636	-0,002	0,227	-1,683	1,216	-0,056	-1,136	-0,001	0,252
50,0	0,135	0,564	-0,012	-0,629	-0,002	0,226	-1,722	1,220	-0,056	-1,131	-0,001	0,251

Quadro 3. Coeficientes de  $f(S)$  (7) para sismo afastado e próximo, para terreno do tipo A

$f$ (Hz)	Sismo afastado					Sismo próximo				
	$c_{1,soloA}$	$c_{2,soloA}$	$c_{3,soloA}$	$c_{4,soloA}$	$\sigma_{\epsilon,soloA}$	$c_{1,soloA}$	$c_{2,soloA}$	$c_{3,soloA}$	$c_{4,soloA}$	$\sigma_{\epsilon,soloA}$
0,201	0,029	-0,006	0,000	-0,002	0,000	0,106	-0,022	0,002	-0,017	0,000
0,240	0,027	-0,006	0,000	-0,002	0,000	0,102	-0,022	0,002	-0,015	0,000
0,334	0,022	-0,005	0,000	-0,002	0,000	0,098	-0,023	0,002	-0,012	0,000
0,522	0,016	-0,003	0,000	-0,001	0,000	0,079	-0,019	0,001	-0,010	0,000
0,954	0,016	-0,003	0,000	-0,002	0,000	0,056	-0,013	0,001	-0,008	0,000
1,285	0,029	-0,006	0,000	-0,003	0,000	0,047	-0,009	0,001	-0,009	0,000
1,669	0,026	-0,005	0,000	-0,003	0,001	0,043	-0,007	0,001	-0,010	0,000
1,953	0,034	-0,006	0,001	-0,004	0,001	0,042	-0,006	0,000	-0,011	0,000
2,421	0,050	-0,009	0,001	-0,006	0,001	0,046	-0,005	0,000	-0,014	0,000
3,311	0,089	-0,017	0,001	-0,011	0,003	0,064	-0,004	0,000	-0,021	0,001
3,906	0,121	-0,023	0,002	-0,015	0,004	0,080	-0,004	0,000	-0,027	0,001
5,025	0,188	-0,034	0,003	-0,023	0,007	0,117	-0,006	0,000	-0,039	0,002
6,250	0,265	-0,047	0,004	-0,033	0,012	0,163	-0,008	0,001	-0,050	0,005
7,299	0,332	-0,057	0,005	-0,041	0,017	0,206	-0,012	0,001	-0,056	0,009
8,403	0,393	-0,063	0,005	-0,049	0,026	0,252	-0,016	0,001	-0,058	0,016
9,901	0,432	-0,059	0,005	-0,051	0,043	0,304	-0,021	0,002	-0,050	0,032
12,5	0,471	-0,046	0,003	-0,025	0,080	0,382	-0,027	0,002	-0,009	0,082
14,925	0,537	-0,044	0,003	-0,013	0,079	0,452	-0,040	0,003	0,036	0,082
20,0	0,224	0,044	-0,005	0,102	0,095	0,484	-0,057	0,003	0,162	0,113
22,222	0,256	0,020	-0,004	0,107	0,058	0,501	-0,072	0,004	0,162	0,082
25,0	0,286	-0,002	-0,002	0,081	0,017	0,510	-0,087	0,005	0,134	0,038
30,303	0,259	-0,006	-0,001	0,070	0,008	0,533	-0,099	0,007	0,112	0,022
40,0	0,585	-0,091	0,004	0,050	0,017	0,723	-0,142	0,009	0,094	0,024
50,0	0,638	-0,094	0,005	0,026	0,044	0,732	-0,144	0,009	0,087	0,036

Quadro 4. Coeficientes de  $f(S)$  (7) para sismo afastado e próximo, para terreno do tipo B

$f$ (Hz)	Sismo afastado					Sismo próximo				
	$c_{1,soloB}$	$c_{2,soloB}$	$c_{3,soloB}$	$c_{4,soloB}$	$\sigma_{\varepsilon,soloB}$	$c_{1,soloB}$	$c_{2,soloB}$	$c_{3,soloB}$	$c_{4,soloB}$	$\sigma_{\varepsilon,soloB}$
0,201	0,193	-0,047	0,003	-0,005	0,004	0,227	-0,056	0,004	-0,004	0,007
0,240	0,193	-0,046	0,003	-0,006	0,007	0,227	-0,057	0,004	-0,005	0,008
0,334	0,130	-0,027	0,002	-0,005	0,015	0,230	-0,058	0,004	-0,007	0,013
0,522	-0,045	0,024	-0,002	0,008	0,031	0,143	-0,028	0,002	-0,004	0,036
0,954	0,113	-0,021	0,001	-0,003	0,007	0,092	-0,014	0,000	-0,004	0,012
1,285	0,064	-0,006	0,000	-0,012	0,004	0,107	-0,020	0,001	-0,014	0,002
1,669	0,026	0,007	-0,001	-0,006	0,012	0,080	-0,005	0,000	-0,015	0,012
1,953	0,050	0,002	0,000	-0,005	0,014	0,084	-0,003	0,000	-0,015	0,012
2,421	0,052	0,003	-0,001	-0,006	0,016	0,088	0,000	-0,001	-0,019	0,012
3,311	-0,046	0,034	-0,003	-0,001	0,024	0,119	-0,005	0,000	-0,022	0,010
3,906	-0,002	0,024	-0,002	0,012	0,033	0,088	0,013	-0,002	-0,016	0,019
5,025	-0,066	0,044	-0,004	0,034	0,048	0,083	0,018	-0,002	-0,004	0,032
6,250	-0,034	0,038	-0,004	0,050	0,062	0,102	0,018	-0,003	0,018	0,049
7,299	-0,031	0,042	-0,005	0,059	0,065	0,137	0,008	-0,002	0,038	0,048
8,403	-0,131	0,072	-0,007	0,077	0,071	0,126	0,010	-0,002	0,061	0,048
9,901	-0,262	0,107	-0,010	0,120	0,082	0,087	0,020	-0,003	0,100	0,068
12,5	-0,222	0,094	-0,010	0,161	0,064	0,085	0,020	-0,004	0,141	0,056
14,925	-0,089	0,056	-0,008	0,167	0,050	0,096	0,015	-0,004	0,161	0,037
20,0	0,061	0,018	-0,005	0,144	0,046	0,192	-0,027	-0,001	0,183	0,028
30,303	-0,042	0,036	-0,005	0,141	0,031	0,249	-0,058	0,002	0,185	0,015
40,0	0,011	0,010	-0,003	0,135	0,014	0,335	-0,087	0,004	0,175	0,004
50,0	0,053	-0,001	-0,002	0,124	0,015	0,324	-0,084	0,004	0,166	0,007

Quadro 5. Coeficientes de  $f(S)$  (7) para sismo afastado e próximo, para terreno do tipo C

$f$ (Hz)	Sismo afastado					Sismo próximo				
	$c_{1,soloC}$	$c_{2,soloC}$	$c_{3,soloC}$	$c_{4,soloC}$	$\sigma_{\varepsilon,soloC}$	$c_{1,soloC}$	$c_{2,soloC}$	$c_{3,soloC}$	$c_{4,soloC}$	$\sigma_{\varepsilon,soloC}$
0,201	0,792	-0,194	0,013	-0,006	0,004	0,852	-0,243	0,016	0,058	0,004
0,240	0,846	-0,208	0,014	-0,011	0,006	0,846	-0,240	0,016	0,047	0,004
0,334	0,953	-0,231	0,016	-0,030	0,014	0,842	-0,233	0,017	0,025	0,006
0,522	0,801	-0,172	0,013	-0,057	0,033	0,694	-0,172	0,013	-0,012	0,018
0,954	-0,172	0,124	-0,009	0,017	0,046	0,483	-0,073	0,006	-0,005	0,048
1,285	-0,472	0,206	-0,018	0,098	0,049	0,273	0,009	-0,002	0,034	0,050
1,669	-0,575	0,216	-0,020	0,159	0,057	0,103	0,063	-0,008	0,067	0,062
1,953	-0,634	0,219	-0,021	0,178	0,055	0,027	0,080	-0,009	0,078	0,064
2,421	-0,735	0,231	-0,022	0,190	0,045	-0,083	0,102	-0,011	0,083	0,064
3,311	-1,035	0,299	-0,027	0,205	0,012	-0,177	0,112	-0,012	0,085	0,025
3,906	-1,191	0,333	-0,030	0,231	0,008	-0,223	0,118	-0,013	0,099	0,018
5,025	-1,311	0,347	-0,033	0,291	0,006	-0,325	0,143	-0,016	0,134	0,020
6,250	-1,422	0,360	-0,034	0,329	0,007	-0,344	0,132	-0,015	0,169	0,017
7,299	-1,262	0,305	-0,031	0,351	-0,006	-0,436	0,155	-0,018	0,195	0,008
8,403	-1,124	0,258	-0,028	0,340	-0,014	-0,427	0,139	-0,017	0,204	-0,005
9,901	-1,220	0,276	-0,028	0,340	-0,010	-0,502	0,142	-0,017	0,209	-0,005
12,5	-1,071	0,222	-0,024	0,358	-0,013	-0,545	0,143	-0,018	0,251	-0,007
14,925	-1,116	0,227	-0,024	0,358	-0,014	-0,609	0,143	-0,017	0,266	-0,008
20,0	-1,102	0,214	-0,023	0,362	-0,018	-0,667	0,140	-0,017	0,298	-0,014
30,303	-1,240	0,243	-0,024	0,371	-0,019	-0,708	0,143	-0,016	0,311	-0,018
40,0	-1,336	0,265	-0,025	0,379	-0,019	-0,670	0,135	-0,015	0,317	-0,017
50,0	-1,315	0,262	-0,024	0,369	-0,020	-0,676	0,137	-0,015	0,313	-0,014

Quadro 6 Coeficientes de  $f(S)$  (7) para sismo afastado e próximo, para terreno do tipo D

$f$ (Hz)	Sismo afastado					Sismo próximo				
	$c_{1,soloD}$	$c_{2,soloD}$	$c_{3,soloD}$	$c_{4,soloD}$	$\sigma_{\varepsilon,soloD}$	$c_{1,soloD}$	$c_{2,soloD}$	$c_{3,soloD}$	$c_{4,soloD}$	$\sigma_{\varepsilon,soloD}$
0,201	1,577	-0,403	0,027	0,013	0,017	1,046	-0,279	0,017	0,129	0,015
0,240	1,503	-0,377	0,026	0,008	0,025	1,103	-0,292	0,019	0,103	0,018
0,334	0,999	-0,218	0,015	0,004	0,041	1,171	-0,302	0,022	0,055	0,032
0,522	-0,356	0,191	-0,016	0,078	0,066	0,617	-0,085	0,006	0,026	0,075
0,954	-0,541	0,248	-0,025	0,183	0,012	0,016	0,148	-0,018	0,094	0,021
1,285	-1,453	0,473	-0,042	0,229	0,028	-0,109	0,145	-0,016	0,091	0,036
1,669	-1,949	0,585	-0,051	0,286	0,012	-0,213	0,162	-0,018	0,113	0,029
1,953	-1,963	0,571	-0,052	0,342	0,003	-0,473	0,238	-0,025	0,140	0,006
2,421	-1,301	0,367	-0,039	0,353	0,000	-0,525	0,262	-0,030	0,175	0,010
3,311	-2,052	0,546	-0,051	0,381	0,013	-0,634	0,255	-0,028	0,168	0,002
3,906	-2,279	0,598	-0,057	0,435	0,018	-0,625	0,233	-0,027	0,214	0,013
5,025	-1,520	0,361	-0,041	0,464	-0,017	-0,674	0,251	-0,032	0,271	-0,024
6,250	-1,514	0,335	-0,040	0,495	-0,013	-0,900	0,293	-0,035	0,300	-0,022
7,299	-1,301	0,263	-0,034	0,488	-0,019	-0,892	0,271	-0,034	0,323	-0,020
8,403	-1,438	0,292	-0,035	0,466	-0,026	-0,868	0,234	-0,030	0,327	-0,024
9,901	-1,243	0,227	-0,030	0,480	-0,032	-0,948	0,251	-0,032	0,359	-0,026
12,5	-1,411	0,265	-0,032	0,470	-0,037	-1,015	0,240	-0,029	0,371	-0,029
14,925	-1,467	0,274	-0,032	0,467	-0,042	-0,994	0,214	-0,027	0,391	-0,036
20,0	-1,726	0,339	-0,035	0,465	-0,044	-1,175	0,242	-0,028	0,403	-0,041
30,303	-1,994	0,408	-0,039	0,477	-0,044	-1,276	0,273	-0,029	0,406	-0,042
40,0	-2,113	0,438	-0,041	0,488	-0,044	-1,176	0,251	-0,026	0,414	-0,041
50,0	-2,100	0,439	-0,041	0,478	-0,044	-1,186	0,258	-0,027	0,408	-0,038

 Quadro 7. Coeficientes de  $f(S)$  (7) para sismo afastado e próximo, para terreno do tipo E

$f$ (Hz)	Sismo afastado					Sismo próximo				
	$c_{1,soloE}$	$c_{2,soloE}$	$c_{3,soloE}$	$c_{4,soloE}$	$\sigma_{\varepsilon,soloE}$	$c_{1,soloE}$	$c_{2,soloE}$	$c_{3,soloE}$	$c_{4,soloE}$	$\sigma_{\varepsilon,soloE}$
0,201	0,510	-0,118	0,008	-0,020	0,003	0,893	-0,260	0,019	0,017	0,005
0,240	0,529	-0,124	0,008	-0,021	0,003	0,872	-0,254	0,018	0,013	0,004
0,334	0,574	-0,136	0,009	-0,029	0,006	0,840	-0,244	0,018	0,005	0,004
0,522	0,551	-0,125	0,009	-0,046	0,011	0,676	-0,190	0,014	-0,013	0,004
0,954	0,469	-0,084	0,007	-0,073	0,027	0,658	-0,172	0,014	-0,035	0,011
1,285	0,227	-0,003	0,001	-0,066	0,042	0,638	-0,153	0,013	-0,043	0,024
1,669	-0,211	0,118	-0,008	-0,009	0,060	0,560	-0,116	0,010	-0,032	0,050
1,953	-0,343	0,152	-0,012	0,044	0,072	0,455	-0,071	0,006	-0,012	0,076
2,421	-0,440	0,173	-0,015	0,119	0,076	0,351	-0,023	0,001	0,028	0,090
3,311	-0,493	0,172	-0,017	0,207	0,069	0,174	0,042	-0,006	0,088	0,080
3,906	-0,615	0,196	-0,019	0,230	0,060	0,094	0,057	-0,008	0,107	0,062
5,025	-0,834	0,241	-0,023	0,256	0,059	-0,047	0,082	-0,009	0,126	0,055
6,250	-0,943	0,259	-0,024	0,277	0,060	-0,157	0,102	-0,011	0,148	0,057
7,299	-1,041	0,277	-0,026	0,303	0,053	-0,202	0,105	-0,011	0,167	0,050
8,403	-1,035	0,267	-0,026	0,337	0,049	-0,261	0,118	-0,013	0,192	0,053
9,901	-0,874	0,216	-0,023	0,342	0,025	-0,257	0,112	-0,013	0,209	0,036
12,5	-0,891	0,210	-0,022	0,343	-0,002	-0,308	0,107	-0,013	0,226	-0,001
14,925	-0,811	0,183	-0,020	0,342	-0,007	-0,322	0,101	-0,012	0,245	-0,007
20,0	-0,807	0,176	-0,019	0,345	-0,008	-0,396	0,106	-0,013	0,273	-0,010
30,303	-0,766	0,159	-0,017	0,361	-0,012	-0,352	0,088	-0,011	0,305	-0,014
40,0	-0,811	0,166	-0,017	0,367	-0,013	-0,280	0,067	-0,009	0,314	-0,015
50,0	-0,763	0,155	-0,016	0,360	-0,014	-0,285	0,069	-0,010	0,312	-0,012

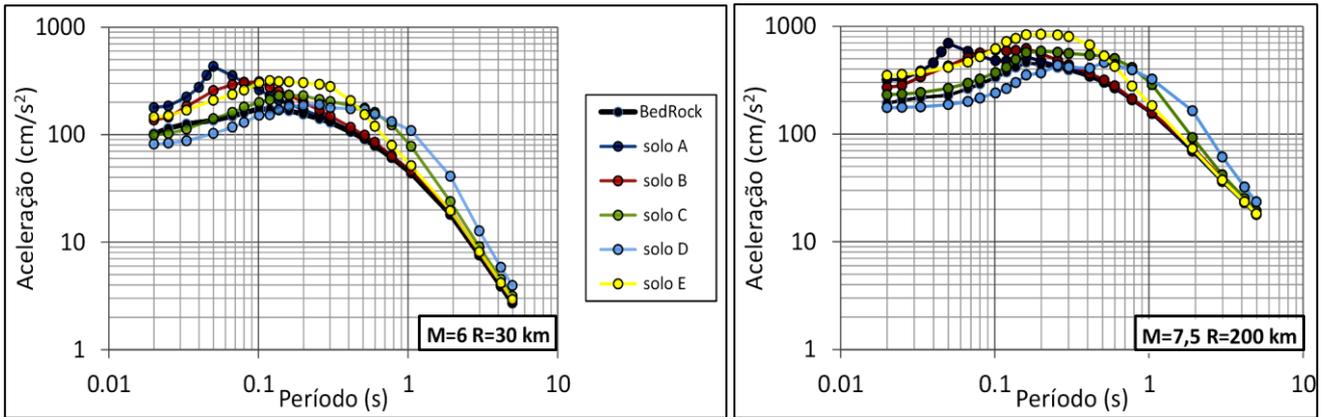


Figura 4. Valores espectrais de aceleração, para os solos tipo A a E do EC8, considerando as leis de atenuação para o sismo próximo (esquerda) e sismo afastado (direita) para um evento de  $M = 6$  e  $R = 30$  km e de  $M = 7,5$  e  $R = 200$  km.

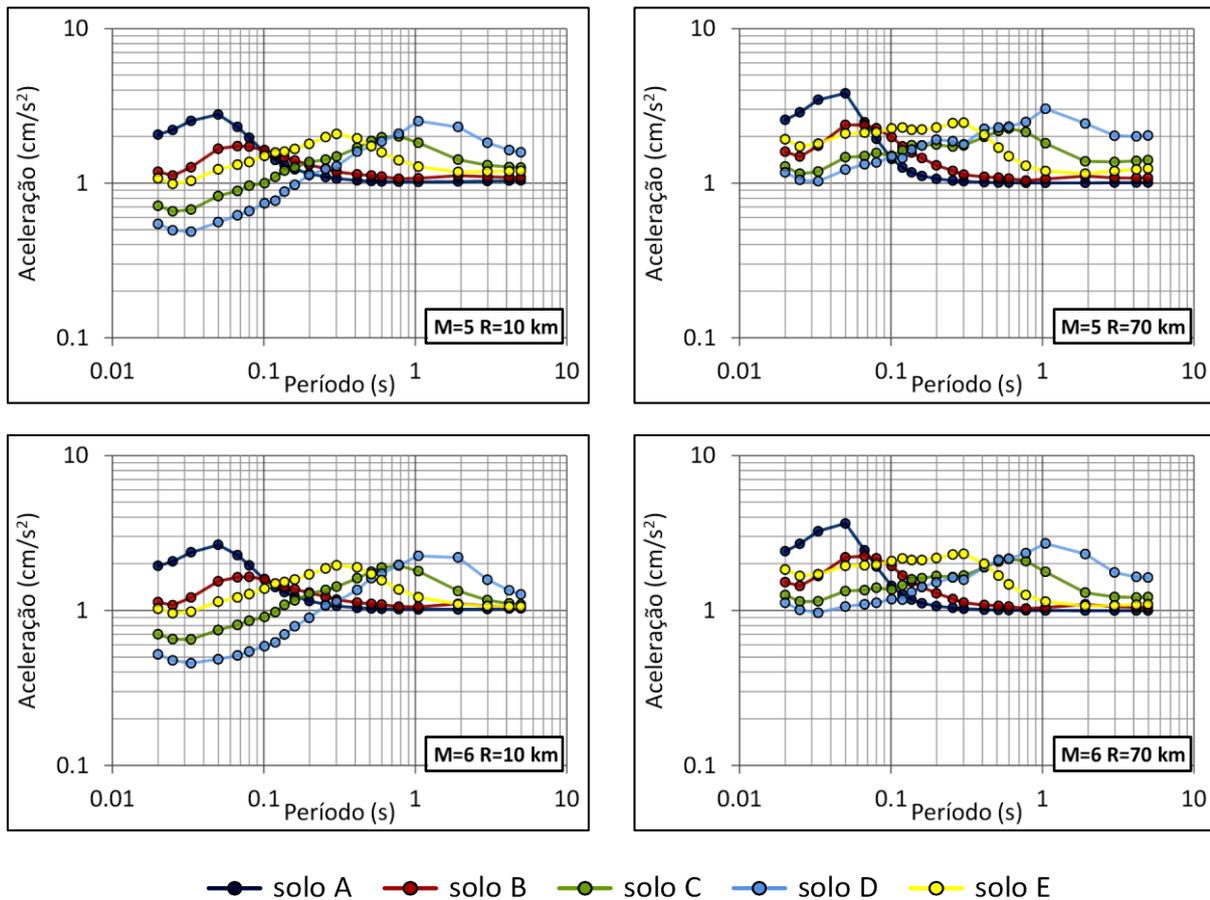


Figura 5. Valores residuais de aceleração, em relação à aceleração no substrato rochoso, para os solos tipo A a E do EC8, considerando a lei de atenuação obtida para o sismo próximo, para eventos de magnitudes 5 e 6 e distâncias 10 e 70 km.

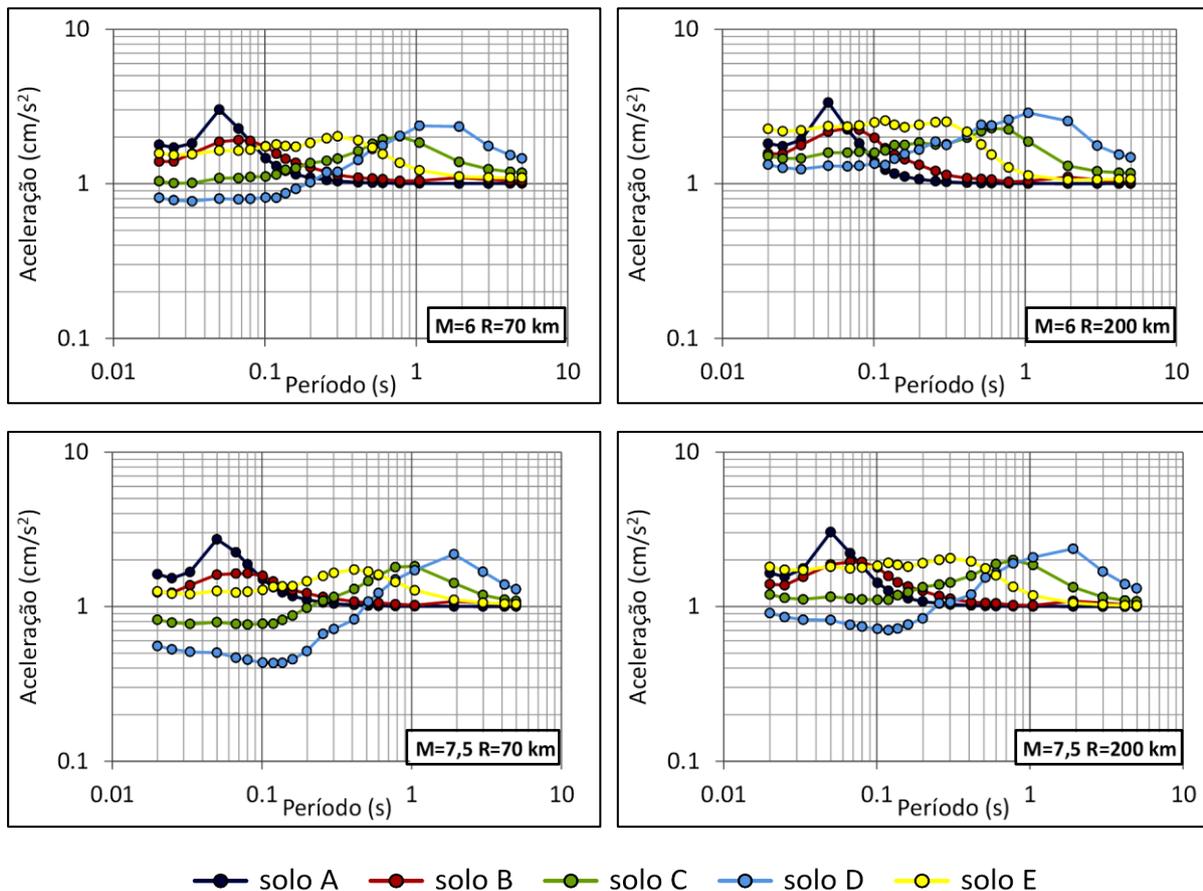


Figura 6. Valores residuais de aceleração, em relação à aceleração no substrato rochoso, para os solos tipo A a E do EC8, considerando a lei de atenuação obtida para o sismo afastado, para magnitudes 6 e 7,5 e distâncias de 70 e 200 km.

Verifica-se que, para os tipos de terreno mais brandos (tipo C e D), existe uma amplificação do movimento do solo para períodos superiores, e que, para os tipos de terreno mais rígidos (tipo A e B), existe uma amplificação para os baixos períodos, de acordo com o período fundamental do solo que é maior para solos mais brandos.

A não linearidade do comportamento dos solos é bem patente, sendo de maior relevância o facto dos solos mais brandos atenuarem os valores da aceleração para os baixos períodos. Este efeito é mais visível nos solos brandos para as magnitudes mais elevadas, para a mesma distância, e para distâncias mais curtas, para a mesma magnitude. Os solos mais rígidos mantêm sempre o mesmo tipo de comportamento, para qualquer magnitude ou distância, amplificando os baixos períodos.

#### 4. COMENTÁRIOS FINAIS

O guia de recomendações norte-americano [11] afirma que em zonas de baixa ou moderada sismicidade, os modelos de base sísmológica são vias aconselhadas para a obtenção dos valores de aceleração espectral para a região.

Naturalmente que a principal virtude da utilização desta metodologia, nomeadamente para Portugal Continental, reside no facto das previsões dos conteúdos espectrais dos movimentos sísmicos intensos se estenderem às magnitudes e distâncias de interesse para a engenharia de estruturas (períodos de retorno entre 475 anos e 10000 anos), colmatando assim as deficiências existentes na base de dados da região.

Assim, com a base de dados sintética, resultante da simulação dos movimentos intensos do solo para uma grelha de magnitudes, distâncias e frequências para dois cenários diferentes (cenário próximo e afastado, representativos da ação tipo 2 e tipo 1 do EC8), foram obtidas leis de atenuação espectrais regionais distintas para os dois ambientes sísmicos, para Portugal Continental, para o substrato rochoso.

A análise dinâmica de estruturas geotécnicas, em particular sob a ação dos sismos, constitui, igualmente, um aspeto importante do dimensionamento estrutural. Assim, foram reunidos 172 perfis geotécnicos da área metropolitana de Lisboa e do distrito de Algarve e, tendo sido posteriormente classificados de acordo com os tipos de terreno definidos no Anexo Nacional do Eurocódigo 8, modelou-se a resposta das camadas de solo com uma abordagem estocástica na aplicação do método linear equivalente. Obteve-se, desta forma, uma base de dados sintética de movimentos intensos do solo à superfície, permitindo a obtenção de leis de atenuação espectral.

É essencial comparar a lei de atenuação aqui apresentada com registos obtidos na rede sísmica nacional. Pese embora a escassez de dados, o cruzamento dos registos sísmicos com o conhecimento do tipo de terreno onde está localizada a estação sísmica e a comparação dos valores reais com a aplicação das leis obtidas será um dos trabalhos futuros, bem como a classificação dos perfis geotécnicos segundo outros critérios [12].

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projecto “PRISE- Avaliação de perdas e risco sísmico dos edifícios em Portugal” (PTDC/ECM-EST/3062/2012).

## REFERÊNCIAS

- [1] Rodrigues, I., Sousa, M.L., Carvalho, A., Carrilho, F. – *Parâmetros das leis de Frequência-Magnitude para as Novas Zonas de Sismogénese Delineadas para a Região do Algarve*. APMG, 6º Simpósio de Meteorologia e Geofísica / 10º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia, Costa da Caparica, Portugal; 2009.
- [2] Carvalho, A. – *Modelação estocástica da ação sísmica em Portugal Continental*. Dissertação de doutoramento, Instituto Superior Técnico, 2007.
- [3] 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 Quakidade, Portugal, 2010.
- [4] Sousa, M. L.; Carvalho, A.; Bilé Serra, J. P.; Martins, A.; Mateus, M. - *Estudo do risco sísmico e de tsunamis do Algarve (ESRTA), Relatório Final*; LNEC, 295/2008 – NESDE.
- [5] Cansado Carvalho, E. C.; Campos Costa, A.; Sousa, M. L.; Martins, A. – *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 LNEC, 280/2002.
- [6] Kramer, S.L. – *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc. 1996.
- [7] Darendeli, M. B. – *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. The University of Texas at Austin; 2001.
- [8] Bilé Serra, J. P.; Saraiva Caldeira, L. M. M. – *Resposta sísmica de camadas de solo por meio de uma abordagem estocástica*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, nº81, 1997.
- [9] Campos Costa, A., Sousa, M.L., Carvalho, A., Bilé Serra, J., Martins, A. e Carvalho, E.C. - *Simulador de cenários sísmicos integrado num sistema de informação geográfica*. 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, 2004, Guimarães. pp. 455- 464
- [10] Delfim, R.; Rodrigues, J.; Gomes, R.; Carvalho, A. – *Estudo da resposta sísmica local na área metropolitana de Lisboa e na região do Algarve*. 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 2014, Lisboa.
- [11] SSHAC - *Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis. Guidance on uncertainty and use of experts*. Lawrence Livermore Nat. Lab.; Report NUREG/CR-6372 – Report UCRL-ID-122160; Vol. I; Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC); Livermore, 1997.
- [12] Pitilakis, K.; Riga, E.; Anastasiadis, A. – *New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database*. Springer Science + Business Media Dordrecht; 2013.