

## Equações de Previsão dos Movimentos Sísmicos à Superfície para o Arquipélago dos Açores



Nuno Malfeito

Estudante  
DEC-FCT/UNL  
Caparica  
nunomalfeito@hotmail.com



Alexandra Carvalho

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



João Bilé Serra

Investigador Principal  
DG/CH - LNEC  
Lisboa  
biles@lnec.pt

### SUMÁRIO

Utilizam-se modelos estocásticos para a simulação dos movimentos sísmicos intensos do solo para construção de uma base de dados sintética de registos que se crêem representativos dos movimentos do solo no Arquipélago dos Açores, no substrato rochoso.

De modo a considerar a influência das condições locais do terreno, foram considerados: (i) perfis geotécnicos sintéticos, para cada tipo de terreno do Anexo Nacional do Eurocódigo 8, (ii) o modelo de propagação vertical de ondas S com polarização horizontal associado a uma coluna estratigráfica com interface inferior materializada por um semi-espaco elástico rochoso e (iii) o método linear equivalente para considerar de forma aproximada a resposta não linear dos solos.

Tais simulações permitiram criar uma base de dados sintética de registos sísmicos à superfície, para as gamas de frequência, magnitude e distância hipocentral de interesse para a engenharia, permitindo a elaboração de equações de previsão dos movimentos do solo, para os diferentes tipos de terreno referidos no Anexo Nacional do EC8, para o Arquipélago dos Açores.

**Palavras-chave:** Movimentos à Superfície nos Açores, Propagação unidimensional de Energia Sísmica, Coeficientes de Atenuação, Equações de Previsão de Movimentos.

## 1. INTRODUÇÃO

A amplitude dos movimentos intensos do solo em eventos futuros é geralmente estimada usando fórmulas empíricas, chamadas de leis de atenuação, mais adequadamente denominadas de equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo. Estas equações, cujos coeficientes para as várias frequências são obtidos através de regressões multi-lineares de mínimos quadrados, prevêem aquela amplitude como função de variáveis explicativas como a magnitude, distância, e, por vezes, classificação de terrenos superficiais e mecanismos de falha. Incluem ainda uma parcela de desvio entre os resultados observados e os correspondentes resultados estimados.

Segundo diversas recomendações para a análise probabilística da perigosidade sísmica (por exemplo, [1]) os estudos de perigosidade sísmica devem ser efectuados considerando leis espectrais de previsão e não apenas um valor de pico do movimento sísmico (exemplo, PGA). Esta recomendação baseia-se no facto de um estudo espectral ser a única maneira de captar a contribuição das várias fontes sísmicas para a perigosidade para frequências de diferentes sistemas estruturais. Implica, no entanto, um estudo de perigosidade sísmica para a gama relevante de frequências.

Para estudos de perigosidade sísmica interessam fundamentalmente os movimentos do solo gerados por sismos de magnitude mínima de 5,5. Devido à inexistência de registos com as magnitudes de interesse em Portugal, e em particular no Arquipélago dos Açores, não é possível desenvolver leis espectrais de previsão a partir de regressões aos dados reais. Assim, a previsão da amplitude dos movimentos intensos do solo para o nosso País tem sido realizada com recurso a:

- a) relações em que a intensidade macrossísmica é a variável dependente, o que impossibilita o estudo espectral e obriga à utilização de leis empíricas para a conversão das intensidades macrossísmicas em parâmetros de movimento do solo, limitados a PGA ou PGV;
- b) relações de carácter empírico validadas noutras regiões, sem contudo ser possível, devido à falta de registos, avaliar o modelo utilizado.

À falta de um julgamento quantitativo das leis utilizadas, pelo menos para a gama de magnitudes e distâncias de interesse, a perigosidade sísmica é feita, frequentemente, apenas em termos de PGA e a decisão de utilizar um modelo em detrimento de outro fica sujeita à sensibilidade do autor de cada estudo, o que se traduz em incertezas importantes nos resultados numéricos obtidos em cada estudo.

Seguindo a recomendação efectuada em [1], de utilização de modelos de base sismológica para a obtenção dos valores de aceleração espectral, quando a falta de registos numa região inviabiliza uma compreensão credível da ação sísmica, foram desenvolvidos anteriormente para Portugal Continental [2,3] modelos estocásticos, não-estacionários, que consideram os processos físicos de geração e propagação da energia sísmica desde a fonte até ao local, com consideração da geometria da falha, do processo de rotura na fonte sísmica e das características de impedância do meio de propagação. Recentemente, foi realizado um estudo

[4] para o conhecimento desses processos na região dos Açores, obtendo-se os parâmetros necessários para a utilização do modelo estocástico de falha-finita na simulação dos movimentos sísmicos intensos para o Arquipélago dos Açores.

Nesta comunicação, recorre-se a esses modelos para a simulação dos movimentos intensos do solo para uma grelha de magnitudes, distâncias e frequências de interesse, criando-se uma base de dados constituída por registos sintéticos, desejavelmente representativos dos movimentos sísmicos em substrato rochoso no Arquipélago dos Açores, suprimindo-se deste modo a escassez de dados regionais. A base de dados permitiu elaborar leis de previsão espectrais regionais para o substrato rochoso.

É importante referir que o método estocástico tem sido usado para estimar leis de previsão dos movimentos sísmicos do solo para diferentes regiões [5,6,7]. Em [7] foi concluído que a metodologia estocástica é uma metodologia robusta para a previsão das amplitudes dos movimentos do solo para magnitudes entre 4 e 8, para distâncias de 1 até duas centenas de quilómetros da fonte sísmica (gama de magnitudes e distâncias da base de dados utilizada nesse estudo).

De modo a considerar a influência das condições locais do terreno, e mais uma vez confrontados com a escassez de perfis geotécnicos para a zona em estudo, foram considerados 200 perfis geotécnicos sintéticos [8] para cada tipo de terreno preconizado no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 [9], perfazendo um total de 1200 perfis estocásticos. Estes perfis pretendem representar as sequências estratigráficas da geologia da região.

Para a propagação das ondas sísmicas, desde o substrato rochoso até ao topo do terreno, adoptou-se o modelo simplificado de propagação vertical de ondas S com polarização horizontal associado a uma coluna estratigráfica com interface inferior materializada por um semi-espaço elástico rochoso e o método linear equivalente para consideração da resposta não linear dos solos [10].

Tais simulações permitiram criar uma base de dados sintética de registos de movimentos horizontais sísmicos à superfície, permitindo a elaboração de equações de previsão dos movimentos do solo para o Arquipélago dos Açores, para os diferentes tipos de terreno caracterizados no Anexo Nacional do EC8. As frequências analisadas (Quadro 1) contemplam as frequências fundamentais do parque habitacional dos Açores (1 – 10 Hz) [11,12] e as frequências fundamentais encontradas para diversos tipos de terreno (0,52 – 7 Hz) [11,12,13].

Quadro 1 – Tabela de Frequências [Hz]

0,17	0,24	0,33	0,52	0,95	1,28	1,67	1,96	2,44	3,33	4,17
5	5,88	6,25	6,67	10	12,5	14,29	16,67	20	33,33	50

## 2. SIMULAÇÃO DE EVENTOS SÍSMICOS À SUPERFÍCIE

Para a ação sísmica no substrato rochoso, foi considerada a base sintética de dados de aceleração, obtida com o modelo estocástico de falha-finita [2,3] considerando os parâmetros regionais obtidos para a região dos Açores [4].

A base de dados de aceleração no substrato rochoso é constituída por espectros de aceleração horizontal resultantes de simulações de eventos sísmicos cujas magnitudes se encontram compreendidas entre 4,1 e 7,5, com incrementos de 0,2, e para distâncias hipocentrais entre 1 e 400 km.

Para a região dos Açores, a informação disponível para os autores não contempla um número suficiente de sequências estratigráficas reais para a avaliação da ação sísmica à superfície pelo que se utilizaram os perfis geotécnicos apresentados em [8], caracterizando seis tipos de sequências estratigráficas que pretendem representar a variabilidade estratigráfica na região.

A informação acerca das propriedades dos materiais constituintes dos estratos que constituem cada um dos tipos de colunas permitiu em [8] a elaboração de 200 unidades de colunas para cada um dos tipos de terreno, obtendo-se assim uma base de dados de 1200 colunas de solo. A simulação de movimentos à superfície do terreno é efetuada com recurso a uma abordagem estocástica, do modelo de propagação vertical de ondas de corte [10], em que o cálculo de função de transferência entre a base e o topo da coluna de solo permite obter a resposta em aceleração, no topo da coluna uma vez conhecido o espectro de potência da ação no substrato rochoso. Este modelo de propagação vertical de ondas de corte está inserido no LNECloss [14], ferramenta computacional utilizada na elaboração desta comunicação.

Para cada sequência estratigráfica considerada foi tomado cada um dos eventos sísmicos da base sintética de dados no substrato rochoso. A respetiva resposta em aceleração superficial horizontal do terreno foi calculada, resultando numa base de dados sintética, constituída por valores espectrais de aceleração à superfície para cada tipo de terreno considerado como representativo dos solos do Arquipélago dos Açores.

De modo a reduzir a dispersão do conjunto de resultados, que possa ser causada por algumas das colunas de solo construídas apresentarem uma resposta excessiva, foi calculado o conteúdo espectral de cada um dos registos de aceleração à superfície, para cada tipo de solo, e ordenados os registos por ordem ascendente para posterior remoção dos espectros que representem variações excessivas, sem, no entanto, colocar em causa a variabilidade intrínseca dos resultados. Após avaliação de *outliers*, foi considerado adequado tomar um quantilho bilateral de 5% para a percentagem de registos a eliminar (Figura 1), resultando na diminuição da dispersão, comprovada pela redução do valor do desvio padrão (Quadro 2, exemplo para o conjunto de espectros do terreno tipo II, para um evento caracterizado por um par magnitude-distância). A aplicação desta metodologia a cada conjunto de 200 espectros de aceleração à superfície, relativos a cada par magnitude-distância hipocentral, resulta em subconjuntos de 190 espectros para cada tipo de terreno.

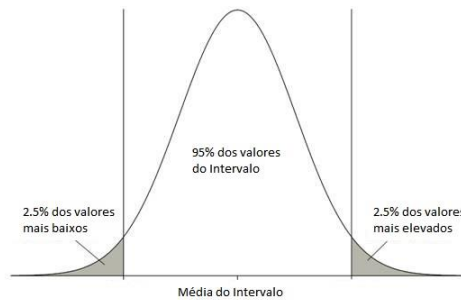


Figura 1 – Distribuição Normal de Probabilidade com eliminação dos Extremos

Quadro 2 – Caracterização estatística da amostra (conteúdo espectral das colunas de solo do terreno do tipo II) antes e após remoção de *outliers*

	Antes da remoção	Após remoção
Dimensão	200	190
Média, $\mu$	188,410	188,412
Desvio Padrão, $\sigma$	7,304	6,286
Coef. de variação, $\sigma/\mu$	3,9%	3,3%

### 3. CÁLCULO DOS COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES DE PREVISÃO DO MOVIMENTO SÍSMICO DO SOLO

A relação funcional para traduzir a amplitude dos movimentos sísmicos do solo num dado local, dado a ocorrência de um evento de magnitude  $M$  a uma distância  $R$  da fonte, assume uma forma genérica do tipo

$$\log Y = c_1 + f_1(M) + f_2(R) + f_3(P) + \varepsilon \quad (1)$$

sendo

$Y$  a intensidade do movimento do solo que se pretende prever (exemplo, aceleração espectral, valores de pico da aceleração, velocidade ou deslocamento);

$\varepsilon$  uma variável aleatória que reflecte a natureza imprevisível 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  $\sigma_\varepsilon^2$ .

e em que

$f_1(M)$  considera a variação da amplitude do movimento do solo com a energia libertada na fonte sísmica;

$f_2(R)$  tem em conta a variação da amplitude do movimento do solo com a distância do local à fonte sísmica, sendo composta, normalmente, por dois termos que consideram a

atenuação geométrica ( $\log Y$  é proporcional a  $\log R$ ) e a atenuação inelástica ( $\log Y$  é proporcional a  $R$ );

$f_3(P)$  representa a função relacionada com as características da fonte e/ou efeitos locais e normalmente utiliza valores 0, 1 e 2 para as diferentes classes de terreno ou diferentes tipos de falhas. Atualmente começam já a aparecer expressões que traduzem os efeitos não lineares dos solos [5].

Neste estudo, a relação funcional considerada para as equações de previsão da média geométrica da componente horizontal da aceleração, para os Açores, é a já considerada para Portugal Continental [15] e assume, para cada tipo de terreno, a forma da expressão (2):

$$\log[A(f)] = C_1(f) + C_2(f)M + C_3(f)M^2 + C_4(f)\log R + C_5(f)R + \sigma_\varepsilon \quad (2)$$

sendo  $A(f)$  a ordenada espectral de aceleração em  $\text{cm/s}^2$ , para a frequência,  $f$ ,  $M$  a magnitude do evento,  $R$  a distância hipocentral, em km, e  $\sigma$  o desvio em relação ao valor previsto pelo modelo de atenuação ajustado.

Os coeficientes,  $C_i$ , foram estimados por meio de regressões multi-lineares, sobre as bases de dados sintéticas dos espectros de aceleração no substrato rochoso e no topo de colunas de solo, para o conjunto de frequências já apresentado no Quadro 1.

O processo de análise foi otimizado fazendo-se recurso de variáveis condicionais, conotadas como variáveis "Dummy", as quais apresentam a forma da expressão (3), na qual  $\beta$  é um coeficiente que é igual a zero quando o tipo de terreno não corresponde ao tipo de terreno para o qual se calcula a regressão e igual a 1 no caso contrário como expresso na expressão (4) e  $C_j$  corresponde ao coeficiente quando se considera o terreno tipo  $j$ .

$$C_i = \sum_{j=0}^6 \beta_j \cdot C_j \quad (3)$$

$$\beta_j = \begin{cases} 1, & \text{para o terreno tipo } j \\ 0, & \text{nos casos contrários} \end{cases} \quad (4)$$

sendo  $i$  o índice do coeficiente, variando de 1 a 5 (expressão 2) e  $j$  o tipo de terreno, variando de 0 a 6, com  $j=0$  quando se trata do substrato rochoso.

### 3.1 Resultados Obtidos

O Quadro 3 apresenta os coeficientes estimados para o substrato rochoso e os Quadros 4 a 9, os valores dos coeficientes estimados para os diferentes tipos de terreno.

**Quadro 3 – Coeficientes para o substrato rochoso**

Frequência [Hz]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	σ <sub>ε</sub>
0,17	-8,5201	2,0699	-0,0787	-0,4564	-0,0031	0,2273
0,24	-8,6461	2,2166	-0,0941	-0,3827	-0,0035	0,2278
0,33	-8,8140	2,4473	-0,1222	-0,2620	-0,0043	0,2297
0,52	-8,3372	2,4531	-0,1302	-0,2255	-0,0048	0,2355
0,95	-7,0411	2,2687	-0,1261	-0,2066	-0,0056	0,2472
1,28	-5,9815	2,0261	-0,1105	-0,2255	-0,0060	0,2540
1,67	-4,9286	1,7622	-0,0921	-0,2443	-0,0063	0,2617
1,96	-4,2214	1,5776	-0,0786	-0,2631	-0,0066	0,2659
2,44	-3,3382	1,3443	-0,0613	-0,2915	-0,0068	0,2724
3,33	-2,1834	1,0375	-0,0380	-0,3462	-0,0072	0,2824
4,17	-1,5074	0,8588	-0,0240	-0,3929	-0,0074	0,2890
5	-0,9966	0,7265	-0,0134	-0,4430	-0,0075	0,2956
5,88	-0,7064	0,6569	-0,0078	-0,4877	-0,0075	0,2996
6,25	-0,5441	0,6202	-0,0047	-0,5195	-0,0075	0,3023
6,67	-0,4177	0,5932	-0,0024	-0,5510	-0,0075	0,3048
10	-0,0539	0,5374	0,0032	-0,7176	-0,0071	0,3147
12,5	-0,0819	0,5730	0,0011	-0,8152	-0,0067	0,3171
14,29	-0,2287	0,6256	-0,0027	-0,8668	-0,0064	0,3162
16,67	-0,3655	0,6648	-0,0056	-0,8849	-0,0063	0,3146
20	-0,6024	0,7244	-0,0099	-0,8916	-0,0061	0,3108
33,33	-1,5815	0,9032	-0,0233	-0,7378	-0,0059	0,2939
50	-1,6389	0,9120	-0,0240	-0,7250	-0,0060	0,2932

**Quadro 4 – Coeficientes para o terreno do tipo I**

Frequência [Hz]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	σ <sub>ε</sub>
0,17	-7,8327	2,1244	-0,0871	-0,8472	-0,0021	0,2342
0,24	-8,0511	2,3020	-0,1049	-0,7770	-0,0024	0,2353
0,33	-8,3832	2,5270	-0,1296	-0,6708	-0,0030	0,2372
0,52	-7,9375	2,5664	-0,1425	-0,5765	-0,0038	0,2426
0,95	-6,7916	2,4184	-0,1407	-0,5340	-0,0048	0,2533
1,28	-5,7522	2,1829	-0,1255	-0,5426	-0,0052	0,2583
1,67	-4,6819	1,9217	-0,1072	-0,5615	-0,0056	0,2657
1,96	-4,0079	1,7528	-0,0949	-0,5746	-0,0059	0,2705
2,44	-3,1083	1,5112	-0,0767	-0,5688	-0,0063	0,2769
3,33	-2,0441	1,1975	-0,0532	-0,4665	-0,0072	0,2935
4,17	-1,3865	0,9639	-0,0372	-0,2884	-0,0078	0,3086
5	-0,6734	0,7026	-0,0208	-0,1392	-0,0078	0,2990
5,88	-0,3044	0,5727	-0,0119	-0,1523	-0,0075	0,2942
6,25	-0,2038	0,5351	-0,0086	-0,1993	-0,0074	0,2949
6,67	-0,1914	0,5280	-0,0072	-0,2596	-0,0072	0,2926
10	-0,4784	0,6059	-0,0098	-0,4513	-0,0067	0,2797
12,5	-0,6972	0,6644	-0,0135	-0,4859	-0,0065	0,2781
14,29	-0,7902	0,6895	-0,0151	-0,5006	-0,0064	0,2776
16,67	-0,8271	0,6997	-0,0158	-0,5079	-0,0064	0,2774
20	-0,8592	0,7093	-0,0163	-0,5167	-0,0064	0,2773
33,33	-0,8457	0,7119	-0,0163	-0,5392	-0,0062	0,2783
50	-0,8202	0,7069	-0,0159	-0,5434	-0,0062	0,2783

Quadro 5 – Coeficientes para o terreno do tipo II

Frequência [Hz]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	σ <sub>ε</sub>
0,17	-7,7791	2,1205	-0,0867	-0,8735	-0,0020	0,2348
0,24	-8,0084	2,2977	-0,1045	-0,7961	-0,0024	0,2357
0,33	-8,3458	2,5209	-0,1291	-0,6831	-0,0030	0,2375
0,52	-7,9071	2,5565	-0,1418	-0,5780	-0,0038	0,2424
0,95	-6,8053	2,4067	-0,1400	-0,5091	-0,0048	0,2519
1,28	-5,7943	2,1689	-0,1248	-0,5004	-0,0053	0,2561
1,67	-4,7299	1,9025	-0,1063	-0,5126	-0,0056	0,2626
1,96	-4,0372	1,7279	-0,0938	-0,5327	-0,0058	0,2665
2,44	-3,0512	1,4735	-0,0749	-0,5694	-0,0061	0,2709
3,33	-1,6865	1,1366	-0,0494	-0,6488	-0,0064	0,2803
4,17	-0,8055	0,9321	-0,0337	-0,7112	-0,0066	0,2911
5	-0,1110	0,7710	-0,0212	-0,7259	-0,0069	0,3119
5,88	0,2735	0,6763	-0,0142	-0,6866	-0,0072	0,3353
6,25	0,4831	0,6146	-0,0099	-0,6370	-0,0073	0,3404
6,67	0,6403	0,5643	-0,0064	-0,6027	-0,0074	0,3301
10	1,0329	0,4138	0,0053	-0,6740	-0,0071	0,3286
12,5	0,9379	0,4323	0,0047	-0,7860	-0,0066	0,3039
14,29	0,9402	0,4329	0,0051	-0,8382	-0,0064	0,2987
16,67	1,0035	0,4148	0,0067	-0,8531	-0,0063	0,3000
20	1,0903	0,3812	0,0093	-0,8555	-0,0062	0,3025
33,33	0,4945	0,4995	0,0005	-0,8121	-0,0061	0,2905
50	0,4660	0,5014	0,0003	-0,8030	-0,0061	0,2898

Quadro 6 – Coeficientes para o terreno do tipo III

Frequência [Hz]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	σ <sub>ε</sub>
0,17	-7,5597	2,0425	-0,0810	-0,8425	-0,0021	0,2349
0,24	-7,7807	2,2222	-0,0989	-0,7765	-0,0024	0,2359
0,33	-8,1247	2,4545	-0,1240	-0,6786	-0,0030	0,2380
0,52	-7,7169	2,5141	-0,1382	-0,6017	-0,0038	0,2441
0,95	-6,5761	2,3834	-0,1373	-0,5851	-0,0048	0,2573
1,28	-5,6397	2,1649	-0,1233	-0,5552	-0,0054	0,2638
1,67	-4,7340	1,9224	-0,1066	-0,4957	-0,0060	0,2749
1,96	-4,1734	1,7616	-0,0953	-0,4422	-0,0065	0,2840
2,44	-3,3741	1,5102	-0,0773	-0,3304	-0,0071	0,3011
3,33	-2,0755	1,0802	-0,0487	-0,1003	-0,0076	0,3355
4,17	-1,0819	0,7583	-0,0286	0,0037	-0,0073	0,3234
5	-0,5444	0,5804	-0,0162	-0,0187	-0,0070	0,3117
5,88	-0,4234	0,5401	-0,0120	-0,0889	-0,0069	0,3104
6,25	-0,4206	0,5373	-0,0108	-0,1370	-0,0069	0,3031
6,67	-0,4665	0,5501	-0,0107	-0,1822	-0,0069	0,2931
10	-0,7207	0,6268	-0,0137	-0,3088	-0,0067	0,2757
12,5	-0,7655	0,6392	-0,0141	-0,3312	-0,0067	0,2768
14,29	-0,5414	0,5722	-0,0089	-0,3377	-0,0066	0,2812
16,67	-0,4246	0,5365	-0,0062	-0,3415	-0,0066	0,2822
20	-0,4275	0,5346	-0,0059	-0,3489	-0,0065	0,2813
33,33	-1,0377	0,6815	-0,0167	-0,3052	-0,0066	0,2743
50	-1,0865	0,6921	-0,0174	-0,3005	-0,0066	0,2738



**Quadro 7 – Coeficientes para o terreno do tipo IV**

Frequência [Hz]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	σ <sub>ε</sub>
0,17	-7,8903	2,1438	-0,0885	-0,8507	-0,0021	0,2344
0,24	-8,1094	2,3213	-0,1063	-0,7799	-0,0024	0,2354
0,33	-8,4406	2,5457	-0,1310	-0,6725	-0,0030	0,2374
0,52	-7,9856	2,5821	-0,1437	-0,5769	-0,0038	0,2426
0,95	-6,8271	2,4311	-0,1417	-0,5327	-0,0048	0,2533
1,28	-5,7667	2,1942	-0,1265	-0,5469	-0,0052	0,2587
1,67	-4,6782	1,9329	-0,1082	-0,5705	-0,0056	0,2662
1,96	-3,9913	1,7634	-0,0960	-0,5852	-0,0058	0,2708
2,44	-3,0627	1,5202	-0,0778	-0,5858	-0,0062	0,2766
3,33	-1,9215	1,2011	-0,0542	-0,5192	-0,0069	0,2874
4,17	-1,2311	0,9857	-0,0390	-0,4536	-0,0072	0,2889
5	-0,6968	0,8120	-0,0261	-0,4584	-0,0072	0,2888
5,88	-0,4114	0,7233	-0,0190	-0,5034	-0,0071	0,2908
6,25	-0,2657	0,6768	-0,0152	-0,5290	-0,0071	0,2932
6,67	-0,1535	0,6406	-0,0121	-0,5520	-0,0070	0,2956
10	0,6579	0,3612	0,0085	-0,5287	-0,0069	0,3008
12,5	0,2677	0,4519	0,0027	-0,5933	-0,0064	0,2924
14,29	-0,2190	0,5859	-0,0065	-0,6399	-0,0062	0,2839
16,67	-0,4241	0,6416	-0,0104	-0,6509	-0,0061	0,2818
20	-0,5966	0,6875	-0,0136	-0,6567	-0,0060	0,2807
33,33	-0,8538	0,7521	-0,0182	-0,6560	-0,0059	0,2789
50	-0,8774	0,7579	-0,0187	-0,6558	-0,0059	0,2787

**Quadro 8 – Coeficientes para o terreno do tipo V**

Frequência [Hz]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	σ <sub>ε</sub>
0,17	-8,4556	2,2924	-0,0995	-0,8225	-0,0021	0,2339
0,24	-8,6666	2,4680	-0,1172	-0,7490	-0,0024	0,2348
0,33	-8,9512	2,6791	-0,1410	-0,6417	-0,0031	0,2368
0,52	-8,3692	2,6748	-0,1507	-0,5449	-0,0039	0,2419
0,95	-7,1627	2,4884	-0,1462	-0,4806	-0,0049	0,2518
1,28	-6,1311	2,2355	-0,1297	-0,4720	-0,0053	0,2557
1,67	-5,0621	1,9543	-0,1100	-0,4826	-0,0056	0,2617
1,96	-4,3756	1,7706	-0,0966	-0,5022	-0,0058	0,2651
2,44	-3,4191	1,5041	-0,0766	-0,5367	-0,0059	0,2683
3,33	-2,1493	1,1502	-0,0494	-0,6146	-0,0060	0,2735
4,17	-1,3844	0,9393	-0,0328	-0,6880	-0,0059	0,2766
5	-0,7975	0,7783	-0,0200	-0,7592	-0,0057	0,2784
5,88	-0,4567	0,6890	-0,0128	-0,8138	-0,0056	0,2792
6,25	-0,2702	0,6400	-0,0088	-0,8433	-0,0055	0,2803
6,67	-0,1274	0,6047	-0,0058	-0,8750	-0,0054	0,2812
10	0,5952	0,4370	0,0078	-1,0064	-0,0050	0,2915
12,5	0,7806	0,4067	0,0102	-1,0455	-0,0050	0,2970
14,29	0,8760	0,3894	0,0117	-1,0716	-0,0049	0,2973
16,67	0,8062	0,4025	0,0109	-1,0815	-0,0048	0,2966
20	0,4803	0,4705	0,0063	-1,0787	-0,0046	0,2945
33,33	-0,9288	0,7853	-0,0169	-0,9575	-0,0045	0,2768
50	-1,0620	0,8094	-0,0187	-0,9355	-0,0045	0,2754

Quadro 9 – Coeficientes para o terreno do tipo VI

Frequência [Hz]	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$\sigma_\varepsilon$
0,17	-7,7957	2,1151	-0,0863	-0,8509	-0,0021	0,2342
0,24	-8,0160	2,2927	-0,1042	-0,7799	-0,0024	0,2353
0,33	-8,3507	2,5179	-0,1289	-0,6726	-0,0030	0,2372
0,52	-7,9123	2,5582	-0,1419	-0,5759	-0,0038	0,2425
0,95	-6,7785	2,4105	-0,1402	-0,5274	-0,0048	0,2529
1,28	-5,7419	2,1749	-0,1250	-0,5347	-0,0052	0,2578
1,67	-4,6649	1,9125	-0,1066	-0,5563	-0,0056	0,2650
1,96	-3,9768	1,7420	-0,0943	-0,5760	-0,0059	0,2697
2,44	-3,0387	1,4973	-0,0759	-0,5901	-0,0062	0,2757
3,33	-1,9021	1,1837	-0,0521	-0,5392	-0,0070	0,2911
4,17	-1,2540	0,9706	-0,0368	-0,3962	-0,0076	0,3103
5	-0,6204	0,7356	-0,0218	-0,2172	-0,0079	0,3079
5,88	-0,2308	0,5931	-0,0126	-0,1775	-0,0077	0,2969
6,25	-0,0843	0,5372	-0,0085	-0,1991	-0,0076	0,3004
6,67	-0,0333	0,5163	-0,0064	-0,2515	-0,0074	0,3010
10	-0,1986	0,5589	-0,0065	-0,4731	-0,0068	0,2828
12,5	-0,3890	0,6118	-0,0097	-0,5232	-0,0066	0,2805
14,29	-0,4530	0,6342	-0,0110	-0,5536	-0,0064	0,2801
16,67	-0,4555	0,6417	-0,0114	-0,5770	-0,0064	0,2801
20	-0,3866	0,6419	-0,0112	-0,6262	-0,0062	0,2810
33,33	-0,5469	0,6608	-0,0125	-0,5847	-0,0063	0,2804
50	-0,5403	0,6591	-0,0124	-0,5845	-0,0062	0,2800

Fazendo uma breve análise crítica aos parâmetros obtidos, constata-se que os coeficientes tomam valores de acordo com o esperado, tendo em conta o fenómeno físico que representam. Assim, (i)  $C_4$  e  $C_5$  têm valores negativos, uma vez que traduzem a variação da amplitude do movimento do solo com a distância e representam o declive da atenuação geométrica e atenuação elástica, respetivamente [4]; (ii)  $C_2$  tem valores positivos, representando a variação da amplitude do movimento do solo com a energia libertada (magnitude) e (iii)  $C_3$ , principalmente para as baixas frequências, tem valores negativos, sendo cada vez menores para as altas frequências. Este parâmetro pretende representar a observação de que a amplitude do movimento sísmico não cresce indefinidamente com a magnitude, havendo uma “saturação” para as magnitudes elevadas.

#### 4. APLICAÇÃO AO SISMO DE 9 DE JULHO DE 1998

Uma vez estimadas as leis de atenuação para as ilhas dos Açores, é pertinente compará-las com a informação de registos reais. Dada a escassez de dados, torna-se difícil cruzar os registos e perfis estratigráficos no local da estação sísmica, sendo que a informação existente na base de dados da rede acelerográfica nacional [16] referente ao tipo de terreno é maioritariamente uma redutora classificação do solo como “rijo, intermédio ou brando”.

No entanto, foi considerado um registo do evento sísmico ocorrido a 9 de Julho de 1998. Este evento teve magnitude  $M_w = 6,1$  [17,18], epicentro de coordenadas 38,63°N; 28,52°W e uma profundidade de 5 km [19]. O registo considerado foi o obtido na estação GZC (Angra do

Heroísmo) localizada ao nível do solo nas coordenadas 38,6557°N; 27,2167°W [16] e a uma distância epicentral de cerca de 113 km.

Para a estação em questão, o solo é descrito [16] como “terreno firme ou rijo, sobreposto num estrato de menor rigidez”. Esta descrição permite assemelhá-lo, nas colunas sintéticas [8], a um terreno do tipo I ou do tipo VI.

Para uma classificação mais correta foi constatado, com auxílio das coordenadas da estação, que esta se encontra no interior de uma habitação localizada em zona urbana classificada (Zona Histórica [20]). Com esta informação foi assumido que o solo é representado pela coluna tipo VI por esta apresentar solos de menor rigidez nas camadas mais superficiais o que se poderia traduzir numa maior facilidade de instalações prediais.

Sendo pertinente a comparação com leis de previsão utilizadas internacionalmente, calcula-se, para o mesmo evento, o espectro de aceleração previsto pela lei internacional [5], que considera o efeito não linear dos solos.

A figura 2 apresenta os espectros de resposta elástica de aceleração horizontal no intervalo [0 s; 4 s] com fração de amortecimento crítico de 5% para os registos da estação sísmica nas direções X (E-W) e Y(N-S), o espectro obtido pela aplicação das equações de previsão definidas neste estudo ( $M=6,1$ ;  $R=113$  km, terreno do tipo VI) e o espectro obtido pela aplicação da equação de previsão [5]. Para a aplicação desta lei considerou-se um valor  $V_{S_{30}} = 908$  m/s, obtido pela média dos valores da totalidade das colunas do terreno tipo VI, sendo que o valor de  $V_{S_{30}}$  para cada uma das colunas de solo é obtido pela expressão (5), presente na norma europeia [9]:

$$V_{S_{30}} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad (5)$$

em que  $n$  é o número de estratos da coluna de solo,  $h_i$  a espessura do estrato  $i$  e  $v_i$  a velocidade média das ondas de corte no estrato  $i$ .

Da Fig. 2, conclui-se que o espectro obtido pela lei estimada para os Açores, reproduz melhor, em comparação com a lei [5], o valor máximo observado no registo, quer em amplitude quer no período espectral em que aquele ocorre.

De referir que, para além da incerteza relativa ao tipo de terreno, existe a incerteza relativa à magnitude do sismo (estimada entre 5,9 e 6,2 [17,18,19]) e à localização do foco. As incertezas relativas às características dos sismos influenciam a precisão dos resultados obtidos, embora seja a incerteza na geologia superficial a originar maior variabilidade nos resultados. Convém referir, também, as limitações inerentes ao modelo utilizado para estimar a resposta da coluna de solo, que considera unicamente ondas S com polarização horizontal, não contemplando, por exemplo, ondas superficiais (cuja contribuição será patente no registo real).

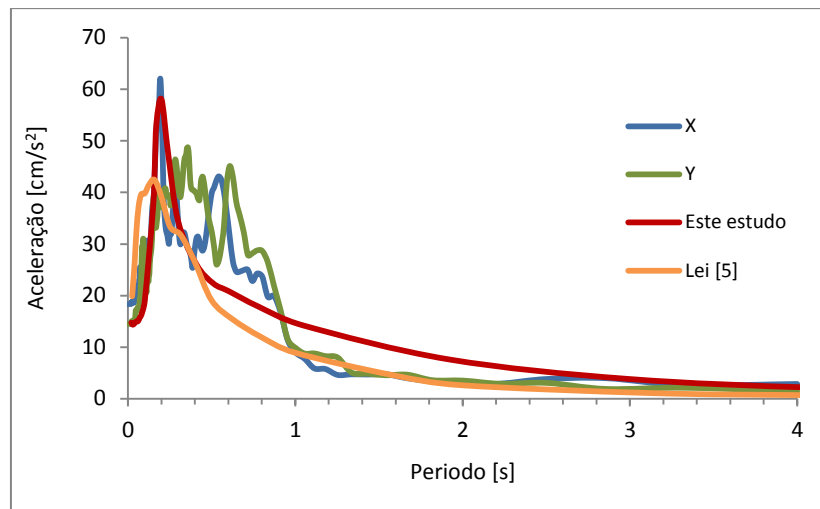


Figura 2 – Espectros de aceleração para os registos obtidos na estação GZC, para a lei de previsão deste estudo (considerando o evento Mw=6,1 e R=113 km e solo do tipo VI) e para a lei de previsão [5], para o mesmo evento e considerando  $V_{s30} = 908 \text{ m/s}$ .

As leis estimadas para a região dos Açores foram ainda aplicadas em [18] para os registos em outras estações para o sismo de 9 de Julho de 1998. Nesse estudo concluiu-se que os resultados obtidos com as leis de atenuação genéricas para a Europa não são de aplicabilidade razoável neste caso, sendo que as leis de atenuação com a inclusão dos efeitos da geologia superficial estabelecidas para os Açores apresentam uma melhor aproximação aos registos. A Fig. 2 corrobora esta conclusão.

## 5. COMENTÁRIOS FINAIS

Estimaram-se leis de previsão da amplitude dos movimentos do solo, inexistentes até à data, para a região autónoma dos Açores, quer no substrato rochoso quer para a superfície do terreno, considerando os tipos de terrenos presentes em [8], para frequências até 50 Hz, magnitudes de 4,1 a 7,5 e distâncias de 1 a 400 km.

Por terem em consideração os solos da região, as leis em questão permitem contemplar efeitos locais representando uma mais-valia face a leis internacionais existentes, inadequadas à realidade dos solos existentes no Arquipélago dos Açores.

O estudo efectuado revela-se, assim, fundamental para futuros estudos de perigosidade sísmica, importantes não só a nível regulamentar mas também em todas as áreas da gestão e planeamento de emergência, contribuindo, assim, para a diminuição da incerteza sistémica na avaliação da perigosidade sísmica e risco sísmico em Portugal.

Como trabalho futuro, referia-se a comparação da lei aqui obtida com todos os registos obtidos pela rede acelerográfica nacional. Tal tarefa afigura-se de difícil execução, não só devido ao reduzido número de registos para uma variada gama de distâncias e magnitudes mas, também, pela escassez de informação relativa à geologia superficial no local de instalação das estações.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio dos Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto "Caracterização da ação sísmica no Arquipélago dos Açores – SiGMA" (PTDC/CTE-GIX/121957/2010).

## REFERÊNCIAS

- [1] 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
- [2] Carvalho, A – “Modelação Estocástica da Ação Sísmica em Portugal Continental”, Tese de doutoramento, 2007, Instituto Superior Técnico.
- [3] Carvalho, A.; G. Zonno, G. Franceschina, J. Bilé Serra, A. Campos Costa – “Earthquake shaking scenarios for the Metropolitan Area of Lisbon”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Doi: 10.1016/j.soildyn.2007.07.009.
- [4] Carvalho, A.; Reis, C. – “Processos Físicos Para Simulação de Movimentos Sísmicos Intensos para o Arquipélago dos Açores”, 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 2014, Lisboa.
- [5] Atkinson, G.; Boore, D. – “Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America”, Bull. Seism. Soc. Am.; Vol. 96; 6, pp. 2181-2205, 2006.
- [6] Toro, Gabriel R.; Abrahamson, Norman A.; Schneider, John F – “Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: Best estimates and uncertainties”, Seismological Research Letters; Vol. 68; No. 1, pp. 41-57, 1997.
- [7] Atkinson, G.; Silva, W. – “Stochastic modeling of California ground motions”, Bull. Seism. Soc. Am.; Vol. 90, pp. 255–274, 2000.
- [8] Malfeito, N.; Carvalho, A.; Bilé Serra, J.P. – “Geração de perfis estratigráficos artificiais para o Arquipélago dos Açores”, 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 2014, Lisboa.
- [9] EN 1998-1 – “Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios”, Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2010.
- [10] 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, *Geotecnia* nº 81, Novembro 1997, p. 51 - 63.

- [11] Teves-Costa, P.; Oliveira, C.; Senos, M.L. – “Danos em Angra do Heroísmo provocados pelo sismo de 1980. Correlação com a frequência do solo e edifícios”, 6º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, 2004, Guimarães, pp. 465- 472
- [12] Maia, L. – “Cenários sísmicos em Ponta Delgada”, Tese doutoramento, 2011, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- [13] Teves-Costa, P.; Veludo, I. – “Soil characterization for seismic damage scenarios purposes: application to Angra do Heroísmo (Azores)”, Bull Earthquake Engineering, 2013, p 401-421
- [14] 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 Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, 2004, Guimarães, pp. 455- 464.
- [15] Rodrigues, J.; Carvalho, A.; Delfim, R.; Gomes, R. – “Leis de atenuação sísmica para Portugal Continental, considerando o tipo de terreno”, 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 2014, Lisboa.
- [16] Vilanova, S. P.; Ferreira, M. A.; & Oliveira, C. S. – “PAD-1.0 Portuguese Accelerometer Database”, 2009, Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- [17] Fernandes, R.M.S.; Miranda, J.M.; Catalão, J.; Luis, J.F.; Bastos, L.; Ambrosius, B.A.C. – “Coseismic displacements of the MW = 6.1, July 9, 1998, Faial earthquake (Azores, North Atlantic)”, Geophysical Research Letters, Vol. 29 (16), 2002, p. 21-21-21-24. 10.1029/2001GL014415
- [18] Estêvão, J.M.C; Carvalho, A. – “Incertezas na simulação estocástica de sismos: o caso dos Açores”, 5ªas Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 2014, Lisboa.
- [19] Instituto Português do Mar e Atmosfera; <https://www.ipma.pt/pt/geofisica/sismologia/>, 2014, Lisboa: IPMA.
- [20] C. N.C.; Gov. Açores; Gab. Zona Classificada; – “Angra do Heroísmo: janela do Atlântico entre a Europa e o Novo Mundo”, Lisboa, 1991.