

## PROCESSOS FÍSICOS PARA SIMULAÇÃO DE MOVIMENTOS SÍSMICOS INTENSOS PARA O ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES



Alexandra Carvalho

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



Cláudia Reis

Bolseira Investigação  
LNEC  
Lisboa  
claudiavdreis@sapo.pt

### SUMÁRIO

A simulação de movimentos intensos do solo torna-se necessária em regiões de sismicidade moderada, onde os registos de interesse para a engenharia são escassos e insuficientes, ou para estudos que exijam especificamente registos de uma determinada magnitude e distância de interesse. O modelo estocástico, partindo do conhecimento das características espectrais da fonte e considerando os efeitos de propagação das ondas sísmicas no percurso desde a fonte até ao local, estima os movimentos intensos do solo em termos da sua intensidade, conteúdo em frequência duração e variabilidade espacial.

Neste trabalho apresenta-se o procedimento efectuado, com base nos registos obtidos na rede acelerográfica nacional, para quantificação dos parâmetros que descrevem os processos envolvidos na geração de movimentos intensos do solo e que são necessários para a aplicação do modelo estocástico. Estuda-se o processo de propagação das ondas sísmicas (atenuação geométrica e inelástica), o processo de atenuação na crosta superior e determinam-se as características espectrais da fonte sísmica.

**Palavras-chave:** Modelos estocásticos, movimentos sísmicos, Açores.

## 1. INTRODUÇÃO

A caracterização dos movimentos sísmicos intensos é essencial para uma análise rigorosa da perigosidade sísmica no território português, cujo interesse e oportunidade reside na sua aplicação aos estudos de mitigação de risco sísmico afetando áreas como o planeamento e gestão de emergência, a definição de estratégias para o reforço do parque habitacional existente e o estabelecimento de políticas de seguros. É indiscutível, também, a necessidade de séries temporais realistas para, por exemplo, análises não lineares da resposta de estruturas de interesse em engenharia, de que são exemplo pontes, barragens e viadutos.

Em zonas de grande atividade tectónica e conseqüentemente de grande sismicidade, a caracterização da ação sísmica pode ser baseada em análises empíricas. Quando tal não é possível, a sua caracterização deverá ser baseada em modelos teóricos que gerem séries temporais representativas do ambiente tectónico da região em estudo e que estimem adequadamente a duração e o conteúdo energético dos movimentos sísmicos.

Uma classe de modelos que poderá satisfazer os requisitos exigidos, acima referidos, são os denominados modelos estocásticos de falha-finita, que descrevem os diferentes processos físicos de geração de energia na fonte, propagação das ondas sísmicas até ao local e efeitos locais.

Assim, este trabalho visa apresentar o estudo efetuado para o conhecimento desses processos, com base nos sismos registados na rede acelerográfica nacional, pretendendo-se obter os parâmetros necessários para a utilização do modelo estocástico de falha-finita na simulação dos movimentos sísmicos intensos para o Arquipélago dos Açores.

## 2. METODOLOGIA

O movimento do solo é o resultado de um complexo sistema físico que se pode descrever considerando, de forma simplificada, três processos separados:

- Processo de geração de energia na fonte sísmica – as ondas sísmicas são geradas pela energia libertada decorrente da rotura de uma falha geológica;
- Processo de propagação da energia sísmica – as ondas sísmicas propagam-se através do meio, desde a fonte até ao substrato rochoso;
- Processo de alteração do conteúdo energético devido a efeitos locais – as ondas sísmicas são modificadas enquanto se propagam na camada superficial da crosta até à superfície.

Os movimentos intensos do solo, num determinado local são, segundo o modelo estocástico, descritos por um espetro de amplitude de Fourier em aceleração para uma banda de frequências entre 0,1Hz e 20Hz, cuja expressão geral tem a forma, para o substrato rochoso:

$$A(f, M_0, R) = (2\pi f)^2 \cdot S(f, M_0) \cdot G(R) \cdot An(f, R) \cdot P(f) \quad (1)$$

em que,

- $S(f, M_0)$  representa o espectro de Fourier de deslocamento na fonte sísmica, refletindo as características espectrais dos movimentos na proximidade da fonte, sem influência dos meios de propagação (campo próximo);
- a)  $G(R)$  e  $An(f, R)$  são, respectivamente, as funções de atenuação geométrica e de atenuação inelástica, que modelam a atenuação das ondas sísmicas no percurso desde a fonte sísmica até ao local em estudo (caraterização dos movimentos do solo no campo afastado);
- $P(f)$  é uma função do decaimento na crosta superior, que modela o comportamento das camadas superiores da crosta.

Os parâmetros que descrevem estes processos estão bem identificados e são:

- b) velocidade  $\beta$ , das ondas sísmicas, densidade crustal,  $\rho$ , frequência-esquina,  $f_c$  e queda de tensão,  $\Delta\sigma$ , para a descrição do espectro de Fourier de deslocamento na fonte sísmica,  $S(f, M_0)$ ;
- c) espessura crustal,  $D$  e fator de qualidade do meio,  $Q(f)$ , para a descrição da atenuação geométrica,  $G(R)$  e atenuação inelástica,  $An(f, R)$ ;
- d) fator de decaimento espectral,  $k$ , para a descrição da atenuação na crosta superior,  $P(f)$ .

O processamento efetuado para a determinação dos parâmetros mencionados está esquematizado na Fig. 1 e consistiu em:

- (i) Obtenção dos espectros de Fourier das ondas S em aceleração e deslocamento, com o software LNEC-SPA [1] (Fig. 1 i) e ii), respetivamente)
- (ii) Determinação do parâmetro de decaimento espectral,  $k$ , a partir do espectro de aceleração (etapa iii da Fig. 1).
- (iii) Correção dos efeitos de propagação no meio (atenuações geométrica, inelástica e crustal) no espectro de deslocamentos e obtenção do espectro de deslocamento da fonte sísmica (etapa iv da Fig.1).
- (iv) Determinação dos parâmetros da fonte sísmica, nomeadamente momento sísmico e frequência-esquina,  $f_c$  (obtidos por dois processos distintos) para posterior cálculo da queda de tensão,  $\Delta\sigma$  (etapa v da Fig. 1).

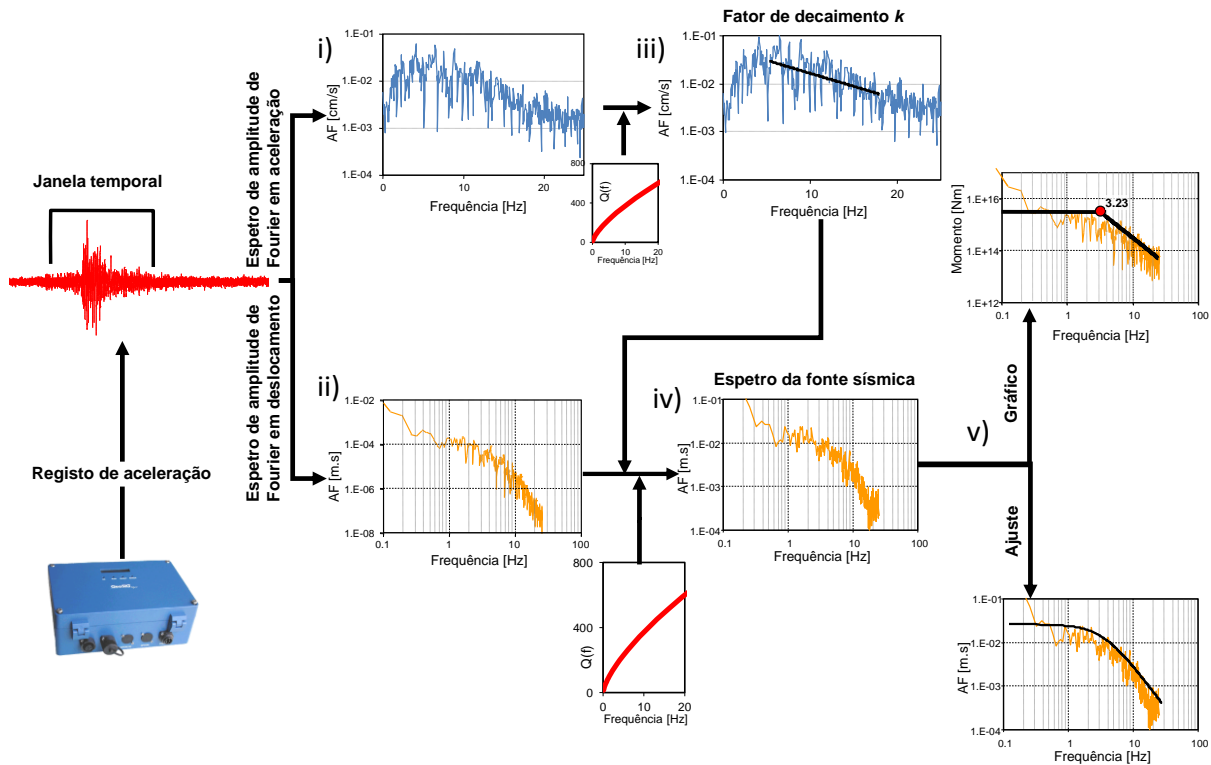


Figura 1. Procedimento adotado para a determinação dos parâmetros necessários à utilização do modelo estocástico de caracterização dos movimentos intensos do solo, para a região dos Açores.

### 3. BASE DE DADOS

Os dados de eventos sísmicos registados pela rede acelerográfica nacional, composta por 24 estações localizadas em Portugal Continental e 27 estações localizadas nos Açores, foram extraídos do PAD 1.0 Portuguese Accelerometer Database [2].

No Quadro 1 apresenta-se as características das estações da rede acelerográfica utilizadas para este trabalho (código da estação, localização geográfica, e local de instalação). A escolha das estações para a calibração dos parâmetros teve em consideração as condições geológicas do local onde se encontra a estação (considerando-se apenas as estações em rocha ou solo muito duro) e o local de instalação da estação (considerando-se somente as localizações em campo aberto ou no piso térreo do edifício), de modo a minimizar a influência quer da coluna de solo acima do firme rochoso quer do edifício.

A Fig. 2 apresenta a distribuição geográfica da rede acelerográfica nos Açores, mostrando a localização das estações utilizadas e das que não foram consideradas neste estudo por não possuírem registos viáveis ou por não reunirem os requisitos de implementação.

Quadro 1. Estações da rede acelerográfica dos Açores, utilizadas neste estudo [2]

| Região    | Código da estação | Lat. [°N] | Long. [°W] | Altitude [m] | Local de instalação <sup>1</sup> |
|-----------|-------------------|-----------|------------|--------------|----------------------------------|
| Graciosa  | SCR               | 39,0859   | 28,0091    | 12           | B10                              |
| Faial     | HSC               | 38,5352   | 28,6289    | 0            | B30                              |
| Faial     | HPT               | 38,5379   | 28,6264    | 10           | B30                              |
| Pico      | SRO               | 38,5244   | 28,3209    | 45           | B20                              |
| Pico      | SMJ               | 38,4342   | 28,4589    | 50           | B10                              |
| Pico      | PI1               | 38,4350   | 28,4528    | 0            | B10                              |
| S. Jorge  | VEL               | 38,6831   | 28,2122    | 35           | B20                              |
| S. Jorge  | TOP               | 38,5500   | 27,7560    | 40           | B10                              |
| Terceira  | PVI               | 38,7321   | 27,0599    | 15           | B20                              |
| S. Miguel | MOS               | 37,8904   | 25,8210    | 25           | B20                              |
| S. Miguel | LR1               | 37,7484   | 25,6640    | 45           | B20                              |

1 –Bmm (m é o número total de andares do edifício B; n é o andar onde se encontra instalado o aparelho, 0 representa o rés-do-chão)

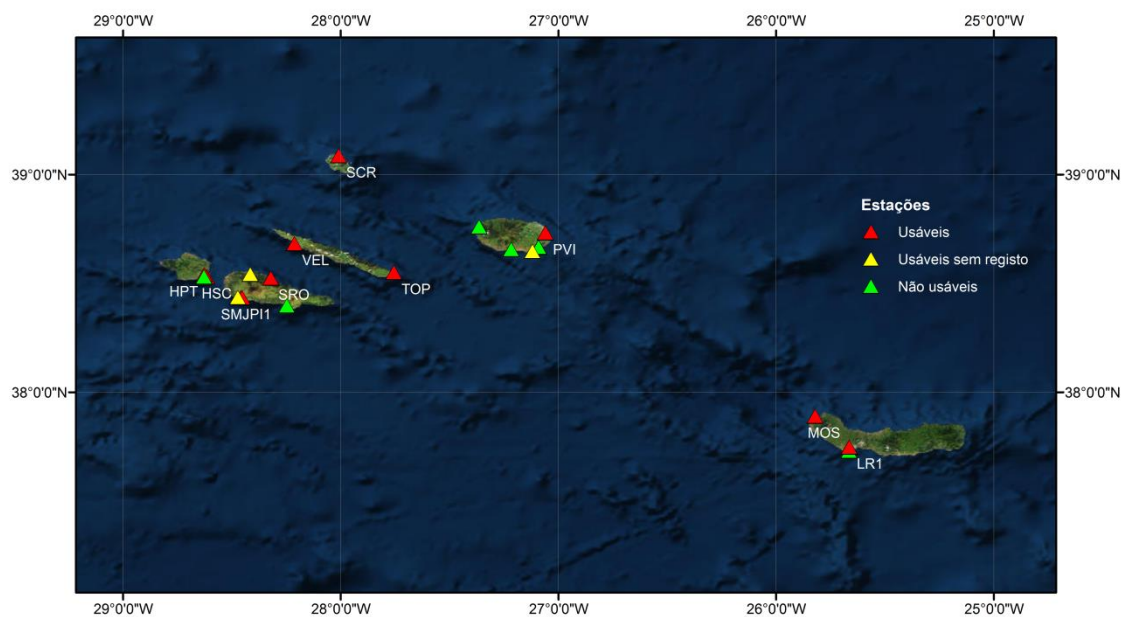


Figura 2. Mapa com a localização geográfica das estações da rede acelerográfica dos Açores e respetiva utilização. O código da estação está representado apenas para as estações utilizadas neste estudo.

As características dos eventos registados, que serão analisados neste estudo, estão resumidas no Quadro 2, apresentando-se na Fig. 3 a distribuição geográfica desses eventos e respetiva magnitude. De referir que a magnitude dos eventos foi submetida a validação e corrigida quando tal se justificava, através da consulta aos dados disponibilizados pelo portal online do Instituto Português do Mar e da Atmosfera [3]. Da análise do Quadro 2 é possível constatar a deficiente cobertura azimutal para os eventos analisados, uma vez que a maioria dos sismos foi registada unicamente em uma ou no máximo duas estações.

**Quadro 2. Sismos registados na rede acelerográfica, e analisados neste estudo**

| #Evento | Data       | Hora     | <i>Epicentro</i> |            | Mag. | Prof. [km] | Código estação | R [km] |
|---------|------------|----------|------------------|------------|------|------------|----------------|--------|
|         |            |          | Lat. [°N]        | Long. [°W] |      |            |                |        |
| 1       | 1999-07-21 | 21:18:36 | 37,87            | 25,83      | 2,1  | 12         | MOS            | 3      |
| 2       | 1999-07-21 | 21:19:18 | 37,86            | 25,83      | 3,5  | 2          | MOS            | 4      |
| 3       | 1999-07-21 | 23:03:08 | 37,87            | 25,85      | 3,0  | 2,7        | MOS            | 3      |
| 4       | 2000-03-04 | 18:42:47 | 38,34            | 26,70      | 4,7  | 4          | PVI            | 54     |
|         |            |          |                  |            |      |            | MOS            | 91     |
| 5       | 2000-08-01 | 04:35:46 | 38,79            | 28,96      | 4,9  | 6          | VEL            | 66     |
|         |            |          |                  |            |      |            | SRO            | 62     |
| 6       | 2000-09-03 | 19:24:14 | 38,6             | 27,06      | 3,5  | 0          | PVI            | 14     |
| 7       | 2000-11-10 | 21:08:24 | 38,66            | 27,3       | 2,4  | 6          | TOP            | 18     |
| 8       | 2000-12-28 | 05:22:38 | 38,69            | 27,62      | 3,3  | 4          | TOP            | 20     |
| 9       | 2001-01-29 | 23:21:59 | 38,64            | 28,58      | 3,6  | 6          | VEL            | 32     |
| 10      | 2001-02-06 | 05:00:28 | 38,12            | 26,39      | 4,1  | 2          | PVI            | 89     |
| 11      | 2001-06-02 | 12:13:24 | 38,65            | 28,42      | 3,8  | 12         | SRO            | 4      |
|         |            |          |                  |            |      |            | VEL            | 23     |
|         |            |          |                  |            |      |            | TOP            | 16     |
| 12      | 2001-07-06 | 08:27:05 | 38,69            | 27,90      | 4,0  | 7          | VEL            | 29     |
|         |            |          |                  |            |      |            | SCR            | 48     |
| 13      | 2001-10-03 | 18:53:14 | 38,98            | 28,06      | 3,0  | 0          | SCR            | 12     |
| 14      | 2001-10-12 | 02:36:19 | 38,64            | 28,58      | 3,5  | 7          | VEL            | 33     |
| 15      | 2001-12-23 | 19:24:50 | 38,4             | 27,02      | 3,7  | 1          | PVI            | 37     |
| 16      | 2002-02-13 | 08:31:47 | 39,11            | 28,26      | 3,9  | 1          | VEL            | 48     |
|         |            |          |                  |            |      |            | SCR            | 22     |
| 17      | 2002-02-13 | 08:42:45 | 39,10            | 28,26      | 3,9  | 0          | SCR            | 28     |
| 18      | 2002-02-13 | 09:04:32 | 39,10            | 28,26      | 3,7  | 0          | SCR            | 25     |
| 19      | 2002-02-13 | 11:30:05 | 39,06            | 28,25      | 3,1  | 0          | SCR            | 21     |
| 20      | 2002-03-11 | 01:44:46 | 38,4             | 27,04      | 3,6  | 0          | PVI            | 37     |
| 21      | 2002-06-10 | 14:33:12 | 38,13            | 26,66      | 4,3  | 0          | PVI            | 84     |
|         |            |          |                  |            |      |            | TOP            | 87     |
| 22      | 2002-11-30 | 22:53:12 | 39,13            | 28,45      | 4,2  | 0          | SCR            | 39     |
|         |            |          |                  |            |      |            | VEL            | 52     |
| 23      | 1998-07-09 | 05:19:07 | 38,63            | 28,52      | 5,9  | 5          | PVI            | 132    |
|         |            |          |                  |            |      |            | MOS            | 253    |
| 24      | 1998-07-10 | 11:49:00 | 38,67            | 28,49      | 4,8  | 0          | MOS            | 248    |
| 25      | 1998-07-18 | 08:55:00 | 38,49            | 28,58      | 3,5  | 24         | HSC            | 7      |
| 26      | 1998-07-18 | 11:06:00 | 38,64            | 28,56      | 4,2  | 0          | HSC            | 13     |
| 27      | 1998-07-20 | 06:14:00 | 38,56            | 28,59      | 3,2  | 18         | HSC            | 4      |
| 28      | 1997-07-14 | 02:24:02 | 38,3             | 26,79      | 3,4  | 0          | MOS            | 96     |
| 29      | 2002-11-30 | 22:53:12 | 39,13            | 28,45      | 4,2  | 0          | SMJ            | 74     |

|    |            |          |       |       |     |    |            |          |
|----|------------|----------|-------|-------|-----|----|------------|----------|
| 30 | 2003-11-05 | 04:43:51 | 39,1  | 28,67 | 3,0 | 5  | SCR        | 57       |
| 31 | 2003-12-23 | 09:03:23 | 39,07 | 28,26 | 2,5 | 4  | SCR        | 22       |
| 32 | 2004-01-01 | 18:26:57 | 39,1  | 28,24 | 2,2 | 14 | SCR        | 20       |
| 33 | 2004-01-17 | 20:28:45 | 39,15 | 28,22 | 2,3 | 22 | SCR        | 19       |
| 34 | 2004-01-18 | 03:55:53 | 39,12 | 28,30 | 3,4 | 4  | SCR        | 25       |
| 35 | 2004-01-27 | 02:10:25 | 39,14 | 27,99 | 3,1 | 1  | SCR        | 6        |
| 36 | 2004-01-28 | 15:47:44 | 39,11 | 28,25 | 4,3 | 7  | SCR        | 17       |
| 37 | 2004-01-28 | 15:48:41 | 39,1  | 28,25 | 3,5 | 5  | SCR        | 21       |
| 38 | 2004-01-28 | 20:23:40 | 39,11 | 28,27 | 3,7 | 3  | SCR        | 16       |
| 39 | 2004-01-31 | 19:58:00 | 39,12 | 28,26 | 3,5 | 6  | SCR        | 22       |
| 40 | 2004-02-03 | 19:33:49 | 39,16 | 28,27 | 3,6 | 4  | SCR        | 24       |
| 41 | 2004-02-07 | 19:31:48 | 39,16 | 27,95 | 2,6 | 2  | SCR        | 9        |
| 42 | 2004-04-25 | 09:30:03 | 39,12 | 28,46 | 4,1 | 0  | SCR        | 36       |
| 43 | 2005-01-01 | 20:04:20 | 39,01 | 27,99 | 2,3 | 0  | SCR        | 8        |
| 44 | 2005-01-05 | 20:00:31 | 37,76 | 25,43 | 3,2 | 2  | SOL        | 21       |
| 45 | 2005-05-05 | 20:15:50 | 38,66 | 28,38 | 3,2 | 6  | VEL<br>SMJ | 15<br>26 |
| 46 | 2005-12-13 | 20:19:59 | 38,67 | 28,99 | 3,0 | 0  | VEL        | 67       |
| 47 | 2006-10-05 | 02:25:40 | 38,66 | 28,56 | 3,0 | 6  | VEL<br>HPT | 30<br>14 |
| 48 | 1997-06-27 | 04:39:53 | 38,24 | 26,82 | 5,3 | 0  | LR1        | 110      |
| 49 | 1997-08-27 | 18:50:11 | 38,24 | 26,73 | 4,4 | 0  | LR1        | 102      |

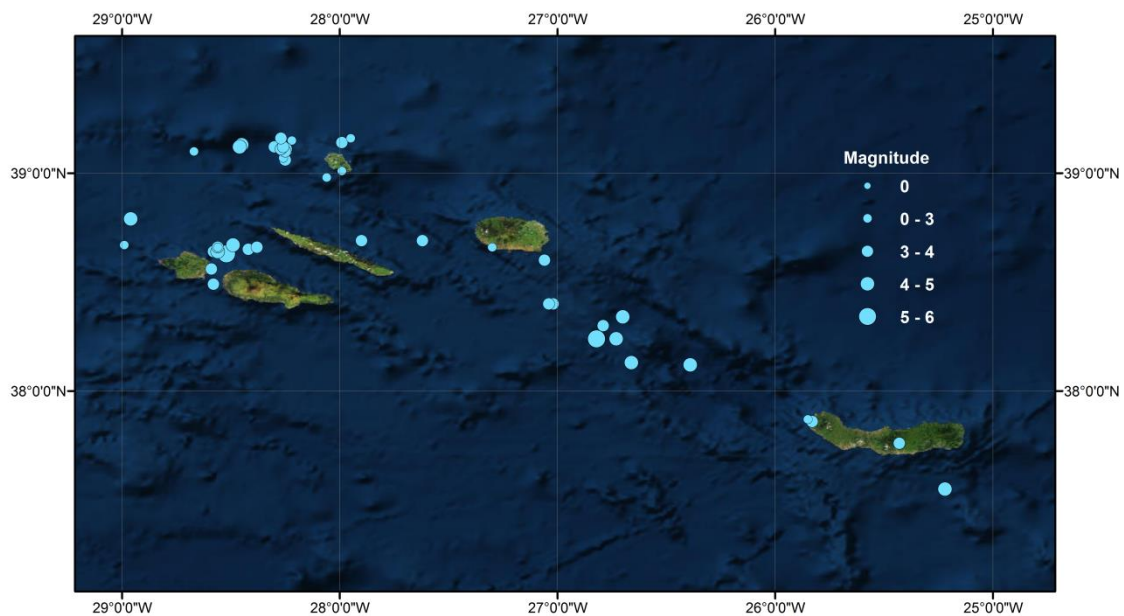


Figura 4. Localização dos eventos considerados (Quadro 2) e respetiva magnitude.

## 4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS REGIONAIS

Os parâmetros regionais a determinar, para a posterior caracterização espectral dos movimentos intensos do solo, são: espessura crustal,  $D$ ; fator de qualidade do meio,  $Q(f)$ ; fator de decaimento espectral,  $k$ ; frequência-esquina,  $f_c$  e queda de tensão,  $\Delta\sigma$ . Outros parâmetros necessários à modelação são obtidos através de estudos anteriores, como é o caso da espessura crustal, das velocidades das ondas sísmicas e da densidade do meio no do local da fonte sísmica.

### 4.1 Espessura crustal

A espessura crustal é um parâmetro a considerar no processo da propagação das ondas sísmicas, para a consideração da atenuação geométrica,  $G(R)$  que descreve o decaimento da energia da onda sísmica com a distância,  $R$ , à medida que esta se propaga no interior da terra. De um modo geral  $G(R) = R^{-\alpha}$  assumindo-se que as ondas sísmicas têm uma propagação esférica ( $\alpha=1$ ) a curtas distâncias da fonte sísmica e uma propagação cilíndrica ( $\alpha=0,5$ ) à medida que propgridem no interior da Terra.

No modelo estocástico a utilizar para a simulação dos movimentos sísmicos intensos nos Açores, adota-se a relação trilinear da atenuação geométrica [4]:

$$G(R) = \begin{cases} \frac{1}{R} & \text{para } R < 1,5D \\ \frac{1}{1,5 \cdot D} & \text{para } 1,5D < R < 2,5D \\ \frac{1}{1,5 \cdot D} \cdot \sqrt{\frac{2,5 \cdot D}{R}} & \text{para } R > 2,5D \end{cases} \quad (2)$$

A espessura crustal considerada foi de  $D = 12$  km [5].

### 4.2 Fator de atenuação crustal, $k$

A atenuação das ondas sísmicas, ao longo do percurso desde a fonte até ao local, em crusta profunda não depende só da distância percorrida, verificando-se que a energia dissipada no processo de propagação aumenta de forma exponencial com a frequência [6]. A atenuação nas altas frequências pode ser descrita por dois fatores, que podem ser estudados separadamente e que descrevem dois efeitos diferentes da atenuação: i) atenuação em crusta profunda, dependente da distância fonte – local e ii) atenuação em crusta superficial.

Esta atenuação pode, então, ser descrita como o produto de dois fatores,  $At(f) = An(f, R) \cdot P(f)$  sendo a atenuação inelástica,  $An(f, R)$  na expressão (1), escrita na forma



$$An(f, R) = e^{-\pi \cdot f \cdot R / Q(f) \cdot \beta} \quad (3)$$

com  $Q(f)$  o fator de qualidade do meio, e  $P(f)$ , a atenuação em crosta superficial, escrita como

$$P(f) = e^{-\pi \cdot f \cdot k} \quad (4)$$

em que  $k$  é o parâmetro de decaimento espectral.

Para os sismos da base de dados,  $k$  foi estimado separadamente para as duas componentes horizontais dos acelerogramas. De referir, que o efeito do decaimento espectral observado nos espetros dos registos sísmicos é, obviamente, resultado dos vários processos físicos que caracterizam o movimento intenso do solo e que alteram o seu conteúdo espectral, nomeadamente, a atenuação inelástica devido às características do meio atravessado pelas ondas sísmicas e a atenuação crustal devido às características da crosta superior. Desta forma, para o estudo da atenuação crustal, os espetros de amplitude de Fourier em aceleração devem ser desconvoluídos do efeito da atenuação inelástica.

No âmbito do projecto SiGMA - caracterização da ação sísmica no Arquipélago dos Açores, financiado pela FCT, em que se inseriu este trabalho, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera, utilizando 1377 registos da rede sismográfica nacional e analisando o decaimento temporal da amplitude (a coda) das ondas sísmicas, estimou para o fator de qualidade para a região central do Arquipélago dos Açores a relação  $Q(f) = 0,79^{0,69}$  [7].

Assim, para todos os registos sísmicos considerados neste trabalho, foram calculados os respetivos espetros de amplitude em acelerações para as duas componentes horizontais (etapa i na Fig. 1). O efeito da atenuação inelástica foi posteriormente corrigido tendo em conta a lei regional estabelecida para o fator de qualidade e considerando a expressão (3).

O factor de decaimento espectral,  $k$ , da expressão (4), foi obtido através do declive,  $k_0$ , da reta de ajuste pelos mínimos quadrados, do decaimento nas altas frequências numa escala log-linear (num gráfico de escala log-linear,  $k = k_0 \cdot \ln(10) / \pi$ ), processo esquematizado na etapa iii) da Fig. 1. A Fig. 5 apresenta, como exemplo, os espetros de amplitude de Fourier em aceleração das ondas S, para as componentes horizontais do registo referente ao evento #6 (Quadro 2) e o ajuste linear do decaimento espectral.

O valor estimado considerando todos os sismos e as duas componentes de cada registo foi de  $k = 0,075 \pm 0,02$  [s]. A dispersão dos valores de  $k$  em torno da média, é semelhante para todas as magnitudes pelo que não parece existir uma dependência de  $k$  com a magnitude, para a base de dados existentes. A mesma conclusão é válida para a dependência de  $k$  com a distância.

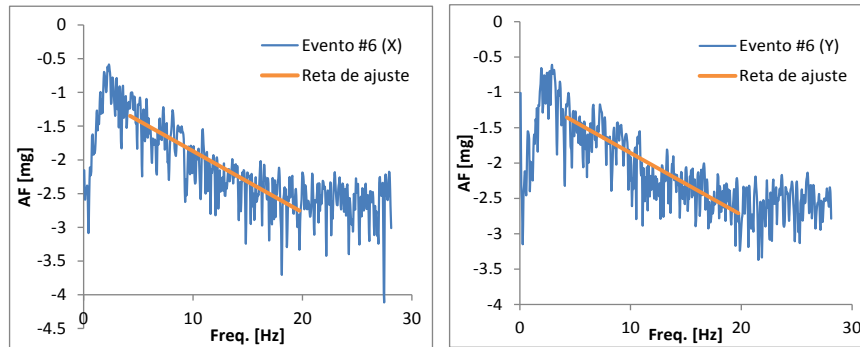


Figura 5. Espectro de amplitude de Fourier das ondas S, para as componentes X e Y do evento #6, e reta de ajuste do decaimento nas altas frequências.

### 4.3 Parâmetros da fonte sísmica

Tendo um melhor conhecimento dos processos envolvidos na atenuação das ondas sísmicas, o espectro  $A(f, M_0, R)$  do registo obtido na estação sísmica pode ser desconvoluído de tais efeito, sendo possível obter um espectro da fonte  $S(f, M_0)$  e, conseqüentemente, determinar os parâmetros que caracterizam a fonte sísmica, nomeadamente momento sísmico, frequência-esquina e queda de tensão.

De referir, a este propósito, que a não correção dos fenómenos físicos de atenuação pode levar a valores subestimados da frequência-esquina (a atenuação faz decair mais rapidamente as altas frequências) e, conseqüentemente, a valores subestimados das quedas de tensão por um factor de 2 ou 3 [8].

Assim, o espectro de deslocamento na fonte sísmica (etapa iv na Fig. 1) é obtido por

$$S(f, M_0) = \frac{A(f, M_0, R)}{(2\pi f)^2 \cdot G(R) \cdot An(f, R) \cdot P(f)} = \frac{A(f, M_0, R)}{(2\pi f)^2} \cdot R^\alpha \cdot e^{\frac{\pi \cdot f \cdot R}{Q(f) \cdot \beta}} \cdot e^{\pi \cdot f \cdot k} \quad (5)$$

Uma vez obtido o espectro de amplitude na fonte, a determinação dos parâmetros da fonte pode ser feita recorrendo a diferentes técnicas, assumindo-se que o espectro na fonte é representado pelo modelo de Brune [9], que se expõe:

A análise do espectro de radiação,  $S(f, M_0)$  das ondas produzidas num sismo permite concluir que o espectro na fonte possui uma parte plana,  $\Omega_0$ , correspondente à amplitude espectral nas baixas frequências e diretamente proporcional ao momento sísmico escalar, e uma parte que decai com  $\omega^{-2}$ , isto é, de forma inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Esta tendência de comportamento do espectro pode ser delineada a partir de duas assintotas: uma plana que define a amplitude nas baixas frequências e uma associada ao decaimento  $\omega^{-2}$ . Estas duas assintotas cruzam-se numa frequência característica denominada frequência-esquina,  $f_c$  (Fig. 6).

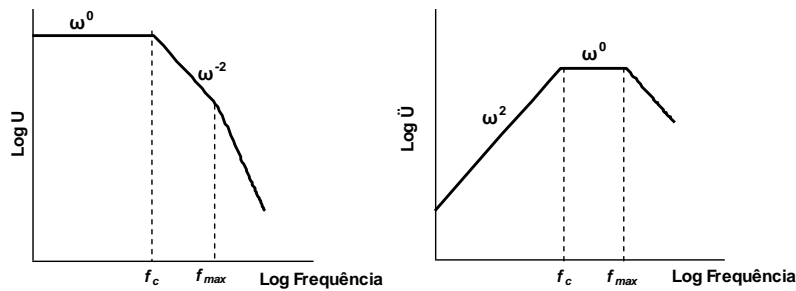


Figura 6. Linhas que definem os espectros de amplitude em deslocamento (U) e aceleração (Ü) propostas por [9] com a consideração do decaimento espectral nas altas frequências.

Este modelo, conhecido como modelo ómega quadrado,  $\omega^2$ , representa a amplitude espectral de um sismo na fonte de acordo com a expressão:

$$S(f, M_0) = \Omega_0 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}, \quad \Omega_0 = C \cdot M_0 \quad (6)$$

sendo C uma constante que depende do padrão de radiação da onda sísmica e da densidade do meio e da velocidade das ondas sísmicas no local da fonte sísmica [10].

O modelo de fonte mais simples, que possui as características descritas pelo modelo  $\omega^2$ , é o modelo pontual, ou modelo de Brune [9], que representa a fonte sísmica como uma rotura circular, com raio finito, em que o espectro de deslocamento da fonte é descrito pela expressão (6) e a frequência de esquina,  $f_c$ , relacionada com a queda de tensão,  $\Delta\sigma$ , na fonte através da expressão:

$$f_c = 4,9 \cdot 10^6 \cdot \beta \cdot \sqrt{\frac{\Delta\sigma}{M_0}} \quad (7)$$

Para sismos de pequena magnitude ( $M < 5,5$ ) o modelo pontual de Brune, com características de rotura circular, pode ser aplicado uma vez que é razoável aceitar a representação da fonte sísmica como um ponto, sem dimensões apreciáveis. Assim, para a determinação dos parâmetros da fonte serão considerados todos os registos do Quadro 2, exceto o registo #23, referente ao sismo de 9 de julho de 1998, de magnitude elevada.

Face ao que foi exposto, uma possível técnica para a determinação dos parâmetros da fonte é uma análise gráfica, que permite calcular simultaneamente os valores do momento sísmico e da frequência-esquina através das envolventes das assíptotas de baixa e de alta frequência do espectro de amplitude de Fourier de deslocamento, da fonte sísmica, como representado na Fig. 6. O momento sísmico corresponderá ao valor da assíptota horizontal (do espectro de deslocamento corrigido) e a frequência-esquina é o valor da intersecção das assíptotas de baixa e alta frequência, isto é, considerando a assíptota horizontal como o patamar nas baixas frequências e a assíptota de declive -2 como a envolvente do decaimento nas altas frequências. A Figura 7 apresenta o exemplo da determinação deste parâmetro pelo método gráfico, para o evento #6.

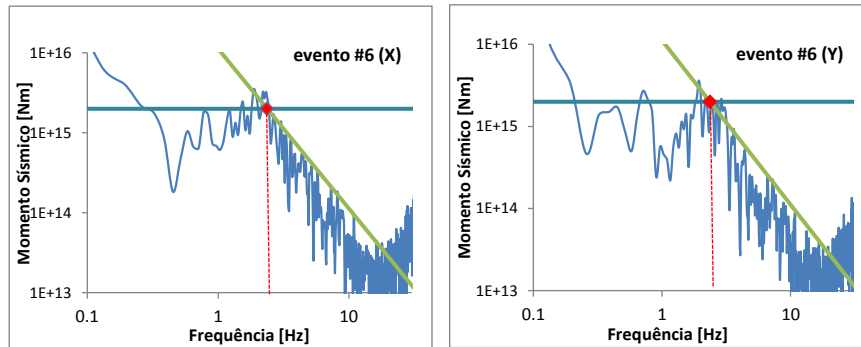


Figura 7. Espectros de amplitude de deslocamento da fonte sísmica, em unidades de momento sísmico, para o evento #6. Metodologia gráfica para determinação, simultânea, da frequência-esquina e momento sísmico (etapa v da Fig.1).

Esta técnica foi utilizada para todos os registos da base de dados (Quadro 2), para as componentes X e Y, obtendo-se os valores de frequência-esquina,  $f_c$ , para todos os registos. Pela expressão (7) foi obtida a queda de tensão,  $\Delta\sigma$  para cada evento registado.

A frequência-esquina é um parâmetro difícil de obter experimentalmente, dado a subjetividade do traçado das envolventes. Foi, então, utilizada uma outra técnica, que consistiu no ajuste do espectro de deslocamento teórico de Brune [9] (expressão 6) ao espectro da fonte sísmica obtido depois da correção dos efeitos de propagação (média quadrática das componentes horizontais), utilizando a melhor relação do momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e da queda de tensão (ajuste nas altas frequências) e determinando, assim, a frequência esquina e a queda de tensão que melhor se ajustam.

A Fig. 8 apresenta o exemplo dessa técnica para o evento #6. Esta figura permite mostrar, também, que o modelo teórico de Brune [9] parece ser um modelo adequado para a descrição dos espectros dos registos da rede acelerográfica nacional.

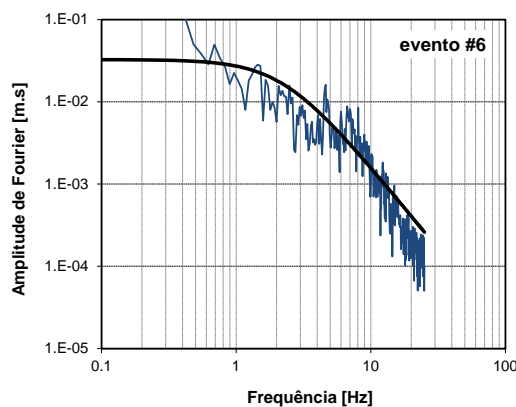


Figura 8. Espectro de Fourier das ondas S, corrigido, para o evento #6. Ajuste do espectro teórico de Brune [9] (etapa v da Fig.1).

Obteve-se, considerando todos os registos e as duas técnicas apresentadas, uma média de queda de tensão de 90 *bar* e 130 *bar*, quando aplicadas a 1ª técnica e a 2ª técnica, respetivamente.

## 5. COMENTÁRIOS FINAIS

O trabalho realizado tem como objetivo final a aplicação do modelo estocástico para a caracterização da ação sísmica no Arquipélago dos Açores. Pretende-se dar resposta a um interesse por parte da comunidade da engenharia sísmica e a uma necessidade para Portugal, descrevendo a ação sísmica em termos da sua intensidade, conteúdo em frequência, duração e variabilidade espacial

Neste artigo apresenta-se o processamento realizado para a determinação dos valores médios dos parâmetros que descrevem os processos físicos da energia radiada na fonte e de propagação das ondas sísmicas. Para tal analisaram-se os registos da rede acelerográfica do Arquipélago dos Açores e utilizou-se informação existente de estudos regionais.

Os parâmetros obtidos com este trabalho serão considerados na modelação dos movimentos intensos do solo, utilizando o modelo estocástico de falha-finita, para a caracterização da ação sísmica no Arquipélago dos Açores [13], suprimindo a falta de registos na região.

Por consistência, a simulação dos movimentos sísmicos deverá usar o conjunto de todos os valores aqui apresentados, antecipando-se, desde já, a necessidade de nova calibração de parâmetros à medida que se tenham novos conhecimentos em relação a qualquer um dos processos intervenientes na modelação (fonte, propagação, local).

A título de resumo e conclusões, apresenta-se no Quadro 3 os parâmetros que serão utilizados para a modelação dos movimentos intensos do solo para os Açores.

Quadro 3. Parâmetros para aplicação do programa RSSIM [11,12] para os Açores.

| Parâmetro                             | Valor  |
|---------------------------------------|--|
| Espessura crustal, $D$ [km]           | 12 - 15  |
| Atenuação geométrica, $G(R)$          | $1/R$ ( $R \leq 1,5 D$ )<br>$1/R^0$ ( $1,5 D \leq R \leq 2,5 D$ )<br>$1/R^{0,5}$ ( $R > 2,5 D$ ) |
| Fator de Qualidade, $Q(f)$            | $79 f^{0,69}$  |
| Decaimento crustal, $k$ [s]           | 0,075  |
| Queda de tensão, $\Delta\sigma$ [bar] | 90 - 130   |

Os valores médios obtidos foram introduzidos no programa RSSIM [11,12] e utilizados na modelação dos movimentos intensos do solo para a caracterização da ação sísmica no substrato rochoso. Tal permitiu a criação de uma base de dados sintética, constituída por registos representativos da região, e uma posterior elaboração de leis de previsão dos movimentos do solo [13].

## 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] Mendes, L.; Campos Costa, A. – “LNEC-SPA, Signal Processing and Analysis tools for civil engineers. Version 1.0 – Build 12”. Relatório 29/2007, LNEC, 2007.
- [2] Vilanova, S. P.; Ferreira, M. A.; Oliveira, C. S. – “PAD-1.0 Portuguese Accelerometer Database”. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2009.
- [3] Instituto Português do Mar e Atmosfera; <https://www.ipma.pt/pt/geofisica/sismologia/>, Lisboa: IPMA.
- [4] Atkinson, G.; Boore, D. – “New ground motion relations for eastern North America”. Bull. Seism. Soc. Am.; Vol. 85, 1995, pp. 17–30.
- [5] Dias, N. A.; Matias, L.; Lourenço, N.; Madeira, J.; Carrilho, A.; Gaspar, J. L. – “Crustal seismic velocity structure near Faial and Pico Islands (Azores), from local earthquake tomography”. Science Direct , 2007, 301-317.
- [6] Anderson, J. G.; Hough, S. E. – “A model for the shape of the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration at high frequencies”. BSSA, V. 74, 1984, 1969-1993
- [7] Carvalho, A.; Reis, C.; Vales, D. – “Source and path parameters for azores area, for stochastic finite-fault modeling”. 2ECEES, Istanbul, 2014.
- [8] Rovelli. A., Cocco, M., Console, R., Alessandrini, B. & Mazza. S. –“Ground motion waveforms and source spectral scaling from close-distance accelerograms in a compressional regime area (Friuli, northeastern Italy)”. BSSA, v, 81, n.1, 1991, pp 57-80.
- [9] Brune, J. N. –“Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes”. J. Geophys. Res., 75, 1970, 4997-5009.
- [10] Boore, D. – “Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra”. BSSA, V. 73, 1983, 1865-1984
- [11] Carvalho, A. – “Modelação Estocástica da Ação Sísmica em Portugal Continental”. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2007.

- [12] 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.
- [13] Malfeito, N.; Carvalho, A.; Bilé Serra, J. – “Equações de previsão dos movimentos sísmicos à superfície para a região autónoma dos Açores”, 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, JPEE, 2014