

NÃO CONFIDENCIAL



MINISTÉRIO DO EQUIPAMENTO SOCIAL

# Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**ESTUDO DE CASUALIDADE  
SÍSMICA NO GRUPO CENTRAL  
DO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES**

RELATÓRIO 208/01 — G3ES



MINISTÉRIO DO EQUIPAMENTO SOCIAL

# Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**NÃO CONFIDENCIAL**

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

Grupo de Estudos e Equipamentos de Engenharia Sísmica

Proc. 037/18/13343

---

## **ESTUDO DE CASUALIDADE SÍSMICA NO GRUPO CENTRAL DO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES**

RELATÓRIO 208/01 — G3ES

Lisboa, Julho de 2001

---



**ESTUDO DE CASUALIDADE SÍSMICA NO GRUPO CENTRAL DO  
ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES**

**RELATÓRIO FINAL**

**SEISMIC HAZARD STUDY IN CENTRAL GROUP OF AZORES ISLANDS  
FINAL REPORT**

**ETUDE DE L'ALÉA SISMIQUE DU GROUPE CENTRAL DE L'ARCHIPEL  
DES AZORES  
RAPPORT FINAL**

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	III
ÍNDICE DE QUADROS .....	VI
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DA CASUALIDADE SÍSMICA .....	3
2.1 - Introdução .....	3
2.2 - Zonas de Geração Sísmica .....	4
2.3 - As Ocorrências no Espaço .....	5
2.4 - As Ocorrências no Tempo .....	6
2.5 - A Distribuição de Magnitudes .....	6
2.6 - Atenuação da Intensidade do Movimento Sísmico .....	7
2.7 - Modelo Matemático para a Análise Probabilística da Casualidade Sísmica .....	9
2.8 - Desagregação da Casualidade Sísmica .....	12
3 - MODELAÇÃO DO PROCESSO SÍSMICO DE OCORRÊNCIA .....	14
3.1 - Os Dados de Base .....	14
3.2 - Modelo de Zonas de Geração Sísmica .....	17
3.3 - Estudo da Ocorrência no Tempo .....	17
3.4 - Modelo de Frequência - Magnitude .....	20
4 - GEOLOGIA SUPERFICIAL .....	24
5 - MODELAÇÃO DA ATENUAÇÃO DOS MOVIMENTOS SÍSMICOS .....	27
6 - AVALIAÇÃO DA CASUALIDADE SÍSMICA .....	30
6.1 - Metodologia Clássica .....	30
6.2 - Metodologia Baseada na Distribuição Espacial da Sismicidade .....	31
6.3 - Análise dos Resultados e Comparação das Diferentes Metodologias .....	32
6.4 - Desagregação da Casualidade Sísmica .....	36
7 - CONCLUSÕES .....	41
AGRADECIMENTOS .....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44
ANEXO .....	49
DESAGREGAÇÃO PARA AS ORDENADAS ESPECTRAIS 0, 0,2 E 1 SEGUNDOS, PARA AS SEDES DE CONCELHO DO GRUPO CENTRAL, PROBABILIDADE DE EXCEDÊNCIA DE 10% EM 50 ANOS .....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 3.1 – Mapa de epicentros para a zona em estudo, anos 1522 a 1998 [Sousa & Martins, 2000]. .....	15
Figura 3.2 – Percentagem de sismos por intervalo de tempo com informação de magnitude ou intensidade epicentral [Sousa & Martins, 2000]. .....	16
Figura 3.3 – Modelo de zonas de geração sísmica adoptado no presente trabalho. As 9 grandes zonas consideradas agrupam as 28 zonas de Nunes <i>et al.</i> [2000b]. .....	17
Figura 3.4 – Estudo da exaustividade segundo o método de Stepp [1971, em Montilla, 2000]. .....	19
Figura 3.5 – Estudo da exaustividade do catálogo sísmico. ....	20
Figura 3.6 – Valores do parâmetro $b$ , para as 9 zonas de geração sísmica. ....	22
Figura 3.7 – Máximas magnitudes encontradas no catálogo, para as 9 zonas de geração sísmica. ....	22
Figura 3.8 – Número de sismos por ano e por unidade de área, para as 9 zonas de geração sísmica. ....	23
Figura 4.1 – Cartas de solos para as ilhas Terceira (em cima) e S. Jorge (em baixo) [em Forjaz <i>et al.</i> , 2000]. .....	25
Figura 5.1 – Registos obtidos pela rede acelerográfica dos Açores (círculos) e curvas de atenuação de acordo com o modelo de Oliveira <i>et al.</i> [2000]. .....	27
Figura 5.2 – Registos da rede acelerográfica dos Açores e curvas de atenuação de Boore <i>et al.</i> [1997] para as magnitudes 5,6, 5,8 e 7,2. ....	28
Figura 5.3 – Curvas de atenuação de Boore <i>et al.</i> [1997] para os diferentes tipos de solo para as magnitudes 5,8 e 7,2. ....	29
Figura 6.1 – Mapa de casualidade sísmica, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (metodologia clássica). ....	31
Figura 6.2 – Mapa de casualidade sísmica, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (metodologia baseada na distribuição espacial da sismicidade). ....	31
Figura 6.3 – Localização das sedes de concelho do Grupo Central dos Açores. ....	33

Figura 6.4 – Curvas de casualidade sísmica para as sedes de concelho do Grupo Central. ....	33
Figura 6.5 – Espectro de resposta em aceleração para as sedes de concelho do Grupo Central, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	34
Figura 6.6 – Mapa de casualidade sísmica para o Grupo Central e valores de pico da aceleração, com a influência das condições geológicas locais, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (metodologia baseada na distribuição espacial da sismicidade). ....	34
Figura 6.7 – Mapa de casualidade sísmica para o Grupo Central e ordenada espectral de 0,2 s, com a influência das condições geológicas locais, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	35
Figura 6.8 – Mapa de casualidade sísmica para o Grupo Central e ordenada espectral de 1 s, com a influência das condições geológicas locais, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	35
Figura 6.9 – Desagregação da casualidade sísmica na Horta, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	37
Figura 6.10 – Desagregação para as ordenadas espectrais 0,2 segundos (em cima) e 1 segundo (em baixo), cidade da Horta, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	39
Figura 6.11 – Espectro de resposta para a Horta para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (linha a tracejado) e para o cenário modal obtido pela análise da desagregação da casualidade (linha azul). A área colorida delimita o erro, no espectro do evento modal derivado da lei de atenuação. ....	40
Figura A.1 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade da Madalena, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	50
Figura A.2 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de S. Roque do Pico, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	51
Figura A.3 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Lajes do Pico, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	52



Figura A.4 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Velas, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	53
Figura A.5 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Calheta, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	54
Figura A.6 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Sta Cruz da Graciosa, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.....	55
Figura A.7 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Praia da Vitória, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.....	56
Figura A.8 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Angra do Heroísmo, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.....	57

## ÍNDICE DE QUADROS

---

Quadro 3.1 - Síntese do conteúdo do catálogo sísmico da Região dos Açores [Sousa & Martins, 2000]. .....	15
Quadro 3.2 - Estudo da exaustividade do catálogo pelo método de Stepp [1971].....	19
Quadro 3.3 - Parâmetros estimados para as 9 zonas de geração sísmica. ....	21
Quadro 4.1 - Classificação geotécnica de solos e rochas do Arquipélago dos Açores [Forjaz <i>et al.</i> , 2000]. .....	24
Quadro 4.2 - Classificação da geologia superficial das freguesias do Grupo Central [Nunes, 2001]. .....	26
Quadro 6.1 - Valores médios e modais da magnitude (M) e distância (R) para diferentes probabilidades de excedência e contribuição desses pares para a casualidade. ....	36
Quadro 6.2 - Valores médios e modais da magnitude (M) e distância (R) para as ordenadas espectrais 0,01, 0,2 e 1 segundos, para as sedes de concelho do Grupo Central, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. ....	38

# 1 - INTRODUÇÃO

---

O presente relatório, elaborado no âmbito do projecto de investigação PRAXIS XXI “Estudo do Risco/Casualidade Sísmica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores” (PPERCAS), descreve as actividades desenvolvidas no Grupo de Estudos e Equipamentos de Engenharia Sísmica (G3ES) do Departamento de Estruturas (DE) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), inseridas na tarefa 8 deste projecto, designada de “Estudo de Casualidade Sísmica”.

Para além do presente relatório o trabalho desenvolvido nesta tarefa conduziu à elaboração de 2 artigos aceites para publicação no livro de *proceedings* do 5º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, intitulados “Casualidade Sísmica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores” por A. Carvalho, M. L. Sousa, C. S. Oliveira, J. C. Nunes, A. Campos Costa e V. H. Forjaz e “Seismic Hazard De-aggregation for the Central Group of Azores Islands” por M. L. Sousa, A. Carvalho e A. Campos Costa e de um terceiro que foi submetido para publicação na revista *Bolletino di Geofisica teorica ed applicata* intitulado “Seismic Hazard for Central Group of Azores Islands” por A. Carvalho, M. L. Sousa, C. S. Oliveira, A. Campos Costa, J. C. Nunes e V. H. Forjaz.

De acordo com o especificado no Anexo Técnico do documento de candidatura, o estudo abrange a região do Grupo Central do Arquipélago dos Açores que compreende as ilhas Terceira, S. Jorge, Graciosa, Pico e Faial e os seus principais objectivos são:

(i) O estabelecimento de mapas e curvas de casualidade sísmica para o Grupo Central do Arquipélago dos Açores, com vista a mitigar os riscos sísmicos na Região Autónoma dos Açores e a poderem ser considerados na regulamentação sísmo-resistente no que toca à classificação das zonas sísmicas, com consequências importantes ao nível do planeamento da emergência.

(ii) A definição dos espectros dos movimentos sísmicos intensos com vista ao projecto de estruturas.

(iii) O estudo do impacto de sismos sobre a comunidade recorrendo ao conceito de cenário sísmico, ao qual se pode associar uma dada probabilidade de ocorrência, com vista a serem utilizados na definição de planos de emergência.

A tarefa de compilação de um catálogo sísmico para o presente estudo de casualidade já foi desenvolvida em colaboração com a Universidade dos Açores e

com o Instituto Superior Técnico, que são alguns dos parceiros do LNEC neste projecto, e apresentada no relatório intitulado “Compilação de um Catálogo Sísmico para a Região dos Açores”.

No capítulo 2 deste relatório descrevem-se as metodologias utilizadas para a avaliação probabilística da casualidade sísmica e justifica-se a importância da desagregação da casualidade sísmica nos estudos de cenários e na definição da acção sísmica a ser considerada na regulamentação sismo-resistente.

No capítulo 3 apresenta-se uma síntese da informação contida no catálogo sísmico utilizado no presente estudo e os procedimentos e opções tomadas conducentes à estimativa dos parâmetros dos modelos probabilísticos descritos no capítulo 2.

No capítulo 4 apresenta-se a informação sobre a geologia superficial do Grupo Central do Arquipélago dos Açores, disponibilizada pela Universidade dos Açores e necessária à concretização do primeiro dos objectivos do projecto atrás mencionado.

No capítulo 5 discute-se e apresenta-se o modelo de atenuação a ser utilizado no estudo da casualidade sísmica.

No capítulo 6 efectua-se a análise da casualidade sísmica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores apresentando mapas e curvas de casualidade sísmica para a região analisada, espectros de casualidade uniforme para um dado período de retorno e espectros de resposta calculados para os eventos modais decorrentes da desagregação, para a cidade da Horta. Utilizam-se duas metodologias distintas para avaliar a casualidade sísmica, a primeira denominada de clássica e baseada num modelo de zonas de geração e a segunda baseada na distribuição espacial da sismicidade. Efectua-se ainda a comparação dos resultados obtidos com as duas metodologias utilizadas.

Finalmente, no capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões do presente estudo de casualidade sísmica.

No anexo apresentam-se as figuras da desagregação da casualidade para as ordenadas espectrais 0,01, 0,2 e 1 segundos para todas as sedes de concelho do Grupo Central (excepto o concelho Horta que foi exposto no capítulo 6).

## **2 - METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DA CASUALIDADE SÍSMICA**

---

### **2.1 - Introdução**

Existem diversos métodos de cálculo para efectuar a análise da casualidade sísmica e o zonamento sísmico de um território, que se podem classificar em duas categorias principais, consoante consideram o fenómeno sísmico como um processo determinístico ou probabilístico.

Os métodos determinísticos baseiam-se nas hipóteses de que a sismicidade futura de uma dada região, será similar à sua história sísmica, e de que não ocorrerão sismos cujos efeitos sejam superiores aos já observados. Em geral, estas técnicas aplicam-se à determinação da casualidade sísmica de locais particulares, e são direccionadas para os estudos de segurança de estruturas especiais, tais como centrais térmicas e nucleares, depósitos de gás, barragens, etc. Os métodos determinísticos também se aplicam na elaboração de cartas de intensidades máximas, com o objectivo de estabelecer o zonamento sísmico de um território.

Num contexto probabilístico, encaram-se os fenómenos sísmicos como uma série de acontecimentos aleatórios no espaço, tempo e grandeza, recorrendo-se a técnicas probabilísticas para modelar a sua ocorrência e caracterizar os efeitos do sismo num local, ou conjunto de locais. O método probabilístico com maior divulgação e aplicação a nível mundial foi desenvolvido por Cornell [1968]. Segundo este autor, o estudo da casualidade sísmica de uma região inserida num ambiente sismotectónico, visa a determinação, em vários locais dessa região, das probabilidades de excedência de um dado nível de intensidade dos movimentos sísmicos. Esta metodologia está exposta com detalhe em Sousa [1996] e é apresentada de forma resumida ao longo do presente capítulo.

No que diz respeito à definição da acção sísmica distinguem-se dois grandes processos: o processo da ocorrência sísmica que lida com o local, data e grandeza do evento e o chamado processo dos movimentos sísmicos intensos que se refere à propagação do movimento sísmico entre a fonte e o local em análise.

Relativamente ao primeiro processo, os dados de base têm que ser transformados em distribuições no espaço, tempo e grandeza, cujos parâmetros são usados no programa de cálculo. A distribuição da ocorrência no espaço descreve a distribuição geográfica dos epicentros na região sísmica analisada. A distribuição da

ocorrência temporal consiste na caracterização probabilística da sequência temporal dos eventos, traduzida, para o cálculo, no caso dos modelos mais simples, por uma taxa média de ocorrência de sismos por ano. A distribuição da grandeza, traduz-se pelas relações de frequência-magnitude, que descrevem a frequência relativa e intemporal de ocorrência de sismos com magnitudes diferentes.

No que toca ao segundo processo, os elementos que contribuem para a avaliação da acção sísmica são as leis de atenuação. Estas leis traduzem a relação entre a intensidade do sismo num local e a distância desse local ao epicentro, a energia libertada no sismo e, eventualmente, parâmetros adicionais que visem uma melhor descrição dos processos físicos de atenuação, tais como a informação sobre as condições geológicas locais.

Neste trabalho a análise probabilística da casualidade sísmica foi efectuada numa base regional e à escala do Arquipélago dos Açores e cujos resultados constituem elementos fundamentais para o estabelecimento de acções sísmicas regulamentares no projecto e dimensionamento de estruturas. No entanto, para aplicações a locais específicos onde se pretendam instalar estruturas críticas, os valores agora obtidos deverão ser encarados como meramente indicativos, sendo necessários estudos mais detalhados dos solos e estruturas tectónicas locais, e da sismicidade histórica e instrumental da região, para avaliar com maior precisão a casualidade no local em análise.

## **2.2 - Zonas de Geração Sísmica**

Considere-se um dado local que pode ser afectado por sismos que ocorrem numa dada região sísmica. O primeiro passo da metodologia clássica para a avaliação probabilística da casualidade sísmica consiste em dividir esse território em zonas de geração sísmica, as quais delimitam regiões que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas. Neste contexto, uma zona de geração sísmica representa uma região da crosta terrestre nas quais são identificadas, ou não, falhas activas onde os sismos podem ser gerados, sendo zonas aproximadamente homogéneas no que respeita às distribuições que caracterizam a sua actividade sísmica.

Uma vez construído o modelo de zonas de geração, a exposição de determinado local à acção dos sismos resultará da soma da casualidade associada a cada uma das zonas.

Frankel [1995] propõe uma outra metodologia que não se baseia no conceito de zona de geração. A área em estudo dividir-se-á não em zonas mas em células

quadradas de dimensão reduzida, pelo que a soma referida no parágrafo anterior extender-se-á não a todas as zonas mas a todas as células da área (na prática apenas se consideram as células que se encontram a menos de uma determinada distância do ponto de cálculo). Esta metodologia será também considerada no estudo da casualidade sísmica do Arquipélago dos Açores, sendo o primeiro passo para efectuar a desagregação da casualidade sísmica.

### 2.3 - As Ocorrências no Espaço

A delimitação de zonas de geração implica uma hipótese adicional sobre a distribuição das ocorrências no espaço, ou seja, sobre a distribuição estatística que representa a forma como os epicentros se distribuem dentro de cada zona de geração. A escolha desta distribuição depende obviamente da forma como é construído o modelo de zonas de geração e das características da sismicidade da região.

Nas regiões de sismicidade marcadamente difusa, em que é difícil estabelecer uma associação entre as estruturas tectónicas activas e os epicentros, admite-se que a sismicidade se distribui uniformemente dentro de cada zona. Desta forma assume-se que a localização dos epicentros é equiprovável em qualquer ponto de uma dada zona de geração sísmica, com uma função densidade de probabilidade uniforme dada por

$$f_{xy}(x,y) = \frac{1}{\int_A dA} = \frac{1}{\iint_{x,y} dy \cdot dx} \quad (1)$$

em que  $\int_A dA$  representa a área da zona de geração.

A função densidade de probabilidade da distância depende, assim, da geometria da fonte e da localização do ponto de cálculo.

Na metodologia de Frankel [1995] em que a região sísmica é dividida em pequenas células, considera-se que todos os pontos da célula se encontram a igual distância do ponto de cálculo. Assim, a função de densidade de probabilidade da distância entre a célula e o local em análise terá o valor 1 para a célula que se considerar no momento e o valor 0 para as restantes.

Nos modelos matemáticos das secções seguintes, o índice  $k$  designará, implicitamente, ou uma zona de geração ou uma dada célula.

## 2.4 - As Ocorrências no Tempo

O modelo estocástico utilizado mais correntemente para caracterizar o processo de ocorrência temporal de sismos,  $N(t)$ , é o de Poisson, devido à simplicidade da sua formulação e aplicação.

Num processo de Poisson homogéneo as ocorrências são independentes ao longo do tempo e a taxa média de ocorrências,  $\lambda$ , é constante. Ao fixar-se um valor genérico,  $t$ , para o parâmetro tempo, o número de eventos até ao instante considerado,  $N_t = n$ , é uma simples variável aleatória discreta, cuja distribuição de probabilidades é a de Poisson com parâmetro  $\lambda t$ :

$$P(N_t = n, \lambda t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty. \quad (2)$$

O parâmetro da distribuição,  $\lambda t$ , representa o número médio de ocorrências durante o intervalo de tempo  $t$ .

## 2.5 - A Distribuição de Magnitudes

A análise dos catálogos sísmicos de uma determinada região permite obter a relação entre a frequência com que ocorrem os sismos e as respectivas magnitudes, para um dado período de tempo.

A relação de frequência-magnitude que mais se utiliza a nível mundial foi desenvolvida por Gutenberg e Richter em 1944 [Gutenberg & Richter, 1944]. O modelo proposto por estes autores estabelece uma dependência linear entre o logaritmo da frequência de ocorrências de sismos e as suas magnitudes, para uma dada região,  $k$ , que se presume homogénea em termos de sismicidade:

$$\log N_k(m) = a_k + b_k \cdot m, \quad (3)$$

em que  $N_k(m)$  é o número de sismos com magnitude maior ou igual a  $m$  que ocorre na região analisada, para um dado período de observação. O coeficiente  $a_k$  é conhecido por actividade sísmica da região e está relacionado com a taxa de ocorrência total no período de observação considerado. O coeficiente  $b_k$  descreve a taxa relativa de ocorrência entre sismos de maior e menor magnitude. Os valores destes parâmetros devem ser ajustados aos dados do catálogo sísmico da região em análise.

A expressão 3 escreve-se usualmente na forma:



$$N_k(m) = e^{\alpha_k - \beta_k \cdot m}, \quad (4)$$

sendo, portanto,  $\alpha_k = \ln(10) \cdot a_k$  e  $\beta_k = -\ln(10) \cdot b_k$ .

Assumindo que a grandeza de eventos sucessivos de uma dada zona de geração são independentes, que os sismos com magnitude inferior a  $m_0$ , que ocorrem na zona de geração  $k$ , contribuem pouco para os valores finais das intensidades dos movimentos sísmicos no local, e incorporando no modelo um valor de magnitude máxima  $m_1$  que não pode ser ultrapassado, então a distribuição cumulativa de probabilidades das magnitudes para essa zona,  $F_{M(k)}(m)$ , que se adequa à relação de Gutenberg-Richter truncada inferior e superiormente escreve-se [Araya & Der Kiureghian, 1988]:

$$F_{M(k)}(m) = P(M < m \mid m_0 \leq M \leq m_1) = \frac{1 - e^{-\beta_k(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta_k(m_1-m_0)}}, \quad m_0 \leq m \leq m_1, \quad (5)$$

em que  $m_0$  é o limiar mínimo de magnitude abaixo do qual se considera que um sismo não causa estragos do ponto de vista da engenharia e  $m_1$  designa-se por magnitude do sismo máximo provável, a qual pode ser fundamentada por estudos de sismotectónica e paleosismicidade:

A respectiva função densidade de probabilidade vem dada por:

$$f_{M(k)}(m) = \frac{\beta_k e^{-\beta_k(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta_k(m_1-m_0)}}, \quad m_0 \leq m \leq m_1. \quad (6)$$

## 2.6 - Atenuação da Intensidade do Movimento Sísmico

A intensidade do movimento do solo aumenta com a energia libertada na fonte (magnitude do sismo) e diminui geralmente com a distância ao epicentro, uma vez que as ondas sísmicas são atenuadas no meio em que se propagam.

Uma lei de atenuação é uma relação empírica que exprime a dependência entre a intensidade do movimento do solo e uma série de variáveis explicativas, como sejam a distância à fonte e a energia nela libertada. A forma geral de um modelo de atenuação é:

$$Y = m_Y(M, R, \mathbf{w}) + \varepsilon_Y, \quad (7)$$

em que

$Y$  é a intensidade do movimento do solo que se pretende prever,

$m_Y(M, R, \mathbf{w})$  é o valor estimado pelo modelo matemático,

$R$  é a distância entre a fonte e o local em análise,

$M$  é a variável que descreve a grandeza do sismo que pode ser a magnitude ou a intensidade epicentral,

$\mathbf{w}$  é um vector de variáveis que pode caracterizar a fonte, a propagação das ondas no meio, ou mais usualmente as condições do local onde é medida a intensidade do movimento e

$\varepsilon_Y$  é uma variável aleatória que representa as flutuações em  $Y$  não explicadas pelas variáveis do modelo, bem como os erros de medição da variável dependente.

Admite-se que os valores de  $\varepsilon_Y$  se distribuem independentemente uns dos outros, são independentes das variáveis explicativas do modelo e seguem uma distribuição normal de média nula e variância constante, ou seja,  $\varepsilon_Y \sim N(0, \sigma_{\varepsilon_Y})$ . Desta forma assume-se que a distribuição da variável  $Y$  em torno do valor central,  $\bar{Y} = m_Y(M, R, \mathbf{w})$ , é gaussiana e independente da grandeza do sismo e da distância do seu epicentro ao local analisado.

Boore *et al.* [1997] publicaram leis de atenuação que permitem prever as ordenadas espectrais da aceleração absoluta a partir da magnitude de momento, da distância e das condições geológicas locais, propondo o seguinte modelo:

$$\log(a_j) = B_{1,j} + B_{2,j} \cdot (M - 6) + B_{3,j} \cdot (M - 6)^2 + B_{5,j} \cdot \log(R) + B_{V,j} \log\left(\frac{V_S}{V_{A,j}}\right), \quad (8)$$

em que

$a_j$  é a aceleração para cada frequência  $j$ , expressa em % de  $g$ ,

$B_{1,j} = B_{1SS,j} \cdot G_{SS} + B_{1RS,j} \cdot G_{RS} + B_{1ALL,j} \cdot G_{1ALL}$ , com  $G_{SS}$  igual a 1 para mecanismos focais de deslizamento e igual a 0 nos outros casos;  $G_{RS}$  igual a 1 para mecanismos focais de falha inversa e igual a 0 nos outros casos e  $G_{ALL}$  igual a 0 se  $G_{SS}$  ou  $G_{RS}$  forem 1 e igual a 1 se o tipo da falha não for especificado,

$R = \sqrt{d^2 + h_{0,j}^2}$  na qual  $d$  é a menor distância entre a estação e a projecção da rotura da falha e  $h_{0,j}$  é uma constante a ser determinada, para cada

frequência,

o termo  $B_{5,j} \cdot \log(R)$  define a atenuação geométrica das ondas sísmicas,

$V_s$  é a velocidade das ondas de corte, nos primeiros 30 m de camada de solo,

$B_{1,j}$ ,  $B_{1SS,j}$ ,  $B_{1RS,j}$ ,  $B_{1ALL,j}$ ,  $B_{2,j}$ ,  $B_{5,j}$ ,  $B_{V,j}$  e  $V_{A,j}$  são constantes a determinar para cada frequência.

## 2.7 - Modelo Matemático para a Análise Probabilística da Casualidade Sísmica

O modelo matemático desenvolvido por Cornell [Cornell, 1968], para o cálculo da casualidade sísmica baseia-se no teorema da probabilidade total:

$$P(A) = \int_{\mathbf{X}} P(A | \mathbf{x}) f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (9)$$

em que  $A$  é o acontecimento cuja probabilidade se pretende calcular e  $\mathbf{X}$  é um vector de variáveis aleatórias contínuas das quais  $A$  depende.

No caso particular do cálculo da casualidade sísmica, o acontecimento  $A$  representa o facto da intensidade de um efeito qualquer do sismo, designada por  $Y$ , exceder um dado nível de intensidade  $y$ , num dado local durante um sismo, ou seja,  $A \equiv Y > y$ , e a integração é feita para todos os valores de  $\mathbf{X}$  para os quais a intensidade  $Y$  excede  $y$ .

As variáveis aleatórias do vector  $\mathbf{X}$ , do qual  $Y$  depende, são aquelas que caracterizam o sismo, desde a sua origem até ao local em estudo, bem como a sua interacção com o local em estudo, ou seja, o vector  $\mathbf{X}$  inclui todas as variáveis aleatórias contabilizadas no modelo geral de atenuação (expressão 7).

Considere-se que os acontecimentos capazes de afectar o local em análise ocorrem numa região sísmica constituída por  $n$  zonas de geração ou células, sendo cada uma delas designada arbitrariamente por zona  $k$ . Considere-se ainda que um sismo, com origem nessa zona  $k$ , é capaz de causar o efeito genérico traduzido pela intensidade do movimento do solo  $Y$ . Assumindo que as variáveis aleatórias do vector  $\mathbf{X}$  são estatisticamente independentes, então o teorema da probabilidade total permite calcular a probabilidade de excedência de um nível  $Y_0$  de intensidade de referência, dada a ocorrência de um sismo na zona de geração:

$$P(Y > Y_0)_{(k)} = \int_{RM} P(Y > Y_0 | m, r)_{(k)} f_{M(k)}(m) f_{R(k)}(r) dm dr, \quad (10)$$

em que  $P(Y > Y_0 | m, r)_{(k)}$  representa a probabilidade condicional de se exceder  $Y_0$  no local à distância  $R$  da zona de geração  $k$  quando ocorre um sismo de magnitude  $M$ , representando portanto as incertezas associadas inerentes ao processo de atenuação.

Para se calcular a taxa média,  $\omega_k$ , de ocorrência de sismos na zona de geração  $k$ , na unidade de tempo, que originam no local intensidades superiores ou iguais a um determinado nível de referência  $Y_0$ , bastará multiplicar a probabilidade dada pela expressão anterior por  $\lambda_k$ , que representa o número médio de ocorrências, na unidade de tempo, nessa zona de geração sísmica, ou seja:

$$\omega_k = \lambda_k \int_{RM} \int P(Y > Y_0 | m, r)_{(k)} f_{M(k)}(m) f_{R(k)}(r) dm dr . \quad (11)$$

Se em vez de um único parâmetro do movimento do solo  $Y$ , a análise probabilística da casualidade sísmica for efectuada para uma descrição espectral da intensidade do movimento no local, e se os valores das ordenadas espectrais forem estatisticamente independentes, a expressão 11 pode ser generalizada para a ordenada  $j$  [Campos Costa, 1997]:

$$\omega_{k,j} = \lambda_k \int_{RM} \int P(Y_j > Y_{0,j} | m, r)_{(k)} f_{M(k)}(m) f_{R(k)}(r) dm dr . \quad (12)$$

A função densidade de probabilidade  $f_{M(k)}(m)$ , ou distribuição da grandeza do sismo, é deduzida a partir das relações de frequência-magnitude determinadas para cada zona de geração (expressão 6). A função  $f_{R(k)}(r)$  é a função densidade de probabilidade da distância hipocentral obtida a partir da distribuição espacial dos epicentros da zona  $k$  e da relação desta zona com o local em análise. Como já foi mencionado anteriormente, na metodologia de Frankel [1995] esta função  $f_{R(k)}(r)$  não aparecerá explicitamente no cálculo pois será 1 para a célula considerada no momento e zero para as restantes.

O cálculo final da distribuição de probabilidade de serem excedidos, pelo menos uma vez, determinados níveis de aceleração espectral  $a_{0,j}$ , na unidade de tempo, devido à ocorrência aleatória de sismos em qualquer das  $n$  zonas de geração que contribuem para a sismicidade sentida no local, baseia-se na propriedade do processo de Poisson de não ser afectado pela agregação de processos de Poisson independentes.

Assim, supondo que o processo de ocorrências no tempo é independente de zona para zona, isto é, o facto de ter ocorrido um sismo numa determinada zona de

geração não condiciona o processo de ocorrências em qualquer outra zona de geração, então, as taxas de ocorrência poderão ser somadas para obter a taxa de ocorrência de um processo geral de Poisson do acontecimento  $a_j > a_{0,j}$ :

$$P(a > a_{0,j}) = 1 - e^{-\sum_{k=1}^n \omega_{k,j}}. \quad (13)$$

Neste contexto, o acontecimento  $a_j > a_{0,j}$  corresponde a verificar-se, pelo menos uma vez, no local em análise, uma intensidade superior ao nível de referência  $a_{0,j}$ .

Quando a unidade de tempo é o ano a expressão anterior fornece a probabilidade anual de excedência.

Resumindo a metodologia apresentada nesta secção, a probabilidade, por unidade de tempo, da intensidade de um dado efeito do sismo exceder, pelo menos uma vez, um determinado nível, num local, é calculada multiplicando a probabilidade do mesmo nível ser excedido quando ocorre um sismo de magnitude e distância focal dadas, pelas respectivas funções de densidade de probabilidade, integrando para todos os valores de  $m$  e  $r$ , multiplicando pela taxa de ocorrência da respectiva zona de geração (ou célula) e somando para todas as zonas (ou células).

Define-se *período de retorno*,  $RP_0$ , como sendo o inverso da probabilidade anual de ser excedido, pelo menos uma vez, um determinado nível de intensidade,  $a_0$ , no local, o que matematicamente se traduz por:

$$RP_0 \equiv RP(a_{0,j}) = \frac{1}{P(a > a_{0,j})} = \frac{1}{1 - e^{-\sum_{k=1}^n \omega_{k,j}}}. \quad (14)$$

No contexto deste trabalho, as curvas de casualidade sísmica serão apresentadas como funções de distribuição da intensidade  $a_0$  em que as probabilidades são representadas pela probabilidade anual  $p_0$  de ser excedida um dado nível de intensidade  $a_0$ , ou pelo correspondente período de retorno  $RP_0$ , o que formalmente se traduz por:

$$a_0 \equiv a(p_0) \equiv a(RP_0), \quad (15)$$

sendo naturalmente  $p_0 \equiv P(a > a_0) = 1 - P(a \leq a_0)$ .

## 2.8 - Desagregação da Casualidade Sísmica

Como se descreveu na secção anterior a análise probabilística da casualidade sísmica envolve a integração de todas as possíveis contribuições da sismicidade para um dado local. Assim, deixa de ser possível caracterizar, com base num único evento, a ameaça sísmica para o local em análise [McGuire, 1995; Bazzurro & Cornell, 1999].

Consequentemente, em estudos de caracterização de cenários, ou na especificação da acção sísmica num local, a determinação do sismo máximo provável baseia-se, muitas vezes, em hipóteses determinísticas, como sejam a magnitude do pior evento histórico existente nos catálogos e a sua localização estimada a partir de falhas ou de zonas sísmicas de geração.

Uma abordagem determinística apresenta porém diversas desvantagens quando se pretende, por exemplo, dimensionar os recursos a afectar a um sistema de gestão de emergência, pois: (i) esses recursos poderão ser sobredimensionados com base no sismo máximo provável (ii) algumas regiões do país sujeitas a eventos menos severos poderão ser menosprezadas, ou (iii) um nível de risco adequado que assegure uma igual protecção sísmica do país poderá não ser considerado.

As desvantagens de uma análise determinística poderão ser ultrapassadas se a caracterização do cenário sísmico, ou mesmo da acção sísmica para disposições regulamentares, decorrerem de uma análise probabilística da casualidade sísmica. Importa assim identificar o evento, ou os eventos dominantes para um determinado nível de casualidade sísmica num local.

O procedimento utilizado para estimar o evento sísmico que mais significativamente contribui, em termos de magnitude e distância, para a casualidade de um dado local, satisfazendo um determinado nível do movimento do solo ou um período de retorno especificado, designa-se por *desagregação da casualidade sísmica*.

Apesar deste tipo de análise ser recente ela tem vindo a ser largamente discutida e aplicada [e.g., Chapman, 1995; Frankel, 1995; Cramer & Petersen, 1996; McGuire, 1995; Bazzurro & Cornell, 1999; Harmsen *et al.*, 1999].

A desagregação da casualidade sísmica consiste na separação das contribuições para a probabilidade de excedência em diferentes espaços das variáveis aleatórias envolvidas no processo. O espaço mais utilizado é bidimensional (2D), ou seja, a casualidade é estudada em termos das contribuições elementares (por células) das variáveis magnitude  $M$  e distância  $R$  ou  $\ln(R)$ . McGuire [1995]

introduziu uma terceira dimensão no procedimento analisando a contribuição para a casualidade em termos de  $M$ ,  $R$  e  $\varepsilon$ , representando a última variável aleatória uma medida do desvio do movimento do solo em relação ao previsto pela mediana da lei de atenuação. Bazzurro & Cornell [1999] aperfeiçoaram o procedimento avaliando as contribuições relativas para a casualidade em termos de  $M$  e  $\varepsilon$  e da latitude e longitude, por substituição da variável  $R$ .

Estes autores discutem de uma forma muito completa as diferentes técnicas de desagregação da casualidade sísmica, abordando diversos problemas envolvidos como sejam a escolha de distribuições de massa de probabilidade ou de densidade de probabilidade, a escolha das variáveis aleatórias envolvidas ( $R$  ou  $\ln(R)$ ; 2D, 3D, ou a desagregação geográfica 4D) e a escolha das dimensões das células e as suas consequências nos resultados finais da desagregação.

Bazzurro & Cornell [1999] descrevem os procedimentos envolvidos na desagregação da casualidade sísmica explicitando que se deverá fixar inicialmente uma frequência anual de excedência ou um determinado nível do movimento do solo que se pretende atingir no local. De acordo com estes autores a desagregação pode ser alcançada em duas etapas: (i) acumular em cada célula elementar a sua contribuição para a casualidade global e (ii) dividir a contribuição total acumulada em cada célula pela frequência anual de excedência total,  $\omega(Y > y)$ . Desta forma, quando a contribuição para a casualidade sísmica é acumulada numa célula bidimensional de  $M$  e  $R$  a desagregação da casualidade é representada pela distribuição conjunta de massa de probabilidade de  $M$  e  $R$ , condicionada por  $Y > y$  no local [Bazzurro & Cornell, 1999].

Os mesmos autores também especificam que quando o objectivo da desagregação é o de estimar o evento médio ou o evento mais provável que origine a excedência de um nível especificado do movimento do solo no local, os resultados da desagregação são muitas vezes sintetizados em parâmetros estatísticos de tendência central como a média e a moda.

Bazzurro & Cornell [1999] analisaram ainda as vantagens e desvantagens de definir um cenário sísmico recorrendo a valores esperados ( $\bar{M}$ ,  $\bar{R}$ ) ou a valores modais ( $\hat{M}$ ,  $\hat{R}$ ) resultantes da desagregação. Harmsen *et al.* [1999] optaram por calcular tanto os valores esperados como os modais, ressaltando que o cálculo de ( $\hat{M}$ ,  $\hat{R}$ ) depende das dimensões das células, enquanto que o par ( $\bar{M}$ ,  $\bar{R}$ ) pode especificar um evento que tenha uma contribuição desprezível para a casualidade.

## 3 - MODELAÇÃO DO PROCESSO SÍSMICO DE OCORRÊNCIA

---

### 3.1 - Os Dados de Base

A informação contida num catálogo sísmico de uma determinada região é fundamental para o estudo da casualidade sísmica da mesma.

O catálogo utilizado foi o compilado no âmbito do projecto PPERCAS para a região dos Açores e contem 9 833 registos no período compreendido entre 1522 e 1998 [Sousa & Martins, 2000] para a zona compreendida entre os paralelos 36 a 40° Norte e os meridianos 24 a 32° Oeste (figura 3.1).

Este catálogo resultou da compilação de dados de sismicidade existentes em catálogos sísmicos locais e mundiais, tendo-se dado prioridade aos primeiros em caso de duplicação da informação. Entre as fontes originais tem-se (i) o catálogo desenvolvido no âmbito dos estudos de casualidade sísmica para o Novo Hospital da Grotnha em Ponta Delgada [Costa Nunes, 1986] que cobre o período entre 1917 e 1979, (ii) o catálogo da Universidade dos Açores [Nunes *et al.*, 2000a] que cobre o período entre 1980 e 1998, (iii) o Boletim Sismológico Preliminar dos Açores [SIVISA, 1998] com os registos da crise sísmica despoletada pelo sismo do Faial de 9 de Julho de 1998 e (iv) o catálogo mundial NATL – *North Atlantic Region* - [NGDC & NEIC, 1996] que cobre o período entre 1591 e 1995, para o polígono em estudo. A informação constante destas fontes não sofreu qualquer tipo de revisão, excepção feita para os sismos históricos mais importantes.

O quadro 3.1 apresenta uma síntese da informação contida no catálogo sísmico da região dos Açores.

A figura 3.2 apresenta a percentagem de sismos, por intervalo de tempo, com e sem informação sobre a magnitude e/ou intensidade epicentral. Note-se a falta de exaustividade da compilação no que toca à informação sobre a grandeza dos eventos. De realçar que no estudo da casualidade sísmica apenas serão utilizados os registos que possuam informação completa no que respeita à data (ano, mês e dia), às coordenadas epicentrais (latitude e longitude) e à magnitude.



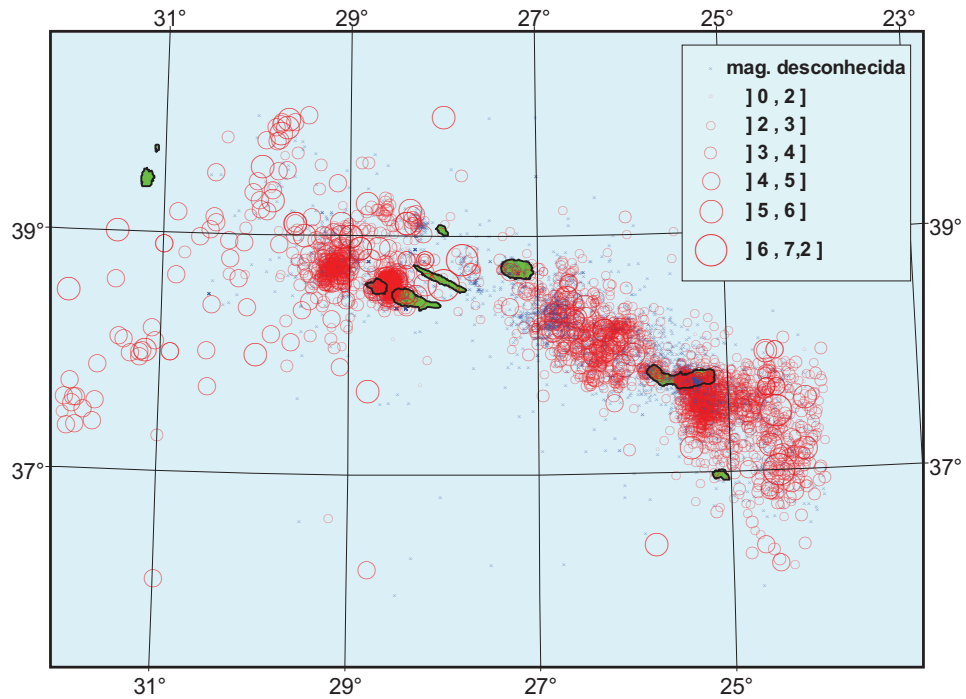


Figura 3.1 – Mapa de epicentros para a zona em estudo, anos 1522 a 1998 [Sousa & Martins, 2000].

Quadro 3.1 - Síntese do conteúdo do catálogo sísmico da Região dos Açores [Sousa & Martins, 2000].

Catálogo da região dos Açores		
Intervalo de tempo		1522 -1998
Nº de registos		9 833
Nº de registos c/ localização epicentral		9 833 (100%)
Nº de registos com loc. epic. e mag.		5 096 (52%)
Magnitude mínima no polígono	$m_b$	3,6
	$m_s$	3,7
	$M_L$	-
	outras mag.	0,2
Magnitude máxima no polígono	$m_b$	5,8
	$m_s$	5,7
	$M_L$	-
	outras mag.	7,2

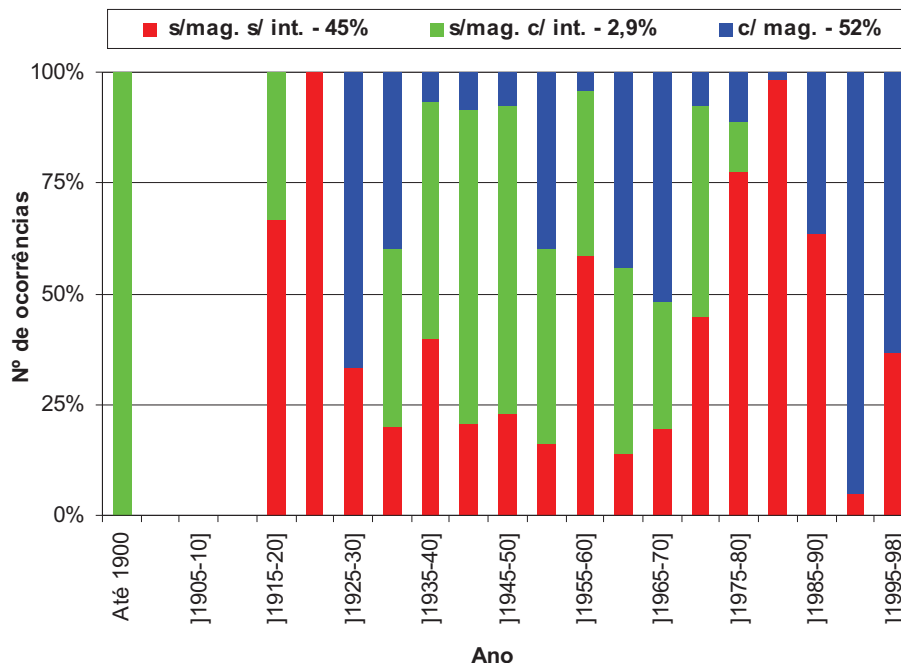


Figura 3.2 – Percentagem de sismos por intervalo de tempo com informação de magnitude ou intensidade epicentral [Sousa & Martins, 2000].

Face ao facto de 45% dos registos do catálogo não terem informação da grandeza do sismo (barras encarnadas, na figura 3.2), tentou completar-se o catálogo por duas vias:

- 1) estabeleceu-se uma relação empírica de conversão de intensidades,  $I_0$ , em magnitudes,  $M$ , obtida a partir dos registos que possuíam simultaneamente informação sobre a intensidade e a magnitude, verificando-se que a regressão conseguida possui um coeficiente de determinação muito reduzido:

$$M = 0,04 \cdot I_0^2 - 0,15 \cdot I_0 + 3,91$$

- 2) solicitou-se um trabalho exterior para estudar os sismos com magnitude desconhecida, dos quais se disponha simultaneamente informação sobre a localização epicentral e de pelo menos um ponto com valor de intensidade macrossísmica conhecida. Nestas condições, Paula [2001] conseguiu avaliar a magnitude de 98 sismos do Arquipélago. Porém, a magnitude estimada, dos 98 sismos considerados, varia entre 2,9 e 6,0 sendo que 60,2% dos sismos são de magnitude inferior ou igual a 4,0 e 32,6% têm magnitude entre 4,1 e 5,0. Uma vez que (i) apenas se consideraram, para o estudo da casualidade do Grupo Central, os sismos com magnitude superior ou igual a 3,5, (ii) os 98 sismos estudados por Paula [2001] incluem réplicas e premonitores e (iii) dos sismos com epicentro no Grupo Central apenas um tem magnitude superior a 4,5, optou

por não se refazer os cálculos entretanto já efectuados. A informação sobre a grandeza dos eventos estudados será importante noutro tipo de estudos, nomeadamente na identificação do padrão de réplicas característico do Arquipélago dos Açores.

### 3.2 - Modelo de Zonas de Geração Sísmica

Tendo em conta a tectónica do Arquipélago e a sua sismicidade, Nunes *et al.* [2000b] delinearam um modelo de 28 zonas de geração, representado na figura 3.3.

Devido à insuficiência da informação do catálogo para caracterizar com validade estatística as distribuições de probabilidade de cada uma dessas 28 zonas originais, estas foram agrupadas em 9 grandes zonas de geração, tendo mais uma vez em consideração a sismotectónica da região.

A figura 3.3 apresenta o modelo de zonas de geração adoptado.

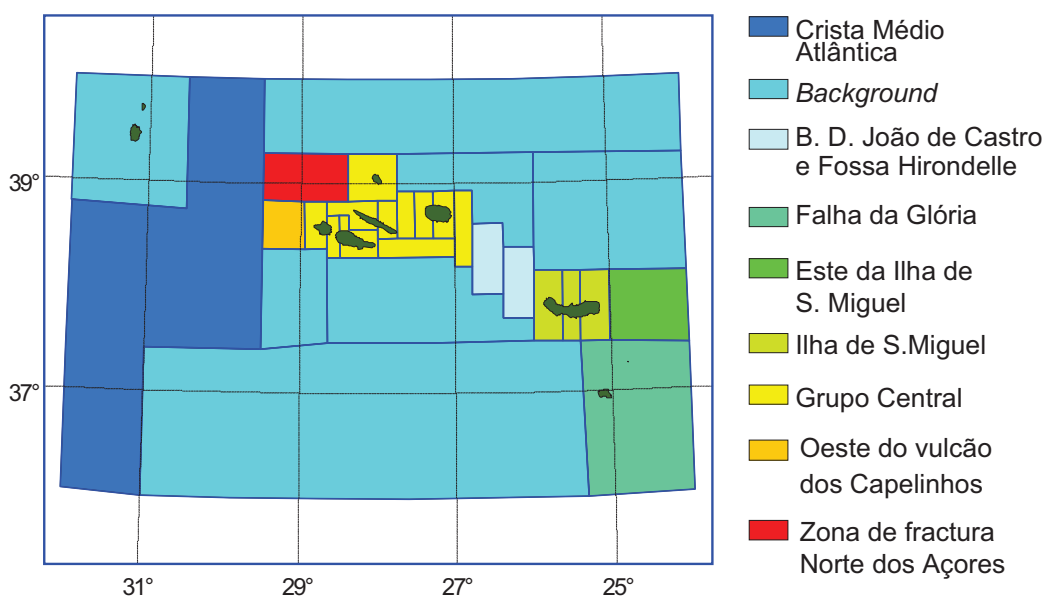


Figura 3.3 – Modelo de zonas de geração sísmica adoptado no presente trabalho. As 9 grandes zonas consideradas agrupam as 28 zonas propostas por Nunes *et al.* [2000b].

### 3.3 - Estudo da Ocorrência no Tempo

Para garantir que a taxa de ocorrência a estimar do catálogo sísmico não é inferior à taxa real do processo de ocorrência em estudo, em especial para o período histórico e para as magnitudes baixas, estabeleceu-se o valor 3,5 como o limiar

inferior de magnitude, abaixo da qual os sismos se consideraram não relevantes para o subsequente estudo de casualidade sísmica.

Para além da filtragem das magnitudes baixas, a caracterização do processo de ocorrência temporal de sismos foi feita subentendendo o carácter Poissoniano do mesmo o que pressupõe que a sequência de acontecimentos num catálogo sísmico seja aleatória, e que nenhuma ocorrência seja afectada pelos acontecimentos passados nem venha a afectar os acontecimentos futuros. Assim, as réplicas e os fenómenos premonitores foram identificados e eliminados do catálogo, de acordo com o método de Gardner & Knopoff [1974] calibrado para a região dos Açores a partir do padrão das réplicas de choques principais recentes com magnitude superior a 3,7 [Nunes, 2000].

Após este tratamento, o catálogo final filtrado e sem réplicas ficou reduzido a 451 registos o que se explica por (i) o processo de ocorrência sísmica dos Açores ser caracterizado por crises; (ii) terem sido eliminados do catálogo todos os registos com magnitude inferior a 3,5 e (iii) só se considerarem os registos que possuam informação em simultâneo sobre o instante de ocorrência, a localização e a grandeza do evento.

De uma forma meramente orientativa realizou-se um estudo estatístico da exaustividade das magnitude do catálogo, seguindo o método de Stepp [1971, em Montilla, 2000]. Segundo este método, sendo  $k_1, k_2, \dots, k_n$  o número de sismos por unidade de tempo em diferentes instantes, o desvio padrão da taxa anual de ocorrência,  $\lambda$ , é dado por

$$\sigma_\lambda = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{T}} \quad \text{em que} \quad \lambda = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_j,$$

sendo  $T$  a duração total da amostra considerada.

Admitindo a estacionaridade do processo espera encontrar-se na representação de  $\ln \sigma_\lambda$  em função de  $\ln T$ , no intervalo de tempo em que o catálogo esteja completo, uma linha recta de declive  $-1/2$ . Fazendo o estudo para várias classes de magnitudes, é possível conhecer o período de tempo em que se pode considerar o catálogo completo, para a classe em análise.

Os resultados apresentam-se no quadro 3.2 e a figura 3.4 ilustra o estudo realizado. Para cada intervalo de magnitude apresenta-se a taxa anual  $\lambda$  ( $\lambda^{1/2}$  coincide directamente com o valor da ordenada em  $T = 1$  ano) e os intervalos de tempo para os quais se pode considerar completo o catálogo nos intervalos de magnitudes indicados.

Quadro 3.2 - Estudo da exaustividade do catálogo pelo método de Stepp [1971].

$\Delta M$	$\lambda^{1/2}$	$T$ (anos)
3,5 – 4,5	1,89	50
4,5 – 5,5	1,04	82
5,5 – 6,5	0,43	100
6,5 – 7,5	0,16	400

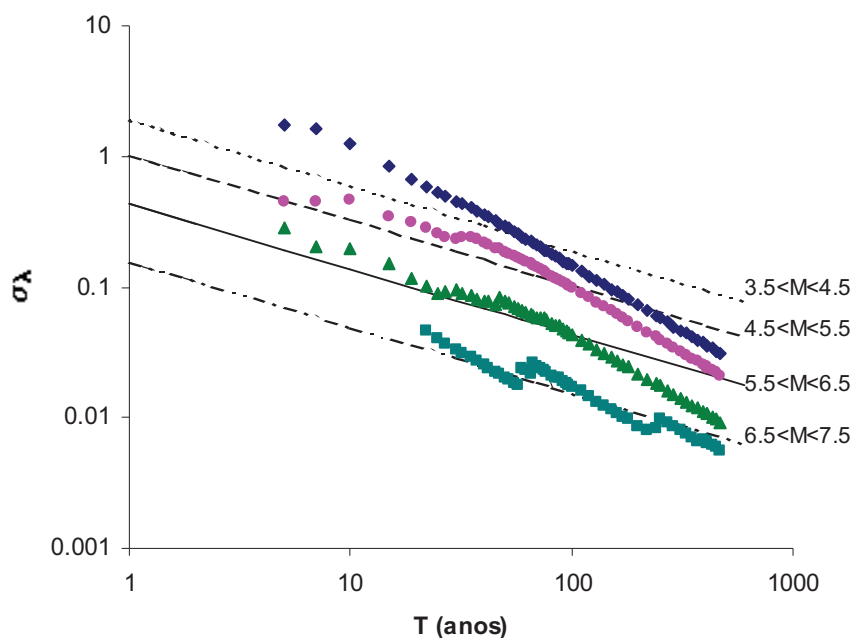


Figura 3.4 – Estudo da exaustividade segundo o método de Stepp [1971, em Montilla, 2000].

Conclui-se que para as magnitudes compreendidas entre 3,5 e 4,5 o catálogo se pode considerar completo nos últimos 50 anos, apesar do ajuste não ser muito satisfatório. Para magnitudes superiores, o catálogo é, evidentemente, considerado completo para intervalos de tempo maiores: 82 anos para magnitudes entre 4,5 e 5,5, 100 anos para magnitudes entre 5,5 e 6,5 e 400 anos para magnitudes entre 6,5 e 7,5.

Há que recordar que este método é puramente estatístico e que se baseia no pressuposto da estacionariedade da sismicidade por intervalos de magnitude. Montilla [2000] afirma que este método peca por defeito na avaliação da exaustividade, ou seja, regra geral os catálogos são mais exaustivos do que o inferido a partir deste método.

Outro método bastante aplicado no estudo da exaustividade baseia-se na hipótese de que o catálogo é completo a partir do momento em que a taxa de ocorrência de sismos, de determinada gama de magnitudes, é constante no tempo.

Desta forma é necessário ajustar uma função linear à série do número cumulativo de sismos, de determinada gama de magnitudes, em função do tempo e determinar graficamente o período de tempo para o qual o declive da recta é constante no tempo. A figura 3.5 apresenta os resultados obtidos seguindo esta metodologia.

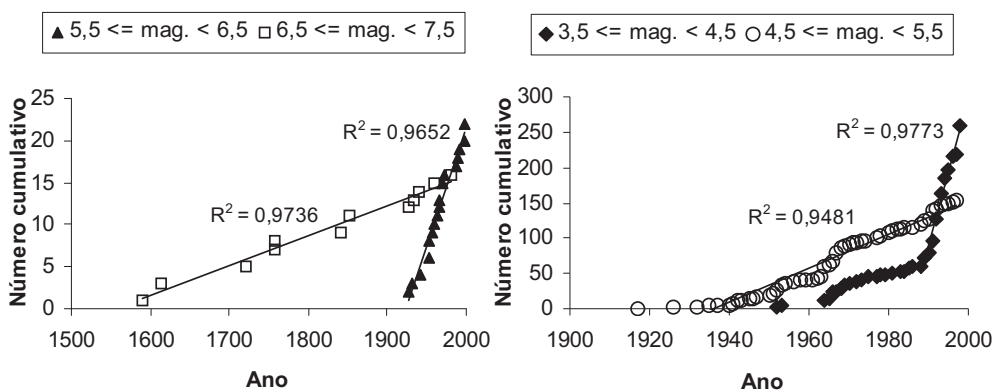


Figura 3.5 – Estudo da exaustividade do catálogo sísmico.

A análise da figura 3.5 permite concluir que os resultados obtidos por esta metodologia não diferem muito dos resultados obtidos seguindo o método de Stepp [1971]. A grande diferença reside na gama de magnitudes [3,5, 4,5[ em que, pela figura 3.5, o catálogo só é considerado completo, para esta gama de magnitude, nos últimos 11 anos.

Analisando os resultados obtidos segundo as duas metodologias concluiu-se que o catálogo pode ser considerado completo, para os diferentes intervalos de magnitude, para os seguintes anos: a partir de 1988 para o intervalo [3,5; 4,5]; a partir de 1917 para o intervalo [4,5; 5,5]; a partir de 1899 para o intervalo [5,5; 6,5]; e a partir de 1591 para o intervalo [6,5; 7,5].

### 3.4 - Modelo de Frequência - Magnitude

Para todas as zonas de geração, escolheu-se o valor de magnitude 3,5 para o parâmetro  $m_0$  das expressões 5 e 6. Para estabelecer a truncatura superior,  $m_1$ , da distribuição de probabilidade da magnitude (equações 5 e 6) ou valor das magnitudes máximas que cada zona tem o potencial de gerar, adoptou-se a magnitude do sismo mais intenso que ocorreu no passado, com epicentro na zona analisada.

Conhecidos os limites de truncatura e seleccionando do catálogo os sismos com magnitude superior a 3,5, para cada período de tempo analisado, os parâmetros  $a_k$  e  $b_k$  da relação de Gutenberg-Richter (expressão 3) foram estimados pelo método da máxima verosimilhança proposto por Weichter [1980], para os diferentes períodos de exaustividade do catálogo e para os diferentes intervalos de magnitude mencionados no ponto 3.3, para cada zona de geração. No quadro 3.3 reúnem-se os parâmetros estimados para caracterizar as distribuições de magnitude de cada zona de geração, e a taxa anual de ocorrência,  $\lambda$ , normalizada pela área de cada zona de geração. No Grupo Central apresenta-se a gama de variação da magnitude máxima das 11 zonas originais pertencentes a esta grande zona.

Quadro 3.3 - Parâmetros estimados para as 9 zonas de geração sísmica.

Zona	$\lambda$	Valor de $b$	$M_{max}$	$[\lambda / km^2] * 10^{-6}$
Crista Médio Atlântica	2,33	0,64	5,9	39,7
Background	1,57	0,84	6,5	8,17
B. D. João de Castro e F.Hirondelle	2,82	0,97	7,2	537
Falha da Glória	2,72	1,34	7,1	138
Este da ilha de S. Miguel	1,47	1,14	6,5	218
Ilha de S. Miguel	1,41	0,77	6,5	222
Grupo Central	1,99	0,76	4,5 - 7,2	133
Oeste do Vulcão dos Capelinhos	4,86	1,87	5,1	2010
Zona de fractura Norte dos Açores	1,63	0,99	6,0	341

As figuras seguintes pretendem ilustrar a variação geográfica dos vários parâmetros entre zonas de geração. Assim, a figura 3.6 ilustra os valores do parâmetro  $b$ , para cada zona, a figura 3.7 apresenta os valores máximos da magnitude para as 9 zonas e a figura 3.8 apresenta a taxa de ocorrência de sismos por ano e por unidade de área.

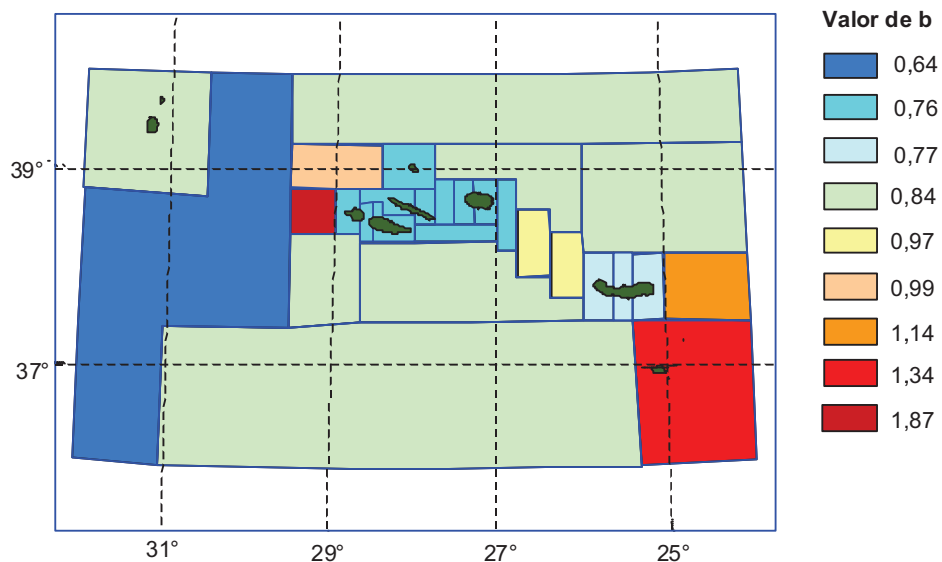


Figura 3.6 – Valores do parâmetro  $b$ , para as 9 zonas de geração sísmica.

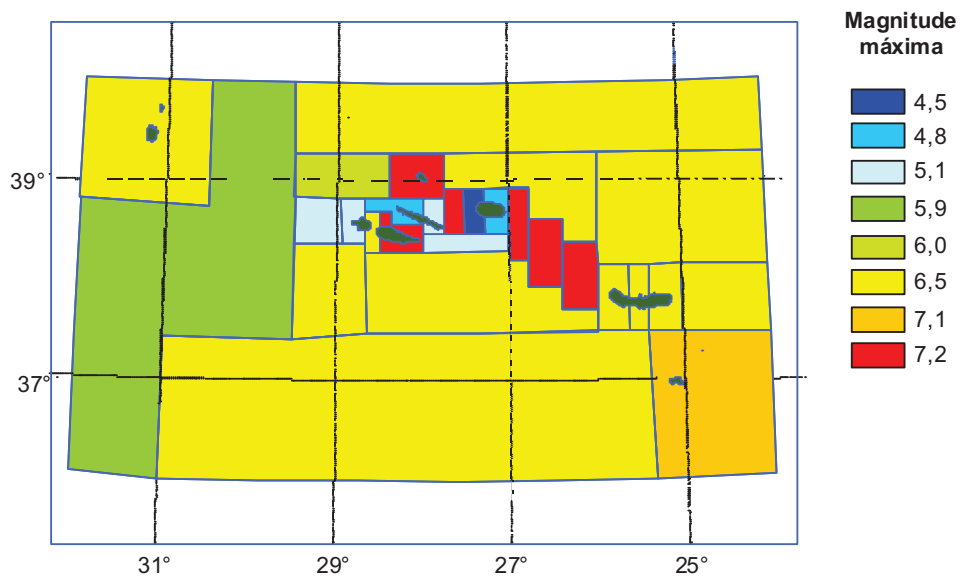


Figura 3.7 – Máximas magnitudes encontradas no catálogo, para as 9 zonas de geração sísmica.



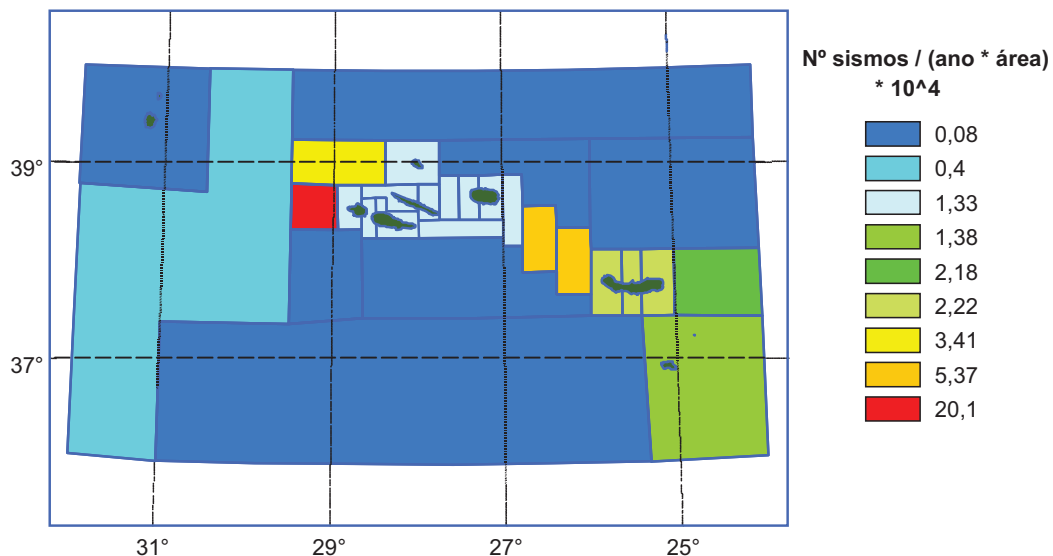


Figura 3.8 – Número de sismos por ano e por área, para as 9 zonas de geração sísmica.

A observação destas figuras permite constatar que parece não existir uma dependência entre a taxa de ocorrência de sismos e a magnitude máxima observada. De facto, a zona “Oeste do Vulcão dos Capelinhos” é de maior actividade embora a magnitude máxima observada seja das mais baixas de todo o Arquipélago. A fraca participação de sismos elevados naquela zona acarreta valores de  $b$  muito elevados. Além disso, as zonas em que se observa os sismos mais intensos não exibem grande actividade sísmica.

Este aspecto poderá dever-se a dois factores que importa clarificar: (i) ou no catálogo não se encontram registados os sismos de baixa magnitude do passado ou (ii) a sismicidade tem vindo a alterar-se ao longo das últimas décadas.

## 4 - GEOLOGIA SUPERFICIAL

---

A caracterização geológica superficial foi desenvolvida em trabalhos anteriores [Forjaz *et al.*, 2000; Forjaz, 2001] e utilizada pela primeira vez para a avaliação da casualidade em Carvalho *et al.* [2001] no âmbito deste projecto. Neste capítulo apenas se apresenta a informação relativa à geologia superficial, sob a forma de quadros e mapas, necessária ao cálculo da casualidade.

No quadro 4.1 apresenta-se a classificação geotécnica de solos e rochas do Arquipélago dos Açores de acordo com Forjaz *et al.* [2000]. Segundo estes autores, os solos e as rochas dos Açores foram classificadas em “duras, intermédias e brandas”.

Quadro 4.1 - Classificação geotécnica de solos e rochas do Arquipélago dos Açores [Forjaz *et al.*, 2000].

Grupo	Subgrupo	Descrição	Vel. das Ondas de corte [m/s]
Duro (I)	I a	Escoadas lávicas traquíticas <i>s.l.</i> (incluindo domos)	> 400
	I b	Escoadas lávicas basálticas <i>s.l.</i>	
	I c	Ignimbritos soldados	
	I d	Tufos surtseianos (hialoclastitos)	
Intermédio (II)	II a	Ignimbritos não soldados e <i>lahars</i>	200-400
	II b	Depósitos de vertente, aluviões e areias de praia	
Brando (III)	III a	Pedra pomes e materiais pomíticos indiferenciados	< 200
	III b	Escórias basálticas <i>s.l.</i> (“bagacina”)	

Também se utilizaram as cartas elaboradas por Forjaz *et al.* [2000], para as cinco ilhas do Grupo Central, as quais classificam os diferentes tipos litológicos existentes e ilustram a respectiva distribuição espacial. A título de exemplo apresentam-se na figura 4.1 as cartas de solos para as ilhas da Terceira e de S. Jorge. A estas cartas foi sobreposta uma grelha regular com espaçamento de 0,08° por 0,08° de latitude e longitude com a finalidade de associar um grupo de solo a cada ponto da grelha. A informação exibida no quadro 4.2 foi utilizada como informação complementar, tendo-se constatado que os solos das sedes de concelho do Grupo Central são todos classificados como pertencentes ao grupo I (duro).

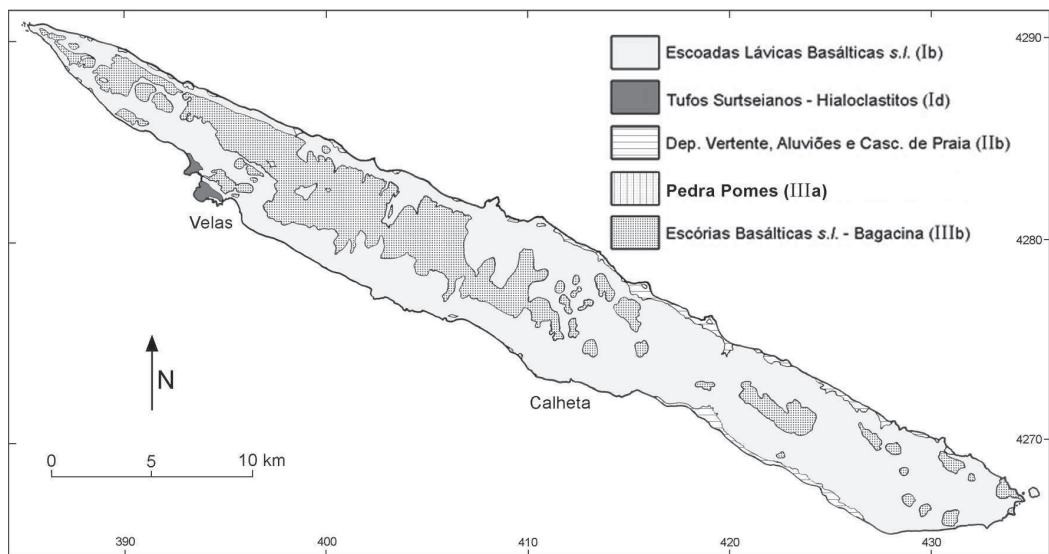
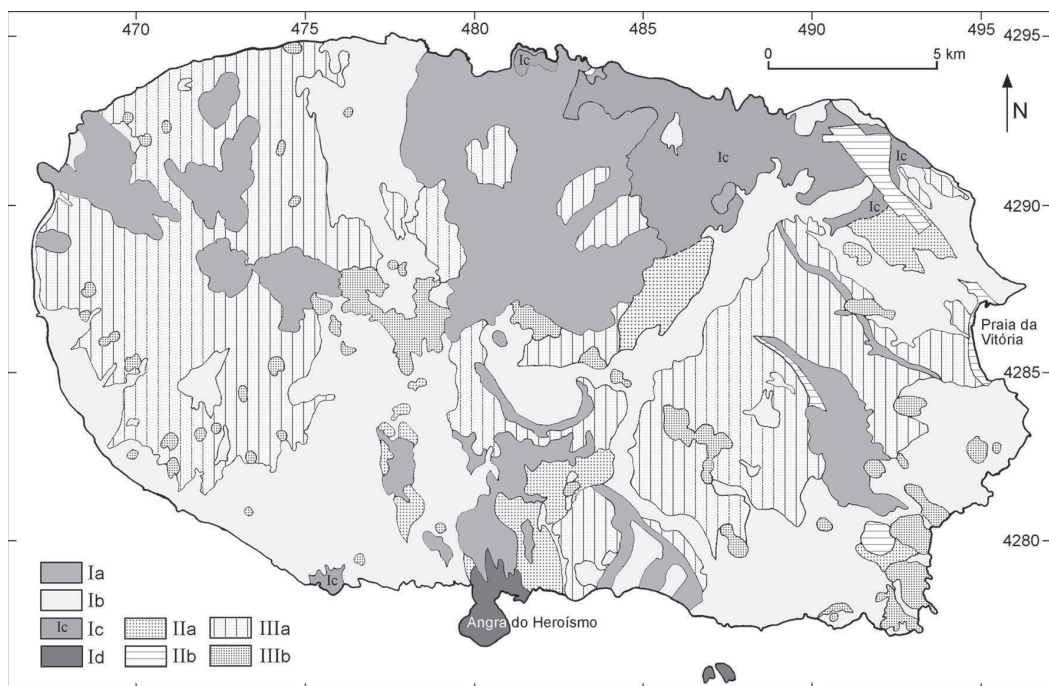


Figura 4.1 – Cartas de solos para as ilhas Terceira (em cima) e S. Jorge (em baixo) [em Forjaz et al., 2000].

Quadro 4.2 - Classificação da geologia superficial das freguesias do Grupo Central [Nunes, 2001].

Topónimo	Ilha	Solo pred.	Topónimo	Ilha	Solo pred.
Altares	Terceira	III a	Guadalupe	Graciosa	I b
N. S. Conceição (Angra)	Terceira	II a	Luz	Graciosa	I b
Santa Luzia (Angra)	Terceira	I a	Praia (S. Mateus)	Graciosa	III a
S. Pedro (Angra)	Terceira	I b	Santa Cruz da Graciosa	Graciosa	I b
Sé (Angra)	Terceira	I d	Calheta do Nesquim	Pico	I b
Cinco Ribeiras	Terceira	I b	Lajes do Pico	Pico	I b
Doze Ribeiras	Terceira	I b	Piedade	Pico	I b
Feteira	Terceira	I b	Ribeiras	Pico	I b
Porto Judeu	Terceira	I b	Ribeirinha	Pico	I b
Posto Santo	Terceira	I a	S. João	Pico	I b
Raminho	Terceira	III a	Bandeiras	Pico	I b
Ribeirinha	Terceira	I a	Candelária	Pico	I b
Santa Barbara	Terceira	III a	Criação Velha	Pico	I b
S. Bartolomeu	Terceira	I b	Madalena	Pico	I b
S. Bento (Angra)	Terceira	II a	S. Caetano	Pico	I b
S. Mateus da Calheta	Terceira	I b	S. Mateus	Pico	I b
Serreta	Terceira	III a	Prainha	Pico	I b
Terra Chã	Terceira	I b	Santa Luzia	Pico	I b
S. Sebastião	Terceira	II b	S. Amaro	Pico	I b
Aqualva	Terceira	I a	S. Antonio	Pico	I b
Biscoitos	Terceira	I b	S. Roque do Pico	Pico	I b
Cabo da Praia	Terceira	I b	Capelo	Faial	I b
Fonte do Bastardo	Terceira	I b	Castelo Branco	Faial	III a
Fontinhas	Terceira	II a	Cedros	Faial	II a
Lajes	Terceira	I c	Feteira	Faial	I b
Sta.Cruz (Praia Vitória)	Terceira	I b	Flamengos	Faial	II a
Quatro Ribeiras	Terceira	I a	Angústias (Horta)	Faial	I b
S. Brás	Terceira	I b	Conceição (Horta)	Faial	II a
Vila Nova	Terceira	I c	Matriz (Horta)	Faial	I b
Calheta	S. Jorge	I b	Pedro Miguel	Faial	I b
Norte Pequeno	S. Jorge	I b	Praia de Almoxarife	Faial	I b
Ribeira Seca	S. Jorge	II b	Praia do Norte	Faial	I b
S. Antão	S. Jorge	I b	Ribeirinha	Faial	I b
Topo (N. Sra Rosário)	S. Jorge	I b	Salão	Faial	III a
Manadas	S. Jorge	I b			
Norte Grande	S. Jorge	I b			
Rosais	S. Jorge	I b			
S. Amaro	S. Jorge	I b			
Urzelina	S. Jorge	I b			
Velas	S. Jorge	I b			

## 5 - MODELAÇÃO DA ATENUAÇÃO DOS MOVIMENTOS SÍSMICOS

A rede acelerográfica digital do Arquipélago dos Açores é composta actualmente por 6 estações digitais GSR-12 e GSR-16, quatro localizadas na Terceira (Angra do Heroísmo, Praia da Vitória e São Sebastião) e duas em São Miguel (Ponta Delgada e Mosteiros) que permitiram reunir alguma informação instrumental de movimentos sísmicos intensos durante a crise sísmica do Faial, Pico e S. Jorge iniciada pelo sismo de 9 de Julho de 1998. Foi também possível recolher registos de aceleração dos sismos de 1973 [Ravara & Duarte, 1975; Oliveira, 1992], 1980 [Oliveira, 1992] e da crise do Banco D. João de Castro de 1997 [Oliveira *et al.*, 1997].

Recentemente Oliveira *et al.* [2000] fizeram uma primeira tentativa para estimar uma lei de atenuação com base nos registos da rede acelerográfica. A lei de atenuação obtida para a região em estudo foi:

$$\log(a) = -2,273 + 0,519 \cdot M_S - 1,494 \cdot \log(R)$$

com  $R = \sqrt{d^2 + 9,4^2}$ .

No entanto, os registos obtidos ainda não são suficientes para estimar uma lei de atenuação aplicável ao território analisado, principalmente na gama das magnitudes elevadas, como se pode verificar pela figura 5.1. Além disso, esta lei não permite distinguir classes diferentes de solos.

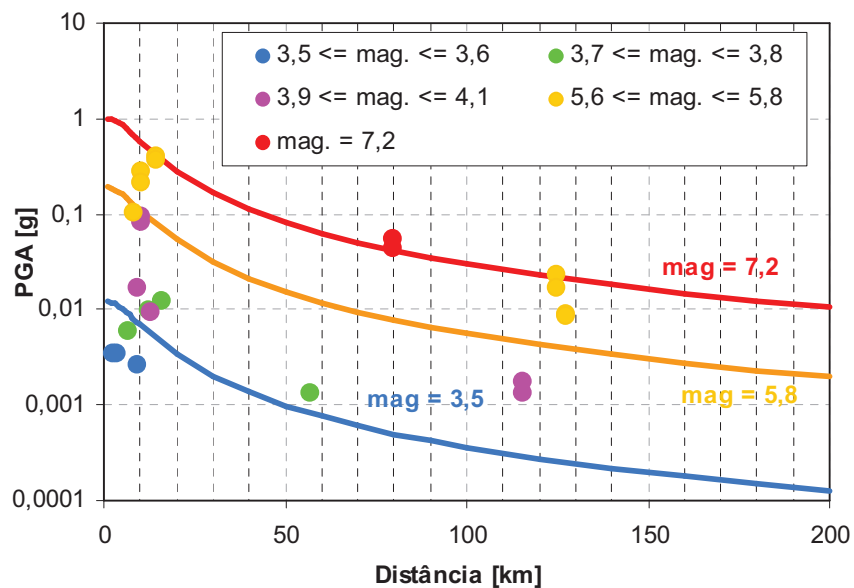


Figura 5.1 – Registos obtidos pela rede acelerográfica dos Açores (círculos) e curvas de atenuação de acordo com o modelo de Oliveira *et al.* [2000].

Desta forma, optou-se por utilizar no presente estudo de casualidade sísmica a lei de atenuação de Boore *et al.* [1997] que se revelou ser, entre as leis internacionais publicadas, a que melhor se ajusta aos valores da aceleração horizontal de pico registados no Arquipélago. Para além disso, esta lei tem em consideração diferentes tipos de condições geológicas locais o que permite aplicar a classificação apresentada no capítulo 4.

Na figura 5.2 apresentam-se os valores da aceleração horizontal de pico registados em consequência de sismos intensos recentes, bem como a curva de atenuação de Boore *et al.* [1997] para as mesmas magnitudes e para solo duro.

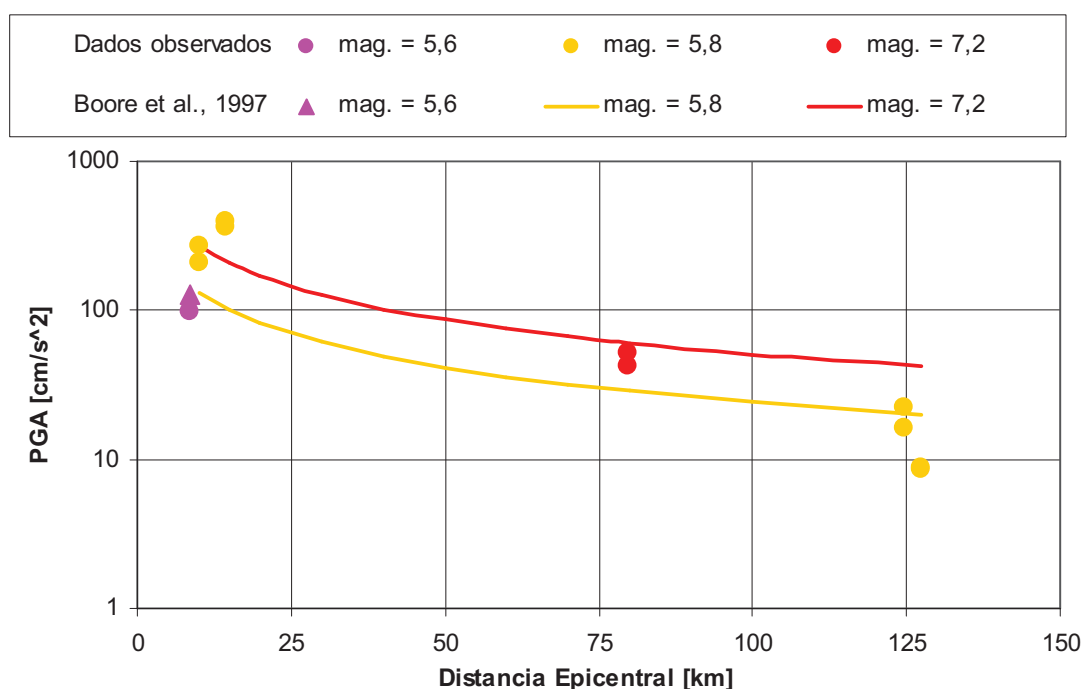


Figura 5.2 – Registos da rede acelerográfica dos Açores e curvas de atenuação de Boore *et al.* [1997] para as magnitudes 5,6, 5,8 e 7,2.

A figura 5.3 apresenta as curvas de atenuação desta lei para os 3 tipos de solos considerados, para duas magnitudes diferentes.

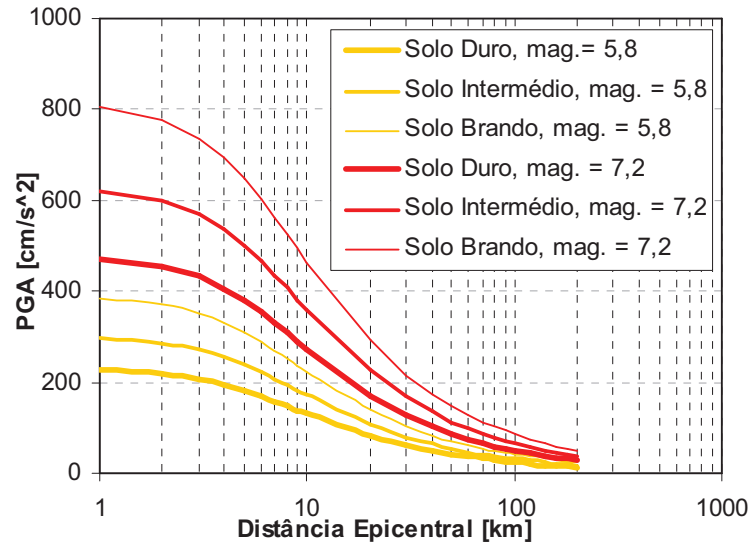


Figura 5.3 – Curvas de atenuação de Boore et al. [1997] para os diferentes tipos de solo para as magnitudes 5,8 e 7,2.

## 6 - AVALIAÇÃO DA CASUALIDADE SÍSMICA

---

A avaliação da casualidade sísmica no Grupo Central dos Açores decorre da implementação computacional dos modelos matemáticos para a quantificação probabilística da casualidade sísmica expostos no capítulo 2, aplicados com as estimativas dos parâmetros dos modelos probabilísticos obtidas nos capítulos 3 e 5 e contemplado a informação sobre os solos do Grupo descrita no capítulo 4.

Assim, a avaliação da casualidade sísmica foi efectuada utilizando duas metodologias diferentes: (i) a clássica desenvolvida por Cornell [1968], e (ii) a proposta por Frankel [1995] baseada na distribuição espacial da sismicidade. A principal diferença entre as duas metodologias reside no facto de a primeira exigir a especificação de zonas de geração e a segunda considerar apenas a distribuição geográfica da actividade sísmica. Esta última tem a vantagem de evitar os juízos, por vezes subjectivos, envolvidos na definição das zonas sísmicas de geração designadamente na sua delimitação ou na atribuição de taxas de ocorrência constantes não justificadas pela distribuição geográfica da sismicidade no interior da zona.

Para as duas metodologias a casualidade sísmica foi estimada para uma grelha regular com espaçamento de  $0,08^\circ$  por  $0,08^\circ$  de latitude e longitude para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, para todo o Arquipélago dos Açores. A lei de atenuação utilizada foi, como já mencionado, a lei de Boore *et al.* [1997], numa primeira fase aplicada à condição geológica de solo duro.

### 6.1 - Metodologia Clássica

O modelo de zonas de geração utilizado foi o já mencionado (figura 3.3), considerando-se para cada zona os parâmetros apresentados no quadro 3.3. Em particular, a magnitude máxima da zona Grupo Central foi discriminada para as 11 zonas que compunham o modelo de 28 zonas originais.

O resultado, apresentado na figura 6.1, decorre da aplicação do programa existente no G3ES / LNEC que resulta da adaptação do programa EQRISK, desenvolvido por McGuire [McGuire, 1976].



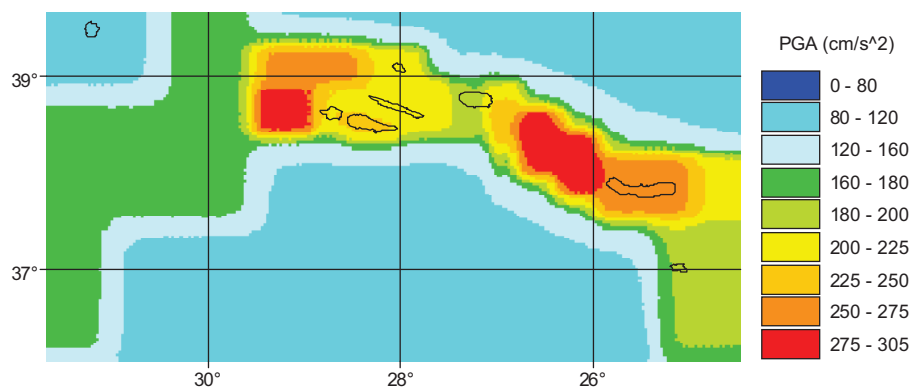


Figura 6.1 – Mapa de casualidade sísmica, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (metodologia clássica).

## 6.2 - Metodologia Baseada na Distribuição Espacial da Sismicidade

Segundo a metodologia proposta por Frankel [1995], estimou-se, para todo o Arquipélago dos Açores, um valor de  $b$  de  $0,96 \pm 0,03$ , pelo método da máxima verosimilhança proposto por Weichert [1980], para os diferentes períodos de exaustividade do catálogo e para os diferentes intervalos de magnitude mencionados no capítulo 3. As magnitudes máximas mantiveram a distribuição geográfica considerada na metodologia anterior. O resultado apresenta-se na figura 6.2.

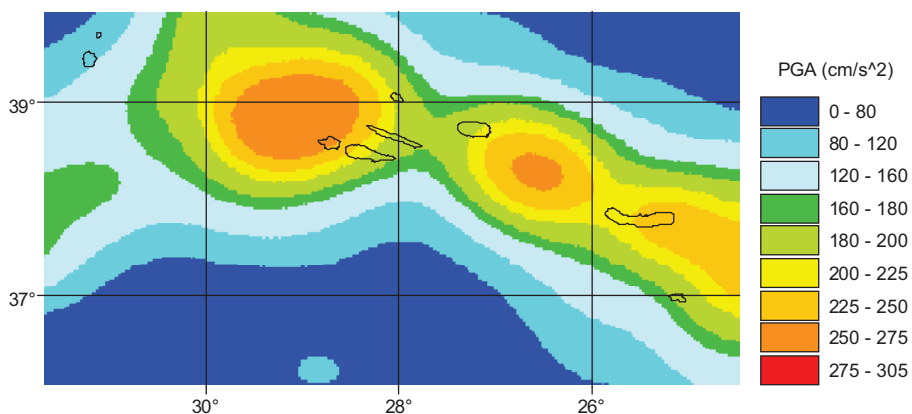


Figura 6.2 – Mapa de casualidade sísmica, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (metodologia baseada na distribuição espacial da sismicidade).

### 6.3 - Análise dos Resultados e Comparação das Diferentes Metodologias

Utilizando a metodologia clássica das zonas, a distribuição geográfica da casualidade sísmica é influenciada pela geometria das zonas de geração. A casualidade próxima das fronteiras das zonas é claramente afectada pela delimitação dessas zonas. Utilizando a metodologia de Frankel [1995], a distribuição da casualidade é controlada pela distribuição espacial da sismicidade, sendo mais severa nas zonas recentemente activas.

Em ambas as metodologias o valor mais elevado da casualidade é obtido a oeste do Grupo Central, cerca dos 38,5° N – 29° W (zona “Oeste do vulcão dos Capelinhos”). Esta área não está associada a sismos de grande magnitude, mas é uma zona de grande actividade sísmica, onde ocorre um grande número de sismos por ano. Um outro valor elevado da casualidade é encontrado na zona do Banco D. João de Castro e Fossa do Hirondelle, sendo condicionado principalmente pela taxa elevada de ocorrência de sismos e não pelas magnitudes elevadas, embora nesta zona tenham ocorrido alguns sismos de magnitude moderada.

Recorrendo à metodologia baseada na distribuição espacial da sismicidade observam-se variações da casualidade sísmica no interior da ilha de S. Miguel, tal como se verificou nos trabalhos de Oliveira *et al.* [1990]. O estudo destes autores era, no entanto, de âmbito local pelo que os seus resultados são mais detalhados e permitem evidenciar maiores variações na casualidade no interior da ilha. Devido à própria concepção da metodologia clássica, esta não permite evidenciar diferenças no interior da ilha de São Miguel, neste estudo de âmbito regional.

Considerando apenas o Grupo Central, a metodologia clássica não parece mostrar grandes variações na casualidade sísmica entre as diferentes ilhas, uma vez que estas estão situadas na mesma zona de geração. A metodologia de Frankel [1995] é um pouco mais selectiva salientando valores mais altos de casualidade a oeste do Grupo Central (Horta, Madalena e Velas) e a Este da ilha Terceira (Praia da Vitória).

A figura 6.3 ilustra a localização das sedes de concelho do Grupo Central para as quais se calcularam as curvas de casualidade (ver figura 6.4) recorrendo à metodologia de Frankel [1995] e para as condições geológicas locais de solo duro (tipo de solo de todas as sedes de concelho).

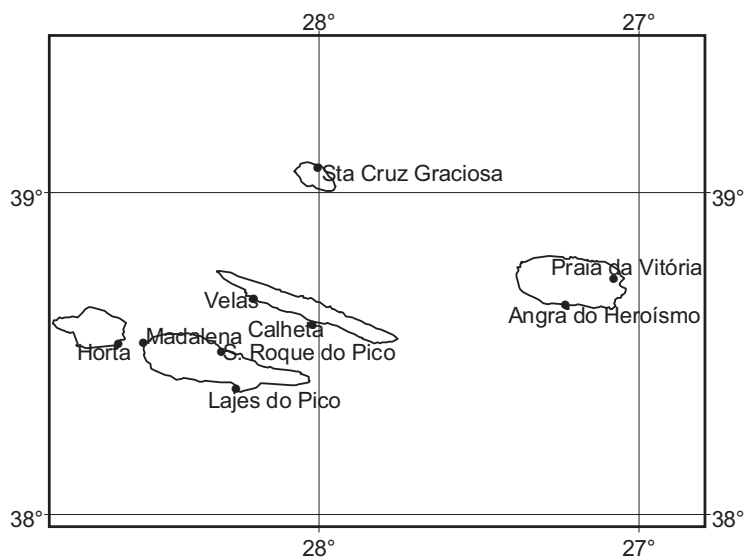


Figura 6.3 – Localização das sedes de concelho do Grupo Central dos Açores.

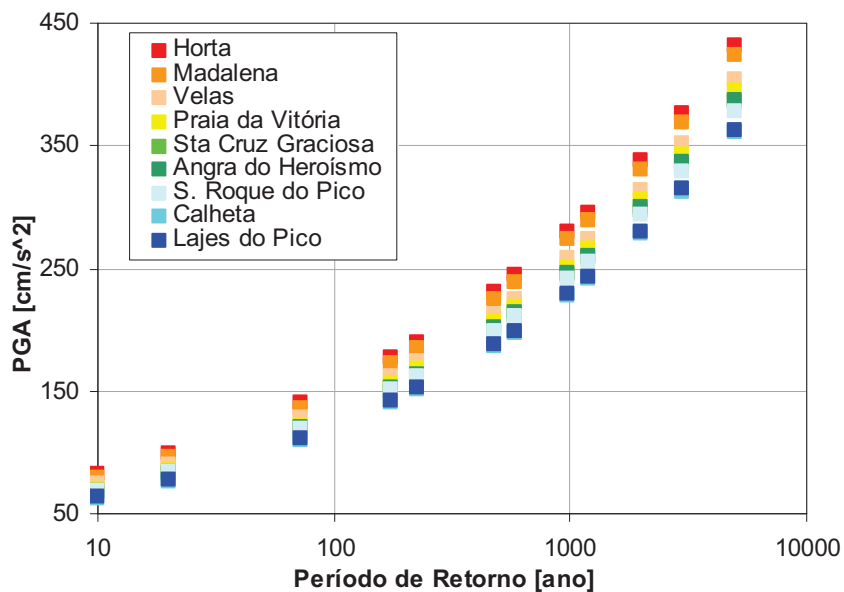


Figura 6.4 – Curvas de casualidade sísmica para as sedes de concelho do Grupo Central.

A figura 6.5 apresenta os espectros de resposta uniformes em aceleração, para um intervalo de referência de 50 anos, para uma probabilidade de excedência de 10% para as referidas sedes de concelho e para solo duro.

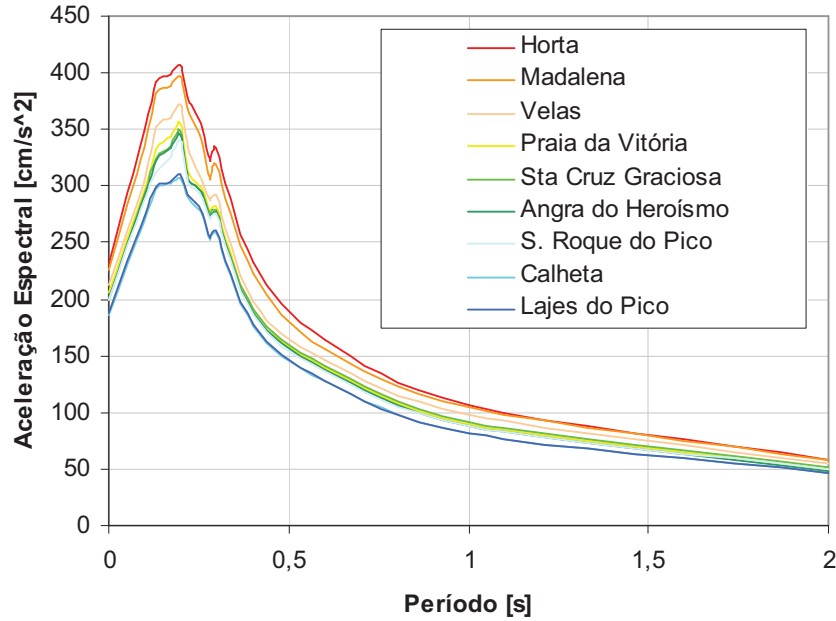


Figura 6.5 – Espectro de resposta em aceleração para as sedes de concelho do Grupo Central, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

Com a finalidade de se obter uma discriminação ainda mais fina da casualidade intra e inter-ilhas, estudou-se a influência das condições geológicas locais utilizando a metodologia de Frankel [1995]. Os resultados apresentam-se na figura 6.6.

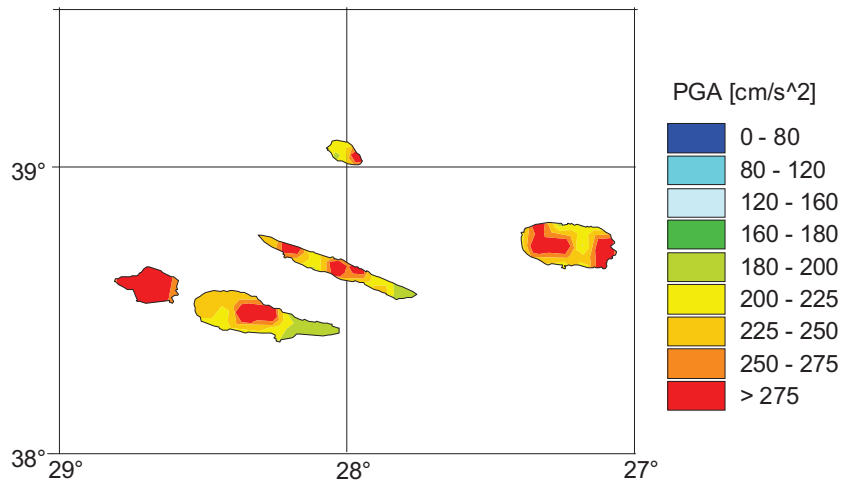


Figura 6.6 – Mapa de casualidade sísmica para o Grupo Central e valores de pico da aceleração, com a influência das condições geológicas locais, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (metodologia baseada na distribuição espacial da sismicidade).

Verifica-se que os valores mais elevados da casualidade reflectem os pontos da grelha a que foram atribuídos as condições geológicas locais de solo intermédios ou brando, nomeadamente na zona ocidental do Grupo Central (ilha do Faial) e nos extremos ocidental e oriental da ilha Terceira. As ilhas S. Jorge e Pico apresentam valores mais elevados no seu interior.

Por fim, nas figura 6.7 e 6.8 apresentam-se os mapas de casualidade sísmica para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, para a aceleração espectral de 0,2 s e 1 s, respectivamente, tendo em consideração as condições geológicas locais e utilizando a metodologia de Frankel [1995].

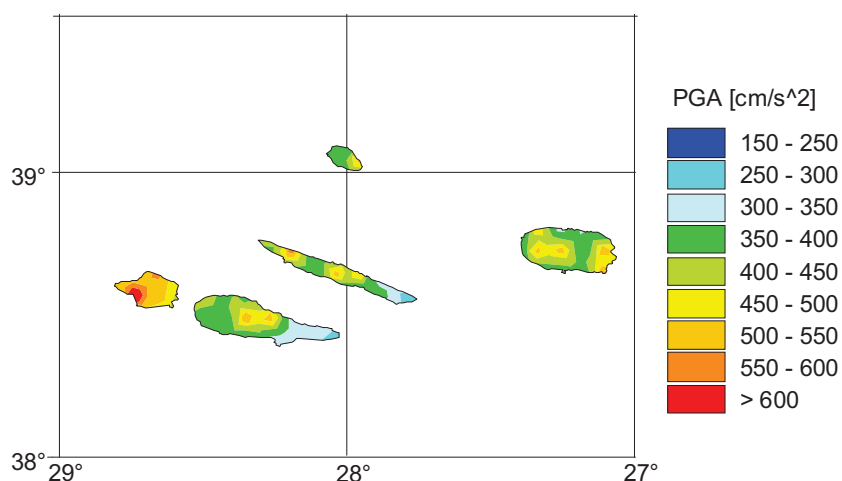


Figura 6.7 – Mapa de casualidade sísmica para o Grupo Central e ordenada espectral de 0,2 s, com a influência das condições geológicas locais, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

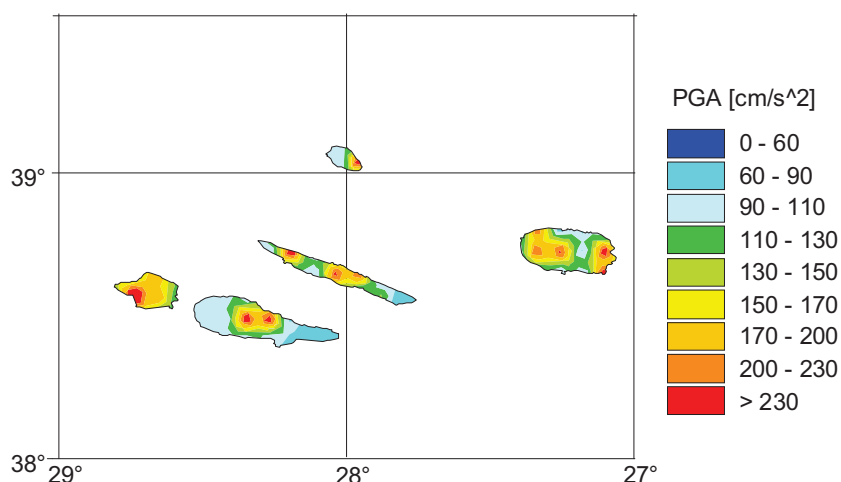


Figura 6.8 – Mapa de casualidade sísmica para o Grupo Central e ordenada espectral de 1 s, com a influência das condições geológicas locais, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

Verifica-se que a distribuição geográfica da casualidade sísmica para 0,2 segundos e 1 segundo é idêntica à de aceleração de pico, embora com valores mais altos e mais baixos, respectivamente, como seria de esperar conhecendo a configuração dos espectros de resposta apresentados na figura 6.5.

## 6.4 – Desagregação da Casualidade Sísmica

Com o objectivo de se identificar o cenário sísmico dominante, em termos de casualidade, estimou-se a desagregação da casualidade sísmica, em termos da magnitude e distância, para as sedes de concelho do Grupo Central dos Açores. Pretende, assim, estudar-se a contribuição para a casualidade de um dado local de diversos intervalos discretos de magnitude e distância, ou seja, a influência para um dado local das diferentes fontes de geração na casualidade global.

A desagregação foi calculada para três probabilidades de excedência diferentes para um intervalo de tempo de referência de 50 anos, para as 9 sedes de concelho. O quadro 6.1 apresenta os valores da média e da moda obtidos para a magnitude e distância, bem como a contribuição relativa desses pares para a casualidade global do local considerado.

Quadro 6.1 - Valores médios e modais da magnitude (*M*) e distância (*R*) para diferentes probabilidades de excedência e contribuição desses pares para a casualidade.

Concelho	10% em 50 anos				5% em 50 anos				1% em 50 anos			
	$\bar{M}$ Contrib. [‰]	$\bar{R}$	$\hat{M}$ Contrib. [‰]	$\hat{R}$	$\bar{M}$ Contrib. [‰]	$\bar{R}$	$\hat{M}$ Contrib. [‰]	$\hat{R}$	$\bar{M}$ Contrib. [‰]	$\bar{R}$	$\hat{M}$ Contrib. [‰]	$\hat{R}$
Horta	4,84 0	9,3	4,40 37	5,0	5,02 0	8,7	4,80 39	5,0	5,41 21	7,7	5,60 52	5,0
Madalena	4,82 0	9,4	4,40 37	5,0	5,04 0	8,9	4,80 39	5,0	5,38 20	7,7	5,60 51	5,0
S.Roque do Pico	4,66 4	8,9	3,80 24	3,0	4,84 4	8,2	4,20 24	3,0	5,24 21	6,9	5,00 28	3,0
Lajes do Pico	4,68 11	9,8	3,60 29	3,0	4,81 10	8,7	4,20 29	3,0	5,18 8	7,0	5,00 33	3,0
Velas	4,74 15	8,9	4,00 26	3,0	4,90 15	8,2	4,40 26	3,0	5,28 21	6,7	5,20 29	3,0
Calheta	4,63 4	9,4	3,80 27	3,0	4,82 6	8,6	4,20 26	3,0	5,19 16	7,0	5,00 29	3,0
Sta Cruz Graciosa	4,78 8	10,2	4,20 35	5,0	5,02 8	9,6	4,40 34	5,0	5,56 0	8,6	5,40 38	5,0
Praia da Vitória	4,72 24	8,0	3,80 39	1,0	4,89 24	7,1	4,20 38	1,0	5,28 0	5,6	5,00 43	1,0
Angra do Heroísmo	4,70 24	8,1	3,80 38	1,0	4,81 24	7,6	4,00 37	1,0	5,17 0	5,53	5,00 42	1,0

Pela análise do quadro conclui-se que

- (i) Em geral, as maiores contribuições para a casualidade das sedes de concelho do Grupo Central dos Açores são de sismos próximos, uma vez que os valores médios e modais da distância são inferiores a 10,2 km, para as três probabilidades de excedência;
- (ii) Os valores médios da distância diminuem e os valores modais aumentam com o aumento do período de retorno. Os valores médios e modais da magnitude aumentam com o aumento do período de retorno;
- (iii) Genericamente, em cada período de retorno, os valores das magnitudes e das distâncias modais são sempre inferiores aos valores médios correspondentes. Exceptuam-se Horta e Madalena para a probabilidade de excedência de 1% em 50 anos;
- (iv) A contribuição dos valores modais é significativamente superior à contribuição dos valores médios. Além disso, os valores médios têm pouco significado físico uma vez que a sua contribuição para a casualidade é praticamente nula.

A figura 6.9 ilustra a desagregação na Horta para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, escolhida por corresponder à sede de concelho com a casualidade mais severa do Grupo Central. No anexo apresenta-se a desagregação da casualidade para as outras sedes de concelho.

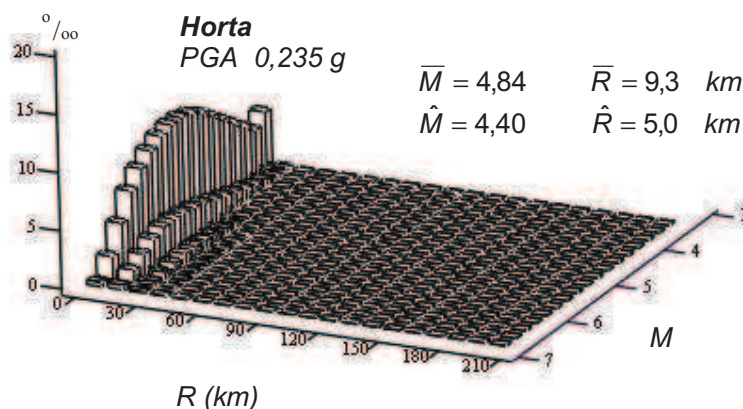


Figura 6.9 – Desagregação da casualidade sísmica na Horta, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

Como se pode observar, para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, as maiores contribuições para a casualidade na Horta resultam de sismos com epicentro a uma distância inferior a 30 km. Assim, um sismo como o de 1 de Janeiro de 1980 com epicentro no mar, a oeste da ilha Terceira, a 80 - 90 km da Horta e

com uma  $M_L = 7,2$  não contribui para a casualidade desta sede de concelho. Por outro lado, um sismo como o de 9 de Julho de 1998 contribui com cerca de  $8^0/_{00}$  [Sousa *et al.*, 2001] para a casualidade total.

No que respeita aos espectros de resposta, a sua configuração depende grandemente da distância e da magnitude dos eventos. Assim, um espectro de casualidade sísmica uniforme pode ser dominado por diferentes sismos para diferentes frequências espectrais, de forma que um único evento modal poderá não reflectir a totalidade do espectro de resposta uniforme correspondente a uma dada probabilidade de excedência [Chapman, 1995]; por outras palavras, poderão existir diferentes cenários sísmicos que caracterizam os espectros de resposta uniformes resultantes das análises da casualidade sísmica.

Deste modo, efectuou-se um estudo de desagregação em ordenadas espectrais de aceleração, para a mesma probabilidade de excedência, para as sedes de concelho do Grupo Central. O quadro 6.2 apresenta os valores médios e modais da distância e magnitude para as sedes de concelho do Grupo Central para as ordenadas espectrais de 0,01 segundos (valor de pico da aceleração), 0,2 e 1 segundos para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e a figura 6.10 ilustra esses resultados para a cidade da Horta.

*Quadro 6.2 - Valores médios e modais da magnitude (M) e distância (R) para as ordenadas espectrais 0,01, 0,2 e 1 segundos, para as sedes de concelho do Grupo Central, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.*

Concelho	0,01 seg.					0,2 seg.					1 seg.				
	PGA [g]	$\bar{M}$	$\bar{R}$	$\hat{M}$	$\hat{R}$	SA [g]	$\bar{M}$	$\bar{R}$	$\hat{M}$	$\hat{R}$	SA [g]	$\bar{M}$	$\bar{R}$	$\hat{M}$	$\hat{R}$
Horta	0,235	4,84	9,3	4,40	5,0	0,419	5,57	13,4	5,40	5,0	0,107	5,62	18,7	5,40	5,0
Madalena	0,230	4,82	9,4	4,40	5,0	0,404	5,56	13,8	5,40	5,0	0,103	5,62	19,7	5,40	5,0
S. Roque do Pico	0,203	4,66	8,9	3,80	3,0	0,343	5,47	15,0	5,40	7,0	0,088	5,45	22,1	5,00	3,0
Lajes do Pico	0,192	4,68	9,8	3,60	3,0	0,324	5,46	16,4	5,40	11,0	0,083	5,48	26,7	4,80	3,0
Velas	0,217	4,74	8,9	4,00	3,0	0,370	5,52	14,7	5,40	9,0	0,095	5,54	20,7	5,00	3,0
Calheta	0,190	4,63	9,4	3,80	3,0	0,321	5,43	16,2	5,20	7,0	0,082	5,45	25,3	5,00	3,0
Sta Cruz Graciosa	0,203	4,78	10,2	4,20	5,0	0,350	5,70	16,7	5,20	5,0	0,092	5,74	10,5	5,80	3,0
Praia da Vitória	0,210	4,72	8,0	3,80	1,0	0,351	5,49	13,8	5,40	7,0	0,089	5,32	15,2	4,80	1,0
Angra Heroísmo	0,206	4,70	8,1	3,80	1,0	0,345	5,43	13,9	5,20	7,0	0,087	5,23	15,4	4,80	1,0

Conclui-se que, em geral, os valores médios da magnitude e da distância representam sismos mais severos e mais afastados, à medida que o período espectral aumenta (diminuição da frequência). Segundo Harmsen *et al.* [1999], este comportamento é típico de uma desagregação unimodal.



Sta Cruz da Graciosa apresenta os maiores valores médios e modais de magnitude, apesar de outros concelhos, nomeadamente Horta e Madalena, apresentarem valores superiores de aceleração espectral. Tal deve-se ao facto da Horta e da Madalena terem uma grande concentração de sismos próximos e de baixa magnitude que dominam a casualidade nas altas frequências, enquanto que a casualidade em Sta Cruz da Graciosa, por esta não estar situada numa zona tão activa sismicamente, é dominada por sismos mais severos que dominam a casualidade sísmica nas baixas frequências.

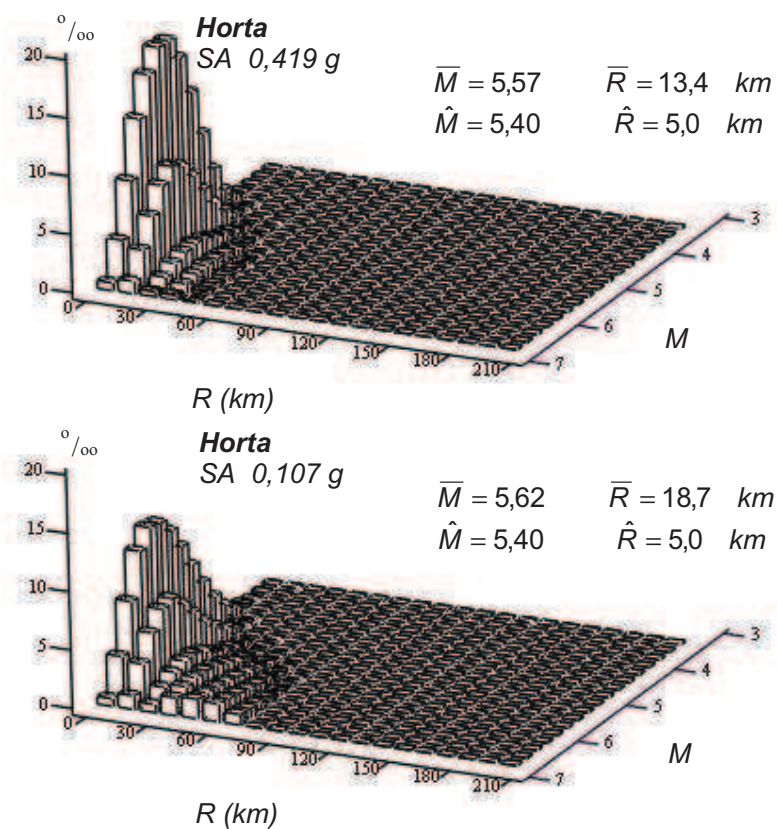
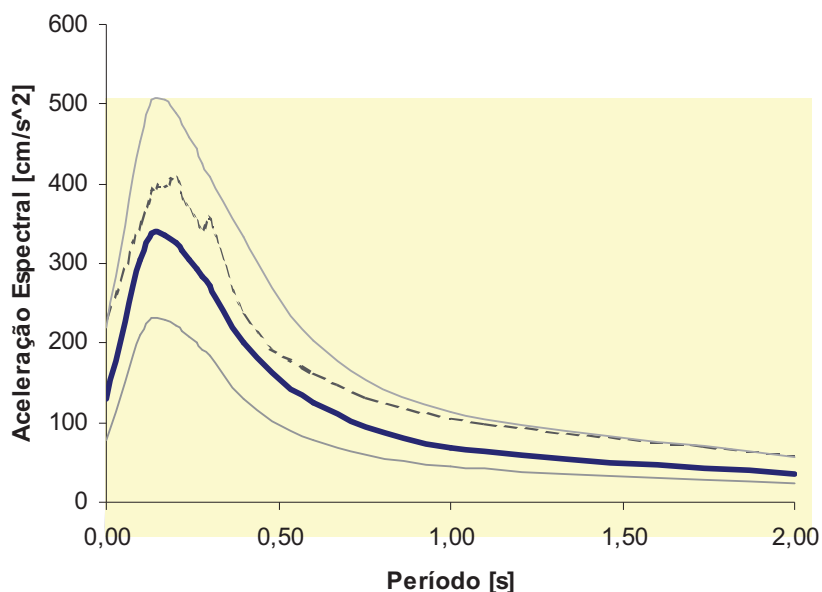


Figura 6.10 – Desagregação para as ordenadas espectrais 0,2 segundos (em cima) e 1 segundo (em baixo), cidade da Horta, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

As contribuições relativas dos pares modais para a casualidade total são muito reduzidas o que dificulta a escolha de um evento dominante. Além disso, o facto já referido de, em termos espectrais, a casualidade sísmica não se caracterizar pelos mesmos valores modais dificulta ainda mais a caracterização de um cenário sísmico. Esta dificuldade pode ser superada ao ter-se em consideração as frequências fundamentais das estruturas a analisar com estes espectros.

Apenas a título de exemplo, e considerando que a banda de frequência de interesse é inferior a 1 segundo, calculou-se o espectro de resposta para a Horta considerando o evento modal que possui uma magnitude 5,4 e um epicentro a uma distância de 5 km. O resultado apresenta-se na figura 6.11, em que a área colorida delimita o erro da lei de atenuação.



*Figura 6.11 – Espectro de resposta para a Horta para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (linha a tracejado) e para o cenário modal obtido pela análise da desagregação da casualidade (linha azul). A área colorida delimita o erro, no espectro do evento modal derivado da lei de atenuação.*

Conforme se pode observar, a consideração de um evento modal conduz a ordenadas espectrais inferiores às ordenadas correspondentes ao espectro de resposta uniforme relativas ao período de retorno de 475 anos. A consideração de um coeficiente de segurança de aproximadamente 1,5 reduz essa diferença garantindo a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

## 7 - CONCLUSÕES

---

O Arquipélago dos Açores apresenta uma taxa de ocorrência de sismos muito elevada face às restantes regiões de Portugal e tem sofrido a acção de diversos sismos moderados a fortes ao longo da sua história. Já no presente século, os sismos de 31 de Agosto de 1926 (Faial), 21 de Fevereiro de 1964 (S. Jorge), 23 de Novembro de 1973 (Pico), 1 de Janeiro de 1980 e de 9 de Julho de 1998, causaram elevados danos materiais nas ilhas do Grupo Central. Durante este século aproximadamente 70% das vítimas de sismos em Portugal decorreram de eventos neste Arquipélago [Carvalho *et al.*, 2001].

Uma vez que o regulamento sísmico actualmente em vigor em Portugal data de 1983 [RSA, 1983] e enquadra os grupos Central e Oriental do Arquipélago dos Açores na zona A e as ilhas das Flores e Corvo na zona D, as de maior e menor sismicidade, respectivamente, é oportuno proceder a uma reavaliação da casualidade sísmica do Grupo Central. Assim, com o objectivo de desenvolver um trabalho de referência para posteriormente se poder efectuar um zonamento sísmico mais detalhado do Arquipélago, realizou-se um estudo de casualidade para as ilhas que constituem o Grupo Central.

Este estudo foi efectuado com base na compilação de catálogos sísmicos locais e mundiais, históricos e instrumentais da região dos Açores [Sousa & Martins, 2000], na análise da exaustividade do catálogo compilado, e nas estimativas dos parâmetros dos modelos necessários à quantificação probabilística da casualidade sísmica.

A geologia superficial das diferentes zonas urbanas foi classificada de forma simplificada em três grandes grupos (duro, intermédio e brando) seguindo Forjaz *et al.* [2000], de forma a ser contemplada na lei de atenuação de Boore *et al.* [1997].

No presente relatório quantificou-se probabilisticamente, e numa base regional, a casualidade sísmica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores. Para tal utilizaram-se duas metodologias diferentes: a clássica e uma metodologia baseada na distribuição espacial da sismicidade.

Os resultados vêm expressos em termos de mapas de aceleração de pico e espectrais (para 0,2 e 1 segundos) para a probabilidade de excedência de 10% em 50 anos e recorrendo às duas metodologias mencionadas. Apresentam-se também curvas de casualidade sísmica e espectros de resposta de acelerações de pico e

espectrais para as sedes de concelho do Grupo Central, utilizando a metodologia baseada na distribuição espacial da sismicidade.

A metodologia clássica que recorre a zonas sísmicas de geração para o cálculo da casualidade sísmica tende a homogeneizar a casualidade nas ilhas do Grupo Central do Arquipélago dos Açores, uma vez que, devido ao modelo considerado, estas se situam na mesma zona de geração. Assim, recorreu-se a uma outra metodologia (metodologia proposta por Frankel, 1995), com o objectivo de melhor identificar possíveis variações da casualidade inter e intra ilhas decorrentes da distribuição espacial da sismicidade.

Para além da aplicação da metodologia de Frankel [1995] também se estudou a influência das condições geológicas locais tendo-se constatado grandes variações da casualidade intra ilhas e um incremento das acelerações de pico e espectral nos locais de solo intermédio ou brando.

De acordo com esta reavaliação da casualidade sísmica para o Arquipélago, os valores de casualidade sísmica mais elevados foram obtidos a Oeste dos Capelinhos e no sector Central do Rife da Terceira, afectando as sedes de concelho que se situam a ocidente do Grupo Central (Horta e Madalena) e na ilha Terceira (Praia da Vitória).

Com a finalidade de se identificar alguns cenários dominantes procedeu-se à desagregação da casualidade sísmica para todas as sedes de concelho do Grupo Central, para a aceleração de pico e para algumas ordenadas do espectro de resposta em aceleração.

A desagregação permitiu concluir que a casualidade, em todas as sedes de concelho do Grupo Central dos Açores, deve-se, maioritariamente, a sismos próximos e não muito severos. Assim, para todas as sedes de concelho e efectuando a desagregação dos valores de pico da aceleração, os valores modais da magnitude são inferiores a 4,4, 4,8 e 5,6 para as probabilidades de excedência de 10%, 5% e 1% em 50 anos, respectivamente. Estes valores modais máximos foram estimados nas sedes dos concelhos da Horta e da Madalena.

Conclui-se, também, que os valores médios da distância dos eventos modais decrescem com o aumento do período de retorno, significando que quanto menor é a probabilidade de excedência considerada, mais influente é a sismicidade local.

A contribuição relativa para a casualidade global dos pares modais e médios é bastante reduzida o que constitui uma dificuldade na escolha de um evento dominante para os locais estudados. Tal conclusão justifica-se pelo facto da casualidade avaliada no presente estudo para o Arquipélago dos Açores ser

controlada pela sismicidade recente. No entanto, a característica unimodal da desagregação permite concluir que, a ser possível escolher um cenário dominante, este seria único.

Finalmente, a análise da desagregação da casualidade sísmica no Grupo Central dos Açores conduziu a resultados coerentes com o padrão de sismicidade observado no Arquipélago dos Açores permitindo interpretar a contribuição relativa para a casualidade global dos valores das variáveis envolvidas. Assim se fundamenta a importância da desagregação da casualidade sísmica para o estudo de cenários e para a caracterização da acção sísmica para a regulamentação sismo-resistente.

## **AGRADECIMENTOS**

---

Agradece-se a colaboração prestada pela Universidade dos Açores, nomeadamente pelo Professor João Carlos Nunes que forneceu a informação relativa à caracterização geológica superficial utilizada neste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Araya, R.; Der Kiureghian, A.; 1988.  
**Seismic Hazard Analysis Improved Models, Uncertainties and Sensitivities**, Report No. UCB/EERC 90/11, University of California, Berkeley.
- Bazzurro, P.; Cornell, C. A.; 1999.  
**Disaggregation of Seismic Hazard**, Bull. Seism. Soc. Am., 89, pp. 501-520.
- Boore, D. M.; Joyner, W. B.; Fumal, T. E.; 1997.  
**Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: a Summary of Recent Work**, Seism. Res. Letts., 68, pp. 128-153.
- Campos Costa, A.; 1997.  
**European Seismic Hazard Scenarios. An Approach to the Definition of Input Motions for Testing and Reliability Assessment of Civil Engineering Structures**, Estudo desenvolvido ao abrigo do Programa Europeu "Human Capital and Mobility", Relatório Joint Research Center, JRC, Ispra, Itália.
- Carvalho, A.; Sousa, M.L.; Oliveira, C. S.; Nunes, J. C.; Campos Costa, A.; Forjaz, V. H.; 2001.  
**Casualidade Sísmica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores**, 5º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Ponta Delgada, Açores.
- Chapman, M. C.; 1995.  
**A Probabilistic Approach to Ground-Motion Selection for Engineering Design**, Bull. Seism. Soc. Am., 85, pp.937-942.
- Cornell, C. A.; 1968.  
**Engineering Seismic Risk Analysis**, Bull. Seism. Soc. Am., 58, nº 5, pp. 1503-1606.
- Costa Nunes, J.; 1986.  
**Sismicidade Histórica e Instrumental do Arquipélago dos Açores. Catálogo Preliminar: 1444-1980**, Não publicado.
- Cramer, C. H.; Petersen, M. D.; 1996.  
**Predominant Seismic Source Distance and Magnitude Maps for Los Angeles, Orange and Ventura Countries, California**, Bull. Seism. Soc. Am., 86, pp. 1645-1649.

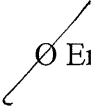
- Forjaz, V. H.; 2001.  
**Caracterização Geotécnica dos Principais Solos e Rochas dos Açores**, 1<sup>as</sup>  
Jornadas Risco Sísmico nas Ilhas do Grupo Central dos Açores, Livro de  
Resumos, Angra do Heroísmo; p. 7.
- Forjaz, V. H.; Nunes, J. C.; Guedes, J. H. C.; Oliveira, C. S.; 2000.  
**Classificação Geotécnica de Solos das Ilhas dos Açores: Uma Proposta**,  
Actas do II Simpósio da Associação Portuguesa de Meteorologia e Geofísica,  
Évora. Em impressão.
- Frankel, A.; 1995.  
**Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States**,  
Seismic. Res. Letts., 66, pp. 8 -21.
- Gardner, J. K.; Knopoff L.; 1974.  
**Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, With Aftershocks  
Removed, Poissonian?**, Bull. Seism. Soc. Am., 64, pp. 1363-1367.
- Gutenberg, B.; Richter, C. F.; 1944.  
**Frequency of Earthquakes in California**, Bull. Seism. Soc. Am., 34, nº 4, pp.  
185–188.
- Harmsen, S.; Perkins, D.; Frankel, A.; 1999.  
**Deaggregation of Probabilistic Ground Motions in the Central and Eastern  
United States**, Bull. Seism. Soc. Am., 89, pp. 1-13.
- McGuire, R. K.; 1976.  
**EQRISK, Evaluation of Earthquake Risk to Site**, Open File Report 76-67,  
United States Department of the Interior Geological Survey, USA.
- McGuire, R. K.; 1995:  
**Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing  
the Loop**, Bull. Seism. Soc. Am., 85, 1275-1284.
- Montilla, J. A.; 2000.  
**Agregación y Desagregación de Aceleraciones Esperadas en la Península  
Ibérica Utilizando Sismicidad de Fondo**, Tese de Doutoramento,  
Universidade de Granada, Espanha.
- NGDC; NEIC; 1996.  
**Seismicity Catalogs, Vol. 2: Global and Regional, 2150 B. C. – 1996 A. D.**

- Nunes, J. C.; 2000.  
**Janelas para a Identificação de Réplicas na Região dos Açores**, Database and report, Project PPERCAS – Univ. Açores, Relatório nº 2/2000, 12p, Ponta Delgada.
- Nunes, J. C.; 2001.  
**Comunicação Pessoal.**
- Nunes, J. C.; Forjaz, V. H.; Oliveira, C. S.; 2000a.  
**Catálogo Sísmico da Região dos Açores, Vol I (1980-88), Vol. II (1989-98).** Projecto PPERCAS – Univ. Açores, Ponta Delgada.
- Nunes, J. C.; Forjaz, V. H.; Oliveira, C. S.; 2000b.  
**Zonas de Geração Sísmica para o Estudo da Casualidade do Grupo Central do Arquipélago dos Açores**, Projecto PPERCAS – Univ. Açores, Relatório nº 3/2000, 12p, Ponta Delgada.
- Oliveira, C. S.; 1992.  
**Quantificação do Movimento Sísmico Aquando do Sismo de 1 de Janeiro de 1980**, Monografia – 10 Anos Após o Sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980, 1, pp. 83 – 125, Editado por Oliveira, C. S.; Lucas, A. R. A. & Guedes, J. H. C., Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Oliveira, C. S.; Campos-Costa, A.; Forjaz, V. H.; Nunes, J. C.; 1990.  
**Seismic Hazard Analysis in Zones of Time and Space Interdependence: an Application to São Miguel Island**, Natural Hazards, 3, pp. 15-29.
- Oliveira, C. S.; Guedes, J. H. C.; Lucas, A.; 1997.  
**Registos Obtidos na Rede Acelerométrica dos Açores Durante a Crise Sísmica de Junho-Outubro de 1997**, 3º Encontro Sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, Instituto Superior Técnico, pp. 49-58.
- Oliveira, C.S.; Sousa, M.L.; Nunes, J.C.; 2000.  
**Seismic Hazard for Central Group of Azores Islands**, XXVII General Assembly for the European Seismology Commission (ESC), Lisboa, Portugal, Livro de resumos, p. 97.
- Paula, A.; 2001.  
**Determinação de Magnitude de Sismos dos Açores com Epicentro e Valores de Intensidade Macrossísmica Conhecidos**, MangaZ, Multimédia Lda.

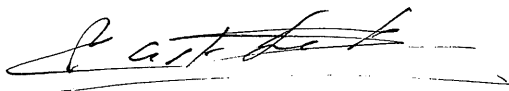


- Ravara, A.; Duarte, R. T.; 1975.  
**Analysis of the 1973–1974 Azores Earthquake**, Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Symposium Earthquake Engineering, Istanbul.
- RSA.; 1983.  
**Regulamento de Segurança e Acções para a Estrutura de Edifícios e Pontes**, Decreto-lei nº 235/83, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, Lisboa.
- SIVISA; 1998.  
**Boletim Sismológico Preliminar dos Açores. Centro de Coordenação do Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores (SIVISA)**, Inst. Meteorologia e Univ. Açores.
- Sousa, M. L.; 1996.  
**Modelos Probabilistas para a Avaliação da Casualidade Sísmica em Portugal Continental**, Tese de Mestrado em Investigação Operacional e Engenharia de Sistemas, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Sousa, M. L.; Carvalho, A.; Campos Costa, A.; 2001.  
**Seismic Hazard De-aggregation for the Central Group of Azores Islands**, 5º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Ponta Delgada, Açores.
- Sousa, M. L.; Martins, A.; 2000.  
**Compilação de um Catálogo Sísmico para a Região dos Açores**, Relatório LNEC. Proc. 260/18/13343, Lisboa.
- Stepp, J. C.; 1971.  
**Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard**, Proceedings of the International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, II, pp. 897-909.
- Weichert, D.; 1980.  
**Estimation of the Earthquake Recurrence Parameters for Unequal Observation Periods for Different Magnitudes**, Bull. Seism. Soc. Am., 70, pp. 1337-1346.

VISTOS

 O Engenheiro Chefe do Departamento  
de Estruturas

Vítor Monteiro



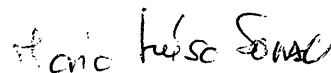
O Engenheiro Chefe do Grupo  
de Estudos e Equipamento  
de Engenharia Sísmica



Eduardo Cansado Carvalho

AUTORIA

G3ES



Maria Luísa Sousa

Assistente de Investigação



Alexandra Carvalho

Bolseira de Investigação



Alfredo Campos Costa

Investigador Principal

## **ANEXO**

**DESAGREGAÇÃO PARA AS ORDENADAS ESPECTRAIS 0, 0,2 E 1 SEGUNDOS, PARA AS SEDES DE CONCELHO DO GRUPO CENTRAL, PROBABILIDADE DE EXCEDÊNCIA DE 10% EM 50 ANOS**

---

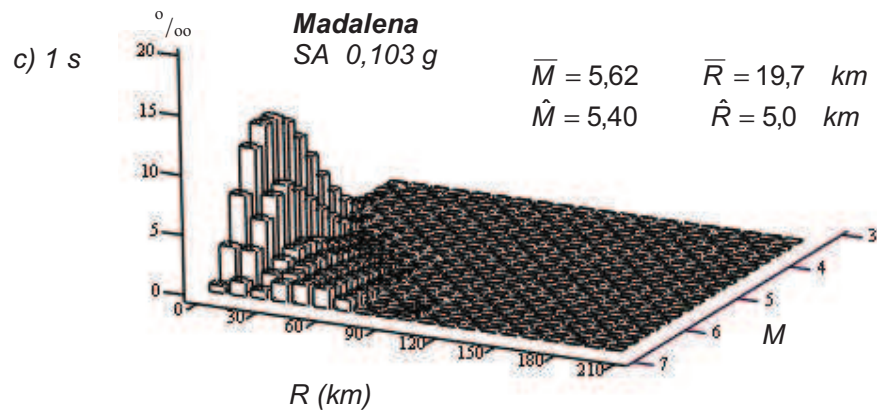
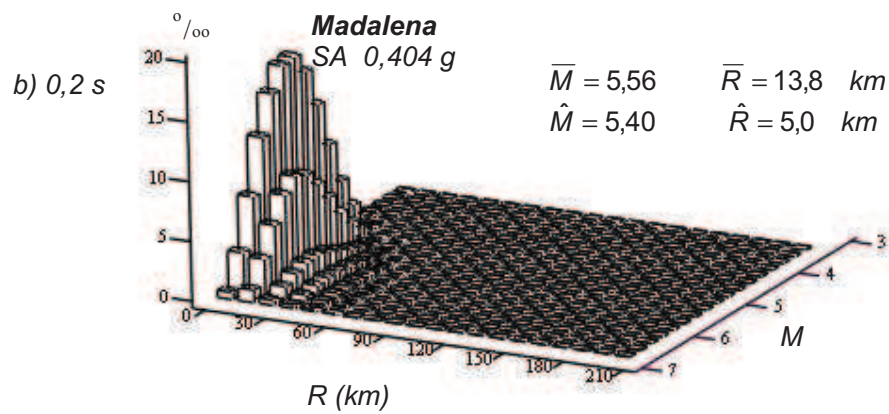
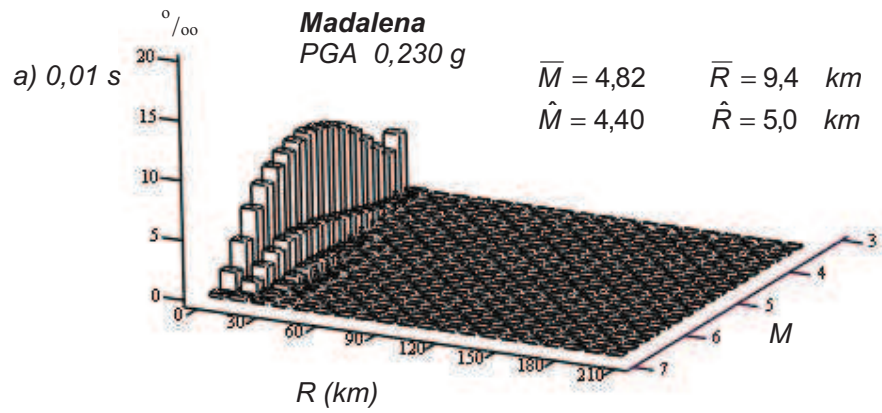


Figura A.1 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade da Madalena, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

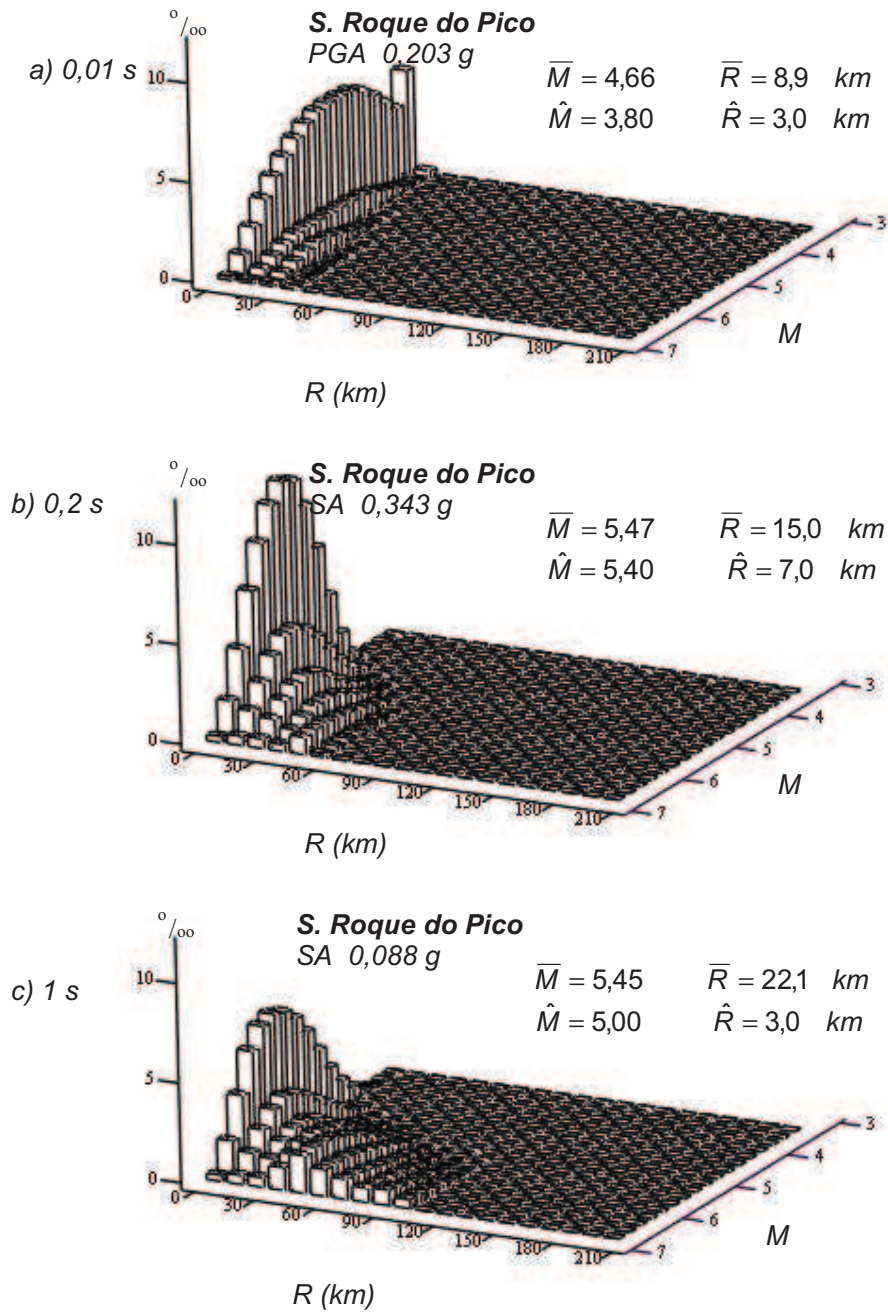


Figura A.2 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de S. Roque do Pico, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

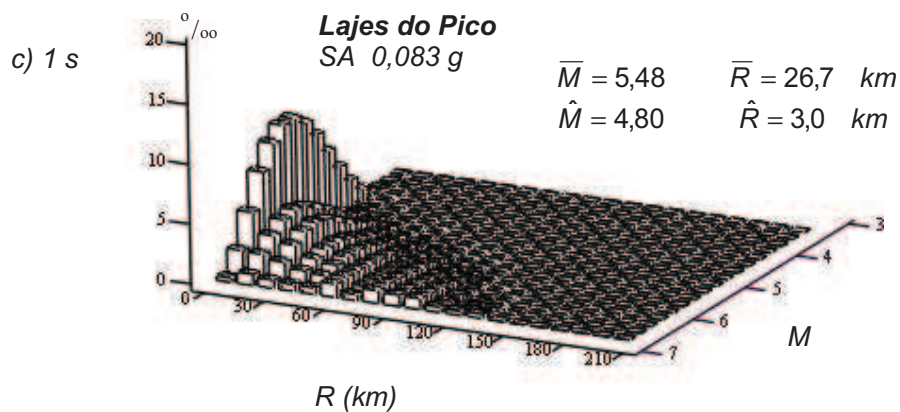
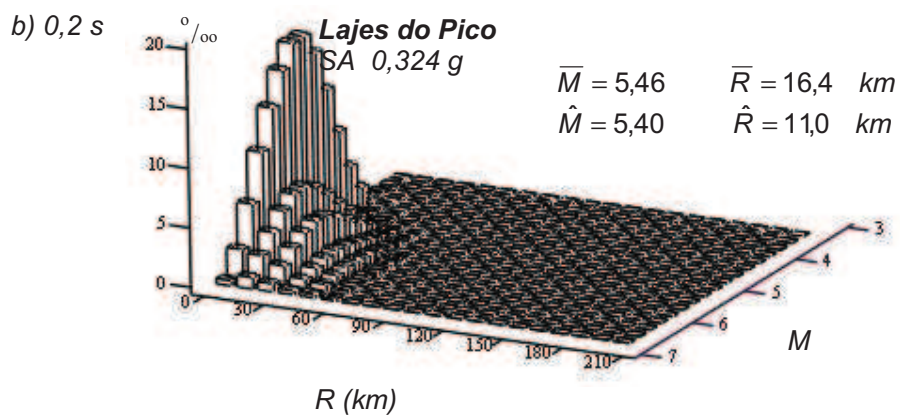
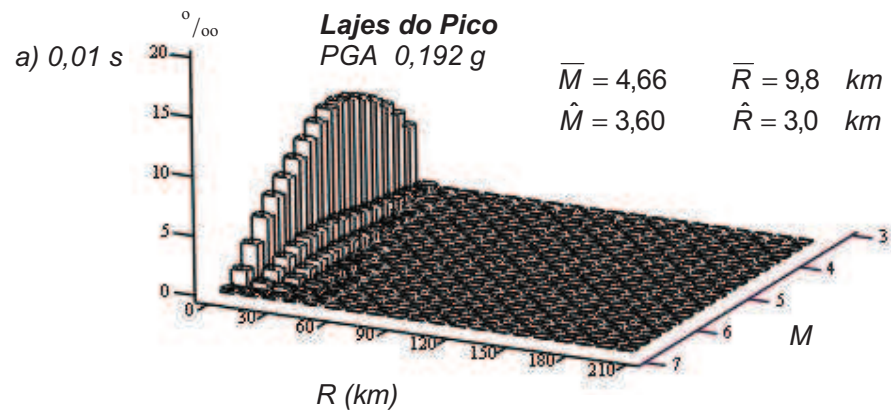


Figura A.3 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Lajes do Pico, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

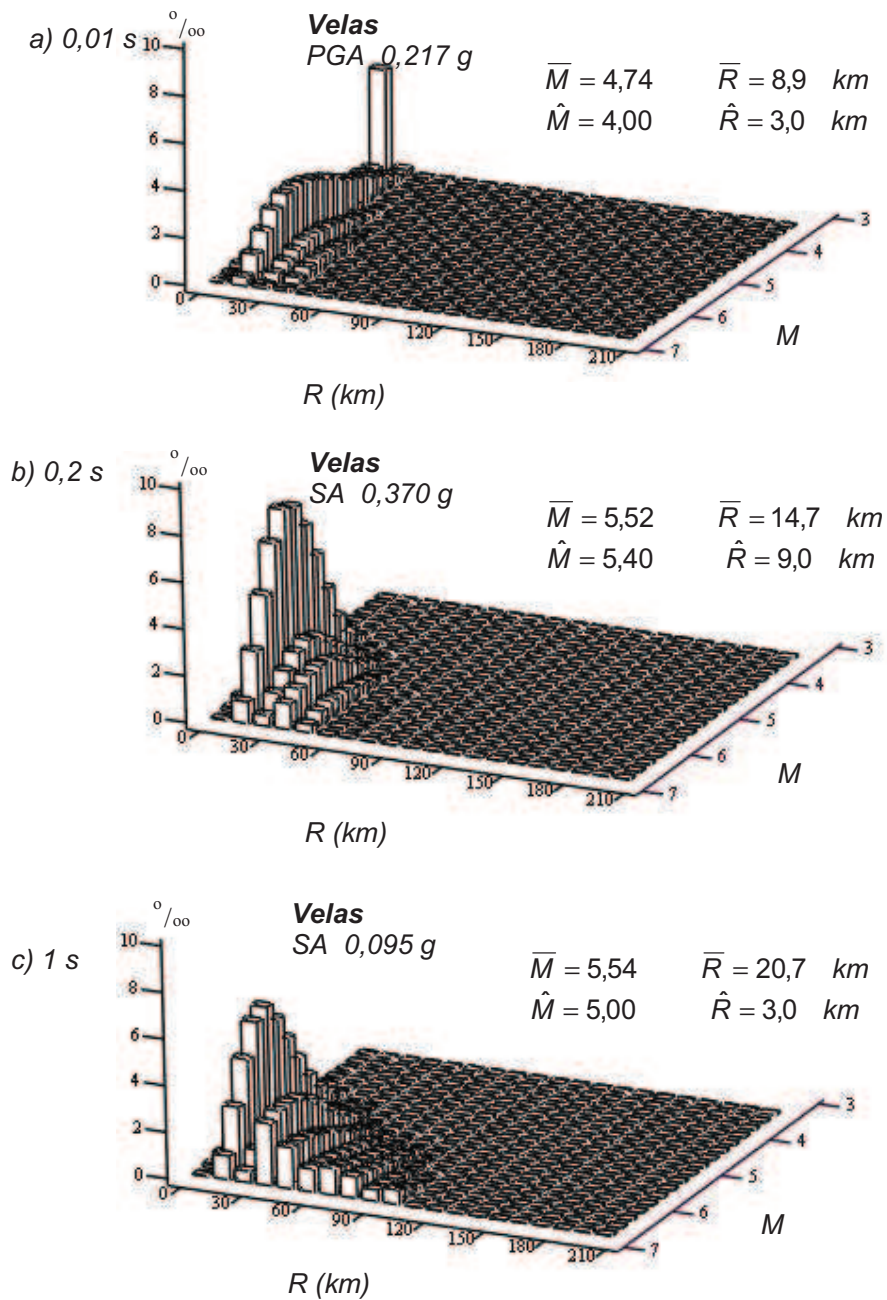


Figura A.4 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Velas, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

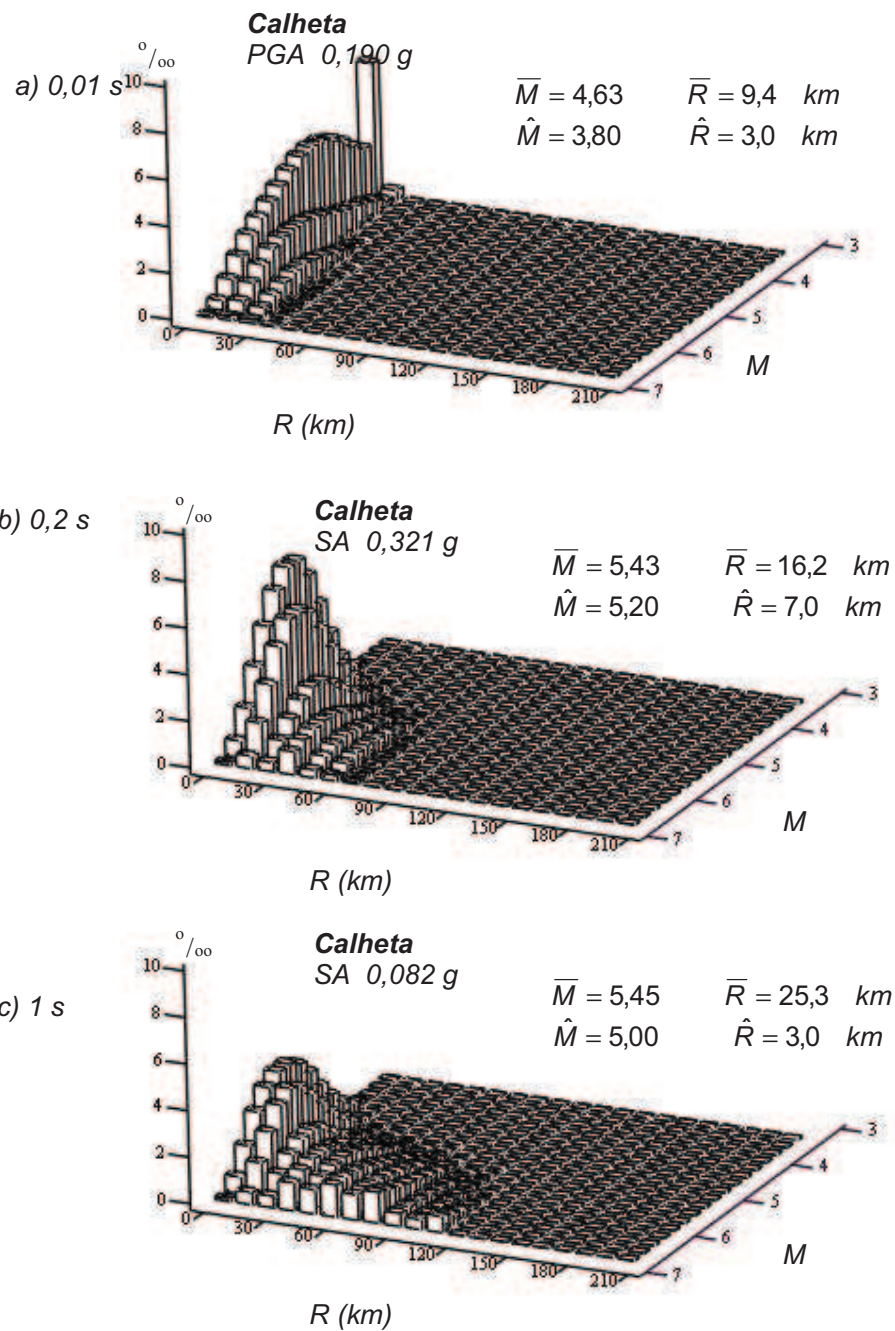


Figura A.5 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundos, cidade de Calheta, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.



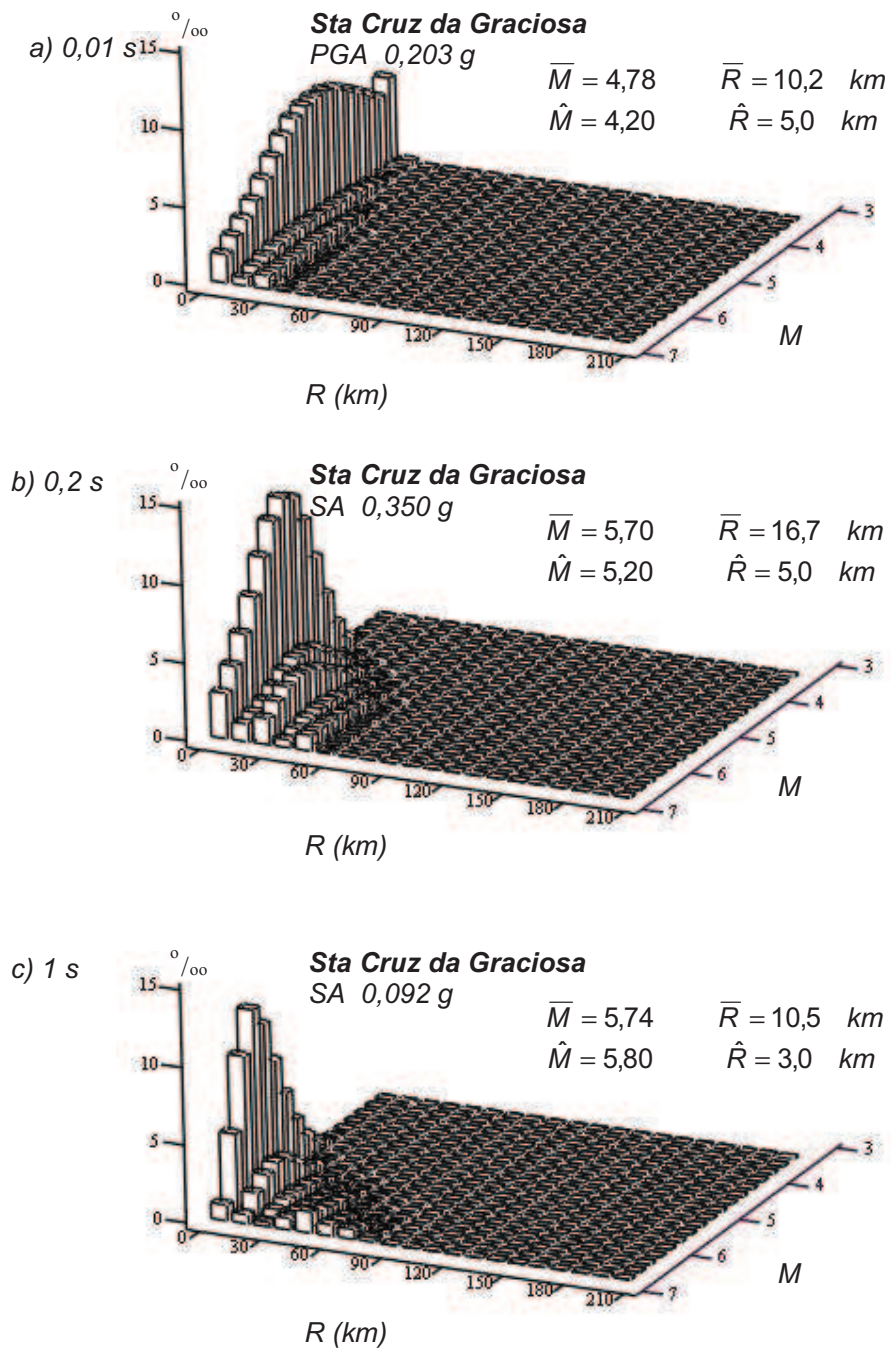


Figura A.6 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Sta Cruz da Graciosa, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

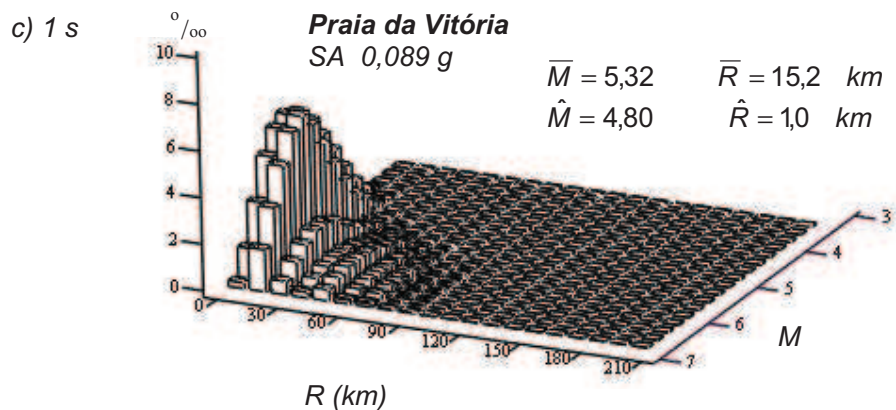
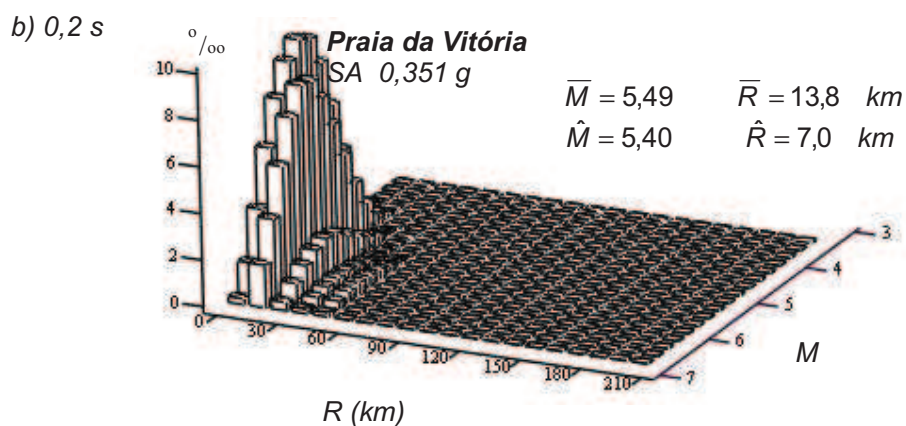
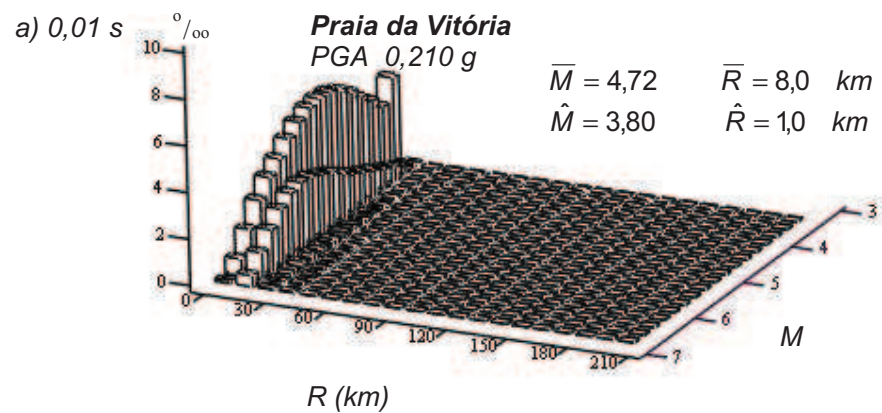


Figura A.7 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Praia da Vitória, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.

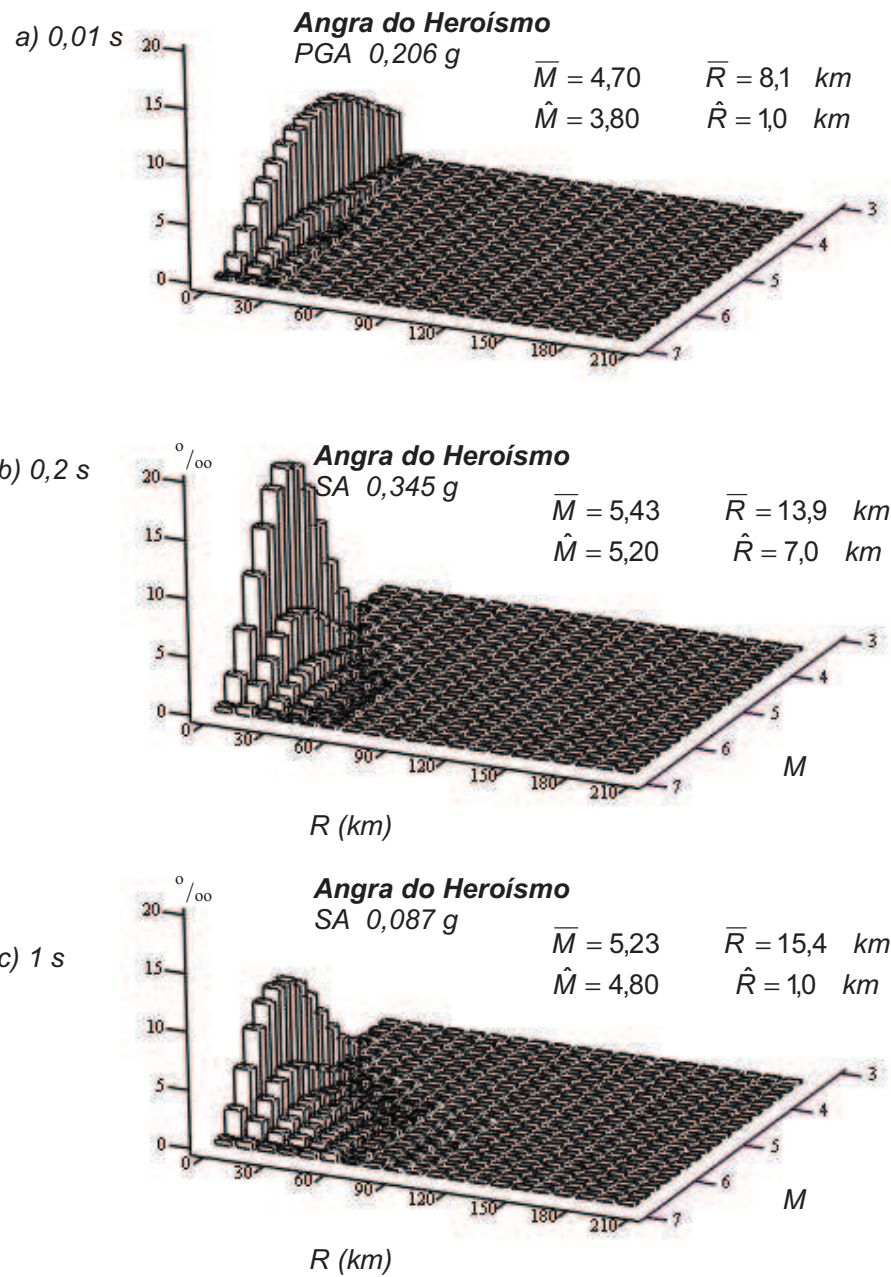


Figura A.8 – Desagregação para as ordenadas espectrais a) 0,01 segundos, b) 0,2 segundos e c) 1 segundo, cidade de Angra do Heroísmo, probabilidade de excedência de 10% em 50 anos.