



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

MAPAS DE PERIGOSIDADE SÍSMICA PARA PORTUGAL CONTINENTAL: UMA ANÁLISE CRÍTICA

Parte I – Períodos de recorrência de sismos

SPES – Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica

Lisboa • novembro de 2018

I&D ESTRUTURAS

RELATÓRIO 363/2018 – DE/NESDE

Título

MAPAS DE PERIGOSIDADE SÍSMICA PARA PORTUGAL CONTINENTAL: UMA ANÁLISE CRÍTICA

Parte I – Períodos de recorrência de sismos

Autoria

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

Alexandra Carvalho

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas

Nuno Malfeito

Engenheiro Civil

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 363/2018

Proc. 0305/1309/19281

MAPAS DE PERIGOSIDADE SÍSMICA PARA PORTUGAL CONTINENTAL: UMA ANÁLISE CRÍTICA

Parte I – períodos de recorrência de sismos

Resumo

Nos estudos probabilísticos para avaliação da perigosidade sísmica, são estabelecidas zonas de geração sísmica (zonas sismogénicas), representando regiões que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas e definidas as relações entre a frequência com que aí ocorrem os sismos e as respetivas magnitudes, num dado período de tempo.

Em 2006, para o Anexo Nacional do Eurocódigo 8, foram consideradas e caracterizadas 11 zonas Sismogénicas para Portugal continental, adaptadas de estudos previamente elaborados em 1996. Entre 2008 e 2009, no âmbito dos projetos ERSTA e SHARE, foram propostas novas zonas sismogénicas, e estimados os respetivos parâmetros da lei de frequência - magnitude. Estas diferentes propostas resultaram em diferentes mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental.

A SPES, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica, espelhando a inquietude existente na comunidade científica face às diversas expressões da perigosidade sísmica em Portugal, e consciente da necessidade de um consenso perante os agentes decisores, considerou urgente a realização de um estudo criterioso acerca das opções tomadas, nos diferentes estudos, e suas implicações. É neste contexto que surge este trabalho, que pretende fazer uma análise crítica e comparativa dos resultados obtidos nos diferentes estudos mencionados e as suas implicações ao nível dos períodos de retorno para sismos de maior magnitude. Numa parte II, serão estudadas as implicações em termos de valores da perigosidade sísmica, para vários períodos de retorno e frequências espectrais.

Palavras-chave: Perigosidade sísmica / Períodos de retorno / Sismos

SEISMIC HAZARD FOR MAINLAND PORTUGAL: A CRITICAL OVERVIEW

Part I - recurrence period of large seismic events

Abstract

Seismic source zones, and its characterization, have major impact in Probabilistic Seismic Hazard Analyses (PSHA).

In 2006, a model with eleven seismogenic zones was considered to re-evaluate the seismic hazard for Mainland Portugal, supporting decisions for the seismic zonation map presented in the Portuguese Annex of Eurocode 8. Between 2008 and 2009, in the aim of projects ERSTA and SHARE, there were alternative area source models developed, together with the estimate of activity rates parameters and magnitude distribution.

These different proposals (although not by itself but together with ground motion prediction equations assumptions) result in quite different seismic hazard levels, leading to a need, among decision makers, to understand the origin of such differences. In particular, SPES – Portuguese Society for Earthquake Engineering promoted this work that aims to analyse the different proposals mentioned, with particular emphasis on its implications for the recurrence period of large seismic events. In a short time (part II) hazard values for several return periods and spectral frequencies will be analysed.

Keywords: Seismic hazard / Recurrence period / Earthquakes

Índice

1 |	Introdução	1
2 |	Descrição dos modelos – Catálogo sísmico, Zonas Sismogénicas e seus parâmetros	4
2.1	Nota introdutória	4
2.2	Modelo EC8	5
2.2.1	Zonas Sismogénicas.....	5
2.2.2	Catálogo Sísmico e parâmetros das zonas	6
2.3	Modelo ERSTA	9
2.3.1	Zonas Sismogénicas.....	10
2.3.2	Catálogo Sísmico e parâmetros das zonas	11
2.4	Modelo SHARE	15
2.4.1	Zonas Sismogénicas.....	15
2.4.2	Catálogo sísmico e parâmetros das zonas.....	16
3 |	Comparação dos vários modelos.....	19
3.1	Nota introdutória	19
3.2	Parâmetros das Zonas Sismogénicas	20
3.3	Análise de cenários.....	23
3.3.1	Vale Inferior do Tejo.....	24
3.3.2	Banco de Goringe	26
3.3.3	Falha da Ferradura	28
3.3.4	Golfo de Cádiz	30
3.3.5	Banco de Portimão	32
3.3.6	Estruturas conjuntas	34
3.4	Considerações	35
4 |	Conclusões.....	38
	Referências bibliográficas	41

Índice de figuras

Figura 1.1 – Mapa de perigosidade sísmica, projeto SHARE, para os 475 anos de período de retorno (Woessner <i>et al.</i> , 2015). Em destaque: Portugal continental	2
Figura 1.2 – Mapa de perigosidade sísmica, produto dos trabalhos realizados para o EC8, para Portugal continental (Campos Costa <i>et al.</i> , 2008). Esquerda: perigosidade sísmica considerando as zonas sismogénicas de mar; Direita: perigosidade sísmica considerando as zonas sismogénicas de terra (ver texto, capítulo 2)	3
Figura 2.1 – Zonas Sismogénicas consideradas no modelo EC8 (adaptado de Campos Costa <i>et al.</i> , 2008)	6
Figura 2.2 – Mapa de epicentros, período 33 AD-1999 e $M_w \geq 3.5$ (registos históricos e instrumentais) e zonas sismogénicas consideradas no modelo EC8 (adaptado de Campos Costa <i>et al.</i> , 2008)	7
Figura 2.3 – Estimativa dos períodos de plenitude do catálogo sísmico utilizado no modelo EC8 (Carvalho, A., comunicação pessoal)	8
Figura 2.4 – Zonas sismogénicas consideradas no modelo ERSTA e em estudos locais	10
Figura 2.5 – Zonas sismogénicas consideradas no modelo ERSTA (Carrilho <i>et al.</i> , 2010) e localização epicentral dos sismos do catálogo sísmico revisto, para a região mostrada no mapa	12
Figura 2.6 – Estimativa dos períodos de plenitude do catálogo sísmico utilizado no modelo ERSTA (Rodrigues <i>et al.</i> , 2009). Parâmetros no Quadro 2.5.....	13
Figura 2.7 – 22 “Superzonas”, resultantes do projeto SHARE, para a região europeia (adaptado de Stucchi <i>et al.</i> , 2013)	16
Figura 2.8 – Zonas Sismogénicas consideradas para o estudo da perigosidade sísmica para Portugal, resultantes do projeto SHARE (adaptado de Woessner <i>et al.</i> , 2015)	16
Figura 2.9 – Catálogo Sísmico do projeto SHARE, 1000 - 2006 (Woessner <i>et al.</i> 2015)	17
Figura 2.10 – Parâmetros da lei Gutenberg-Richter. Esquerda: valores de a ; Direita: valores de b (Woessner <i>et al.</i> 2015).....	18
Figura 3.1 – Estruturas tectónicas da margem continental SW-Ibérica (Ribeiro, 2005)	19
Figura 3.2 – Valores da magnitude máxima, considerados no modelo SHARE. Esquerda: valor mínimo, $m_{max,min}$; Direita: valor máximo, $m_{max,max}$ (Woessner <i>et al.</i> 2015)	20
Figura 3.3 – Valores de m_{max} considerados nos modelos EC8, ERSTA e SHARE	21
Figura 3.4 – Valores de a considerados nos modelos EC8, ERSTA e SHARE	22
Figura 3.5 – Valores de b considerados nos modelos EC8, ERSTA e SHARE	23
Figura 3.6 – Zonas sismogénicas dos vários modelos analisados, e indicação das estruturas sismogénicas mais relevantes nelas inseridas. 1-Falha Vale Inferior do Tejo; 2-Banco de Gorringe; 3-Falha da Ferradura; 4-Golfo de Cádiz; 5-Banco de Portimão. A georreferenciação das estruturas é a que consta da base de dados do projeto SHARE .	24
Figura 3.7 – Parâmetros para a zona do Vale Inferior do Tejo, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE. No gráfico da magnitude máxima, para o modelo SHARE, apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo, $m_{max,min}$ e o valor máximo, $m_{max,max}$ da magnitude máxima.....	25
Figura 3.8 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, M_{min} , e máximo, M_{max} , da magnitude máxima), para a zona do Vale Inferior do Tejo.....	25
Figura 3.9 – Parâmetros para a zona do Banco de Gorringe, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE. No gráfico da magnitude máxima, para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo, $m_{max,min}$ e o valor máximo, $m_{max,max}$ da magnitude máxima.....	27
Figura 3.10 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, M_{min} , e máximo, M_{max} , da magnitude máxima), para a zona do Banco de Gorringe	27

Figura 3.11 – Parâmetros para a zona da Falha da Ferradura, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE. No gráfico da magnitude máxima, para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo, <i>mmax, min</i> e o valor máximo, <i>mmax, max</i> da magnitude máxima.....	29
Figura 3.12 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, <i>Mmin</i> , e máximo, <i>Mmax</i> , da magnitude máxima), para a zona da Falha da Ferradura	29
Figura 3.13 – Parâmetros para a zona do Golfo de Cádiz, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE. No gráfico da magnitude máxima, para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo, <i>mmax, min</i> e o valor máximo, <i>mmax, max</i> da magnitude máxima.....	31
Figura 3.14 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, <i>Mmin</i> , e máximo, <i>Mmax</i> , da magnitude máxima), para a zona do Golfo de Cádiz	31
Figura 3.15 – Parâmetros para a zona do Banco de Portimão, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE. No gráfico da magnitude máxima, para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo, <i>mmax, min</i> e o valor máximo, <i>mmax, max</i> da magnitude máxima.....	33
Figura 3.16 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, <i>Mmin</i> , e máximo, <i>Mmax</i> , da magnitude máxima), para a zona do Banco de Portimão.....	33
Figura 3.17 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando, para este, o valor da magnitude máxima como a magnitude de cálculo referida no texto), para as estruturas offshore estudadas.....	34
Figura 3.18 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor da magnitude máxima de cálculo), para a zona da Falha da Ferradura	35

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Síntese da informação do catálogo sísmico para Portugal continental e região adjacente (Carvalho e Sousa, 2001)	7
Quadro 2.2 – Exaustividade do catálogo sísmico utilizado no modelo EC8	8
Quadro 2.3 – Parâmetros definidores das zonas sísmicas considerados no modelo EC8 (adaptado de Campos Costa <i>et al.</i> , 2008)	9
Quadro 2.4 – Síntese da informação do catálogo IPMA (catálogo sísmico para Portugal continental e região adjacente)	12
Quadro 2.5 – Plenitude do catálogo sísmico utilizado no modelo ERSTA (Rodrigues <i>et al.</i> , 2009)	14
Quadro 2.6 – Plenitude revista do catálogo sísmico utilizado no modelo ERSTA (Carvalho e Campos Costa, 2015).....	14
Quadro 2.7 – Parâmetros definidores das zonas sísmicas considerados no modelo ERSTA (Carvalho e Campos Costa, 2015)	15
Quadro 2.8 – Plenitude do catálogo sísmico histórico (1000 – 1899) (Stucchi <i>et al.</i> , 2013)	17
Quadro 2.9 – Plenitude do catálogo sísmico utilizado no modelo SHARE (Rovida <i>et al.</i> , 2011)	17
Quadro 2.10 – Parâmetros definidores das zonas sísmicas considerados no modelo SHARE.....	18
Quadro 3.1 – Estruturas tectónicas e respetivas zonas para os modelos EC8, ERSTA e SHARE	24
Quadro 3.2 – Valores dos parâmetros de caracterização para a zona do Vale Inferior do Tejo, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE	25
Quadro 3.3 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 5,5, 6,0 e 7,0 (direita) na zona VIT	26
Quadro 3.4 – Valores dos parâmetros de caracterização para a zona do Banco de Gorringe, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE	27
Quadro 3.5 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 6,0, 6,5 e 7,0 (direita) na zona do Banco de Gorringe	28
Quadro 3.6 – Valores dos parâmetros de caracterização para a zona da Falha da Ferradura, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE	29
Quadro 3.7 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 7,5, 8,0 e 8,5 (direita) na zona da Falha da Ferradura	30
Quadro 3.8 – Valores dos parâmetros de caracterização para a zona do Golfo de Cádiz, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE	31
Quadro 3.9 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 6,0, 6,5 e 7,0 (direita) na zona do Golfo de Cádiz	32
Quadro 3.10 – Valores dos parâmetros de caracterização para a zona do Banco de Portimão, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE	32
Quadro 3.11 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 6,0, 6,5 e 7,0 (direita) na zona do Banco de Portimão.....	34

1 | Introdução

Nos estudos probabilísticos para avaliação da perigosidade sísmica para Portugal, em que os resultados são expressos em termos da probabilidade de excedência de determinado nível de movimentos do solo, durante um determinado período de exposição, são estabelecidas regiões que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas, habitualmente referidas como zonas de geração sísmica, zonas sismogénicas ou áreas-fonte. Neste contexto, uma zona de geração sísmica representa uma região da litosfera aproximadamente homogénea no que respeita às distribuições que caracterizam a sua atividade sísmica. Para cada zona é definida a relação entre a frequência com que aí ocorrem os sismos e as respetivas magnitudes, num dado período de tempo (lei de frequência-magnitude).

Em 2006, decorrente da preparação do Anexo Nacional do Eurocódigo 8, foram consideradas e caracterizadas 11 zonas sismogénicas para Portugal continental (Campos Costa *et al.*, 2008) adaptadas de estudos previamente elaborados em 1996 (Sousa, 1996; Sousa e Oliveira, 1997).

No ano de 2008, no âmbito do projeto ERSTA (2008-2011) - *Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve*, promovido pela Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) procedeu à revisão do catálogo sísmico do Continente. Esta revisão, aliada aos estudos de neotectónica desenvolvidos no âmbito do projeto, permitiu redesenhar e propor novas zonas sismogénicas (Carrilho *et al.*, 2010), para as quais se procedeu à estimativa dos parâmetros da lei de frequência – magnitude (Rodrigues *et al.*, 2009).

Paralelamente, no contexto do projeto europeu SHARE (2009-2013) - *Seismic Hazard Harmonization in Europe*, foram propostas zonas sismogénicas para o território português (Vilanova *et al.*, 2014) e definidas as taxas de atividade e distribuição de magnitudes respetivas (Woessner *et al.*, 2015).

A delimitação das zonas sismogénicas reveste-se de alguma subjetividade podendo-se dar maior relevância a critérios sísmicos (distribuição espacial dos sismos e suas magnitudes), tectónicos (existência de estruturas tectónicas ativas), geológicos (tipo de crosta e sua reologia) e /ou estatísticos (quantidade de dados de modo a que a amostra seja estatisticamente significativa). Para mais, para cada zona sismogénica considerada, os valores dos parâmetros que as caracterizam estão fortemente condicionados aos dados sísmicos existentes, particularmente, ao catálogo sísmico, também este objeto de análise e tratamento, e aos dados de paleosismicidade que possam existir e complementar o catálogo.

A consideração de diferentes catálogos sísmicos e os tratamentos diferenciados por parte de diversos grupos de trabalho, assim como os critérios escolhidos para a delimitação das zonas sismogénicas, originaram diferentes estimativas da lei de frequência-magnitude que se traduzem em diferenças nos intervalos de recorrência para magnitudes de interesse e, conseqüentemente, em níveis significativamente diferentes de perigosidade sísmica para o território português.

A SPES, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica, espelhando a inquietude existente na comunidade científica face às diversas expressões da perigosidade sísmica em Portugal, e consciente

da necessidade de um consenso perante os agentes decisores, considerou urgente a realização de um estudo criterioso acerca das opções tomadas, nos diferentes estudos, e suas implicações. É neste contexto que surge este trabalho, que pretende fazer uma análise crítica e comparativa dos resultados obtidos nos diferentes estudos mencionados e as suas implicações ao nível dos períodos de retorno para sismos de maior magnitude. É o início de um trabalho que serve de ponto de partida para a criação de um grupo de trabalho nacional, cujo intuito é o de discutir os assuntos relevantes nesta matéria (catálogo sísmico e seu tratamento, zonas sismogénicas e seus parâmetros, metodologias e leis de previsão dos movimentos do solo) e, quem sabe, chegar a um consenso para o mapa da perigosidade sísmica para Portugal continental.

O estudo promovido tem como objeto de trabalho os três estudos já enunciados (aqui apelidados de modelos), apresentando-se neste relatório, que corresponde a uma primeira parte do estudo, a descrição dos modelos (capítulo 2) com a identificação das zonas sismogénicas consideradas e os parâmetros que as caracterizam, seguida de uma análise comparativa dos parâmetros e as implicações para os períodos de retorno de sismos de elevada magnitude em estruturas tectónicas consideradas relevantes (capítulo 3).

Como nota introdutória e para efeitos de enquadramento do trabalho, apresentam-se nas Figura 1.1 e Figura 1.2 os mapas de perigosidade sísmica que foram produto do projeto SHARE e dos estudos para o EC8, respetivamente, e que justificam o trabalho agora realizado.

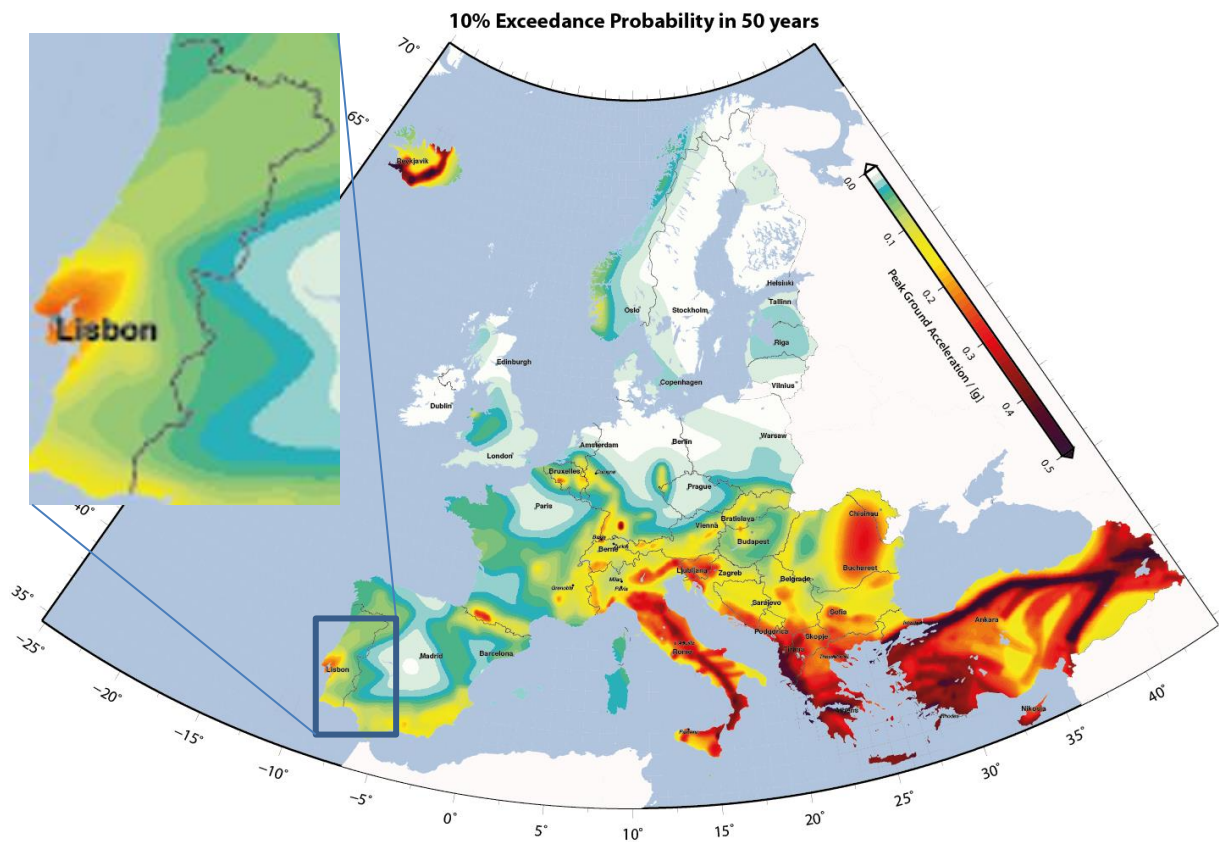


Figura 1.1 – Mapa de perigosidade sísmica, projeto SHARE, para os 475 anos de período de retorno (Woessner et al., 2015). Em destaque: Portugal continental

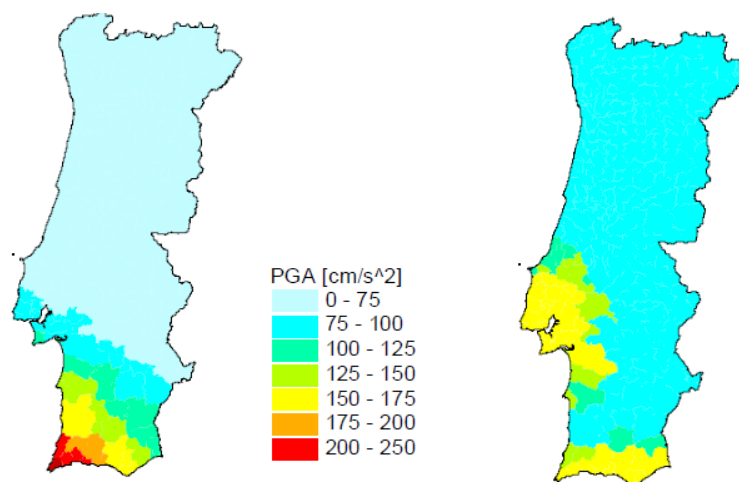


Figura 1.2 – Mapa de perigosidade sísmica, produto dos trabalhos realizados para o EC8, para Portugal continental (Campos Costa *et al.*, 2008). Esquerda: perigosidade sísmica considerando as zonas sismogénicas de mar; Direita: perigosidade sísmica considerando as zonas sismogénicas de terra (ver texto, capítulo 2)

Não é apresentado um mapa de perigosidade sísmica do projeto ERSTA, pois não existiu esse produto final como resultado do projeto. Far-se-ão, no entanto, futuramente, considerações sobre as implicações para a perigosidade sísmica, das opções tomadas no âmbito deste projeto.

2 | Descrição dos modelos – Catálogo sísmico, Zonas Sismogénicas e seus parâmetros

2.1 Nota introdutória

Como referido, existem três propostas de divisão do território em zonas sismogénicas, e respetivos parâmetros, que se considerou serem de maior relevância: i) a que deu origem ao zonamento sísmico do Anexo Nacional do Eurocódigo 8, aqui intitulada de “Modelo EC8”; ii) a que resultou no âmbito do projeto ERSTA, aqui intitulada de “Modelo ERSTA” e iii) a considerada no projeto europeu SHARE, aqui intitulada de “Modelo SHARE”.

Para cada zona sismogénica considerada é definida a relação entre a frequência com que aí ocorrem os sismos e as respetivas magnitudes, num dado período de tempo. Esta relação pode ser expressa pela lei de Gutenberg-Richter (Gutenberg e Richter, 1944), que estabelece uma dependência linear entre o logaritmo da frequência de ocorrências de sismos e as suas magnitudes:

$$\log N(m) = a - bm \Leftrightarrow N(m) = 10^{a - bm} = \exp(\alpha - \beta m) \quad (1)$$

em que:

$$\alpha = a \ln 10 \quad e \quad \beta = b \ln 10 \quad (2)$$

Sendo que $N(m)$ é a taxa média anual de eventos com magnitude superior a m que ocorre na região analisada, a é a atividade sísmica da zona, 10^a é a média anual de sismos de magnitude maior ou igual a zero, e b é o coeficiente que descreve a taxa relativa de ocorrência entre sismos de maior e menor magnitude em cada zona.

Assumindo que i) as grandezas de eventos sucessivos de uma dada zona são independentes, ii) os sismos com magnitude inferior a m_0 que ocorrem nessa zona não são relevantes para o cálculo da perigosidade sísmica (por exemplo, por não causarem danos estruturais relevantes) e iii) em cada zona existe um valor máximo de magnitude, m_{\max} , que não pode ser ultrapassado, então $N(m)$ pode escrever-se através da lei, conhecida como lei de Gutenberg-Richter truncada, (Araya e Der Kiureghian, 1988):

$$N(m) = \exp(\alpha - \beta m_0) \frac{\exp[-\beta(m - m_0)] - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]}, \quad m_0 \leq m \leq m_{\max} \quad (3)$$

O inverso da taxa média anual de eventos com magnitude superior a m é comumente conhecido como o período de retorno, T_R , do sismo de magnitude superior a m ($T_R = \frac{1}{N(m)}$).

Assim, estas relações de frequência-magnitude caracterizam o comportamento sísmico da região e são elementos fundamentais para estimar a perigosidade sísmica e os intervalos de recorrência (períodos de retorno) associados a dada magnitude.

De referir que a lei de Gutenberg-Richter truncada não é o único modelo que descreve a relação entre a frequência com que ocorrem os sismos e as respetivas magnitudes. Mencione-se, por exemplo, o modelo de sismo característico (Wesnousky *et al.*, 1983). Foi, no entanto, o modelo utilizado nos estudos aqui considerados. Acrescente-se que não existe consenso, na comunidade científica, relativamente ao modelo ideal para caracterizar a recorrência sísmica.

As secções seguintes apresentam as zonas sismogénicas e respetivos parâmetros para os três modelos aqui considerados, da inteira responsabilidade dos autores dos trabalhos mencionados, não se pretendendo avaliar as metodologias utilizadas para a estimativa dos parâmetros, mas, simplesmente, analisar as implicações dos resultados dos estudos.

2.2 Modelo EC8

Para a preparação das versões portuguesas das várias partes do Eurocódigo 8 relativas ao projeto sísmo-resistente, foi criado, em 2006, um grupo de trabalho (GT EC8) cuja principal atividade consistiu na preparação dos respetivos Anexos Nacionais, sendo dada prioridade à preparação da Parte 1 (Aspectos gerais, ação sísmica e edifícios). Nesse âmbito, foi solicitado ao Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do LNEC a apresentação de algumas propostas de definição da ação sísmica em Portugal continental para posterior apreciação pelo GT EC8.

2.2.1 Zonas Sismogénicas

Face aos prazos apertados para apresentação das propostas, a avaliação da perigosidade sísmica no território continental considerou o modelo existente e proposto por Sousa (Sousa, 1996), alterado para incorporar algumas sugestões depois da apresentação da proposta à comunidade técnica e científica, em sessão pública. O modelo contempla um total de 11 zonas sismogénicas para Portugal continental (Figura 2.1). Tal como mencionado em Sousa (2006), as zonas adotadas têm grande expressão geográfica devido à dificuldade de relacionar os epicentros (de acordo com o catálogo sísmico utilizado e compilado por Sousa *et al.*, 1992) com as falhas cartografadas na carta neotectónica e à necessidade de assegurar a validade das distribuições de probabilidades que caracterizam cada zona. Os detalhes de cada zona podem ser encontrados em Sousa (1996) mas no geral as zonas delineadas classificam-se em duas grandes categorias - as zonas interplacas ou de mar (zonas 1, 6, 7 e 9), que originam sismos com epicentro maioritariamente localizado na fronteira de placas (exceto a zona 1, mas o número de sismos é muito reduzido) e as zonas intraplaca ou de terra, que originam sismos com epicentro localizado predominantemente no interior da placa euroasiática (zonas 2, 3, 4, 5, 8, 10 e 11).



Figura 2.1 – Zonas Sísmogénicas consideradas no modelo EC8 (adaptado de Campos Costa *et al.*, 2008)

2.2.2 Catálogo Sísmico e parâmetros das zonas

O catálogo sísmico utilizado (ver Figura 2.2) para a caracterização das zonas sísmogénicas cobre uma janela temporal de, aproximadamente, 1965 anos (33 D.C. - 1999) e resultou de uma listagem de sismos compilada por Sousa *et al.* (1992) complementada com a informação do catálogo do Instituto Geográfico Nacional espanhol (IGN, www.geo.ign.es) sobre a região ibérica, para o período 1991-1999. A informação compilada diz respeito à data do sismo (ano, mês, dia), ao instante de ocorrência (hora, minutos e segundos), às coordenadas epicentrais (latitude e longitude), à sua profundidade, às magnitudes (magnitude das ondas volúmicas, M_b , das ondas superficiais, M_s , magnitude local, M_L , e outra, M_P , designação adotada quando o tipo de magnitude não é especificado nos catálogos originais) e à intensidade macrossísmica. Para efeitos de trabalho, foi considerada a magnitude máxima de entre as várias magnitudes que possam existir para cada evento.

A Figura 2.2 apresenta a localização dos epicentros dos sismos que constam no catálogo sísmico revisto sobreposta às zonas sísmogénicas definidas para Portugal continental. O Quadro 2.1 apresenta a síntese da informação constante no catálogo sísmico.

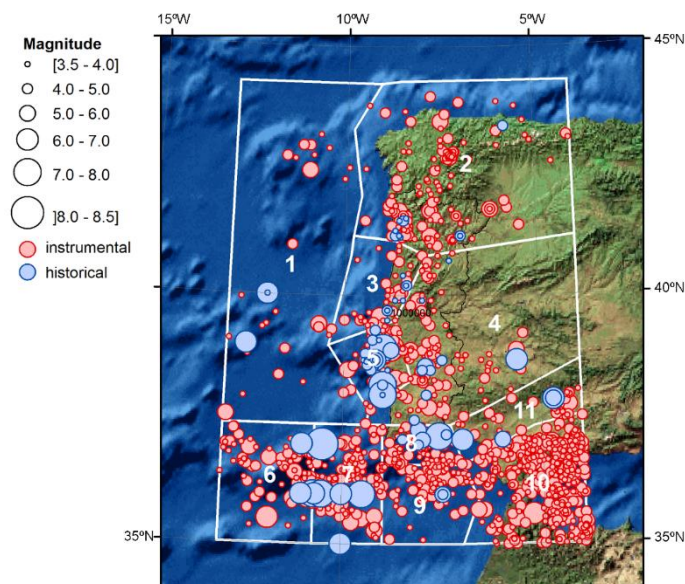


Figura 2.2 – Mapa de epicentros, período 33 AD-1999 e $M_w \geq 3.5$ (registos históricos e instrumentais) e zonas sísmogénicas consideradas no modelo EC8 (adaptado de Campos Costa *et al.*, 2008)

Quadro 2.1 – Síntese da informação do catálogo sísmico para Portugal continental e região adjacente (Carvalho e Sousa, 2001)

Data de Início		33 D.C.
Data de Fim		1999
Número de Registos		8657
Latitude	Mínima	35,0°N
	Máxima	44,0°N
Longitude	Mínima	13,0°O
	Máxima	4,0°O
Magnitude mínima		1,8
Magnitude máxima		8,5

O catálogo foi analisado pelo grupo de trabalho constituído para os trabalhos específicos do zonamento do anexo nacional. Para assegurar que a distribuição de magnitudes do catálogo não se encontra enviesada quer pelo desconhecimento da magnitude dos sismos das épocas históricas, quer pelo facto do catálogo não ser completo na gama de magnitudes baixas nas épocas antigas, o processo de ocorrência no tempo foi estudado para magnitudes iguais ou superiores a 3,45.

Uma metodologia para o estudo da plenitude, ou exaustividade (*completeness*, em inglês) do catálogo sísmico baseia-se na hipótese de que este 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 reta é constante. A Figura 2.3 apresenta os resultados obtidos seguindo esta metodologia.

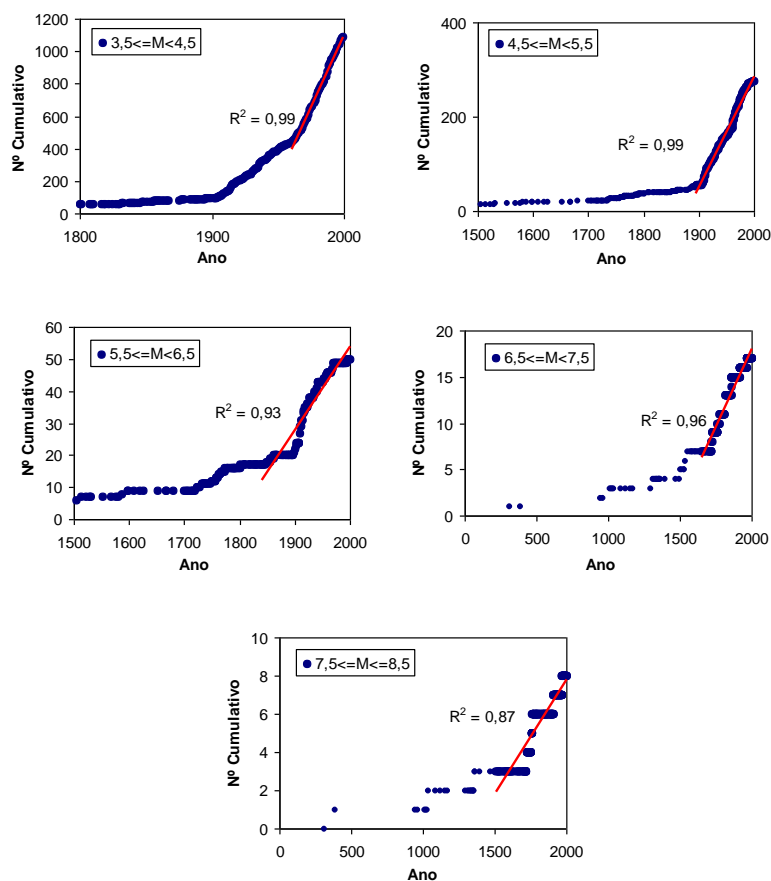


Figura 2.3 – Estimativa dos períodos de plenitude do catálogo sísmico utilizado no modelo EC8 (Carvalho, A., comunicação pessoal)

Analisando os resultados obtidos concluiu-se que o catálogo pode ser considerado completo para os diferentes intervalos de magnitude, para os seguintes anos: a partir de 1960 para o intervalo [3,5; 4,5]; a partir de 1895 para o intervalo [4,5; 5,5]; a partir de 1840 para o intervalo [5,5; 6,5]; a partir de 1651 para o intervalo [6,5; 7,5] e a partir de 1512 para o intervalo [7,5; 8,5]. Estes resultados estão apresentados no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Exaustividade do catálogo sísmico utilizado no modelo EC8

Magnitude	Ano
[3,5; 4,5[	1960
[4,5; 5,5[	1895
[5,5; 6,5[	1840
[6,5; 7,5[	1651
[7,5; 8,7]	1512

Os parâmetros, com os quais se caracterizam as diferentes zonas sismogénicas do modelo EC8 (Figura 2.1), foram obtidos recorrendo aos principais eventos sísmicos, de magnitudes iguais ou superiores a

3,5, para o período instrumental do catálogo, tendo sido considerado por Sousa (1996, 2006) este o período de uma melhor georreferenciação dos eventos.

Para todas as zonas de geração, a magnitude inferior (m_0 na expressão 3) considerada foi de 3,5 e a magnitude superior, m_{max} , foi estabelecida adotando-se a maior magnitude de todas as magnitudes dos sismos com epicentro na zona analisada. De referir que a magnitude para o sismo de 1755 é de 8,5 no catálogo utilizado, tendo sido alterada para 8,75 uma vez que a magnitude deste sismo é estimada entre 8,5 e 9 (por exemplo, Johnston, 1996).

Conhecidos os limites de truncatura e selecionando do catálogo os sismos com magnitude igual ou superior a 3,5 para cada período de tempo analisado, os parâmetros a e b da relação de Gutenberg-Richter (expressão 1) foram estimados pelo método da máxima verosimilhança proposto por Weichert (1980), para os diferentes períodos de plenitude do catálogo e para os diferentes intervalos de magnitude apresentados no Quadro 2.2, para cada zona de geração.

Os valores dos parâmetros a , b e m_{max} utilizados na elaboração dos cenários sísmicos do Anexo Nacional português (NP EN 1998-1, 2010), apresentam-se no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Parâmetros definidores das zonas sísmicas considerados no modelo EC8 (adaptado de Campos Costa *et al.*, 2008)

Zona	a	b	m_{max}
1	2,15	0,68	7,0
2	2,39	0,66	6,0
3	2,64	0,86	5,6
4	2,94	0,82	7,0
5	2,41	0,71	7,2
6	2,54	0,72	7,5
7	2,70	0,72	8,75
8	2,56	0,77	7,8
9	2,98	0,81	7,1
10	3,53	0,79	6,2
11	2,68	0,84	7,0

2.3 Modelo ERSTA

No âmbito do projeto “Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve (ERSTA)”, financiado pela Autoridade Nacional de Proteção Civil, foi realizado um trabalho concertado de várias entidades nacionais que, após a revisão da informação sísmica, tectónica e geológica da região algarvia, permitiu redesenhar as zonas sismogénicas que potencialmente afetam a região do Algarve. Visando considerar a perigosidade sísmica para a totalidade do todo o território continental, e no âmbito de outros estudos locais, foram definidas mais 4 zonas sismogénicas.

2.3.1 Zonas Sismogénicas

A revisão das zonas sismogénicas para a região sul de Portugal, no âmbito do projeto ERSTA, originou a delimitação de 15 novas zonas (zonas de A a P) (Carrilho *et al.*, 2010). Posteriormente, no âmbito de outros estudos locais, foram acrescentadas 3 zonas (Z1 a Z3, Jeremias *et al.*, 2012), modeladas por áreas de grandes dimensões devido à dificuldade em relacionar os epicentros com as falhas cartografadas na carta neotectónica, e uma zona Z4 (Sousa, comunicação pessoal). O conjunto final contém um total de 19 zonas e está apresentado na Figura 2.4.

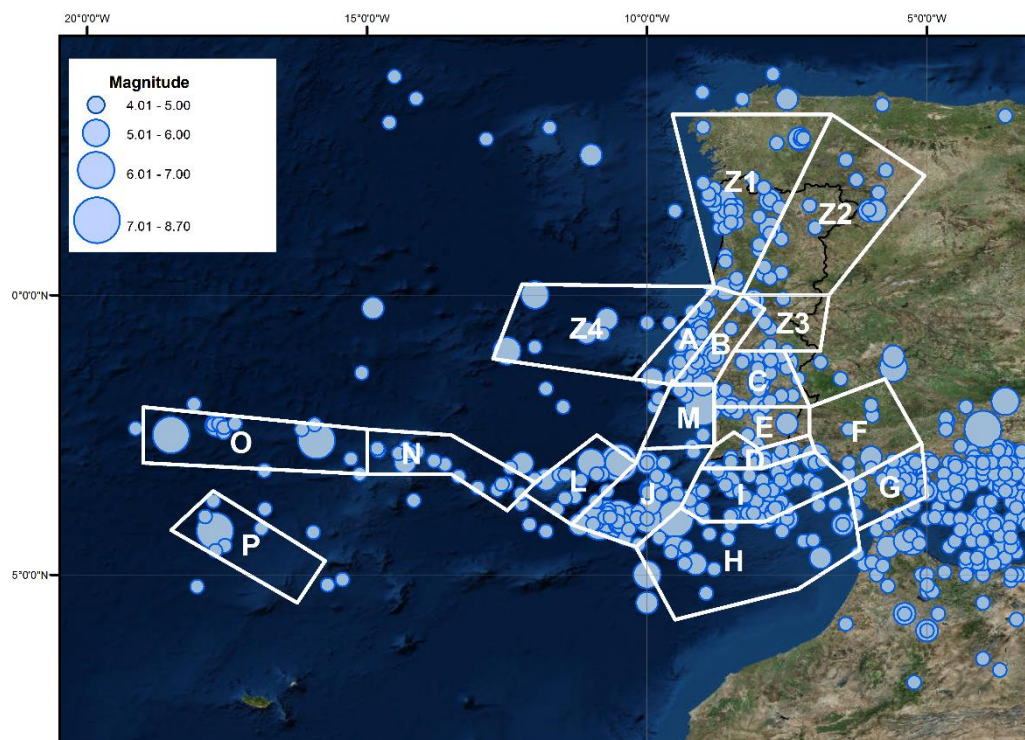


Figura 2.4 – Zonas sismogénicas consideradas no modelo ERSTA e em estudos locais

Os detalhes podem ser encontrados em Carrilho *et al.* (2010), fazendo-se referência aqui a algumas zonas com atividade mais relevante:

- A área A corresponde aproximadamente à extensão continental da Bacia Mesozoica Lusitana, e aparece claramente marcada por uma mancha de epicentros;
- A área B apresenta uma sismicidade significativamente inferior à anterior, e integra a Bacia Cenozoica do Vale Inferior do Tejo;
- A zona H foi delimitada tendo em consideração a proposta formulada por Gutscher (2004), segundo a qual nesta área existe uma zona de subducção que pode ter gerado o grande sismo de 1755;
- A zona I incorpora o importante cavalcamento do Guadalquivir, sendo uma das zonas de maior atividade sísmica no período instrumental (Figura 1 de Carrilho *et al.*, 2010);

- A zona J compreende a falha da Ferradura, a falha do Marquês de Pombal e a Falha de S.Vicente. Nesta área foram gerados alguns dos sismos mais importantes, como o de 28 de fevereiro de 1969 e, muito provavelmente, o de 1 de novembro de 1755. O último sismo mais importante teve epicentro nesta área (12 de fevereiro de 2007). É, claramente, a zona de maior libertação de energia sísmica (ver Figura 5 de Carrilho *et al.*, 2010);
- A zona L compreende essencialmente o Banco de Gorringe, sendo uma região de grande libertação de energia.

2.3.2 Catálogo Sísmico e parâmetros das zonas

No âmbito do projeto ERSTA, o IPMA procedeu à revisão da sismicidade para Portugal continental e região adjacente. O catálogo foi revisto para a região compreendida entre as latitudes 35°N e 44°N e as longitudes 18°O e 5,5°O, e apenas para o período de 1961 a 1969 (Carrilho *et al.*, 2010). Na base de dados foram ainda incluídos todos os sismos com localização epicentral exterior à região acima mencionada, mas que tenham sido detetados em pelo menos uma estação da rede nacional. Tal como explicado em Carrilho *et al.* (2010), todos os hipocentros foram recalculados com recurso ao programa Hypocent (Lienert, 1986) tendo havido a preocupação de incorporar todos os dados existentes, após pesquisa na base de dados sísmica do então Instituto de Meteorologia (IM), nos vários boletins sísmicos ou catálogos regionais e globais existentes. A base de dados resultante é constituída por um conjunto de localizações hipocentrais determinadas com recurso a um único algoritmo de cálculo e de estimativas de magnitude baseadas em valores publicados em várias fontes. Foram também adicionados vários parâmetros indicadores da qualidade das soluções determinadas (erros médios quadráticos, elipses de confiança a 90%, número de fases sísmicas utilizadas, deficiência de cobertura azimutal), bem como os valores de intensidade macrossísmica máxima observados em terra.

Procedeu-se também à atualização do catálogo sísmico nacional, tendo sido integrado o período 1961-2000 no catálogo pré-existente (Martins e Mendes Victor, 1990), e efetuadas algumas correções em epicentros e magnitudes atribuídas, nomeadamente nos sismos de 1909 e 1722, e ainda à eliminação de falsos sismos. Procedeu-se ainda ao alargamento do catálogo até dezembro de 2007, tendo a informação 2001-2007 sido incluída com base nos boletins sísmicos preliminares publicados pelo IM.

A título ilustrativo apresentam-se na Figura 2.5 os epicentros de todos os eventos sísmicos do catálogo (Carrilho *et al.*, 2010), bem como as zonas sismogénicas com maior influência para a perigosidade sísmica do Algarve. As magnitudes devidamente legendadas podem ser vistas na Figura 2.4, embora apenas para magnitudes superiores a 4.

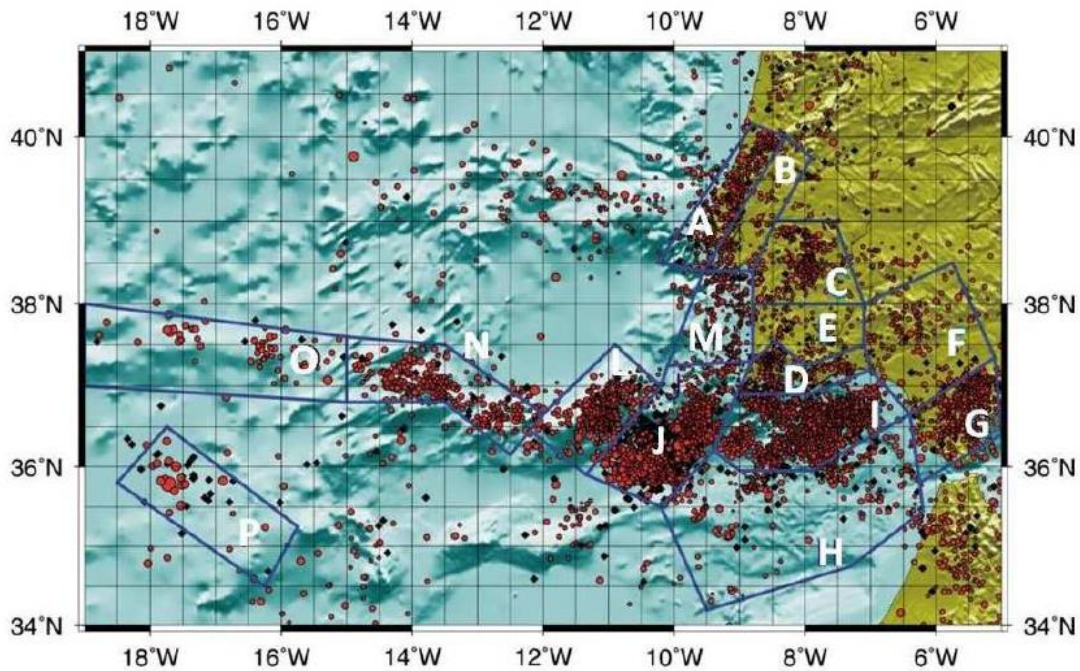


Figura 2.5 – Zonas sísmogénicas consideradas no modelo ERSTA (Carrilho *et al.*, 2010) e localização epicentral dos sismos do catálogo sísmico revisto, para a região mostrada no mapa

A revisão do catálogo permite evidenciar algumas diferenças em relação ao catálogo sísmico existente até à data (Figura 2.2) e utilizado nos estudos para a revisão da perigosidade do Anexo Nacional. São, agora, identificáveis vários enxames de epicentros, sendo perfeitamente visível uma certa organização na sua distribuição, contrastando com o carácter difuso patente nas versões anteriores do catálogo sísmico (Carrilho *et al.*, 2010). Em particular, destaca-se a região do Vale Inferior do Tejo, com uma concentração de epicentros na faixa continental paralela ao traçado do rio Tejo e localizada na margem norte, isto é, na faixa continental da Bacia Mesozoica Lusitana (zona A, Figura 2.4 e Figura 2.5).

No Quadro 2.4 sintetiza-se a informação contida no novo catálogo sísmico, aqui denominado de catálogo IPMA para facilidade de referência.

Quadro 2.4 – Síntese da informação do catálogo IPMA (catálogo sísmico para Portugal continental e região adjacente)

Data de Início		63 A.C.
Data de Fim		2007
Número de Registos		10552
Latitude	Mínima	33° N
	Máxima	44° N
Longitude	Mínima	19° O
	Máxima	0° O
Magnitude mínima, M_L		0,1
Magnitude máxima, M_L		8,7

Refira-se que, neste catálogo, constam dois sismos de 63 A.C e 55 A.C de magnitudes 8,5 e 6, respetivamente, que não constam do catálogo utilizado para o modelo EC8 (Quadro 2.1) pois estes sismos não têm indicação de data de ocorrência e não foram considerados como sendo informação fidedigna.

Referia-se, ainda, uma alteração efetuada ao catálogo sísmico do IPMA, concretamente, a alteração epicentral do sismo de 1 de novembro de 1755. No catálogo, este sismo tem a localização epicentral que consta do catálogo pré-existente (Martins e Mendes Victor, 1990), nomeadamente as coordenadas (37°N, 10,5°O), atribuindo ao Banco de Goringe a fonte geradora do sismo de 1755. Apesar da fonte geradora deste sismo ser uma questão que continua em aberto, tendo sido publicados vários modelos que englobam estruturas individuais ou combinadas, estudos mais recentes (Ribeiro, 2005; Zitellini *et al.*, 2004; Carvalho, 2007) indicam a zona onde se situa a Falha da Ferradura como a zona mais provável de geração deste sismo. Assim, alterou-se a localização epicentral no catálogo, passando esta a estar localizada na zona J e não na zona L (ver Figura 2.4 ou Figura 2.5).

A plenitude do catálogo foi analisada (Figura 2.6) concluindo-se que o catálogo pode ser considerado completo para os diferentes intervalos de magnitude, para os seguintes anos: a partir de 1971 para o intervalo de magnitude [3,5; 4,5[, a partir de 1899 para o intervalo [4,5; 5,5[, a partir de 1851 para o intervalo [5,5; 6,5[, a partir de 1568 para o intervalo [6,5; 7,5[e a partir de 1494 para o intervalo [7,5; 8,7]. Estes resultados são sintetizados no Quadro 2.5.

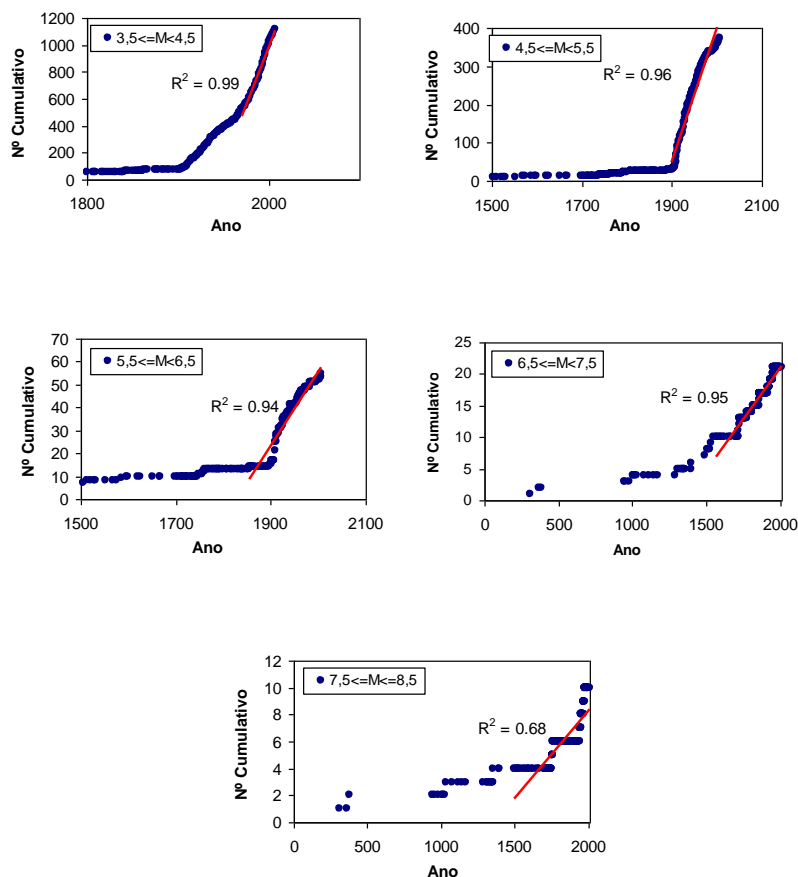


Figura 2.6 – Estimativa dos períodos de plenitude do catálogo sísmico utilizado no modelo ERSTA (Rodrigues *et al.*, 2009). Parâmetros no Quadro 2.5

Quadro 2.5 – Plenitude do catálogo sísmico utilizado no modelo ERSTA (Rodrigues *et al.*, 2009)

Magnitude	Ano
[3,5; 4,5[	1971
[4,5; 5,5[	1899
[5,5; 6,5[	1851
[6,5; 7,5[	1568
[7,5; 8,7]	1494

Tendo em conta os diferentes mecanismos dos sismos que afetam o nosso território, a plenitude deste catálogo foi recentemente revista (Carvalho e Campos Costa, 2015), analisando-se separadamente os registos dos sismos com epicentros no interior da placa euroasiática – aqui denominado de catálogo “terra”, e representando os sismos intraplaca – e os registos dos sismos com epicentros na região atlântica – aqui denominado de catálogo “mar e representando os sismos interplacas.

O Quadro 2.6 apresenta os períodos de plenitude considerados para as várias gamas de magnitudes.

Quadro 2.6 – Plenitude revista do catálogo sísmico utilizado no modelo ERSTA (Carvalho e Campos Costa, 2015)

mar		terra	
Magnitude	Ano	Magnitude	Ano
[3,5; 5,5[	1960	[3,5; 4,0[	1973
[5,5; 7,0[	1900	[4,0; 4,5[	1950
[7,0; 8,7[	1500	[4,5; 5,0[	1915
		[5,0; 6,0[	1838
		[6,0; 7,1]	1500

Os parâmetros de caracterização das zonas sismogénicas, a , b e m_{\max} , foram, assim, alvo também de uma posterior revisão e os seus valores apresentam-se no Quadro 2.7.

Refira-se que para efeitos do presente estudo (estudo comparativo dos períodos de retorno de sismos de magnitude elevada estimados considerando diferentes modelos de zonas sismogénicas) ir-se-á considerar, para o modelo ERSTA, os valores revistos e agora apresentados (Quadro 2.7).

Quadro 2.7 – Parâmetros definidores das zonas sísmicas considerados no modelo ERSTA (Carvalho e Campos Costa, 2015)

Zona	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>m_{max}</i>
A	3,41	0,96	6,0
B	3,03	0,79	7,1
C	3,12	0,89	6,0
D	2,27	0,75	7,0
E	2,68	0,98	5,6
F	2,88	0,97	6,0
G	3,98	1,07	5,4
H	2,14	0,64	7,5
I	2,99	0,76	7,0
J	2,44	0,62	8,7
L	2,75	0,82	7,0
M	1,63	0,62	7,2
N	4,00	1,12	5,1
O	2,04	0,67	8,2
P	0,92	0,51	8,1
Z1	3,56	0,98	5,6
Z2	3,86	1,08	5,7
Z3	3,12	1,10	5,0
Z4	1,68	0,62	7,0

2.4 Modelo SHARE

O projeto FP7 SHARE (*Seismic hazard HArmonization in Europe*) teve como objetivo a produção de um mapa de referência da perigosidade sísmica na Europa, que constituísse uma base para uma revisão dos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8, dos vários países europeus.

Nesse âmbito, foram propostas várias zonas sismogénicas e, numa perspetiva integradora e de homogeneização do modelo por toda a Europa, determinados os parâmetros da lei de Gutenberg-Richter.

2.4.1 Zonas Sismogénicas

Numa primeira perspetiva global, criaram-se 22 regiões, designados por “superzonas” (Figura 2.7), em que cada uma representa um ambiente geotectónico semelhante. Para determinação de alguns parâmetros regionais (nomeadamente magnitudes máximas), essas superzonas foram divididas em zonas sismogénicas. No que a Portugal diz respeito, mencione-se a superzona B apelidada de “offshore Portugal” e a superzona C apelidada de “Iberia”.

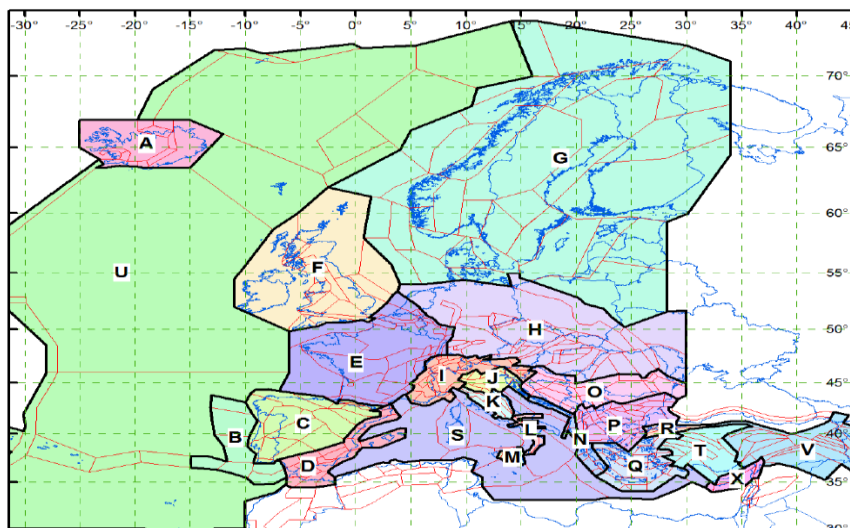


Figura 2.7 – 22 “Superzonas”, resultantes do projeto SHARE, para a região europeia (adaptado de Stucchi *et al.*, 2013)

No presente trabalho apenas se consideraram as zonas definidas para o estudo da perigosidade sísmica para Portugal (Figura 2.8), de acordo com o projeto SHARE.

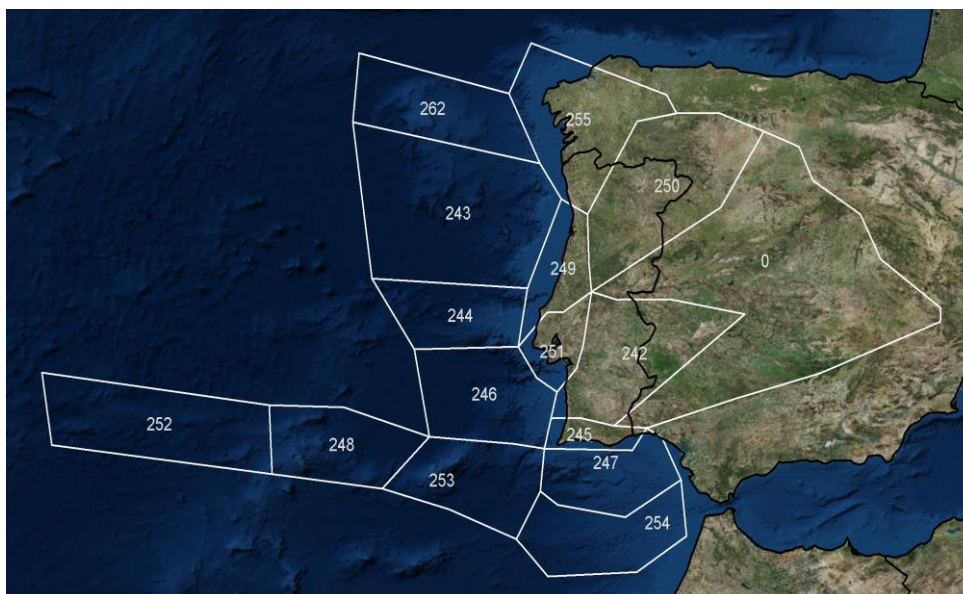


Figura 2.8 – Zonas Sísmogénicas consideradas para o estudo da perigosidade sísmica para Portugal, resultantes do projeto SHARE (adaptado de Woessner *et al.*, 2015)

2.4.2 Catálogo sísmico e parâmetros das zonas

O catálogo sísmico do SHARE compila os eventos sísmicos dos vários catálogos regionais existentes na Europa, contendo cerca de 24210 eventos com magnitude, M_W , compreendida entre 1,7 e 8,5 (Figura 2.9), para o período 1000 -2006, para a região compreendida entre as longitudes -32° e 44° e as latitudes 35° a 72° , que inclui o oriente e a parte central da Turquia. O catálogo foi construído considerando a base de dados histórica AHEAD (Archive of Historical Earthquake) que inclui um total

de 4482 eventos no período 1000-1899, e uma compilação de eventos regionais no período 1899-2006, consistindo em 13600 registos de magnitude $M_W \geq 3,5$ para latitudes $\geq 44^\circ\text{N}$ e $M_W \geq 4,0$ para latitudes $< 44^\circ\text{N}$.

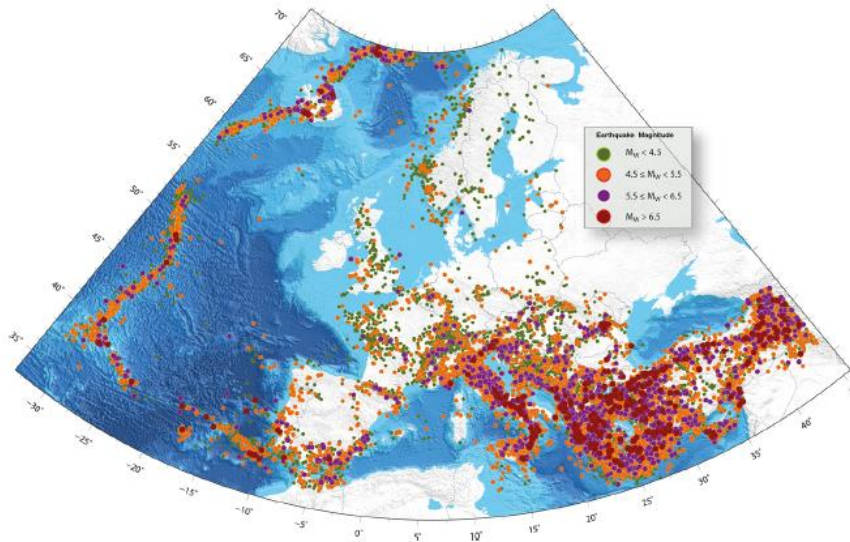


Figura 2.9 – Catálogo Sísmico do projeto SHARE, 1000 - 2006 (Woessner *et al.* 2015)

A plenitude do catálogo foi estudada para o catálogo histórico, período 1000 -1899, para $M_W \geq 5,8$ e $M_W \geq 6,8$, (Quadro 2.8), para cada uma das superzonas e depois para o catálogo completo (Quadro 2.9).

Quadro 2.8 – Plenitude do catálogo sísmico histórico (1000 – 1899) (Stucchi *et al.*, 2013)

Super Zona \ Magnitude	5,8	6,8
B	>1900	1700
C	1500	1300

Quadro 2.9 – Plenitude do catálogo sísmico utilizado no modelo SHARE (Rovida *et al.*, 2011)

Super Zona \ Magnitude	[4,0;4,55]	[4,55;5,05]	[5,05;5,55]	[5,55;6,05]	[6,05;6,55]	[6,55;7,05]	[7,05;7,55]
B	1950	1910	1910	1910	1910	1700	1700
C	1900	1900	1800	1500	1500	1300	1300

A obtenção dos parâmetros a e b foi realizada, inicialmente, para o catálogo como um todo, para a gama de magnitudes $4,5 \leq M_W \leq 8,6$, separando as zonas de subducção das zonas crustais, pelo método da máxima verosimilhança de Wiemer *et al.* (2009), obtendo-se os valores de $a = 5,89 \pm 0,04$ e $b = 0,90 \pm 0,01$ (Hiemer *et al.*, 2014). Os dois parâmetros foram, posteriormente, calculados para as diferentes zonas sismogénicas pelo método da máxima verosimilhança com abordagem bayseana (Johnston *et al.*, 1994; Coppersmith *et al.*, 2012) e o valor de b segundo o método de Weichert (1980). O valor de b foi comparado com o valor obtido para todo o catálogo, sendo alterado subjetivamente

(*expert opinion*) se diferir em mais de 0,4 do valor obtido para o catálogo. A Figura 2.10 apresenta os resultados obtidos para a região estudada pelo SHARE.

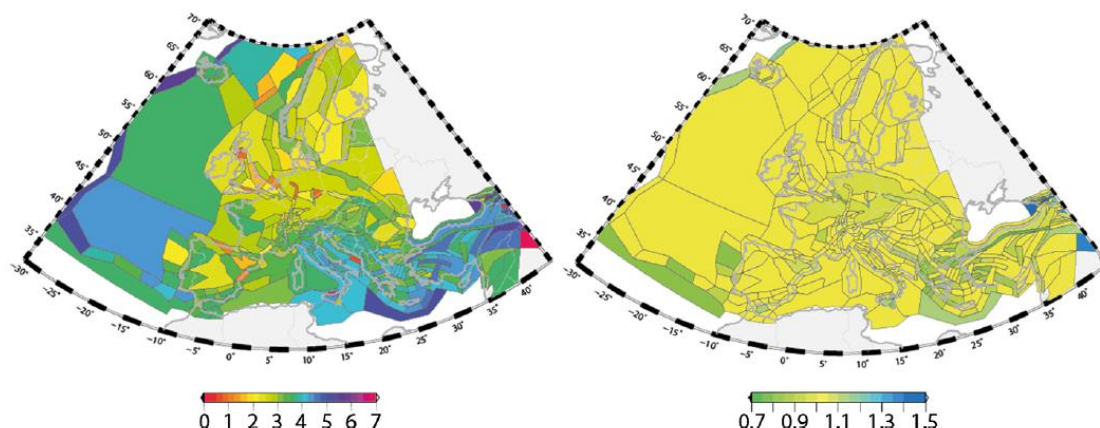


Figura 2.10 – Parâmetros da lei Gutenberg-Richter. Esquerda: valores de a ; Direita: valores de b (Woessner *et al.* 2015)

No Quadro 2.10 apenas se apresentam os valores estimados para Portugal continental, bem como o maior valor, $m_{max,max}$, e o menor valor, $m_{max,min}$, da magnitude máxima, pois, como será explicado e analisado no capítulo seguinte, no projeto SHARE foram considerados 4 valores de m_{max} para cada zona.

Quadro 2.10 – Parâmetros definidores das zonas sísmicas considerados no modelo SHARE

Zona	a	b^*	$m_{max,min}$	$m_{max,max}$
0	2,33	1,00	6,5	7,4
242	3,32	1,00	6,5	7,4
243	2,10	0,80	7,0	7,6
244	3,25	0,88	7,0	7,6
245	3,00	1,00	6,5	7,4
246	3,40	1,00	7,0	7,6
247	4,30	1,00	6,8	7,7
248	4,25	1,00	8,5	8,8
249	3,10	1,00	7,0	7,6
250	3,60	1,00	6,5	7,4
251	3,40	0,90	7,0	7,6
252	3,30	0,80	8,5	8,8
253	4,00	0,90	8,5	8,8
254	3,54	1,00	6,8	7,7
255	3,30	1,00	7,0	7,6
262	3,50	1,00	7,0	7,6

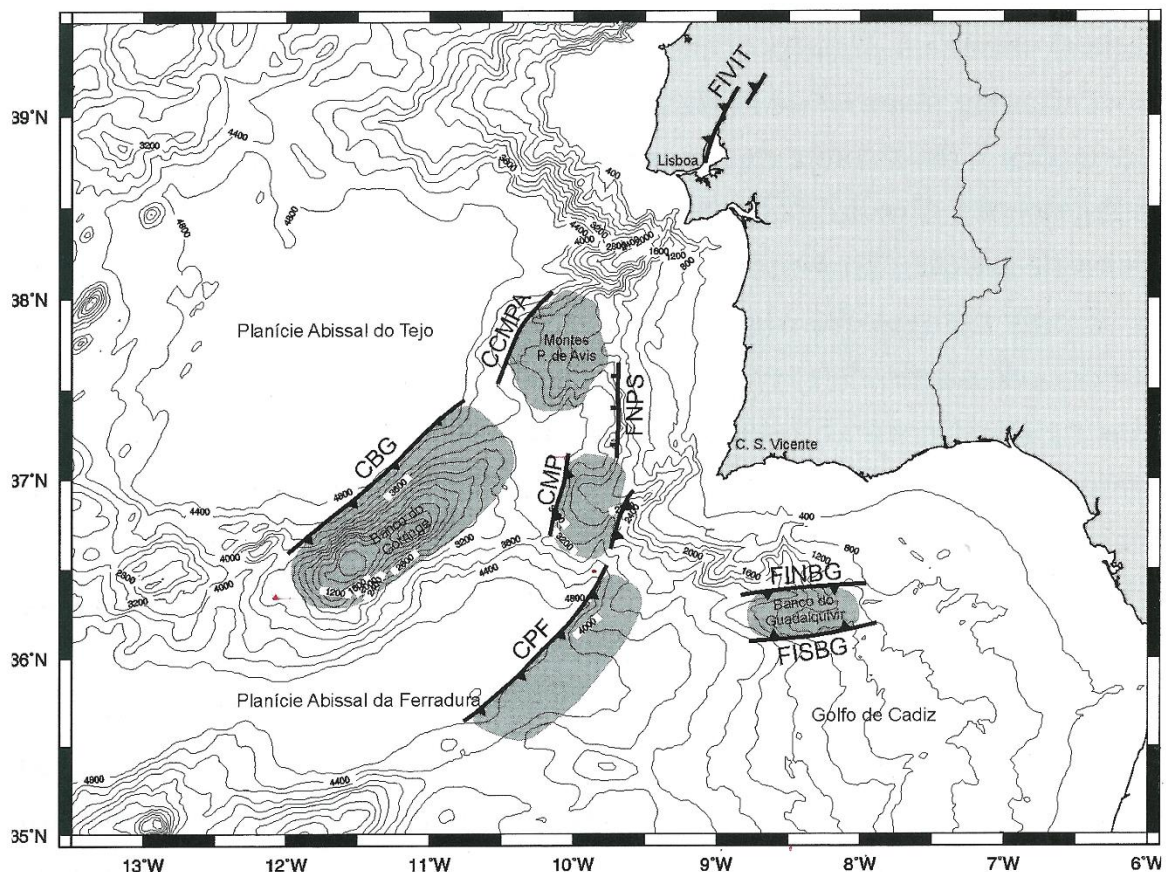
*o valor $b=1,00$ foi decidido por expert opinion, em vez do valor de 0,9 obtido pelo catálogo

3 | Comparação dos vários modelos

3.1 Nota introdutória

Tendo em conta as diferentes opções para as zonas sismogénicas e, naturalmente, a obtenção de diferentes relações de frequência-magnitude, far-se-á, neste capítulo, uma comparação dos parâmetros da lei de Gutenberg-Richter obtidos pelos três modelos.

As implicações das diferentes opções, para os períodos de retorno de várias magnitudes, serão analisadas para as regiões do Vale Inferior do Tejo, da margem Sudoeste Ibérica e do Golfo de Cádiz (Figura 3.1), que englobam estruturas tectónicas relevantes (Falha do Vale Inferior do Tejo, o Banco de Goringe, a Falha da Ferradura, o Banco de Portimão/Guadalquivir e a zona do Golfo de Cádiz).



CBG – Carreamento do Banco de Goringe; **CCMPA** – Carreamento da Montanha Príncipes de Avis; **CPF** – Carreamento da Planície da Ferradura; **CMP** – Carreamento do Marquês de Pombal; **FNPS** – Falha normal de Pereira de Sousa; **FINBG** e **FISBG** – Falha inversa Norte e Sul, respetivamente, do Banco de Guadalquivir; **FIVIT** – Falhas inversas do Vale Inferior do Tejo.

Figura 3.1 – Estruturas tectónicas da margem continental SW-Ibérica (Ribeiro, 2005)

3.2 Parâmetros das Zonas Sismogénicas

No que respeita aos valores de magnitude mínima a considerar, quer o modelo EC8 quer o modelo ERSTA consideraram o valor de 3,5 enquanto que no projeto SHARE o valor definido foi de 4,5.

Quanto aos valores de magnitude máxima, no caso específico do SHARE, foram atribuídos, no âmbito do projeto, quatro valores para o limite superior da magnitude, fazendo-se um incremento de 0,2 a um valor base, ponderados numa árvore lógica (para obtenção dos mapas de perigosidade sísmica) dando-se o maior peso, de 0,5, à menor magnitude, isto é, à magnitude base e ponderação de 0,2, 0,2 e 0,1 para os três valores de magnitude com incremento de 0,2. Para as zonas consideradas de baixa a moderada sismicidade (essencialmente as Regiões Continentais Estáveis), o valor base foi o valor da maior magnitude observada, com a devida incerteza. Para as restantes zonas, caracterizadas por sismicidade elevada e sismicidade histórica melhor definida, o valor base foi definido como o maior valor entre o maior valor reportado no catálogo e a magnitude máxima esperada considerando as falhas existentes, tendo em conta a respetiva incerteza. Os restantes valores foram obtidos com incrementos de 0,2 (Woessner *et al.*, 2015). De referir que, quer pela análise dos ficheiros *input* utilizados no SHARE quer pela análise do Quadro 2.10, para o caso de Portugal, são poucas as zonas sismogénicas consideradas que verificam esta regra. Nomeadamente, na maior parte das zonas os incrementos são de 0,3 e não de 0,2.

A Figura 3.2 apresenta o valor mínimo e o valor máximo das magnitudes máxima, m_{max} , consideradas.

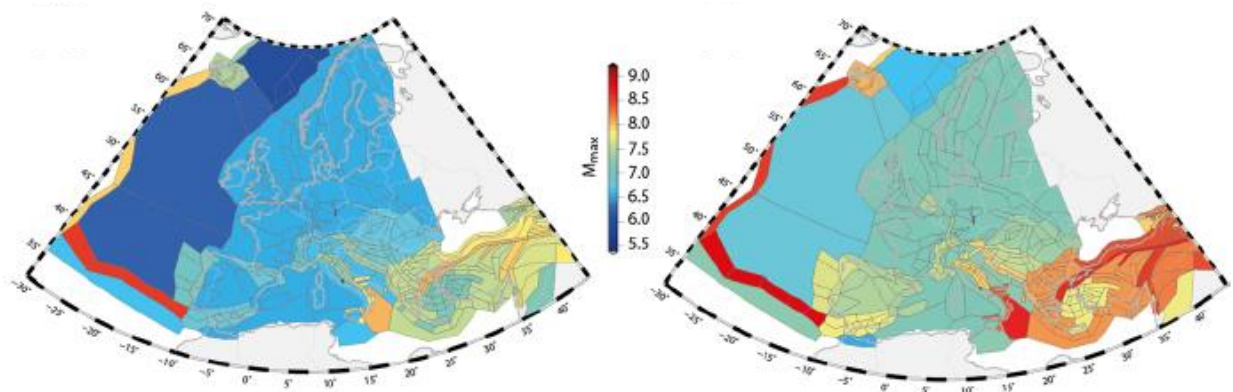


Figura 3.2 – Valores da magnitude máxima, considerados no modelo SHARE. Esquerda: valor mínimo, $m_{max,min}$; Direita: valor máximo, $m_{max,max}$ (Woessner *et al.* 2015)

A figura seguinte compara as magnitudes máximas consideradas em cada modelo estudado, observando-se, no geral, os valores mais altos no modelo SHARE e os mais baixos no modelo ERSTA.

No caso do SHARE, e por existirem 4 valores de magnitude máxima para a maior parte das zonas, apresenta-se também o valor da magnitude máxima ponderada, $m_{max,med}$, utilizando o esquema de ponderação mencionado nos parágrafos anteriores. Excetuam-se as três zonas offshore 248, 252 e 253 (zonas na “linha” da fronteira interplacas, Figura 2.8), que só têm dois valores de magnitude máxima atribuídos (8,5 e 8,8) pelo que foi considerado a média dos dois valores.

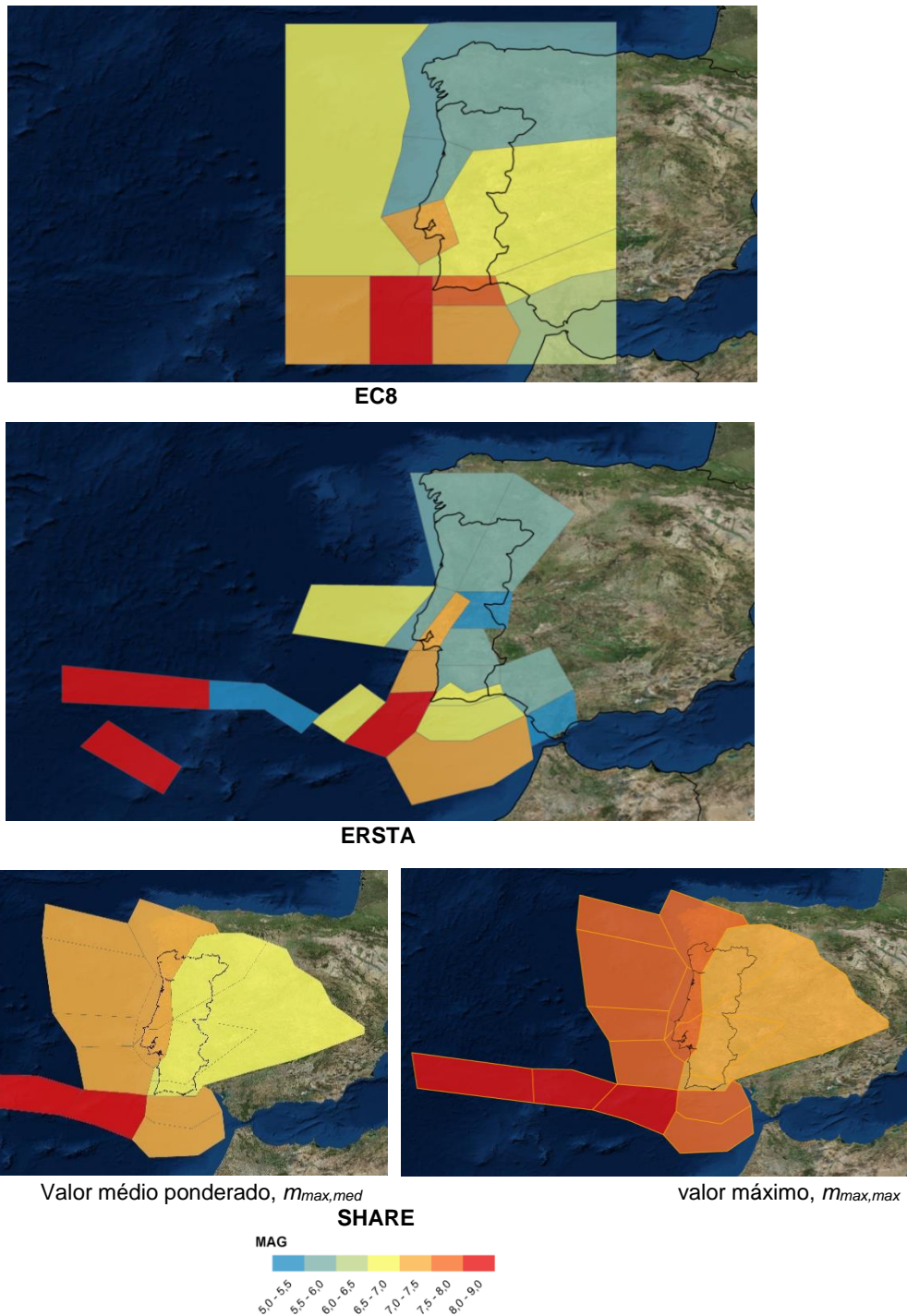


Figura 3.3 – Valores de m_{max} considerados nos modelos EC8, ERSTA e SHARE

O processo de obtenção dos parâmetros da lei Gutenberg-Richter é baseado no método da máxima verosimilhança. O projeto SHARE difere dos restantes por fixar o valor de b , obtido previamente para a respetiva “superzona”, determinando posteriormente o valor de a para cada zona, tal como já explicado anteriormente. Os parâmetros de caracterização referentes ao zonamento sísmico de Portugal continental foram já apresentados anteriormente (Quadro 2.3, Quadro 2.7 e Quadro 2.10) sendo apresentadas, nas Figura 3.4 e Figura 3.5, as distribuições espaciais dos parâmetros, para fácil comparação.

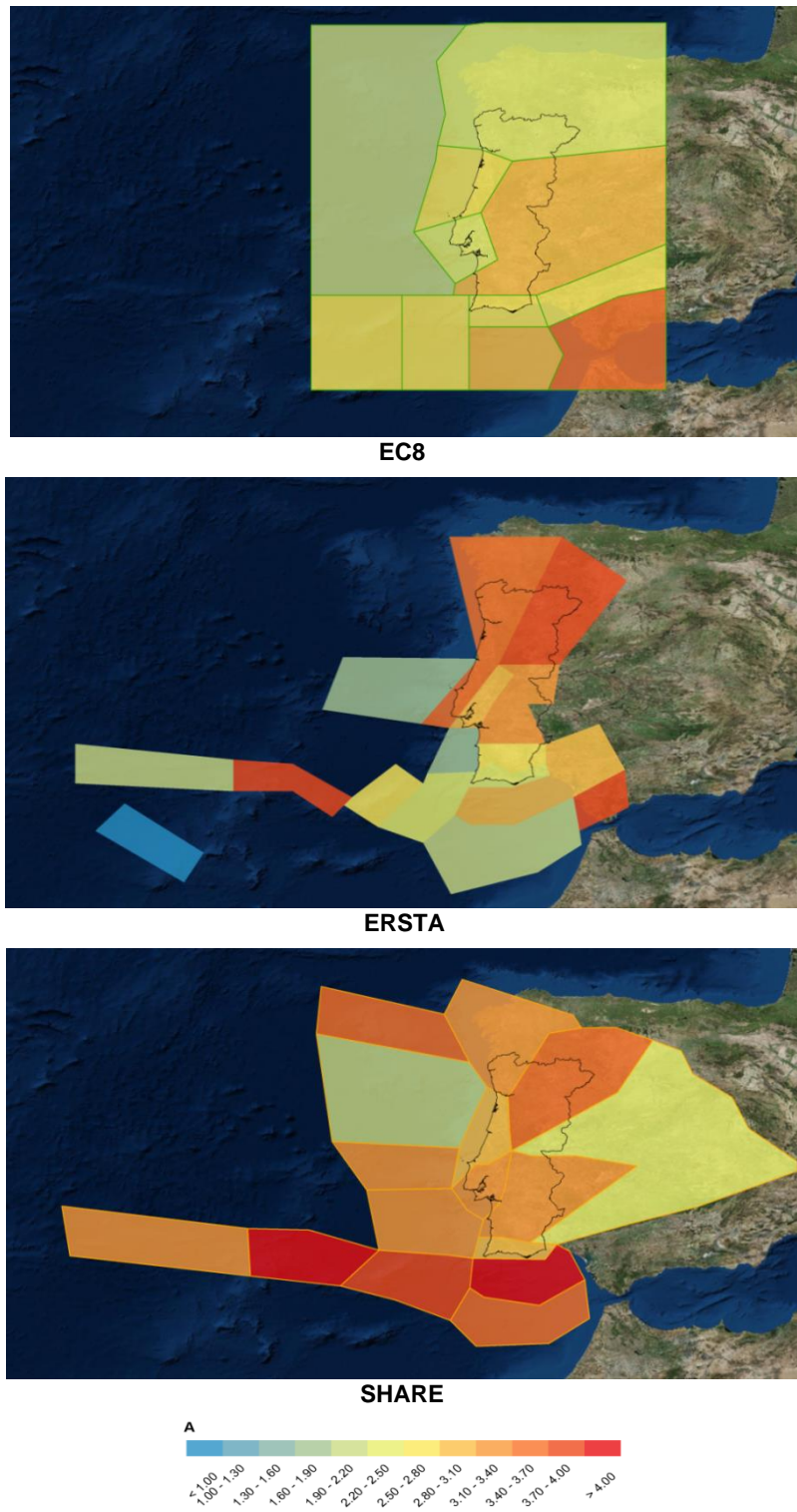


Figura 3.4 – Valores de a considerados nos modelos EC8, ERSTA e SHARE

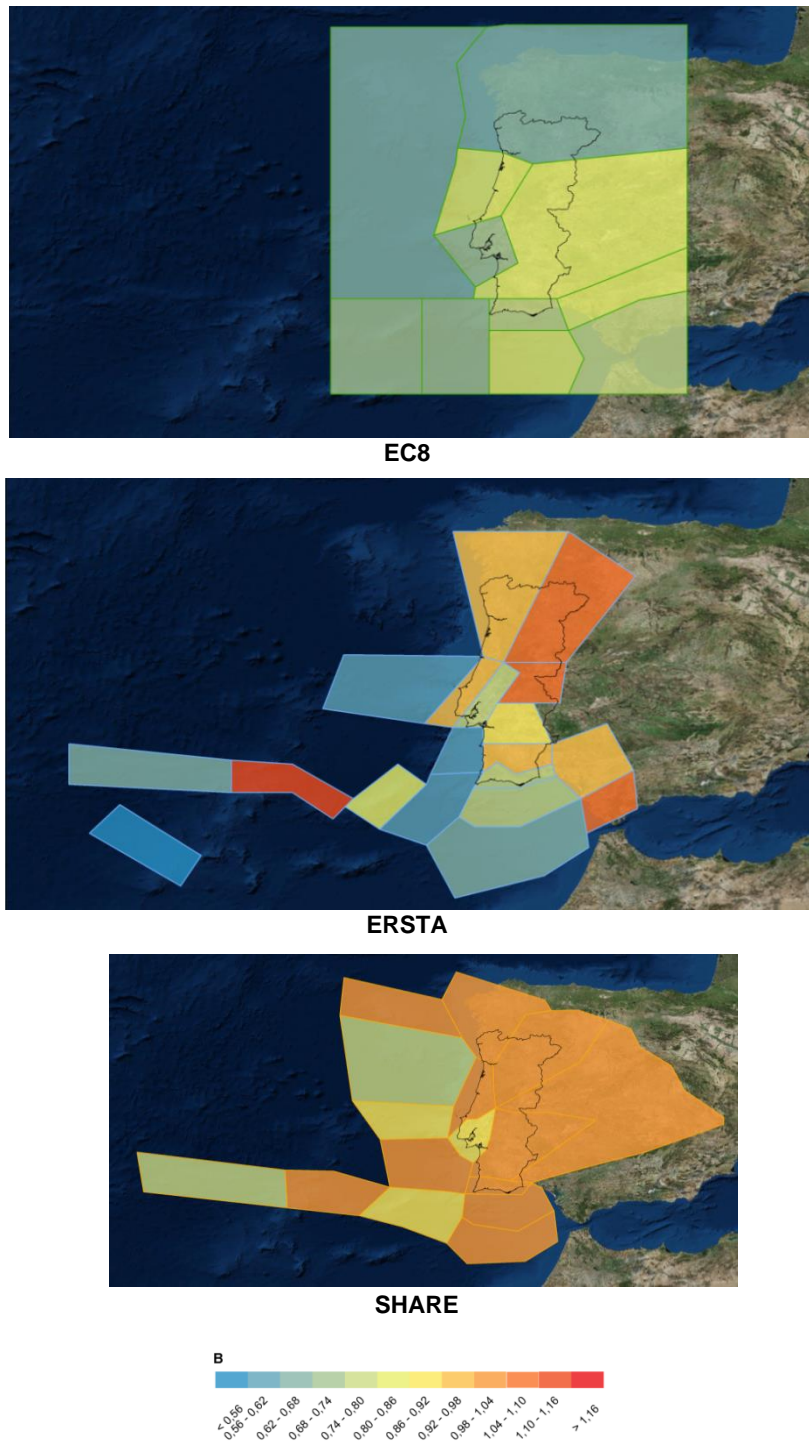


Figura 3.5 – Valores de b considerados nos modelos EC8, ERSTA e SHARE

3.3 Análise de cenários

Os modelos foram analisados para a zona do Vale Inferior do Tejo, margem SW Ibérica e zona do Golfo de Cádiz, sendo apresentadas na Figura 3.6 e no Quadro 3.1 as estruturas tectónicas relevantes (Falha do Vale Inferior do Tejo, Banco de Gorringe, Falha da Ferradura, Banco de Portimão e a zona do Golfo de Cádiz) e respetivas zonas de cada um dos modelos.

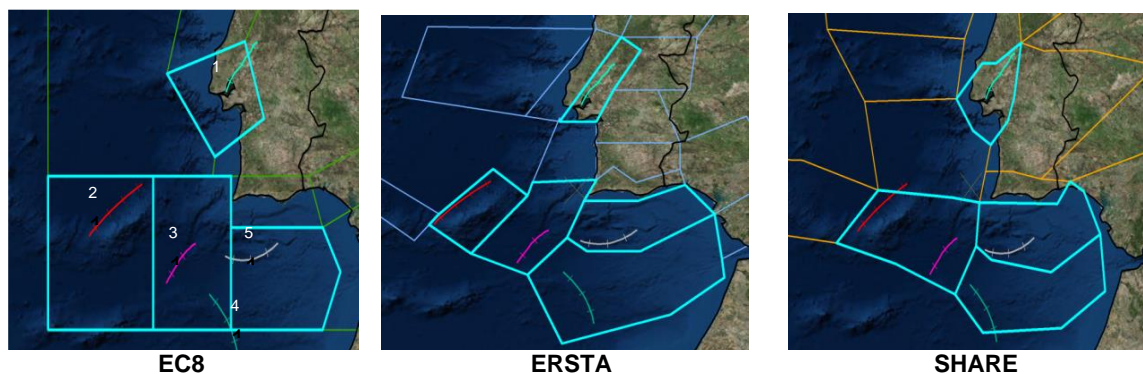


Figura 3.6 – Zonas sismogénicas dos vários modelos analisados, e indicação das estruturas sismogénicas mais relevantes nelas inseridas. 1-Falha Vale Inferior do Tejo; 2-Banco de Gorringe; 3-Falha da Ferradura; 4-Golfo de Cádiz; 5-Banco de Portimão. A georreferenciação das estruturas é a que consta da base de dados do projeto SHARE

Quadro 3.1 – Estruturas tectónicas e respetivas zonas para os modelos EC8, ERSTA e SHARE

Estrutura	Zonas Sismogénicas		
	EC8	ERSTA	SHARE
Falha Vale Inferior do Tejo	5	B	251
Banco de Gorringe	6	L	253
Falha da Ferradura	7	J	253
Banco de Portimão	9	I	247
Golfo de Cádiz	9	H	254

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para 4 períodos de retorno (100, 475, 975 e 4975 anos, correspondendo a uma probabilidade de excedência de cerca de 40%, 10%, 5% e 1%, respetivamente, para um período de exposição de 50 anos) e estimados os períodos de recorrência para diversas magnitudes, que diferem de cenário para cenário e que serão explicadas caso a caso.

3.3.1 Vale Inferior do Tejo

A região do Vale Inferior do Tejo (VIT) localiza-se na zona 5 do modelo EC8, na zona B do modelo ERSTA e na zona 251 do modelo SHARE.

Os parâmetros de caracterização das zonas sismogénicas de cada estudo, referentes a esta estrutura, encontram-se sintetizados no Quadro 3.2, fazendo-se a comparação dos valores nas Figura 3.7 e Figura 3.8.

Quadro 3.2 – Valores dos parâmetros de caracterização para a zona do Vale Inferior do Tejo, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE

	EC8	ERSTA	SHARE
Parâmetros \ Zona	5	B	251
<i>a</i>	2,41	3,03	3,40
<i>b</i>	0,71	0,79	0,90
m_{max}	7,2	7,1	7,0 ¹ 7,6 ²

¹ $m_{max,min}$
² $m_{max,max}$

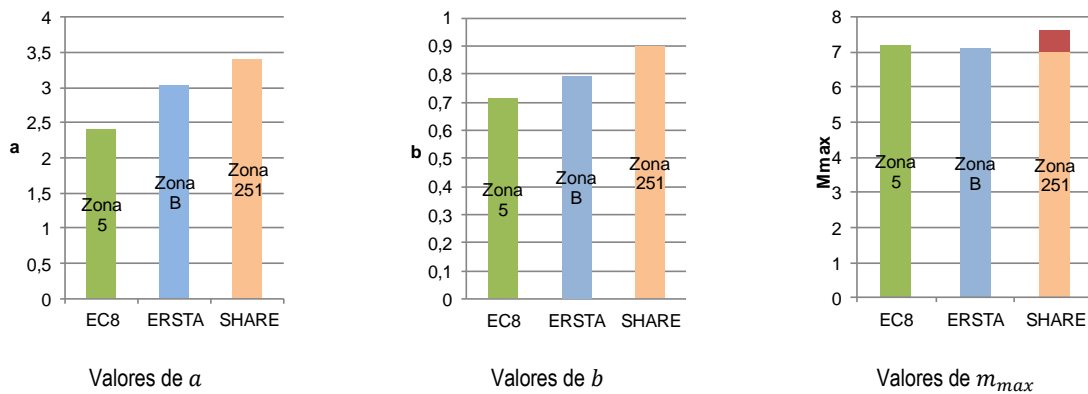


Figura 3.7 – Parâmetros para a zona do Vale Inferior do Tejo, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE. No gráfico da magnitude máxima, para o modelo SHARE, apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo, $m_{max,min}$ e o valor máximo, $m_{max,max}$ da magnitude máxima

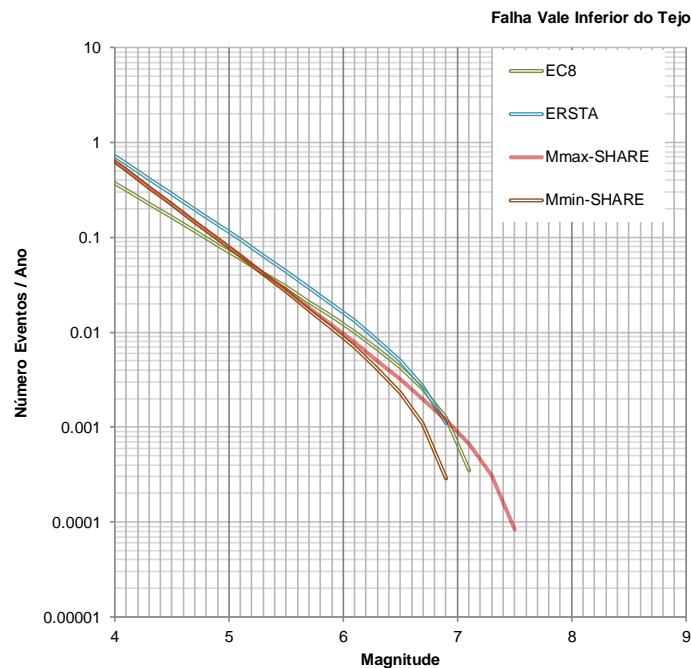


Figura 3.8 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, Mmin, e máximo, Mmax, da magnitude máxima), para a zona do Vale Inferior do Tejo

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para os 4 períodos de retorno já mencionados (100, 475, 975 e 4975 anos) e estimados os períodos de recorrência para as magnitudes 5,5, 6,0 e 7,0 (considerou-se a magnitude 5,5 como sendo uma magnitude que já poderá implicar danos moderados nas estruturas, a magnitude 6,0 por ser uma magnitude expectável tendo em conta as falhas que existem na zona do Vale Inferior do Tejo e a magnitude 7,0 por ser a magnitude máxima considerada por um ou mais modelos). Uma vez que o modelo SHARE considera quatro magnitudes máximas, para a magnitude de cálculo foi considerado o valor médio ponderado das magnitudes máximas, calculando-se, também, os valores previstos considerando o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 5,5, 6,0 e 7,0 (direita) na zona VIT

	Período de Retorno (anos)					Magnitude		
	100	475	975	4975		5,5	6,0	7,0
EC8	6,1	6,8	6,9	7,1	EC8	33	83	1304
ERSTA	6,2	6,8	6,9	7,1	ERSTA	23	62	2003
SHARE	6,0	6,6	6,8	7,1	SHARE	37	109	2551
		6,5 – 6,7	6,7 – 7,0	6,9 – 7,4				1116 – 4244*

*Considerando o valor mínimo $m_{\max,\min} = 7,1$

Não foram observados valores discrepantes, entre os três modelos analisados, sendo que a maior diferença se verifica nos grandes períodos de retorno (4975 anos), para os quais o modelo SHARE estima valores de magnitude mais elevados, consequência do maior valor de magnitude máxima ($m_{\max,\max} = 7,6$) considerada no modelo.

O maior valor de b no modelo SHARE, que faria com que os períodos de retorno para os sismos de maior magnitude fossem mais elevados, é compensado com o valor mais elevado da taxa de atividade atribuída a esta zona, por este modelo.

No geral, os modelos, apesar dos diferentes parâmetros, dão resultados semelhantes, não havendo diferentes implicações para a perigosidade sísmica para esta zona.

3.3.2 Banco de Gorringe

A região do Banco de Gorringe localiza-se na zona 6 do modelo EC8, na zona L do modelo ERSTA e na zona 253 do modelo SHARE, que inclui, também, a Falha da Ferradura.

Os parâmetros de caracterização das zonas sismogénicas de cada estudo, referentes a esta estrutura encontram-se sintetizados no Quadro 3.4, fazendo-se a comparação dos valores nas Figura 3.9 e Figura 3.10.

Quadro 3.4 – Valores dos parâmetros de caracterização para a zona do Banco de Gorringe, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE

	EC8	ERSTA	SHARE
Parâmetros \ Zona	6	L	253
<i>a</i>	2,54	2,75	4,00
<i>b</i>	0,72	0,82	0,90
m_{max}	7,5	7,0	8,5 ¹ 8,8 ²

¹- $m_{máx,min}$
²- $m_{máx,min}$

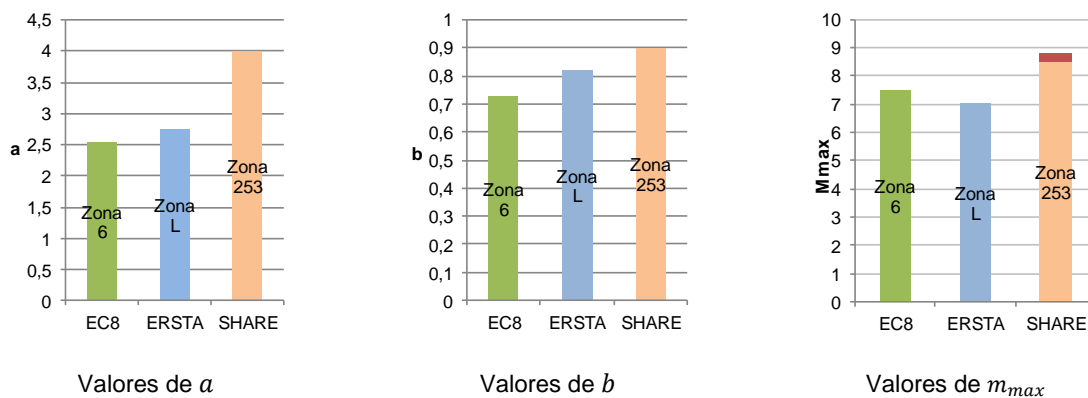


Figura 3.9 – Parâmetros para a zona do Banco de Gorringe, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE. No gráfico da magnitude máxima, para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo, $m_{max,min}$ e o valor máximo, $m_{max,max}$ da magnitude máxima

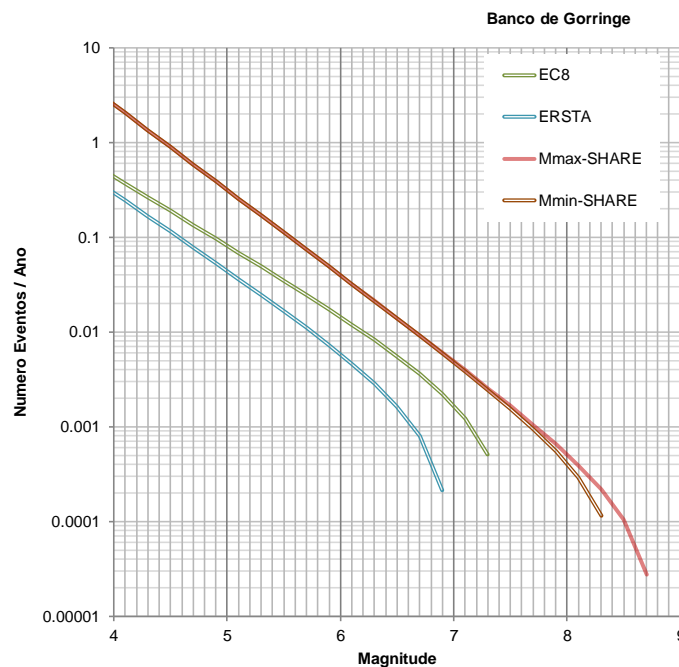


Figura 3.10 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, M_{min} , e máximo, M_{max} , da magnitude máxima), para a zona do Banco de Gorringe

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para os 4 períodos de retorno (100, 475, 975 e 4975 anos) e o período de recorrência para as magnitudes 6,0 6,5 e 7,0 (a magnitude 7,0 foi o valor máximo escolhido para análise, uma vez que é a magnitude máxima atribuída a esta zona por um dos modelos). Para a magnitude de cálculo para o modelo SHARE, foi considerado o valor médio das duas magnitudes máximas consideradas, calculando-se, também, os valores previstos considerando o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima. Os resultados são apresentados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 6,0, 6,5 e 7,0 (direita) na zona do Banco de Gorringe

	Período de Retorno (anos)				Magnitude		
	100	475	975	4975	6,0	6,5	7,0
EC8	6,2	6,9	7,1	7,4	69	181	597
ERSTA	5,7	6,4	6,6	6,9	172	614	5596*
SHARE	6,7	7,4	7,7	8,3 8,2-8,3	25	71	206

*Considerando $m_{max}=7,1$

O modelo SHARE apresenta valores mais elevados para as magnitudes para maiores períodos de retorno (a partir dos 475 anos), consequência dos valores elevados de m_{max} atribuídos a esta zona, muito superiores aos valores m_{max} atribuídos pelos outros dois modelos. Isto deve-se ao facto de, no modelo SHARE, a zona onde está inserida o Banco de Gorringe também incorporar a falha da Ferradura, região atribuída ao epicentro do sismo de 1 de novembro de 1755, de magnitude estimada entre 8,5 e 9,0, por vários autores. Já nos modelos EC8 e ERSTA, o Banco de Gorringe está individualizado.

As diferenças de magnitude máxima, para a zona do Banco de Gorringe, entre os modelos EC8 e ERSTA deve-se à localização epicentral do sismo de 28 de fevereiro de 1969, que difere no catálogo sísmico utilizado pelos dois modelos. No catálogo utilizado pelo modelo EC8, o sismo de 28 de fevereiro de 1969 tem o epicentro localizado no Banco de Gorringe e uma magnitude atribuída de 7,5, magnitude que foi considerada para magnitude máxima da zona 6. No projeto ERSTA, após revisão do catálogo sísmico pelo IPMA, a localização epicentral do sismo de 1969 foi atribuída à zona da falha da Ferradura, pelo que este sismo não condiciona a magnitude máxima nesta zona, para o modelo ERSTA.

3.3.3 Falha da Ferradura

A Falha da Ferradura localiza-se na zona 7 do modelo EC8, na zona J do modelo ERSTA e na zona 253 do modelo SHARE (que inclui, também, o Banco de Gorringe).

Os parâmetros de caracterização das zonas sismogénicas de cada estudo, referentes a esta estrutura encontram-se sintetizados no Quadro 3.6, fazendo-se a comparação dos valores nas Figura 3.11 e Figura 3.12.

Quadro 3.6 – Valores dos parâmetros de caracterização para a zona da Falha da Ferradura, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE

	EC8	ERSTA	SHARE
Parâmetros \ Zona	7	J	253
<i>a</i>	2,70	2,44	4,00
<i>b</i>	0,72	0,62	0,90
m_{max}	8,8	8,7	8,5 ¹ 8,8 ²

¹- $m_{max,min}$
²- $m_{max,max}$

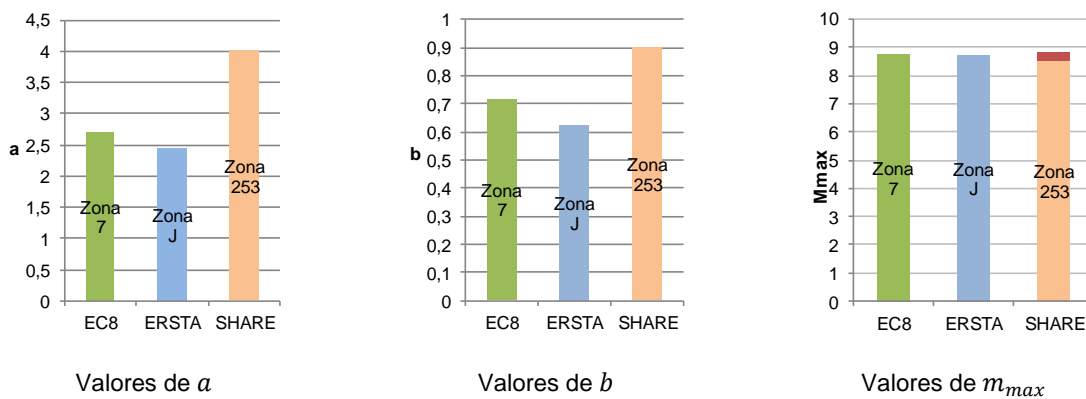


Figura 3.11 – Parâmetros para a zona da Falha da Ferradura, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE. No gráfico da magnitude máxima, para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo, $m_{max,min}$ e o valor máximo, $m_{max,max}$ da magnitude máxima

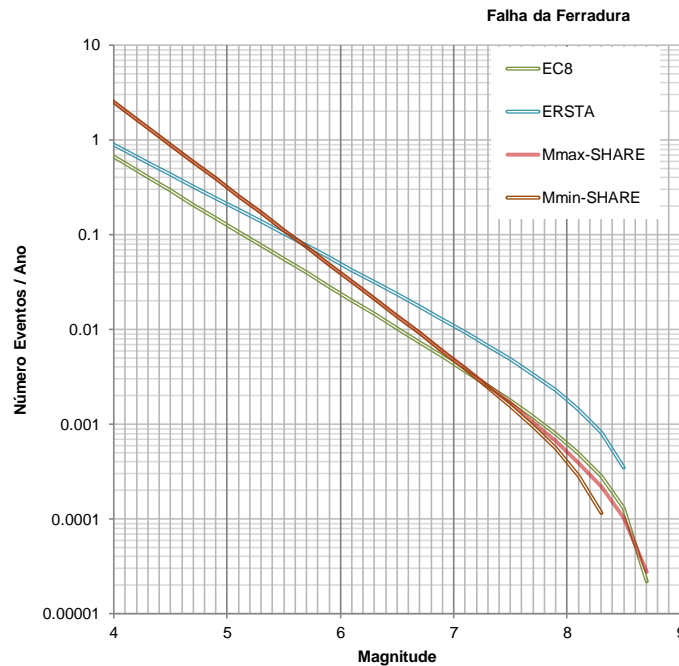


Figura 3.12 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, M_{min} , e máximo, M_{max} , da magnitude máxima), para a zona da Falha da Ferradura

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para os 4 períodos de retorno já mencionados (100, 475, 975 e 4975 anos) e o período de recorrência para as magnitudes 7,5, 8,0 e 8,5. Estes valores foram considerados como valores de magnitude que podem originar danos nas estruturas do continente sendo o valor 8,5 considerado por ser o valor máximo de magnitude atribuída a esta zona por um dos modelos. Para o valor da magnitude de cálculo para o modelo SHARE, foi considerado o valor médio das duas magnitudes máximas consideradas, calculando-se, também, os valores previstos considerando o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima. Os resultados são apresentados no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 7,5, 8,0 e 8,5 (direita) na zona da Falha da Ferradura

	Período de Retorno (anos)				Magnitude			
	100	475	975	4975	7,5	8,0	8,5	
EC8	6,5	7,4	7,8	8,4	EC8	567	1594	7655
ERSTA	7,1	7,9	8,2	8,6	ERSTA	207	550	2862
SHARE	6,7	7,4	7,7	8,3	SHARE	619	2142	16719
				8,2 - 8,3		603-643	1958-2456	9648-23865*

*Considerando $m_{max,min} = 8,6$

O modelo SHARE apresenta os menores valores de magnitude para esta zona, para os períodos de retorno maiores que 475 anos, verificando-se grandes intervalos de recorrência para as magnitudes elevadas. O modelo ERSTA prevê as magnitudes mais elevadas para os diversos períodos de retorno e, conseqüentemente, menores períodos de recorrência para as magnitudes.

De assinalar os cerca de 550 e 2900 anos previstos para sismos de magnitude 8,0 e 8,5, respetivamente, para o modelo ERSTA, contrastando com os cerca de 2100 e 17000 anos previstos pelo modelo SHARE. As diferenças são devidas aos valores de b , mais baixos no modelo ERSTA e mais elevados no modelo SHARE. Este modelo considera, assim, uma menor relevância dos sismos de magnitude elevada, a serem originados nesta zona. As taxas de atividade muito mais elevadas no modelo SHARE do que nos outros dois modelos é consequência da grande área considerada no modelo SHARE, que incluiu, para além da Falha da Ferradura, o Banco de Goringe, uma das áreas de maior libertação de energia na região em estudo, não sendo possível separar as contribuições destas duas estruturas tectónicas.

3.3.4 Golfo de Cádiz

A zona do Golfo de Cádiz localiza-se na zona 9 do modelo EC8 (que inclui o Banco de Portimão), na zona H do modelo ERSTA e na zona 254 do modelo SHARE.

Os parâmetros de caracterização das zonas sismogénicas de cada estudo, referentes a esta estrutura encontram-se sintetizados no Quadro 3.8, fazendo-se a comparação dos valores nas Figura 3.13 e Figura 3.14.

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para 4 períodos de retorno (100, 475, 975 e 4975 anos) e o período de recorrência para as magnitudes 6,0, 6,5 e 7,0. Uma vez que o modelo SHARE apresenta quatro valores de magnitudes máximas para esta zona, foi considerado como magnitude de cálculo o valor médio ponderado das magnitudes máximas, calculando-se, também, os valores previstos considerando o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima. Os resultados são apresentados no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 6,0, 6,5 e 7,0 (direita) na zona do Golfo de Cádiz

	Período de Retorno (anos)				Magnitude			
	100	475	975	4975	6,0	6,5	7,0	
EC8	6,0	6,7	6,8	7,0	EC8	92	302	3048
ERSTA	6,3	7,0	7,2	7,4	ERSTA	59	144	445
SHARE	5,5	6,2	6,4	6,8	SHARE	315	1248	14022
		6,1 - 6,2	6,3 - 6,5	6,7 - 7,1		294-343	973 - 1828	3603 – 14022*

*Considerando o valor mínimo $m_{max,min} = 7,1$

Para esta zona, à semelhança da zona da Falha da Ferradura, são verificadas grandes diferenças, especialmente para os períodos de retorno elevados. O modelo SHARE apresenta valores de magnitude consideravelmente inferiores aos previstos pelo modelo ERSTA, apresentando grandes intervalos de recorrência nas magnitudes elevadas.

De assinalar os cerca de 400 anos previstos para um sismo de magnitude 7, com base no modelo ERSTA, contrastando com os cerca de 14000 anos (ou cerca de 8000 anos, se considerarmos o meio do intervalo) previstos pelo modelo SHARE. Tal como na zona da Falha da Ferradura, tais diferenças devem-se aos valores de b , consideravelmente mais baixos no modelo ERSTA.

3.3.5 Banco de Portimão

O Banco de Portimão localiza-se na zona 9 do modelo EC8 (que inclui, também, o Golfo de Cádiz), na zona I do modelo ERSTA e na zona 247 do modelo SHARE.

Os parâmetros de caracterização das zonas sismogénicas de cada estudo, encontram-se sintetizados no Quadro 3.10, fazendo-se a comparação dos valores nas Figura 3.15 e Figura 3.16.

Quadro 3.10 – Valores dos parâmetros de caracterização para a zona do Banco de Portimão, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE

	EC8	ERSTA	SHARE
Parâmetros \ Zona	9	I	247
a	2,98	2,99	4,30
b	0,81	0,76	1,00
m_{max}	7,1	7,0	6,8 ¹ 7,7 ²

¹- $m_{max,min}$

²- $m_{max,max}$

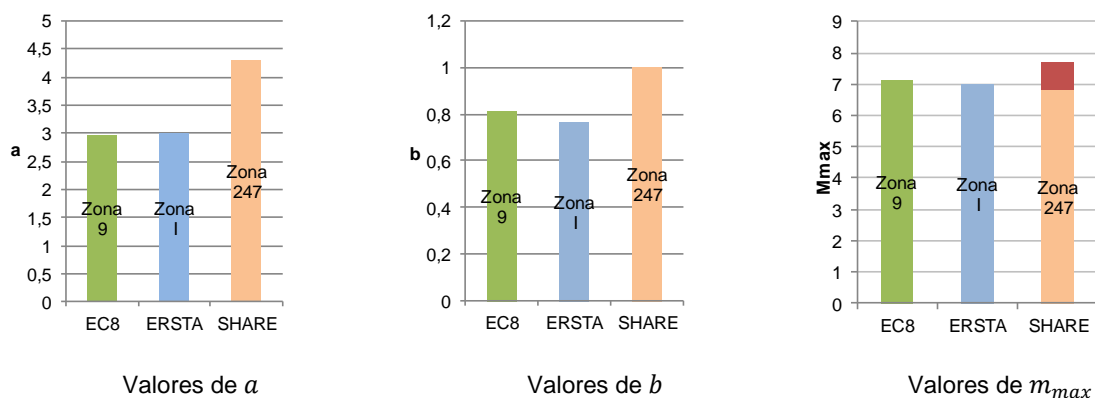


Figura 3.15 – Parâmetros para a zona do Banco de Portimão, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE. No gráfico da magnitude máxima, para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo, $m_{max,min}$ e o valor máximo, $m_{max,max}$ da magnitude máxima

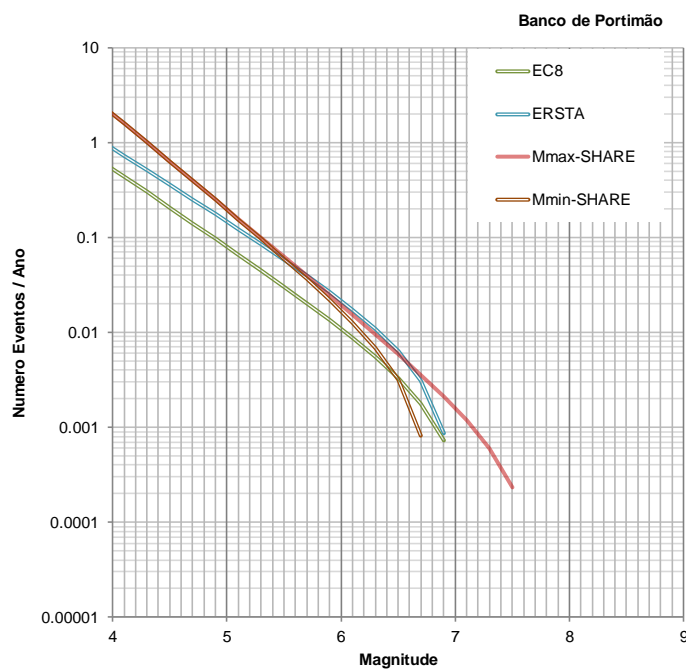


Figura 3.16 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, $Mmin$, e máximo, $Mmax$, da magnitude máxima), para a zona do Banco de Portimão

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para 4 períodos de retorno (100, 475, 975 e 4975 anos) e o período de recorrência para as magnitudes 6, 6,5 e 6,9. Para o modelo SHARE, que apresenta quatro valores de magnitudes máximas para esta zona, foi considerado como magnitude de cálculo o valor médio ponderado das magnitudes máximas, calculando-se, também, os valores previstos considerando o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima. Os resultados são apresentados no Quadro 3.11.

Quadro 3.11 – Magnitudes esperadas excedidas (\geq) para diferentes períodos de retorno (esquerda) e período de recorrência para as magnitudes de 6,0, 6,5 e 7,0 (direita) na zona do Banco de Portimão

	Período de Retorno (anos)				Magnitude			
	100	475	975	4975	6	6,5	7,0	
EC8	6,0	6,7	6,8	7,0	EC8	92	302	3048
ERSTA	6,3	6,8	6,9	7,0	ERSTA	47	159	1387
SHARE	6,2	6,7	6,9	7,0	SHARE	55	217	3367
		6,6 - 6,9	6,7 - 7,1	6,8 - 7,5			169-318	626-4600*

*Considerando valor mínimo $m_{max,min} = 7,0$

Refira-se que a zona 9, do modelo EC8, contém também o Golfo de Cádiz, não sendo possível separar as contribuições destas duas estruturas tectónicas. Não foram observados valores discrepantes entre os três modelos analisados, sendo que a maior diferença se verifica no período de recorrência de grandes sismos, consequência da maior magnitude máxima considerada no modelo SHARE.

3.3.6 Estruturas conjuntas

Um exercício interessante é perceber as implicações nas magnitudes esperadas para os diferentes períodos de retorno e nos períodos de recorrência de sismos de magnitude elevada quando se combinam as estruturas *offshore* relevantes.

Assim, para cada modelo, assumiu-se uma lei Gutenberg - Richter envolvente tendo em conta as leis para as várias zonas que contemplam as estruturas offshore aqui mencionadas: Banco de Goringe, Falha da Ferradura, Golfo de Cádiz e Banco de Portimão. A Figura 3.17 apresenta as leis de Gutenberg-Richter, para os 3 modelos, considerando todas as estruturas mencionadas.

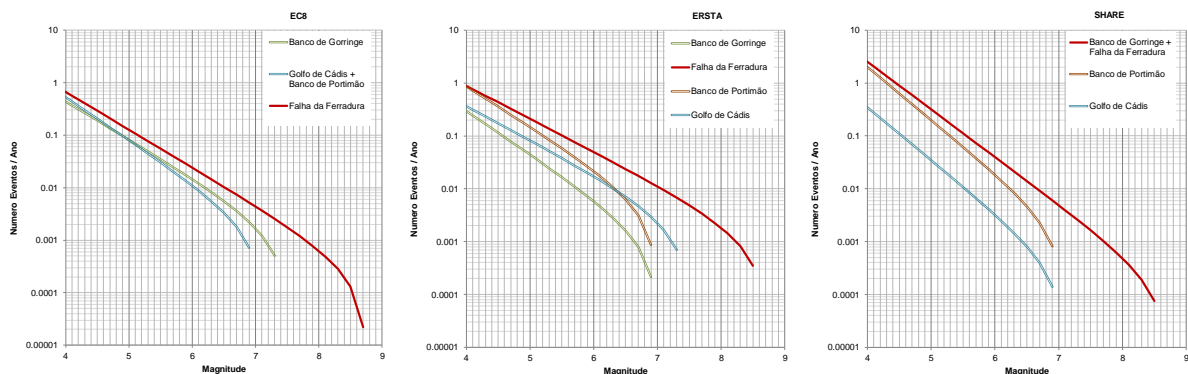


Figura 3.17 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando, para este, o valor da magnitude máxima como a magnitude de cálculo referida no texto), para as estruturas offshore estudadas

Constata-se que a lei obtida para a zona que inclui a Falha da Ferradura é condicionante, e que esta é a única zona que considera sismos de magnitude superior a 7,2. Assim, a representação da lei de Gutenberg-Richter truncada, para os três modelos, considerando a envolvente, é, na realidade, a obtida para a zona que inclui a Falha da Ferradura e já ilustrada na Figura 3.12. Para efeitos de análise,

reproduz-se aqui as leis de Gutenberg-Richter para a zona da Falha da Ferradura, diferindo da Figura 3.12 apenas porque para o modelo SHARE se considera, neste cenário conjunto, a magnitude máxima de cálculo (média ponderada das diversas magnitudes comiseradas).

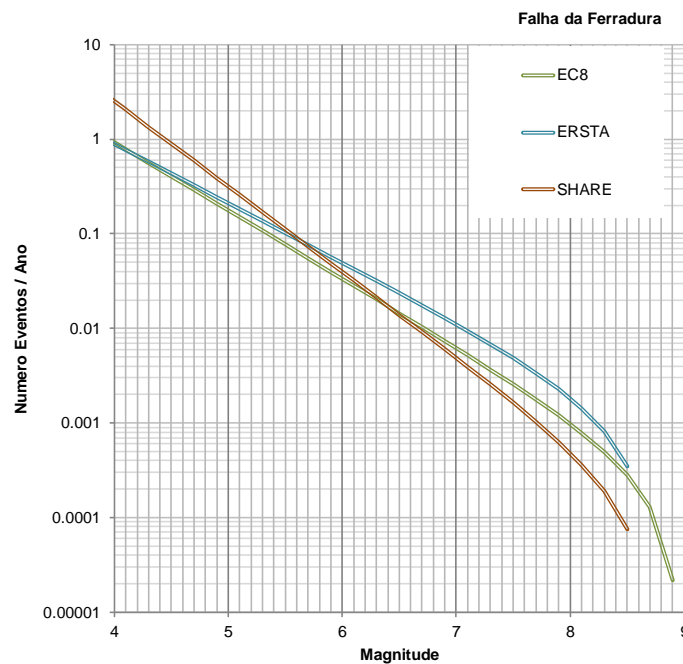


Figura 3.18 – Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor da magnitude máxima de cálculo), para a zona da Falha da Ferradura

Conclui-se que o modelo SHARE é o modelo que apresenta períodos de retorno mais elevados para sismos de magnitude superior a 7,0, sendo o modelo ERSTA o que apresenta períodos de retorno mais baixos para sismos fortes. Os resultados são os apresentados no Quadro 3.7, na análise do cenário da Falha da Ferradura.

3.4 Considerações

A análise dos parâmetros da lei de Gutenberg-Richter, essencial nos estudos de perigosidade sísmica, permitiu perceber algumas diferenças nos modelos analisados e as consequências, em termos de períodos de retorno para magnitudes relevantes, que, naturalmente, serão espelhadas nos diferentes mapas de perigosidade sísmica obtidos.

Uma constatação imediata é a consideração de valores mais altos de b e de a no modelo SHARE, face aos outros dois modelos, para todas as zonas consideradas neste estudo.

Para as zonas a Sudoeste de Portugal, particularmente para a zona da Falha da Ferradura onde foi considerada uma magnitude máxima superior a 8,0 pelos três modelos, de uma forma geral os valores de b bem mais elevados no modelo SHARE tiram relevância a estas zonas sismogénicas na sua capacidade de geração de sismos de elevada magnitude, para baixas probabilidades de excedência (elevados períodos de retorno). A escolha de valores de b tão uniformes e elevados, para estas zonas, no modelo SHARE, resultou da decisão, no âmbito do projeto, de estimar um valor *a priori* de b para

grandes áreas, as superzonas, classificadas de acordo com o regime tectónico (ex: zonas de crosta continental estáveis, onde estão incluídas todas as zonas consideradas, exceto as zonas 247, 254 e 252 – ver Figura 2.8), que seria revisto apenas, e de forma subjetiva, se o valor obtido, em cada zona, apresentasse um desvio superior a 0,4 unidades em relação ao valor obtido para todo o catálogo ($b = 0,9$) (Woessner *et al.*, 2015). Para as cinco estruturas estudadas neste trabalho, os valores de b foram de 0,9 para a zona do Vale Inferior do Tejo e zona que inclui o Banco de Goringe e Falha da Ferradura e de 1,0 para a zona que inclui o Golfo de Cádiz e Banco de Portimão, não parecendo, portanto, que os valores de b tenham sido fruto de *expert opinion* mas sim de respeito pela decisão de homogeneização.

Se para a zona da Falha do Vale Inferior do Tejo os modelos apresentam resultados aproximados, não se verificando grandes diferenças entre eles no que diz respeito ao período de recorrência das magnitudes e ao valor esperado da magnitude para cada período de retorno, é notória a diferença nas zonas a Sudoeste de Portugal para sismos de elevada magnitude. A título de exemplo, para um sismo de magnitude 8,5 estimaram-se períodos de recorrência de cerca de 2800 anos (ERSTA), 7600 anos (EC8) ou entre 9600 e 23800 anos (SHARE) para a zona da Falha da Ferradura.

Referindo estudos de outra natureza que não sísmica, nomeadamente estudos paleontológicos, na zona *offshore*, refira-se os trabalhos de Luque *et al.* (2001) que, pela análise de depósitos sedimentares gerados por tsunamis ocorridos na zona do Golfo de Cádiz (zona que inclui as estruturas tectónicas da falha do Marquês de Pombal e Falha da Ferradura), concluíram que um evento como o sismo de 1755, de magnitude superior a 8,5, ocorreu cerca de 216-218 AC, permitindo deduzir um período de cerca de 2000 anos entre estes dois eventos. Neste trabalho, os autores referem, também, os estudos de Lario *et al.* (2000) que dataram um outro depósito sedimentar gerado por tsunamis, na zona do Golfo de Cádiz, como tendo ocorrido no período 2550-2300 AC.

Gutscher *et al.* (2006) e Thiebot e Gutscher (2006) estudaram as grandes estruturas na região do Golfo de Cádiz e Gibraltar e propuseram um modelo de subducção ativa sob o Arco de Gibraltar como a fonte geradora do sismo de 1755. Segundo estes autores, as dimensões médias do plano de falha, 180 km (N-S) x 210 km (E-O), são suficientes para gerar um sismo de magnitude 8,6 – 8,8 a cada 1000 - 2000 anos, considerando uma taxa de convergência de 5-10 mm/ano e 10-20 m de deslizamento médio associado.

Gràcia *et al.* (2010) apresentam os resultados da caracterização de falhas ativas e deslizamentos associados na margem sul da Iberia (Mar de Alborão e Golfo de Cádiz) baseados em evidências paleosísmicas. Os resultados sugerem que as falhas do Golfo de Cádiz estão ativas e capazes de gerar sismos de elevada magnitude, estimando, pela análise de depósitos de turbiditos e de deslizamentos em toda a região do Golfo de Cádiz, um intervalo de recorrência de sismos de magnitude superior a 8,0 entre 1800 a 2000 anos.

Cunha *et al.* (2012) simularam numericamente a atividade neotectónica no Golfo de Cádiz beneficiando de dados recentes de batimetria multi-feixe e de outras técnicas avançadas que permitiram detalhar cavalgamentos e lineamentos que se estendem entre a Planície Abissal da Ferradura e o bordo oeste do Golfo de Cádiz. O modelo mais de acordo com as observações permitiu estimar uma taxa máxima

de movimentação de 1,5–2 mm/ano no norte do Golfo de Cádiz e de 0,5–1 mm/ano nos cavalgamentos com orientação E-O e NE-SO a SO de Portugal.

Matias *et al.* (2013), baseados nos resultados de Cunha *et al.* (2012), estimaram períodos de retorno entre 3600 e 7200 anos para um evento de magnitude 8,0, gerado por uma única falha. Afirmam, também, que um evento “tipo 1755”, de magnitude aproximadamente 8,7, pressupõe uma rotura de mais do que uma falha e, que para um deslizamento de cerca de 1 mm/ano, o período de retorno estimado é de cerca de 10000 anos. Ressalvam, no entanto, que se tiver em conta as estruturas existentes na região e a possibilidade de roturas múltiplas, os períodos de retorno reduzem-se para 700 e 3500 anos para sismos de magnitude 8,0 e 8,7, respetivamente. Os autores referem, também, que, devido à proximidade entre as estruturas existentes, é previsível interação entre as diferentes falhas pelo que sismos de magnitude elevada poderão ocorrer agrupados no tempo.

4 | Conclusões

Este estudo pretendeu fazer uma análise crítica e comparativa dos resultados obtidos por três propostas diferentes de zonas sismogénicas para Portugal continental (EC8, ERSTA e SHARE) e analisar as suas implicações para os períodos de retorno de sismos de maior magnitude.

As implicações das diferentes opções, para os períodos de retorno de várias magnitudes, foram analisadas para as regiões do Vale Inferior do Tejo, da margem Sudoeste Ibérica e do Golfo de Cádiz que englobam estruturas tectónicas relevantes (Falha do Vale Inferior do Tejo, o Banco de Gorringe, a Falha da Ferradura, o Banco de Portimão/Guadalquivir e a zona do Golfo de Cádiz). Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para 4 períodos de retorno (100, 475, 975 e 4975 anos, correspondendo a uma probabilidade de excedência de cerca de 40%, 10%, 5% e 1%, respetivamente, para um período de exposição de 50 anos) e estimados os períodos de recorrência para diversas magnitudes.

Uma constatação imediata na análise dos parâmetros da lei de Gutenberg-Richter é a consideração de valores mais altos de b e de a no modelo SHARE, face aos outros dois modelos, para todas as zonas consideradas neste estudo.

Em relação à região do Vale Inferior do Tejo não foram observados valores discrepantes, entre os três modelos analisados, sendo que a maior diferença se verifica nos grandes períodos de retorno (4975 anos), para os quais o modelo SHARE estima valores de magnitude mais elevados, consequência do maior valor de magnitude máxima ($m_{\max, \max} = 7,6$) considerada no modelo.

Para as zonas a Sudoeste de Portugal, particularmente para a zona da Falha da Ferradura onde foi considerada uma magnitude máxima superior a 8,0 pelos três modelos, de uma forma geral os valores de b bem mais elevados no modelo SHARE tiram relevância a estas zonas sismogénicas na sua capacidade de geração de sismos de elevada magnitude, para baixas probabilidades de excedência (elevados períodos de retorno).

Realça-se, com a análise efetuada, que o impacto das incertezas na delimitação das zonas sismogénicas e na obtenção dos parâmetros que as caracterizam (resultado de diferentes base de dados, de tratamentos diferenciados do catálogo, e de diferentes critérios de seleção) é elevado nos intervalos de recorrência para magnitudes de interesse e não pode ser ignorado.

É, pois, indiscutível, a importância da criação de um grupo de trabalho nacional, com o intuito de discutir todos os pontos essenciais para uma avaliação da perigosidade sísmica no nosso território (catálogo sísmico e seu tratamento, zonas sismogénicas e seus parâmetros, metodologias e leis de previsão dos movimentos do solo – objeto de estudo num outro relatório).

No campo do catálogo sísmico e delimitação das zonas sismogénicas, é essencial a discussão sobre qual ou quais magnitudes a considerar e sobre a localização das fontes sísmicas dos eventos de maior magnitude, como os de 1531, 1755, 1909, entre outros. A existência de um catálogo sísmico oficial,

disponível para a comunidade científica, é um dos primeiros requisitos para a não proliferação de mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental, que descredibilizam a comunidade científica e criam incertezas acrescidas aos agentes decisores.

Concluiu-se com um agradecimento à SPES pela iniciativa e ao Doutor Luís Matias pela revisão científica e pelas sugestões que muito melhoraram o trabalho. Refira-se, também, que parte do conteúdo deste relatório foi já apresentado em Carvalho e Malfeito (2016).

Lisboa, LNEC, janeiro de 2018

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Engenharia Sísmica e
Dinâmica de estruturas



Alfredo Campos Costa

O Diretor do Departamento de Estruturas



José Manuel Catarino

AUTORIA



Alexandra Carvalho
Investigadora Auxiliar



Nuno Malfeito
Engenheiro Civil

Referências bibliográficas

- ARAYA, R.; DER KIUREGHIAN, A., 1988 – **Seismic Hazard Analysis: Improved Models, Uncertainties and Sensitivities**. Report UCB/EERC 90/11, University of California, Berkeley.
- CAMPOS COSTA, A.; SOUSA, M.L.; CARVALHO, A., 2008 – **Seismic Zonation for Portuguese National Annex of Eurocode 8**. Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng. Beijing, China, 8–15.
- CARRILHO, F.; PENA, J. A.; NUNES, J. C., 2010 – **Sismicidade**. Capítulo 3, do livro “Estudo do Risco Sísmico e de tsunamis no Algarve”, Edição: Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC), 28-43.
- CARVALHO, A., 2007 – **Modelação Estocástica da Acção Sísmica em Portugal continental**. Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico
- CARVALHO, A.; CAMPOS COSTA, A., 2015 – **Impact of seismicity assumptions on seismic hazard for Portugal mainland**. LNEC - Proc. 0305/121/19265. Relatório 20/2015 – DE/NESDE.
- CARVALHO, A.; MALFEITO, N., 2016 – **Períodos de recorrência de sismos para Portugal continental: uma análise crítica**. rpee, série 3, n. 2, 51-62.
- CARVALHO, A.; SOUSA, M.L., 2001 – **Análise estatística do catálogo sísmico de Portugal Continental**. LNEC - Proc. 037/14/13733. Nota Técnica 2/2001 – DE/G3ES.
- COPEERSMITH, K. J.; SALOMONE, L. A.; FULLER, C. W. *et al.*, 2012 – **Seismic source characterization for nuclear facilities**. Technical report: central and eastern United States, chapter 5. Palo Alto, CA, USA.
- CUNHA, T. A.; MATIAS, L. M.; TERRINHA, P.; NEGREDO, A. M.; ROSAS, F.; FERNANDES, R. M. S.; PINHEIRO, L. M., 2012 – **Neotectonics of the SW Iberia margin, Gulf of Cadiz and Alboran Sea: a reassessment including recent structural, seismic and geodetic data**. Geophys. J. Int., doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05328.
- GRÀCIA, E.; DAÑOBEITIA, J.; VERGÉS, J.; PARSIFAL Team, 2003 – **Mapping active faults offshore Portugal (36°N–38°N): implications seismic hazard assessment along the southwest Iberian margin**. Geology 31 (1): 83-86.
- GUTSCHER, M.-A., 2004 – **What caused the Great Lisbon Earthquake?**. Science, 305, 1247-1248.
- GUTSCHER, M.-A.; BAPTISTA, M. A.; MIRANDA, J. M., 2006 – **The Gibraltar Arc seismogenic zone (part 2): Constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by tsunami modeling and seismic intensity**. Tectonophysics, 426, 153-166.
- GUTTENBERG, B.; RICHTER, C. F., 1944 – **Frequency of earthquakes in California**. Bull. Seismol. Soc. Am., 34(4), 185–188.

- HIERMER, S.; WOESSNER, J.; BASILI, R. *et al.*, 2014 – **A kernel-smoothed stochastic earthquake rate model considering seismicity and fault moment release for Europe**. *Geophys J Int*, 198.doi:10.1093/gji/ggu186.
- JEREMIAS, F. T.; CARVALHO, A.; COELHO, A. G.; CAMPOS COSTA, 2012 – **Estudos sismológicos para definição das ações sísmicas para o local de implantação do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua**. XIII Congresso Nacional de Geotecnia, 16 p.
- JOHNSTON, A. C., 1996 – **Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions-111. New Madrid 181 1-1812, Charleston 1886 and Lisbon 1755**. *Geophys. J. Int.* (1996) 126,314-344.
- JOHNSTON, A. C.; COPPERSMITH, K.J.; KANTER, L.R.; CORNELL, C.A., 1994 – **The earthquakes of stable continental regions, volume 1: assessment of large earthquake potential**. Report, Electric Power Research Institute, USA.
- LARIO, J.; ZAZO, C.; PLATER, A. J.; GOY, J. L.; DABRIO, C. J.; BORJA, F.; SIERRA, F. J.; LUQUE, L., 2000 – **Particle size and magnetic properties of Holocene estuarine deposits from the Doñana National Park (SW Iberia): evidence of gradual and abrupt Coastal sedimentation**. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 45,33 - 54.
- LIENERT, B.; BERG, E.; NEIL FRAZER, L., 1986 – **Hypocenter: an earthquake location method using centered, scaled and adaptively damped least squares**. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 76(3), 771-783.
- LUQUE, L.; LARIO, J.; ZAZO, J. L.; DABRIO, C. J.; SILVA, P. G., 2001 – **Tsunami deposits as paleoseismic indicators: examples from the Spanish coast**. *Acta Geologica Hispanica*, 36, 3-4, pp. 197-211.
- MARTINS, L.; MENDES VICTOR, L. A., 1990 – **Contribuição para o estudo da sismicidade de Portugal continental**. Univ. De Lisboa, Instituto Geofísico do Infante D. Luis, publicação 18, 1–70.
- MATIAS, L. M.; CUNHA, T.; ANNUNZIATO, A.; BAPTISTA, M. A.; CARRILHO, F., 2013 – **Tsunamigenic earthquakes in the Gulf of Cadiz: fault model and recurrence**. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1–13. doi:10.5194/nhess-13-1-2013.
- NP EN 1998-1, 2010 – **Eurocódigo 8 - Projeto de Estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios**. Instituto Português da Qualidade.
- OLIVEIRA, L., 2017 – **Risco sísmico no Algarve – Implicações devidas à avaliação da perigosidade sísmica**. Tese de mestrado, Universidade de Lisboa.
- RIBEIRO, A., 2005 – **O Sismo de 1755 e a Geodinâmica da Ibéria e Atlântico**. 1755 – O Grande Terramoto de Lisboa Volume 1 Descrições; Flad e Público.
- RODRIGUES, I.; SOUSA, M. L.; CARVALHO, A.; CARRILHO, F., 2009 – **Parâmetros das leis de frequência-magnitude para as novas zonas de sismogénese delineadas para a região do Algarve**. APMG 2009, 6º Simpósio de Meteorologia e Geofísica / 10º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia, Costa da Caparica, Portugal.

- ROVIDA, A.; D'AMICO, V.; MELETTI, C.; STUCCHI, M., 2011 – **Assessing the completeness of SHEEC, the SHARE European Earthquake Catalogue**. SHARE Report, task 3.1.
- SOUSA, M. L., 1996 – **Modelos probabilistas para avaliação da casualidade sísmica em Portugal Continental**. Tese de mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- SOUSA, M. L., 2006 – **Risco sísmico em Portugal continental**. Tese de Doutoramento da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- SOUSA, M. L.; MARTINS, A.; OLIVEIRA, C. S., 1992 – **Compilação de Catálogos Sísmicos da Região Ibérica**. LNEC - Proc. 036/12/9295. Relatório 36/92 – DE/NDA.
- SOUSA, M.L.; OLIVEIRA, C. S., 1997 – **Hazard assessment based on macroseismic data considering the influence of geological conditions**. Natural Hazards. 14, 207-225, Kluwer Academic Publishers.
- SSHAC, 1997 – **Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis. Guidance on uncertainty and use of experts**. Lawrence Livermore Nat. Lab.; Report NUREG/CR-6372 – Report UCRL-ID-122160; Vol. I; Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC); Livermore.
- STUCCHI, M.; ROVIDA, A.; GOMEZ CAPERA, A. A., *et al.*, 2013 – **The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000–1899**. J Seismol, 17, 523–544. doi:10.1007/s10950-012-9335-2.
- THIEBOT, E.; GUTSCHER, M-A., 2006 – **The Gibraltar Arc seismogenic zone (part 1): Constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by seismic data, gravity and thermal modeling**. Tectonophysics, 426, 135–152.
- VILANOVA, S. P.; NEMSER, E. S.; BESANA-OSTMAN, G. M., *et al.*, 2014 – **Incorporating descriptive metadata into seismic source zone models for seismic-hazard assessment: a case study of the Azores-West Iberian region**. Bull Seismol Soc Am, 104, 1212–1229. doi:10.1785/0120130210.
- WEICHERT, D., 1980 – **Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes**. Bull. Seism. Soc. Am., 70, 1337-1346.
- WESNOUSKY, S. G.; SCHOLZ, C. H.; SHIMAZAKI, K.; MATSUDA, T., 1983 – **Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting**. Journal of Geophysical Research, 88, 9331-9340.
- WIEMER, S.; GIARDINI, D.; FAH, D., *et al.*, 2009 – **Probabilistic seismic hazard assessment of Switzerland: best estimates and uncertainties**. J Seismol, 13, 449–478. doi:10.1007/s10950-008-9138-7.
- WOESSNER, J.; LAURENTIU, D.; GIARDINI, D.; CROWLEY, H.; COTTON, F.; GRUNTHAL, G.; *et al.*, 2015 – **The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results**. Bull. Earthq. Eng., 13, 3553-3596.

ZITELLINI, N.; ROVERE, M.; TERRINHA, P.; CHIERICI, F.; MATIAS, L.; BIGSETS Team, 2004 –
Neogene Through Quaternary Tectonic Reactivation of SW Iberian Passive Margin.
Pure and Apl. Geophys., 161, 567-587.