

Períodos de recorrência de sismos para Portugal continental: uma análise crítica

Recurrence interval for great earthquakes in mainland Portugal: a critical overview

Alexandra Carvalho
Nuno Malfeito

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. O presente trabalho visa clarificar algumas questões, fazendo uma análise comparativa da lei frequência - magnitude estimada para as diferentes zonas sismogénicas e analisando as suas implicações nos períodos de recorrência dos sismos de maior magnitude.

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 this work the earthquake activity rates, b-values and magnitude distribution for the mentioned source zones proposals are analysed, with particular emphasis on its implications for the recurrence period of large seismic events.

Palavras-chave: Zonas sismogénicas / Perigosidade sísmica / Portugal continental / Períodos de retorno

Keywords: Seismic source zones / Seismic hazard / Mainland Portugal / Recurrence intervals

Alexandra Carvalho

Investigadora Auxiliar
LNEC
Lisboa, Portugal
xana.carvalho@lnec.pt

Nuno Malfeito

Engenheiro Civil
Lisboa, Portugal
nunomalfeito@hotmail.com

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

CARVALHO, A [et al.] – Períodos de recorrência de sismos para Portugal continental: uma análise crítica. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 2. ISSN 2183-8488. (novembro 2016) 51-62.

1 Introdução

Nos estudos probabilísticos para avaliação da perigosidade sísmica para Portugal, que aplicam a metodologia introduzida por Cornell [1] e 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 crosta 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 (distribuição de magnitudes). Esta relação pode ser expressa pela lei de Gutenberg-Richter [2], que estabelece uma dependência linear entre o logaritmo da frequência de ocorrências de sismos e as suas magnitudes:

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

em que $N(m)$ é a taxa média anual de eventos com magnitude superior ou igual a m que ocorre na região analisada, a é a atividade sísmica da zona, sendo 10^a 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 como (lei de Gutenberg-Richter truncada) [3]:

$$N(m) = \exp(\alpha - \beta m_0) \frac{\exp[-\beta(m - m_0)] - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]}, m_0 \leq m \leq m_{\max} \quad (2)$$

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

Naturalmente, os valores que caracterizam cada zona sismogénica considerada estão fortemente condicionados aos dados sísmicos existentes, ou seja, ao catálogo sísmico e aos dados de paleossismicidade que possam existir e complementar o catálogo.

A análise do catálogo sísmico constitui, assim, uma primeira e fundamental etapa para a estimativa das taxas de ocorrência das zonas de geração, sendo essencial estimar o período de plenitude (exaustividade), isto é, o intervalo de tempo para o qual o catálogo se encontra completo, para as diferentes magnitudes. Esta necessidade advém da heterogeneidade do catálogo sísmico, não só por este espelhar a história da rede sísmica (quantidade, localização,

qualidade das estações sísmicas), mas também porque os registos históricos estão incompletos, condicionados à magnitude do evento, importância das localidades afetadas e densidade populacional da época.

A delimitação das áreas-fontes reveste-se, também, de subjetividade podendo-se dar maior relevância a critérios sísmicos (distribuição epicentral 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).

Em 2006, e decorrente da preparação do Anexo Nacional do Eurocódigo 8 [4], foram consideradas e caracterizadas 11 zonas sísmogénicas para Portugal continental, adaptadas de estudos previamente elaborados em 1996.

No ano de 2008, no âmbito do projeto ERSTA – Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve (2008-2011) 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 sísmogénicas, para as quais se procedeu à estimativa dos parâmetros da lei de frequência-magnitude.

Paralelamente, e no contexto do projeto europeu SHARE – Seismic Hazard Harmonization in Europe (2009-2013), foram propostas zonas sísmogénicas para o território português e definidas as taxas de atividade e distribuição de magnitudes respetivas.

A consideração de diferentes catálogos sísmicos e o seu tratamento diferenciado por parte dos diversos grupos de trabalho, assim como os critérios para a delimitação das zonas sísmogénicas, originaram diferentes estimativas da relação de frequência-magnitude. Como se mostrará nas secções seguintes, estas traduzem-se em diferenças nos intervalos de recorrência para magnitudes de interesse e, consequentemente, em diferentes níveis 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 dos resultados obtidos nos diferentes estudos e das suas implicações, ao nível dos períodos de retorno, para sismos de maior magnitude. É o início de um trabalho que continuará ao longo dos próximos meses, e que constitui um ponto de partida para a criação de um grupo de trabalho nacional, cujo intuito é o de discutir os diversos aspetos relevantes nos estudos de perigosidade sísmica (catálogo sísmico e seu tratamento, zonas sísmogénicas e seus parâmetros, metodologias probabilísticas e leis de previsão dos movimentos do solo) e, quem sabe, chegar a um consenso para o mapa da perigosidade sísmica para Portugal continental.

2 Zonas sísmogénicas e seus parâmetros

Como referido, existem três propostas de delimitação de zonas sísmogénicas e respetivas características, que se considerou serem de maior relevância para Portugal continental: 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”. As secções seguintes apresentam os mapas das zonas e respetivos parâmetros, 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 desses resultados.

2.1 Modelo EC8

Para a preparação dos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8, mais concretamente no que se refere à apresentação de um mapa de zonamento sísmico, a perigosidade sísmica foi avaliada considerando o modelo de zonas de geração de Sousa [5]. Os parâmetros que as caracterizam foram obtidos depois do estudo da exaustividade, do catálogo, considerando os sismos com magnitude igual ou superior a 3,5 [6]. O modelo proposto considera 11 zonas sísmogénicas (Figura 1), apresentando-se os respetivos parâmetros na Tabela I.

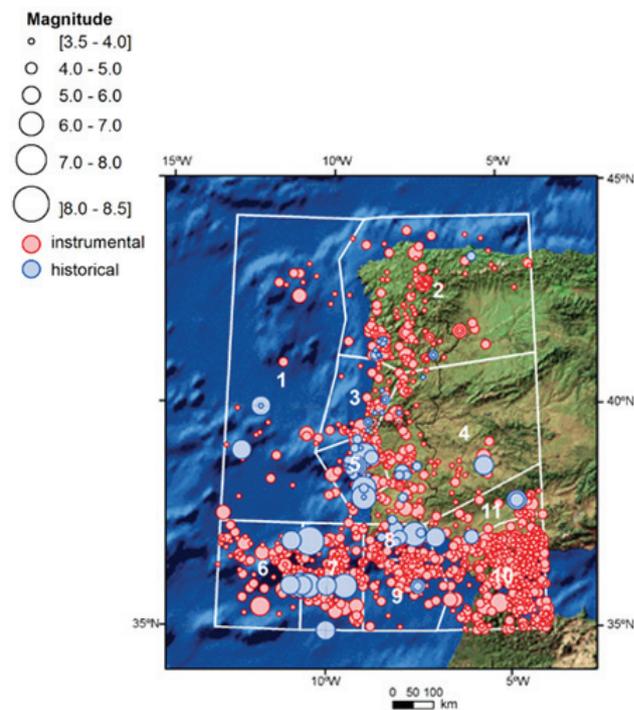


Figura 1 Mapa Epicentral, e zonas sísmogénicas consideradas no Modelo EC8 [5]

Tabela I Parâmetros definidores das zonas sísmicas consideradas no modelo EC8 (adaptado de [5])

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	8,8
8	2,55	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

* Definido para $m = 0$

2.2 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 (15 zonas) que potencialmente afetam a região do Algarve [7]. Visando considerar a perigosidade sísmica para a totalidade do território continental, e no âmbito de outros estudos locais [8], foram definidas mais 4 zonas sismogénicas, modeladas por áreas de grandes dimensões devido à dificuldade em relacionar os epicentros com as falhas cartografadas na carta neotectónica. Foi realizado um estudo de exaustividade [9] do novo catálogo sísmico, revisto pelo IPMA, e determinados os parâmetros que caracterizam estas zonas [8,9,10] e que são apresentados na Tabela II.

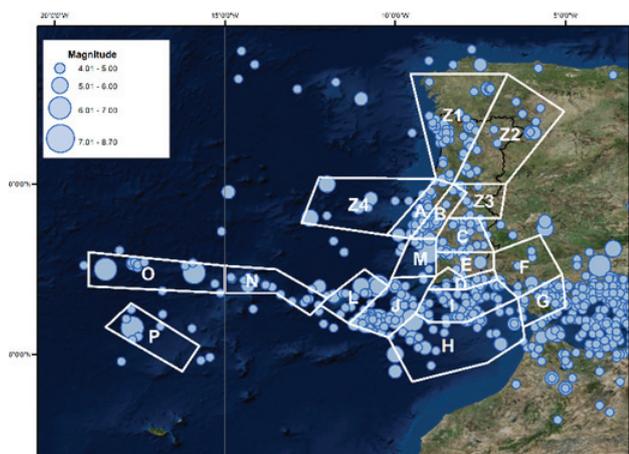


Figura 2 Zonas sismogénicas consideradas no projeto ERSTA (A a P) [7] e complementadas por outros estudos locais (Z1 a Z4) [8].

Tabela II Parâmetros definidores das zonas sísmicas consideradas no modelo ERSTA [10]

Zona	a	b	M_{max}
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	1,07	5,7
Z3	3,12	1,09	5,0
Z4	1,68	0,62	7,0

2.3 Modelo SHARE

O projeto FP7 SHARE 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 a e b da lei de Gutenberg-Richter, assim como as magnitudes máximas, M_{max} , das zonas. Neste projeto, foram atribuídos até um máximo de quatro valores para a magnitude máxima a considerar, fazendo-se um incremento de 0,2 unidades a um valor base [11]. Para zonas consideradas de baixa sismicidade em zonas continentais estáveis o valor base foi de 6,5 e, para as restantes zonas, 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 e tendo em conta a respetiva incerteza. Os restantes valores foram obtidos com incrementos de 0,2.

No presente trabalho apenas se consideraram as zonas definidas para Portugal continental, apresentadas na Figura 3, e cujos parâmetros se apresentam na Tabela III. Apresentam-se, também, os valores mínimos e máximos considerados para a magnitude máxima, $M_{max,min}$ e $M_{max,max}$, respetivamente, bem com o valor médio considerado, $M_{max,med}$.

Tabela III Parâmetros definidores das zonas sísmicas consideradas no modelo SHARE [11]

Zona	a	b	$M_{max,min}$	$M_{max,max}$	$M_{max,med}$
0	2,33	1	6,5	7,4	7,0
242	3,3	1	6,5	7,4	7,0
243	2,1	0,8	7,0	7,6	7,3
244	3,3	0,9	7,0	7,6	7,3
245	3,0	1	6,5	7,4	7,0
246	3,4	1	7,0	7,6	7,3
247	4,3	1	6,8	7,7	7,3
248	4,3	1	8,5	8,8	8,7
249	3,1	1	7,0	7,6	7,3
250	3,6	1	6,5	7,4	7,0
251	3,4	0,9	7,0	7,6	7,3
252	3,3	0,8	8,5	8,8	8,7
253	4,0	0,9	8,5	8,8	8,7
254	3,5	1	6,8	7,7	7,3
255	3,3	1	7,0	7,6	7,3
262	3,5	1	7,0	7,6	7,3

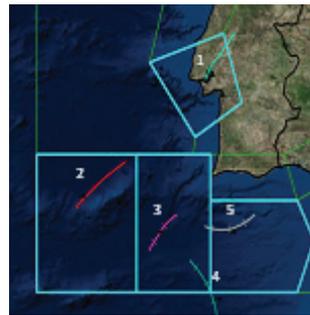


Figura 3 Zonas sísmogénicas para Portugal continental, propostas no âmbito do projeto SHARE [11]

3 Implicações nos estudos de perigosidade sísmica

Os três modelos foram analisados para a zona do Vale Inferior do Tejo, margem SW Ibérica e zona do Golfo de Cádiz, sendo apresentadas na Figura 4 as estruturas tectónicas consideradas relevantes e respetivas zonas, para cada um dos modelos. A saber, a zona do Vale Inferior do Tejo, o Banco de Gorringe, a Falha da Ferradura, o Banco de Portimão e a zona do Golfo de Cádiz.

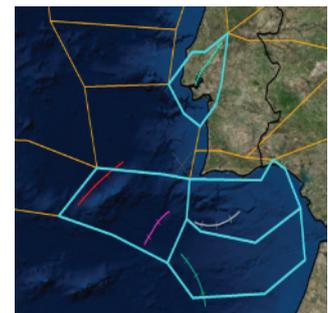
Far-se-á a comparação dos valores da lei de Gutenberg-Richter (G-R), utilizando os parâmetros propostos nos vários modelos, e determinar-se-ão os períodos de retorno para várias magnitudes consideradas de interesse do ponto de vista da engenharia.



Modelo EC8



Modelo ERSTA



Modelo SHARE

Figura 4 Zonas sísmogénicas dos vários modelos analisados, e indicação das estruturas sísmogénicas consideradas mais relevantes. 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 [12]

Refira-se que, uma vez que o modelo SHARE apresenta diversas magnitudes máximas, na realização do presente trabalho foi adotado o valor médio das magnitudes máximas, apresentando-se também a gama de valores previstos considerando o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima, $M_{max,min}$ e $M_{max,max}$, apresentados na Tabela III.

3.1 Zona do Vale Inferior do Tejo

A região do Vale Inferior do Tejo localiza-se na zona 5 do modelo EC8, na zona B do modelo ERSTA e na zona 251 do modelo SHARE. A Figura 5 apresenta a lei G-R para os 3 modelos analisados e as comparações dos respetivos parâmetros.

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para 4 períodos de retorno (100, 475, 1000 e 5000 anos) e estimados os períodos de recorrência para as magnitudes 5,5, 6 e 7. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela IV.

Não foram observados valores discrepantes, entre os três modelos analisados, sendo que a maior diferença se verifica nos grandes

períodos de retorno ($> = 5000$ anos), para os quais o modelo SHARE estima valores de magnitude mais elevados, consequência do maior valor da 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.

Tabela IV Esquerda: Magnitudes esperadas para diferentes Períodos de Retorno; Direita: período de recorrência para as magnitudes $M > = 5,5, 6$ e 7 na zona do Vale Inferior do Tejo

Períodos de retorno (anos)	100	475	1000	5000	Magnitude	$\geq 5,5$	≥ 6	≥ 7
EC8	6,1	6,8	7,0	7,1	EC8	33	83	1304
ERSTA	6,2	6,8	6,9	7,1	ERSTA	23	62	2003
SHARE	6,0	6,6	6,9	7,2	SHARE	36	107	1716
		6,5 - 6,7	6,7 - 7,0	6,9 - 7,4				1116-4244*

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

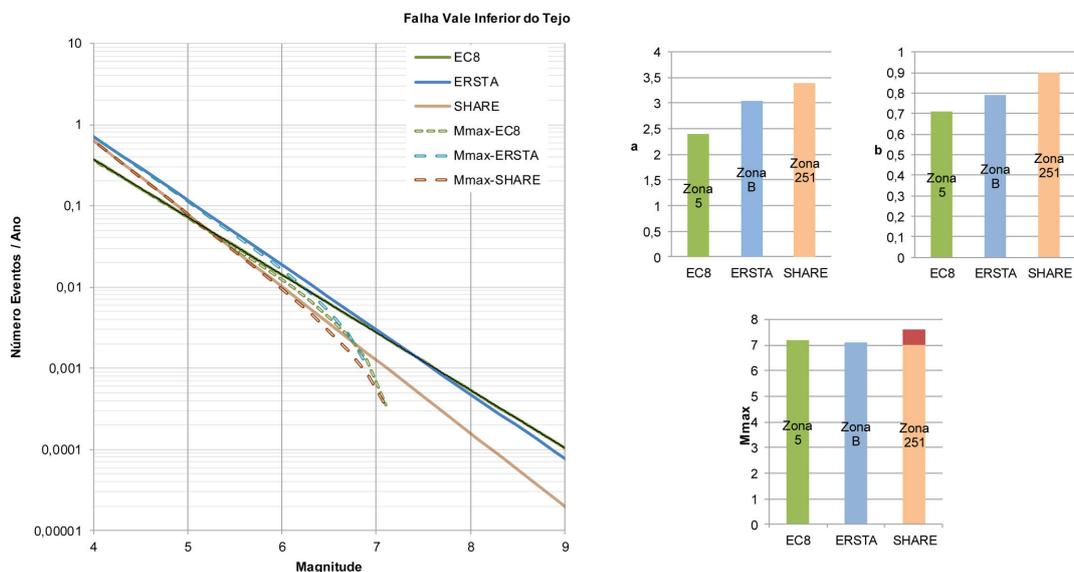


Figura 5 Esquerda: lei de G-R (traço simples) e lei de G-R truncada (a tracejado), para os três modelos analisados; Direita: valores de a , b e M_{\max} para as zonas onde se insere a zona do Vale Inferior do Tejo. No gráfico da magnitude máxima, M_{\max} , para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima

3.2 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). A Figura 6 apresenta a lei G-R para os 3 modelos analisados e as comparações dos respetivos parâmetros.

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para 4 períodos de retorno (100, 475, 1000 e 5000 anos) e estimados os períodos de recorrência para as magnitudes 7, 8 e 8,4. Os resultados são apresentados na Tabela V.

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 550 e os cerca de 1700 anos previstos para sismos de magnitude 8 e 8,4, respetivamente, para o modelo ERSTA, contrastando com os cerca de 2100 e 9000 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 último 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 inclui, para além da falha da Ferradura, o Banco de Gorringe, uma das áreas de maior libertação de energia na região em estudo, não sendo possível separar as contribuições destas duas estruturas tectónicas.

Tabela V Esquerda: Magnitudes esperadas para diferentes Períodos de Retorno; Direita: período de recorrência para $M \geq 7, 8$ e $8,4$ na Falha da Ferradura

Períodos de retorno (anos)	100	475	1000	5000	Magnitude	≥ 7	≥ 8	$\geq 8,4$
EC8	6,5	7,4	7,8	8,4	EC8	229	1594	4999
ERSTA	7,1	7,9	8,2	8,6	ERSTA	91	550	1768
SHARE	6,7	7,4	6,9	8,3	SHARE	206	2142	8990
				8,2 - 8,3			1958 - 2456	6443-19398

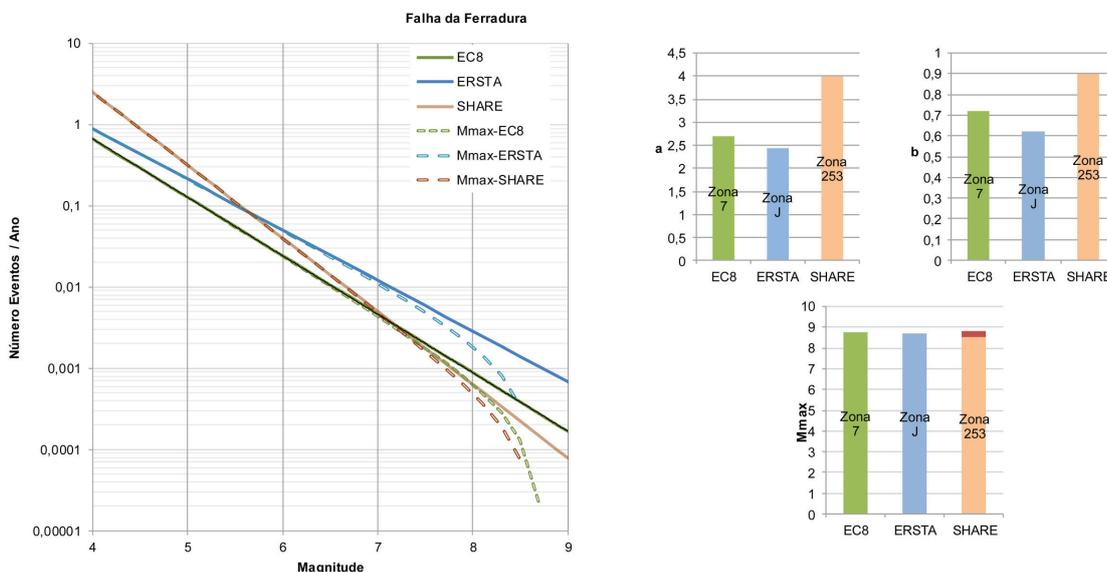


Figura 6 Esquerda: lei de G-R (traço simples) e lei de G-R truncada (a tracejado), para os três modelos analisados; Direita: valores de a , b e M_{max} para as zonas onde se insere a Falha da Ferradura. No gráfico da magnitude máxima, M_{max} , para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima

3.3 Zona do Golfo de Cádiz

A zona do Golfo de Cádiz localiza-se na zona 9 do modelo EC8, na zona H do modelo ERSTA e na zona 254 do modelo SHARE. A Figura 7 apresenta a lei G-R para os 3 modelos analisados e as comparações dos respetivos parâmetros.

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para 4 períodos de retorno (100, 475, 1000 e 5000 anos) e estimados os períodos de recorrência para as magnitudes 6, 6,5 e 7. Os resultados são apresentados na Tabela VI.

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 6500 anos 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.

Tabela VI Esquerda: Magnitudes esperadas para diferentes Períodos de Retorno; Direita: período de recorrência para $M \geq 6, 6,5$ e 7 para o Golfo de Cádiz

Períodos de retorno (anos)	100	475	1000	5000	Magnitude	≥ 6	$\geq 6,5$	≥ 7
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	6,9	SHARE	343	1109	6590
		6,2 - 6,3	6,3 - 6,5	6,7 - 7,1			973 - 1828	3603 - 14022*

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

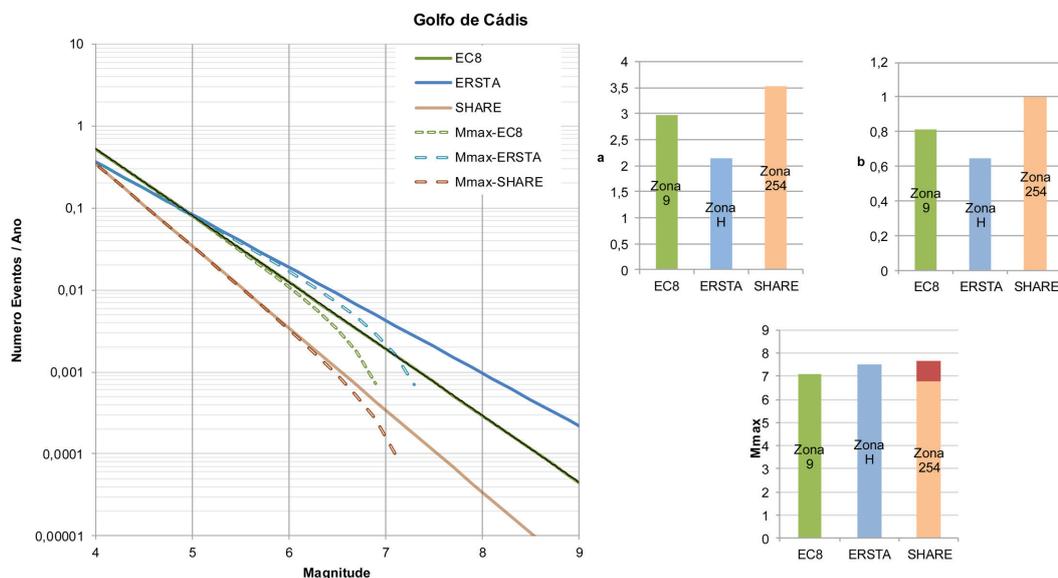


Figura 7 Esquerda: lei de G-R (traço simples) e lei de G-R truncada (a tracejado), para os três modelos analisados; Direita: valores de a , b e M_{\max} para as zonas onde se insere o Golfo de Cádiz. No gráfico da magnitude máxima, M_{\max} , para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima

3.4 Zona do Banco de Portimão

O Banco de Portimão localiza-se na zona 9 do modelo EC8, na zona I do modelo ERSTA e na zona 247 do modelo SHARE. A Figura 8 apresenta a lei G-R para os 3 modelos analisados e as comparações dos respetivos parâmetros.

Para cada modelo foi determinada a magnitude esperada para 4 períodos de retorno (100, 475, 1000 e 5000 anos) e estimados os períodos de recorrência para as magnitudes 6, 6,5 e 6,9. Os resultados são apresentados na Tabela VII.

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 nos grandes períodos de retorno, consequência da maior magnitude máxima considerada no modelo SHARE.

Tabela VII Esquerda: Magnitudes esperadas para diferentes Períodos de Retorno; Direita: período de recorrência para $M \geq 6, 6,5$ e $6,9$ no Banco de Portimão

Períodos de retorno (anos)	100	475	1000	5000	Magnitude	≥ 6	$\geq 6,5$	$\geq 6,9$
EC8	6,0	6,7	6,8	7,0	EC8	92	302	1382
ERSTA	6,3	6,8	6,9	7,0	ERSTA	47	159	1164
SHARE	6,3	6,8	6,9	7,2	SHARE	53	193	719
		6,6 - 6,9	6,7 - 7,1	6,8 - 7,4			169 - 318	473 - 1936*

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

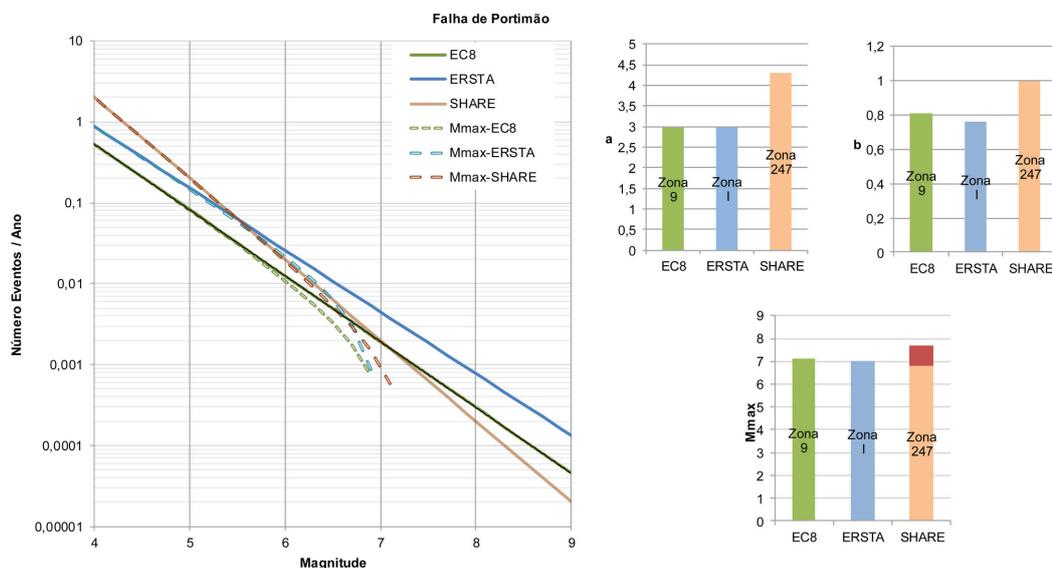


Figura 8 Esquerda: lei de G-R (traço simples) e lei de G-R truncada (a tracejado), para os três modelos analisados; Direita: valores de a , b e M_{\max} para as zonas onde se insere o Banco de Portimão. No gráfico da magnitude máxima, M_{\max} para o modelo SHARE apresenta-se a gama de valores entre o valor mínimo e o valor máximo da magnitude máxima

4 Considerações finais

A análise dos parâmetros da lei de Gutenberg-Richter, essenciais nos estudos de perigosidade sísmica, permitiu perceber algumas diferenças nos modelos analisados e as consequências, em termos de períodos de retorno para magnitudes relevantes.

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, havendo maior consenso no valor médio considerado para a magnitude máxima, que não diverge mais do que 0,2 unidades entre os três modelos.

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 8,4 estimaram-se períodos de recorrência de cerca de 2000 anos (ERSTA), 5000 anos (EC8) ou entre 6500 e 19000 anos (SHARE) para a zona da Falha da Ferradura.

Para as zonas a Sudoeste de Portugal, particularmente para a zona da Falha da Ferradura onde foi considerada uma magnitude máxima superior a 8, 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, resultou de decisões no âmbito do projeto [11], de estimar um valor *a priori* de b para grandes áreas, chamadas de 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 3), 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 ($b = 0,9$). Além disso, para zonas com poucos dados, b foi restringido a valores entre 0,8 -1,2 [11].

É pertinente analisar estudos paleontológicos, associados a estas zonas *offshore*, que permitem complementar estudos de natureza sísmica. Assim, refiram-se os trabalhos de [13] 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 $> 8,5$, ocorreu cerca de 216-218 a.C., permitindo deduzir um período de cerca de 2000 anos entre estes dois eventos. Em [14] pela análise de depósitos de turbiditos e de deslizamentos, na região do Golfo de Cádiz, estimou-se um intervalo de recorrência entre 1800 a 2000 anos para sismos de magnitude superior a 8.

É patente que os estudos locais originaram resultados muito diferentes dos obtidos num estudo geograficamente mais amplo e com perspetivas de harmonização, pelo que parece importante considerar os resultados obtidos à escala local/regional de modo a diminuir a incerteza epistémica nos estudos mais globais.

Salienta-se, também, a revisão do catálogo sísmico, por parte do IPMA, entre 2007 e 2009, que originou um catálogo bastante diferente do catálogo existente até à data e que foi o considerado para os estudos dos parâmetros do modelo EC8. Esta revisão traduziu-se em diferenças nos valores de b entre estes dois modelos. Torna-se, assim, pertinente a revisão do mapa de perigosidade sísmica que serviu de apoio ao zonamento sísmico constante no Anexo Nacional do EC8.

As diferenças significativas nos parâmetros da lei de Gutenberg-Richter serão, naturalmente, espelhadas nos diferentes mapas de perigosidade sísmica obtidos considerando os modelos aqui analisados. Esse é o estudo que se encontra neste momento em finalização e o relatório de todo o trabalho efetuado será disponibilizado, até ao fim do ano corrente, no sítio da SPES (www.spes-sismica.pt).

Referências

- [1] Cornell, C. (1968) – Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 58, n. 5, pp. 1583–1606.
- [2] Gutenberg, B.; Richter, C. F. (1944) – Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 34, n. 4, pp. 185–188.
- [3] Araya, R.; Kiureghian, A. der (1988) – Seismic Hazard Analysis: Improved Models, Uncertainties and Sensitivities. Report UCB/EERC 90/11, University of California, Berkeley.
- [4] NP EN 1998-1 (2010) – Eurocódigo 8 - Projecto de Estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios, Inst. Port. da Qual., vol. 1.
- [5] Sousa, M. L. (1996) – *Modelos probabilistas para avaliação da casualidade sísmica em Portugal Continental*. Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- [6] 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, pp. 8–15, 2008.
- [7] 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), pp. 28-43.
- [8] Jeremias, F. T.; Carvalho, A.; Coelho, A. G.; Campos Costa, A. (2012) – Estudos sísmológicos para definição das acções sísmicas para o local de implantação do aproveitamento hidroeléctrico de Foz Tua. *XIII Congresso Nacional de Geotecnia*, 16 p.

- [9] 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*, 6.º *Simpósio de Meteorologia e Geofísica / 10º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia*, Costa da Caparica, Portugal.
- [10] Carvalho, A.; Campos Costa, A. (2015) – Impact of seismicity assumptions on seismic hazard for Portugal mainland. Relatório LNEC 20/2015.
- [11] Woessner, J.; Laurentiu, D.; Giardini, D.; Crowley, H.; Cotton, F.; Grünthal, G.; Valensise, G.; Arvidsson, R.; Basili, R.; Demircioglu, M. B.; Hiemer, S.; Meletti, C.; Musson, R. W.; Rovida, A. N.; Sesetyan, K.; Stucchi, M. (2013) – The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. *Bull. Earthq. Eng.* Vol. 13. pp. 3553-3596.
- [12] Basili, R. *et al.* (2013) – The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE, <http://dis.rm.ingv.it/share-edsf/>.
- [13] Luque, L.; Lario, J.; Zazo, C.; Goy, J. L.; Dabrio, C. J.; Silva, P. G. (2001) – Tsunami deposits as paleoseismic indicators: examples from the Spanish coast. *Acta Geol.*, vol. 36, pp. 197–211.
- [14] Vizcaino, A. *et al.* (2010) – Holocene earthquake record offshore Portugal (SW Iberia): testing turbidite paleoseismology in a slow-convergence margin. *Quat. Sci. Rev.*, vol. 29, pp. 1156–1172.

