

# Geração de catálogos sintéticos de sismos para a avaliação probabilista do perigo de tsunamis

## Generation of synthetic earthquake catalogues for probabilistic tsunami hazard assessment studies

L. M. Matias  
M. A. Baptista  
R. Omira  
J. M. Miranda

### Resumo

A avaliação probabilista do perigo de tsunamis requer a geração de um catálogo de sismos que obedeça às características sismo-tectónicas da área de geração e um modelo de falha para cada evento. A distribuição da magnitude dos eventos segue uma distribuição de Gutenberg-Richter truncada e os epicentros distribuem-se de forma aleatória no domínio de geração. Considerar um deslizamento uniforme no plano de falha, eventualmente sujeito a uma condição de fecho simples, tem como consequência que o deslizamento sobre o domínio vai extravasar a zona fonte ou que a distribuição de deformação no domínio é heterogénea, contrariando as considerações sismotectónicas na base do seu estabelecimento. Apresentamos uma metodologia para a criação de catálogos sintéticos e sua aplicação à falha da Glória no Atlântico, à qual são associados três tsunamis instrumentais 08.05.1939, 25.11.1941 e 26.05.1975 [1]. Propomos também uma lei de escala e um modelo de falha para grandes sismos tsunamigénicos.

### Abstract

Probabilistic Tsunami Hazard Assessment requires the existence of a synthetic earthquake catalogue obeying the geodynamic framework of the source area and a fault model for each event. Usually, we assume a constant fault displacement, eventually filtered by a simple closure condition. The distribution of events by magnitude classes follows a truncated Gutenberg-Richter law with epicentres uniformly distributed in the source domain. This approach makes that the slip on the source structures will extend beyond the generation domain being heterogeneous inside that domain. This contradicts the assumption that the slip is caused by geodynamic constraints. Here, we propose a methodology for creating synthetic earthquake catalogues and we apply it to the Gloria Fault in the Atlantic. With three instrumental tsunamis recorded: 08.05.1939, 25.11.1941 and 26.05.1975 [1]. Additionally, we propose a semi-empirical scaling law for the generation of the tsunamigenic earthquakes.

Palavras-chave: Perigosidade de tsunami / Catálogos sísmicos / PTHA

Keywords: Tsunami Hazard / Earthquake Catalogues / PTHA

## L. M. Matias

Professor Associado  
Instituto D. Luiz  
Lisboa, Portugal  
lmmatias@fc.ul.pt

## M. A. Baptista

Professora Coordenadora  
ISEL  
Lisboa, Portugal  
mavbaptista@gmail.com

## R. Omira

Investigador  
IPMA  
Lisboa, Portugal  
omirarachid10@yahoo.fr

## J. M. Miranda

Professor Catedrático  
IPMA  
Lisboa, Portugal  
miguel.miranda@ipma.pt

### Aviso legal

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

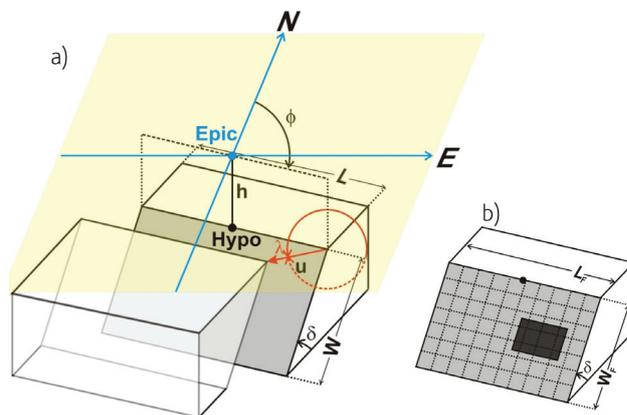
### Legal notice

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

MATIAS, L. M. [et al.] – Geração de catálogos sintéticos de sismos para a avaliação probabilista do perigo de tsunamis. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 2. ISSN 2183-8488. (novembro 2016) 7-12.

## 1 Introdução

Na avaliação probabilista do perigo de tsunamis (PTHA – *Probabilistic Tsunami Hazard Assessment*) começa-se por considerar uma lista de sismos (um catálogo sintético). Para cada um dos eventos nesse catálogo calcula-se a geração do tsunami, a sua propagação e impacto junto à costa. A avaliação do perigo pode ser feita considerando vários parâmetros característicos da inundaçã, a amplitude máxima da onda na linha de costa (ou num ponto de referência), a profundidade máxima de inundaçã, o *run-up*, a velocidade de corrente máxima, etc. O modelo mais corrente, por ser o mais simples, que é usado na geração do tsunami por uma falha é o da falha retangular, como se mostra na Figura 1a.



**Figura 1** a) Modelo de falha retangular para a geração de tsunamis em PTHA. b) Modelo simplificado de um PBS, segmento de fronteira de placas

Neste exemplo definimos o hipocentro do evento no centro do bordo superior da falha de forma que o epicentro estará no meio do traço da falha como seria representado numa carta geológica. O sismo seria assim localizado pelas coordenadas do epicentro e pela profundidade  $h$ . Uma vez que a geração do tsunami assume que a deformação inicial do oceano reproduz a deformação do fundo do mar causada pelo deslocamento sobre a falha, o parâmetro  $h$  relevante é o da profundidade do foco sob o fundo do mar. O sismo deve ainda ser caracterizado pela sua magnitude de momento,  $M_w$ . Para além destes parâmetros, habituais num catálogo sísmico, para gerar um tsunami é ainda necessário propor para cada evento os parâmetros seguintes que caracterizam completamente a geometria da falha e o movimento sofrido:

- Largura  $W$
- Comprimento  $L$
- Inclinação  $\delta$
- Azimute  $\phi$
- Deslizamento médio  $u$
- Ângulo de deslizamento (*rake*)  $\lambda$

Estes parâmetros não são todos independentes, uma vez que eles estão relacionados com a magnitude de momento através do módulo de rigidez ( $\mu$ ):

$$M_0 = \mu L W u \quad M_w = \frac{2}{3} (\log M_0 - 9,5) \quad (SI) \quad (1)$$

Os modelos mais simples de geração de tsunamis em PTHA, e também no cálculo determinista de cenários, consideram que o deslizamento sobre a falha é uniforme. Neste trabalho iremos mostrar que este modelo simples de geração aplicado a um segmento de fronteira de placas, sujeito a constrangimentos geodinâmicos, gera resultados para o deslizamento acumulado inaceitáveis. Face a este resultado, iremos propor um modelo de geração alternativo que se destina a mitigar os defeitos identificados. Dada a sua simplicidade, exemplificamos a aplicação do modelo com a fronteira de placas definida pela Falha da Glória.

## 2 Geração uniforme de tsunamis ao longo de um segmento de fronteira de placas

### 2.1 PBS: Segmento de fronteira de placas

Vamos considerar que a fronteira de placas onde pretendemos gerar tsunamis e fazer um estudo de PTHA tem a forma de um retângulo, como se mostra na Figura 1a. Uma fronteira de placas complexa pode ser considerada formada por uma associação de segmentos mais simples ou PBS (*Plate Boundary Segment*). A geração de tsunamis ocorre pelo movimento em falhas no PBS, como se ilustra na Figura 1b. É importante aqui salientar que cada PBS está inserido num contexto geodinâmico que impõe à escala geológica uma cinemática para o movimento acumulado, ou para o deslizamento médio sofrido. Vejamos agora o que acontece quando são gerados de forma aleatória sismos neste PBS. Sem perda de generalidade vamos considerar os efeitos ao longo do traço do PBS, tomando este como uma linha sem largura. Os mesmos efeitos irão também ocorrer com a distribuição do deslizamento com a profundidade.

### 2.2 Geração de tsunamis segundo a largura do PBS

Começamos por considerar que toda a sismicidade tem a mesma magnitude de momento  $M$  e que os seus epicentros se distribuem ao longo do PBS que tem um comprimento total  $L_f$ . Sejam ainda

- $L(M)$  Comprimento da falha que rompe com magnitude  $M$
- $u(M)$  Deslizamento médio na falha de magnitude  $M$
- $N(M)$  Número de sismos por ano com magnitude  $M$
- $\dot{u}_f$  Deslizamento médio no PBS constrangido pelo contexto geodinâmico

Se o modelo de geração de tsunamis no PBS for consistente com a geodinâmica, então deveríamos obter no final a identidade

$$\dot{u}_f = \dot{N} \frac{L}{L_f} \quad (2)$$

Vejamos então o que ocorre. Na Figura 2 mostramos a rotura de um PBS por sismos de pequena magnitude e por sismos de grande magnitude. Uma vez que admitimos que toda a rotura sísmica está

contida no PBS, a localização epicentral tem de estar limitada ao intervalo  $\left] \frac{L}{2}, L_f - \frac{L}{2} \right[$

Se admitirmos que neste intervalo a distribuição dos epicentros é aleatória (distribuição uniforme) então obtemos um deslizamento acumulado (ou médio) não uniforme, representado na Figura 3.

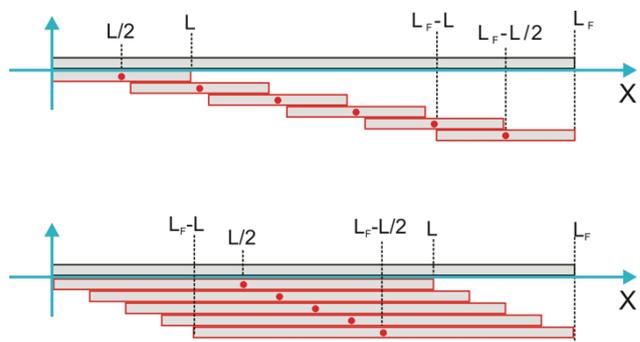


Figura 2 Rotura de um PBS linear por sismos de pequena e grande magnitude

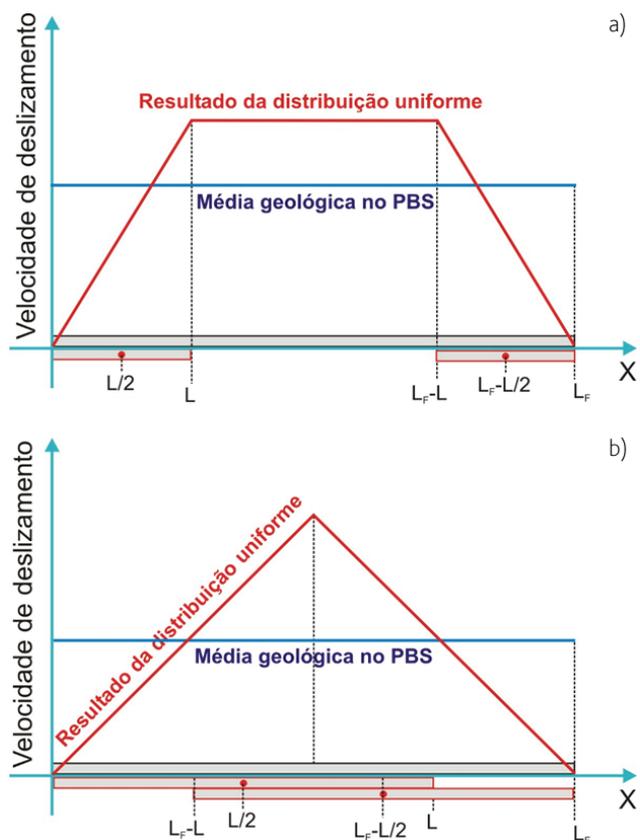
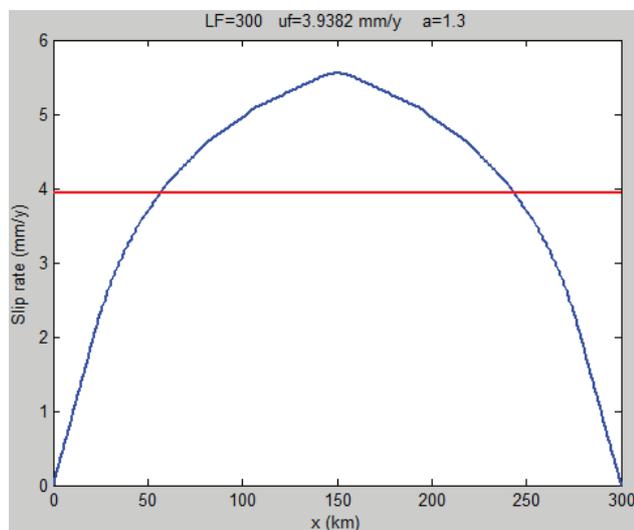


Figura 3 Distribuição do deslizamento médio que resulta de uma distribuição uniforme de epicentros no PBS: a) para sismos de pequena magnitude; b) para sismos de grande magnitude

Podemos assim constatar que o modelo de geração aleatório, usado habitualmente nos estudos probabilistas de perigosidade de sismos (PSHA – *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*) falham no caso da avaliação da perigosidade de tsunamis, pois dão resultados inconsistentes com o forçamento geodinâmico. Para grandes sismos o centro do PBS tem um deslizamento médio que é o dobro do esperado pelos constrangimentos geológicos. Este efeito é um pouco atenuado para o caso dos pequenos sismos, mas subsiste o problema de nos bordos do PBS não haver qualquer deslizamento capaz de gerar um tsunami.

Este efeito que detetamos para o caso de sismos com uma única magnitude subsiste mesmo no caso de uma distribuição de sismos que siga uma lei truncada de Gutenberg-Richter, como se ilustra na Figura 4. Neste caso temos uma velocidade de deslizamento no meio do PBS que é 1,5x superior ao valor geológico. Essa velocidade reduz-se a zero nos bordos do PBS.



**Figura 4** Distribuição do deslizamento médio que resulta de uma distribuição uniforme de epicentros no PBS, com as magnitudes distribuídas segundo uma lei truncada de Gutenberg-Richter

### 3 Geração dependente de sismos

Tal com antes (Figura 1b), consideramos que o PBS está dividido em células, cuja dimensão é inferior à rotura sísmica do menor sismo a ser considerado. Partimos de um catálogo de sismos cuja distribuição segue a lei truncada de Gutenberg-Richter. Os parâmetros da lei são ajustados de tal forma que, juntamente com a lei de escala, se deve ter em média um ajuste entre a velocidade de deformação sísmica e a velocidade geológica. Em seguida, para mitigar os efeitos indesejáveis causados por uma geração aleatória de sismos numa fronteira de placas, ilustrados na secção anterior, propomos a seguinte metodologia:

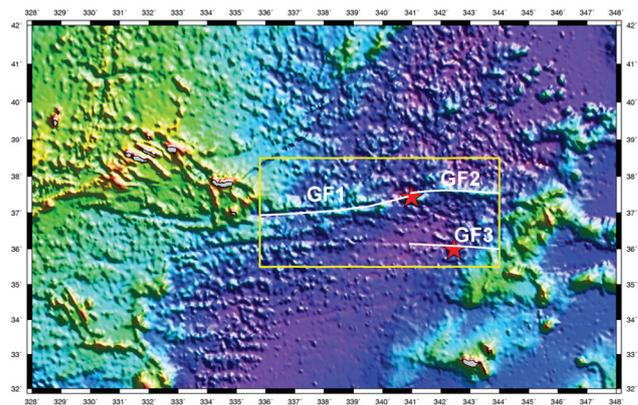
- Inicializar o PBS com uma distribuição aleatória de deslizamentos, filtrada, com média nula;

- Para cada evento do catálogo é calculada a posição no PBS com menor deslizamento acumulado. Essa é a posição da nova rotura.

Desta forma a distribuição de epicentros não será aleatória, mas seguirá uma distribuição dependente da história das roturas anteriores.

### 4 Aplicação à falha da Glória

A falha da Glória, entre as longitudes de 16°W e 24°W, é uma estrutura linear que representa a fronteira de placas entre a Eurásia e a África (Núbia). No século XX ocorreram nesta estrutura e suas vizinhanças dois grandes sismos que geraram tsunamis observados nas zonas costeiras, 25/11/1941 ( $M_w \sim 8,4$ ) e 26/05/1975 ( $M_w \sim 7,9$ ). Este segundo sismo localiza-se fora do traço morfológico da falha da Glória. Por isso teremos de considerar para este troço da fronteira de placas Açores-Gibraltar um conjunto de 3 segmentos. O 1.º segmento (GF1), associado ao sismo de 1941, acumula toda a deformação do movimento relativo das placas. Os restantes 2 (GF2 e GF3) partilham metade dessa deformação, permitindo o 3.º segmento justificar o sismo de 1975. A localização dos epicentros destes dois sismos assim como a definição dos segmentos estão ilustradas na Figura 5.



**Figura 5** Definição da área de trabalho (retângulo amarelo). Localização dos epicentros dos 2 principais sismos tsunamigénicos ocorridos na Falha da Glória e definição dos segmentos de fronteira de placas usados na simulação

A Falha da Glória é uma estrutura tectónica bastante atípica no Globo pois se trata de uma falha com um movimento do tipo transformante que no entanto não separa dois segmentos de dorsal, como ocorre mais frequentemente. Além disso trata-se de uma estrutura que se mantém ativa praticamente desde a origem do Atlântico Norte, com mais de 100 MA. No segmento que pretendemos investigar trata-se de uma falha que separa dois oceanos com idades bastante diferentes mas muito antigos, ~40 MA a norte e ~60 MA a sul. Não podemos por isso usar leis de escala retiradas de compilações globais pois não existem análogos adequados.

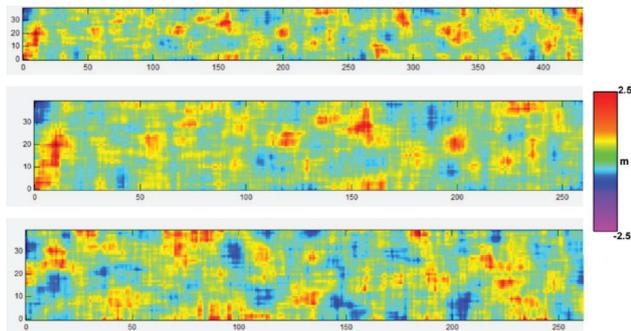
Começamos por considerar que a espessura sismogénica da litosfera é de 40 km, o que é adequado à idade da litosfera na região [2]. Pela mesma razão usamos para o módulo de rigidez um valor de  $5,0 \times 10^{10}$  Pa mais apropriado para uma litosfera com uma componente importante de manto. Em seguida usamos os dados dos grandes sismos nesta região para propor uma lei de escala semiempírica baseada no modelo de [3]:

$$D_{\max} \rightarrow \begin{cases} L \leq 2W_{\text{sat}} & D_{\max} = \alpha \frac{L}{2} \\ L > 2W_{\text{sat}} & D_{\max} = \alpha \frac{1}{\frac{1}{L} + \frac{1}{2W_{\text{sat}}}} \end{cases} \quad (3)$$

Nesta lei  $D_{\max}$  é o deslizamento máximo sobre a falha (usualmente considerado como sendo duas vezes o deslizamento médio),  $L$  é o comprimento da falha e  $W_{\text{sat}}$  é a espessura sismogénica. Acrescentando um fator de forma para relacionar o comprimento e a largura da falha podemos obter para cada magnitude as dimensões da falha e o deslizamento médio.

Dispondo desta lei de escala podemos obter os parâmetros da lei truncada de Gutenberg-Richter de tal forma que em média eles correspondam a uma deformação geológica de 4 mm/ano para GF1 e de 2 mm/ano para GF2 e GF3. Nos 3 PBS a magnitude mínima é de 6,0, sendo a magnitude máxima de 8,5 para GF1 e de 8,1 para GF2 e GF3.

Seguindo a metodologia proposta, começamos por inicializar o deslizamento sobre cada um dos PBS de forma aleatória, mas suavizada. Os padrões iniciais de deslizamento (com média nula) estão ilustrados na Figura 6.

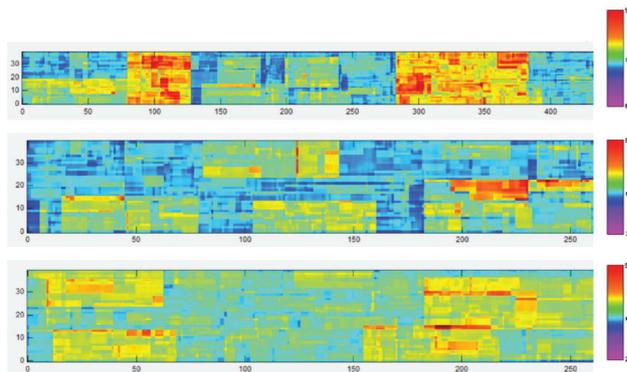


**Figura 6** Distribuição inicial do deslizamento sobre os 3 segmentos, GF1, GF2 e GF3. Escala horizontal e vertical em km

A distribuição de deslizamento acumulado ao fim de 20 mil anos de um catálogo sísmico encontra-se na Figura 7.

Para o segmento GF1, onde seria expectável um total acumulado de 80 m, obtemos uma distribuição irregular entre 67 e 97 (extremos absolutos). Para o segmento GF2 onde seria expectável um total acumulado de 40 m, obtemos uma distribuição irregular entre 31 e 53 (extremos absolutos). Para o segmento GF3 onde seria expectável um total acumulado de 40 m, obtemos uma distribuição irregular entre 24 e 56 (extremos absolutos).

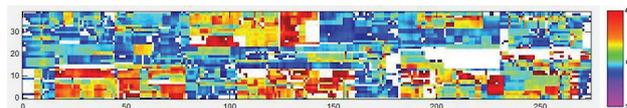
Podemos então concluir que esta metodologia permite de facto atenuar os efeitos de uma distribuição de hipocentros aleatória e independente, apontados na secção 3.



**Figura 7** Distribuição acumulada do deslizamento sobre os 3 segmentos, GF1, GF2 e GF3, após 20 mil anos de catálogo sísmico. A escala de cores maximiza as diferenças. Ver comentários no texto. Escala horizontal e vertical em km

## 5 Discussão

Para grandes sismos regionais a amplitude com que o tsunami atinge a costa é diretamente influenciada pelo deslizamento verificado na falha, num domínio específico definido pela diretividade da propagação. Esta constatação aplica-se a eventos simples para avaliação determinista e também a estudos probabilistas de perigosidade (PTHA). É por isso importante que nesses estudos os modelos de geração de tsunamis sejam os mais consentâneos possíveis com os constrangimentos geodinâmicos do segmento de fronteira de placas em jogo (PBS). Neste trabalho mostrámos como é que uma distribuição uniforme de eventos de um catálogo ao longo de uma PBS dá origem a uma grande distorção na distribuição da velocidade de deformação, aumentando o perigo numas zonas em detrimento de outras. Para mitigar esse problema propusemos uma metodologia para a geração de tsunamis a partir de um catálogo sintético, em que a localização de cada evento está dependente da distribuição acumulada de deformação nos eventos anteriores. Esta metodologia foi testada numa zona de fronteira de placas geometricamente simples, como a Falha da Glória. Como resultado obtemos uma distribuição acumulada de deslizamento que em média não se afasta do seu valor nominal geodinâmico. As regiões onde essa deformação excede ou é inferior ao valor nominal de 10% consistem menos de 10% do domínio total e a sua distribuição é irregular, como se mostra na Figura 8.



**Figura 8** Distribuição acumulada do deslizamento no segmento GF2. A branco assinalam-se as zonas que excedem  $\pm 10\%$  o valor nominal. Escala horizontal e vertical em km

## Agradecimentos

Esta comunicação foi apoiada pelo projeto FCT UID/GEO/50019/2013 – Instituto Dom Luiz. Ela constitui uma contribuição para o projeto ASTARTE – Assessment Strategy and Risk Reduction for Tsunamis in Europe Grant 603839 – FP7.

## Referências

- [1] Baptista, M.A.; Miranda, J.M. (2009) – "Revision of the Portuguese catalog of tsunamis", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 25-42.
- [2] McKenzie, D.; Jackson, J.; Priestley, K. (2005) – "Thermal structure of oceanic and continental lithosphere", *Earth Plan. Sci. Lett.* 233, 337-349.
- [3] Manighetti, I.; Campillo, M.; Bouleya, S.; Cottona, F. (2007) – "Earthquake scaling, fault segmentation, and structural maturity", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 253, 429-438.