



ESTUDO DO MECANISMO DE ROTURA DOS SISMOS DE 1939 (M7) E 2007 (M6) NA FAIXA S. MIGUEL - GLÓRIA (AÇORES): UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A COMPREENSÃO DA SISMOTECTÓNICA LOCAL

B. CALDEIRA
Prof. Auxiliar
ICT, ECT, U. Évora
Évora-Portugal

E. BUFORN
Prof. Catedrática
U. Complutense
Madrid-Espanha

J. F. BORGES
Prof. Auxiliar
ICT, ECT, U. Évora
Évora-Portugal

M. BEZZEGHOUD
Prof. Associado
ICT, ECT, U. Évora
Évora-Portugal

A. UDIAS
Prof. Catedrático
U. Complutense
Madrid-Espanha

SUMÁRIO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo de 3 dos mais significativos sismos instrumentais ocorridos na faixa S. Miguel-Glória, Açores: o de 8 de Maio de 1939 e os de 5 e 7 de Abril de 2007. A investigação envolveu a concepção e desenvolvimento de um método que permite recuperar os movimentos reais do solo em formato digital a partir de sismogramas antigos. Os resultados obtidos para o sismo de 1939 relocalizam o evento numa posição mais próxima da fronteira de placas e com mecanismo também mais próximo da generalidade dos eventos estudados. O estudo da fonte dos sismos de 2007 reforçam o mecanismo padrão da zona.

ABSTRACT

The scope of the present work is the study of the seismic source of three significant instrumental earthquakes that occurred in the strip S. Miguel-Gloria region, Azores: the May 8, 1939 and the 5 and 7 April 2007. The study involved the development of a method to recover the real values of the ground motion in digital format, from old seismograms. The results for the 1939 earthquake relocate the event to a site near the plate boundary with a mechanism similar as the most ones in the area. The seismic source results from the 2007 earthquakes reinforce the standard mechanism considered.

PALAVRAS-CHAVE: Fonte sísmica; Sismogramas antigos; Inversão da forma de onda; Sismos dos Açores;

1. INTRODUÇÃO

A faixa dos Açores entre 26°W e 24°W que corresponde à zona entre São Miguel e a Glória, que inclui a ilha de Santa Maria e as ilhotas das Formigas, define a área de interface entre dois Sectores com características sismotectónicas distintas, identificados em [1] pelas designações Ocidental e Central. O Sector Ocidental, que contém a Plataforma dos Açores, apresenta uma dinâmica dominada pela atividade da Crista Média Atlântica. Predominam sismos com mecanismo de desligamento esquerdo compatíveis com um regime tectónico horizontal com eixos de pressão orientados na direção E-W. O Sector Central corresponde à vasta região dominada pela falha da Glória onde, nos poucos sismos estudados, destacam-se mecanismos de desligamento com movimento direito, compatível com eixos de tensão horizontais orientados na direção NE-SW.

Como se pode constatar nos trabalhos publicados sobre a sismicidade e sismotectónica dos Açores, [2],[3],[4],[5],[6], a faixa São Miguel-Glória apresenta uma atividade sísmica apreciável, mas com padrão de mecanismo distinto do das zonas adjacentes. Esta diferenciação indicia um sistema tectónico com complexidade distinta, ainda difusamente estabelecido, que produz predominantemente sismos de falha normal com eixos de tensão orientados NE-SW.

Neste trabalho apresentamos um estudo pormenorizado sobre o mecanismo de rotura dos eventos que consideramos serem os três mais significativos sismos instrumentais ocorridos daquela região. O sismo de Santa Maria de 8 de Maio de 1939 (Mw7), por ser o maior, e os sismos de 5 e 7 de Abril de 2007 (Mw6), por serem os mais bem instrumentados.

O estudo da fonte do sismo de 1939 foi feito por aplicação de uma metodologia adaptada ao tipo de dados disponíveis, que são: a) fases retiradas do catálogo do International Seismological Centre (ISC), a que foram adicionadas as fases das estações espanholas; b) as polaridades utilizadas no trabalho [2]; c) um conjunto de 17 cópias fotográficas de sismogramas registados por estações de longo período a distâncias telessísmicas. Com esses dados foi feita a relocalização do hipocentro; o reprocessamento do mecanismo usando as polaridade da primeira chegada e a preparação dos registos antigos para a modelação da rotura por inversão da forma de onda. A reconstituição da métrica dos movimentos do solo a partir de sismogramas antigos envolveu o desenvolvimento de um método baseado na integração da função temporal da fonte obtida por desconvolução das funções de Green. Este trabalho começa pela descrição do método.

Os modelos de rotura dos eventos de 2007 foram obtidos por inversão de ondas de volume a distâncias telessísmicas, método [7], aplicado segundo a metodologia estabelecida em trabalhos como [8].

2. ADEQUAÇÃO DE SISMOGRAMAS ANTIGOS

Quando se pretende estudar sismos a partir das formas de onda registadas por instrumentos antigos, esbarramos frequentemente na circunstância de encontrarmos dados analógicos de qualidade e em quantidade suficiente para as análises pretendidas, contudo impossíveis de usar por falta de informações precisas sobre aspectos menores. A situação com que nos deparamos relativamente ao sismo de 1939 foi precisamente essa. Foi possível obter 17 formas de onda registadas a distâncias telessísmicas com uma razoável cobertura azimutal a partir das quais contamos calcular o modelo de fonte por inversão destes dados por métodos atuais (ver Tabela 1, Fig. 1). Contudo, embora conhecida a resposta de cada instrumento antigo, a falta de informação sobre a escala da amplitude dos registos nos sismogramas, nuns casos, ou uma informação insegura sobre a constante de amplificação dos instrumentos, noutros, impossibilita a reconstituição dos movimentos absolutos do solo, em deslocamento ou em velocidade. Convém notar que a proposta de solução desenvolvida tem aplicação em situações onde são conhecidas as marcas de tempo nos sismogramas e é conhecida a resposta do instrumento ainda que sem

certezas sobre a constante de amplificação. Nestas circunstâncias os sismogramas podem ser digitalizados usando uma escala de amplitude arbitrária e as digitalizações que resultam podem ser representadas com uma taxa de amostragem uniforme, como se de dados digitais se tratasse. Para essa função utilizou-se o software livre GraphClick para a digitalização; a interpolação para taxas de amostragem constante, filtragem e exportação para formato SAC foi executada com programa escrito o efeito.

Tabela 1 Identificação das componentes de longo período que registam o sismo de 1939 com qualidade suficiente para serem digitalizadas e corrigidas do instrumento mediante o método proposto.

Nome	Cidade	Pais	Lat	Long	Cp.	Instrumento
WES	Boston	USA	42.38	-71.32	Z	Benioff 100 kg
					NS	Benioff 100 kg
					EW	Benioff 100 kg
DBN	DeBilt	Holanda	52.10	5.18	Z	Galitzin
					NS	Galitzin
					EW	Galitzin
PUL	Pulkova	Russia	59.78	30.32	Z	Galitzin
					NS	Galitzin
					EW	Galitzin
GTT	Gottingen	Germany	51.55	9.96	Z	Winchert
FLO	Florissant	USA	38.80	-90.37	EW	Galitzin
HAM	Hamburgo	Germany	53.56	9.98	Z	Wiechert
PAS	Pasadena	USA	34.15	-118.17	Z	Benioff 100kg
					NS	Wood_Anderson
					EW	Wood_Anderson
TUC	Tukson	USA	32.31	-110.78	EW	Wood_Anderson
SJP	San Juan	Porto Rico	18.38	-66.12	EW	Wenner

A desconvolução da resposta do instrumento a partir de dados digitalizados nestas circunstâncias permite recuperar rigorosamente a forma dos movimentos do solo, embora com uma métrica arbitrária. Designamos o registo assim desconvoluído por $U^{ij}(t)$, em que i é o identificador da forma de onda considerada. Representando por $U^j(t)$ o deslocamento absoluto do solo produzido pela forma de onda j e que se pretende determinar, pode escrever-se,

$$U^j(t) = k^j U^{ij}(t) \quad (1)$$

em que k^j é a constante de calibração que permite reconstituir o movimento do solo associado à componente i , a partir do registo mal escalonado em amplitude. Notar que $U^{ij}(t)$ é o registo digitalizado depois de desconvoluída a resposta do instrumento. Atendendo ao teorema da representação, [9], a determinação da forma de onda j que traduz o deslocamento do solo produzido a distâncias telessísmicas por um sismo, envolve a combinação da função escalar $F(t)$, com a função de Green $G_{\phi,\delta,\lambda}^j(t)$, em que $F(t)$ é a função temporal da fonte e a função $G_{\phi,\delta,\lambda}^j(t)$ representa a resposta do meio a um impulso unitário ocorrido na fonte com determinado mecanismo caracterizado pelos parâmetros angulares $\lambda =$ azimute, $\delta =$ inclinação e $\lambda =$ ângulo de deslizamento,

$$U^j(t) = F(t) * G_{\phi,\delta,\lambda}^j(t) \quad (2)$$

em que * representa a convolução.

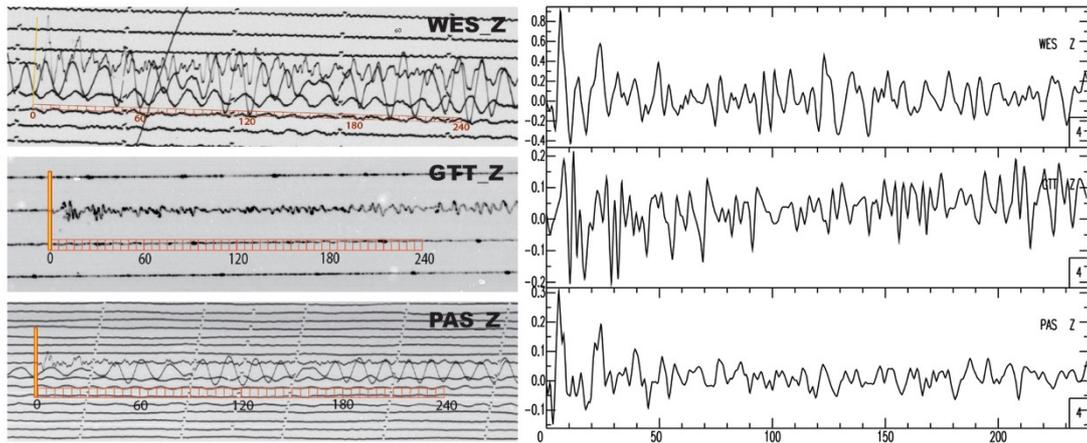


Figura 1: painel da esquerda - Excerto de 3 registos analógicos preparados para a digitalização, onde foi representada a escala de tempo absoluto e escala de amplitude relativa; painel da direita - os mesmos registos da esquerda depois de digitalizados e convertidos e amostrados com taxa de amostragem de 10Hz.

Três importantes propriedades da função temporal da fonte $F(t)$ é, i) ser positiva em todo o seu domínio, ii) limitada e, iii)

$$\int_0^{\infty} F(t)dt = M_0 \quad (3)$$

em que M_0 representa o momento sísmico escalar do sismo.

Atendendo às equações (1) e (2) e às propriedades da convolução podemos escrever,

$$U'^j(t) = \frac{1}{k} F^j(t) * G_{\phi, \delta, \lambda}^j(t) \quad (4)$$

onde,

$$F'^j(t) = \frac{1}{k^j} F^j(t) \quad (5)$$

Atendendo a (4) conclui-se que $F'^j(t)$ pode ser obtida por desconvolução da função de Green associada à componente j , da correspondente componente dos movimentos relativos do solo, $U'^j(t)$, isto é, desconvolvendo $G_{\phi, \delta, \lambda}^j(t)$ de $U'^j(t)$. Designando por

$$Area^j = \int_0^{\infty} F'^j(t)dt$$

e atendendo às propriedades dos integrais, a equação (5) pode escrever-se,

$$\int_0^{\infty} F^j(t)dt = k^j \int_0^{\infty} F'^j(t)dt$$

ou seja,

$$k^j = \frac{M_0}{Area^j} \quad (7)$$

Assim, a obtenção dos parâmetro k^j de cada componente, acordo com Eq. 7, envolve:

- i) digitalização das formas de onda com escala real no tempo, podendo usar-se na amplitude qualquer escala arbitrária e conversão do traço para uma amostragem uniforme;
- ii) possuir a resposta dos instrumentos que deve ser desconvoluída das componentes digitalizadas para obter as formas de onda $U'^j(t)$;
- iii) desconvoluir as funções de Green dos movimentos do solo com métrica arbitrária, $U'^j(t)$ para obter $F'^j(t)$, cujo integral representa $Area^j$.

Finalmente, proceder à correção da amplitude das formas de onda por aplicação de k^j na Eq. 1.

A obtenção das funções de Green de cada componente, compatíveis com o mecanismo do evento em estudo, pode ser feita por duas vias: ou calculadas sinteticamente; ou então utilizando funções empíricas de Green [10], desde que seja possível encontrar eventos compatíveis com essa técnica (com localização próxima do principal; com magnitude inferior em pelo menos uma unidade; com mecanismo semelhante ao do principal e; registados pelas mesmas estações que registaram o principal) . No caso de se optar pela utilização de funções de Green sintéticas a distâncias telessísmicas, com o objetivo de reconstituir a função temporal da fonte por desconvolução das funções de Green de ondas de volume, como no caso presente, há que considerar porções de sinal com uma duração cerca de 3 a 4 vezes superior à duração da fonte expectável com início na primeira chegada das ondas P (ou S se a análise recair na análise das ondas S) [11], [12]. Atendendo a que a técnica se aplica exclusivamente a casos de sismos fortes, onde a durações da fonte geralmente excede os 30s, há necessidade de analisar segmentos de sinal que contém fases P, PcP, PP, ou S e ScS [11]. Deste modo no cálculo das funções de Green deve ser aplicado um dos três métodos capazes de modelar corretamente essas fases: sobreposição de modos normais [13], refletividade [14] ou método de solução direta (DSM) [15], [16]. Neste trabalho as funções de Green foram calculadas pelo método DSM [17].

Outro aspecto delicado envolvido no processo é o da desconvolução das funções de Green de $U'^j(t)$ (eq. 5). Para que o resultado seja fidedigno é preciso proceder à filtragem dos dados de forma a preservar o conteúdo informativo nas baixas frequências evitando as frequências mais altas e aplicar um método de desconvolução que imponha os constrangimentos a que a função temporal da fonte tem de obedecer [11], [18], [19].

Neste trabalho a desconvolução foi processada, no domínio do tempo, aplicando um algoritmo baseado no método iterativo [20], modificado para devolver soluções de $F'(t)$ positivas e confinadas temporalmente ao tempo de rotura fixado. A Fig. 2 apresenta o resultado da desconvolução e passos seguintes propostos no método descrito para obter a correção pretendida. O exemplo foi aplicado à componente vertical do registo do sismo de 1939 na estação WES. A função de Green foi calculada considerando as componentes do momento sísmico de um impulso unitário com $M_0=1\text{Nm}$ com o mecanismo $(\phi, \delta, \lambda) = (152^\circ, 24^\circ, -87^\circ)$, $H_0=14\text{km}$; o tempo de rotura fixado foi 35s.

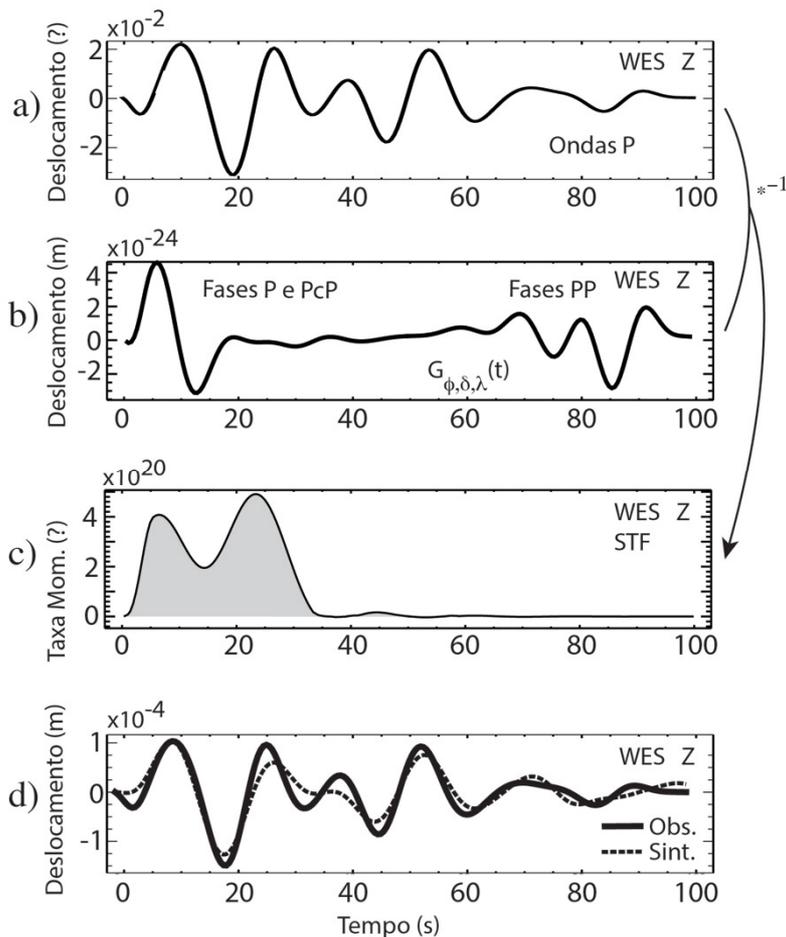


Figura 2: Fases da desconvolução. (a) exemplo de fragmento de forma de onda da componente WES_Z, depois de desconvoluído o instrumento do registo digitalizado com amplitude não calibrada e filtrado com filtro passa banda entre 0.02Hz a 0.3Hz; (b) Função de Green teórica calculada pelo método [17] e filtrada da mesma maneira que os dados; (c) resultado da desconvolução, ainda com amplitude em unidades arbitrárias; (d) comparação ente a forma de onda observada depois de feita a correção (1) e a correspondente forma de onda sintética que resulta da convolução entre a FTF normalizada para M_0 do sismo e a função de Green.

3. O SISMO DE 1939

3.1. Localização

O maior sismo conhecido da região ocorreu no dia 8 de Maio de 1939, com uma magnitude 7.1. A localização deste sismo varia de catálogo para catálogo (Ver. Tab. 1). Por essa razão o primeiro passo para o estudo deste evento foi a relocalização utilizando o programa LocSAT incluído no pacote SeisComP3 (<https://www.seiscomp3.org/wiki/doc/changelog/seattle-2013.340>). Foram usados os tempos das fases disponibilizadas catálogo do ISC, a que se acrescentaram as fases das estações espanholas não incluídas na base de dados do ISC. Para a localização em questão pelo método e dados referidos, foram ensaiados vários modelos de velocidade: a) “ems_iasp91” baseado no modelo IASPEI91 [21] e atualmente utilizado

Tabela 2- Relocalização do simo de Santa Maria de 8 de Maio de 1939

Modelo Vel.	Lat. (N)	Erro (km)	Lon (W)	Erro (km)	H0 (km)	rms	Fases	Az. gap	Min. dist
ldc_iasp91	37.14	2	24.25	1	16±1	2.6	290/464	63	2.8
ldc_ak135	37.02	2	24.20	1	19±1	3.0	290/464	63	2.9 ^o
Gfz_tab	37.09	1	24.30	1	14±1	2.8	285/464	63	2.8^o
Gfz_iasp91	37.09	2	24.26	1	15±1	2.7	253/464	63	2.8 ^o
Ems_iasp91	37.14	2	24.28	1	18±1	2.4	266/264	63	2.8

pelos IGN de Espanha; b) o modelo “IASPEI91” incluído no seiscomp3; c) o modelo “tab” usado pelo Centro Alemão de Investigação para as Geociências (GFZ); d) o modelo “ak135” e e) o modelo CTBTO usado pela Organização do Tratado de Interdição Completa de Ensaios Nucleares. A Tabela 2 representa as localizações e erros associados, a cada modelo de velocidades considerado. De acordo com essa tabela considera-se que a melhor localização (Lat=37.09N, Long= 24.30°W) é a que corresponde ao modelo “Gfz_tab”, que situa o epicentro deste evento mais próximo da fronteira de placas.

3.2. Mecanismo

O mecanismo deste sismo foi anteriormente estudado por outros autores como [22] e [2], usando o método de análise das polaridades da primeira chegada das ondas P a um conjunto de estações distribuídas à volta da fonte. Constata-se que os mecanismos obtidos por esses autores para este evento divergem do mecanismo característico obtido para os sismos mais recentes da zona. Por isso decidiu-se reprocessar os dados usados por [2], excluindo algumas polaridades sobre as quais recaíram dúvidas e utilizando modelos de velocidade mais recentes (Tabela 3). O resultado desse reprocessamento mostra um plano de falha (152°, 24°, -87°) próximo do mecanismo característico da zona.

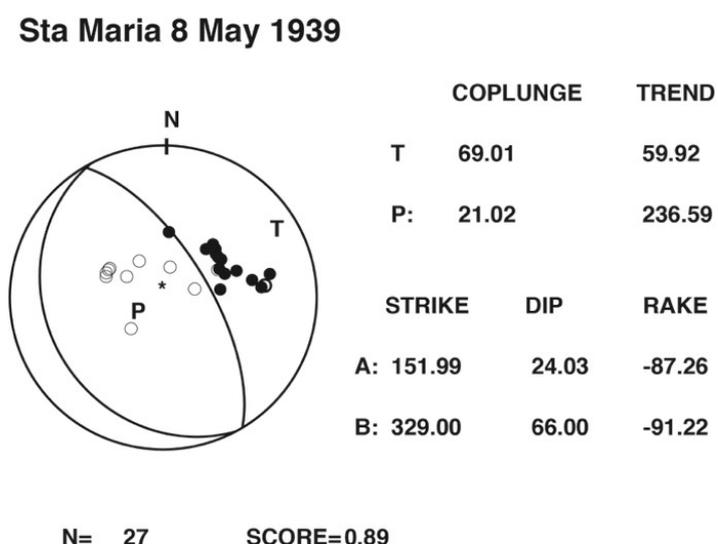


Figura 3: Solução do plano de falha obtido para o sismo de 1939. Os círculos pretos correspondem a compressões e os brancos a dilatações; T e P representam os eixos de tensão e pressão respetivamente. N é o número de fases usadas.

4. OS SISMOS DE 2007

De acordo com os dados do IPMA/SIVISA os sismos de 5 e 7 de Abril de 2007 tem epicentro a 13 km um do outro, nas coordenadas 37.30°N, 24.66°W e 37.22°N, 24.56°W, respetivamente. O estudo destas fontes foi efetuado pressupondo um modelo cinemático de fonte extensa, cujos parâmetros do modelo foram calculados pelo método de inversão de ondas de volume a distâncias telesísmicas de Kikuchi e Kanamori (1981). Para o efeito foram selecionadas 17 componentes de formas de onda P para o sismo do dia 5 de Abril e 19 componentes para o do dia 7 de Abril. Em ambos os casos fornecidos pelo consórcio IRIS. Não foi possível a utilização de componentes SH devido ao elevado nível de ruído.

Os sismogramas foram corrigidos do instrumento e representados sob a forma de deslocamento, filtrados com filtro Butterworth passa banda entre frequências 0.01 Hz e 1 Hz e reamostrados para uma taxa de amostragem de 10Hz.

Para o cálculo das funções de Green segundo o método [23] foi considerando, para a zona da fonte, o modelo de velocidades representado na Tabela 3, adaptado de modelos existentes para os Açores, como [24], [4]. Os modelos de velocidade em questão, obtidos quase exclusivamente com dados sísmicos do grupo central, consideram que a espessura da crosta varia entre 7km e 14km e que a velocidade das ondas P varia entre 5.4 e 6.9 km/s, com uma relação $V_p/V_s \sim 1.8$. Outros trabalhos, como [6] ou [25], propõem uma espessura da crosta nesta região de ~16km. Para a propagação fora da zona da fonte foi considerado o modelo IASPEI.

Tabela 3 - Modelo de velocidades considerado

Thickness (km)	V_p (km s ⁻¹)	V_s (km s ⁻¹)	Density (g cm ⁻³)
1.5 (water)	1.5	0.0	1.0
10.0	6.3	3.5	2.8
-	8.0	4.4	3.2

A inversão destas fontes seguiu a metodologia estabelecida em trabalhos como [8]. Assim, na primeira fase e com o objetivo de fixar a orientação do plano de rotura e a profundidade da fonte foi executada uma sequência de inversões segundo um modelo de fonte pontual, fixando sucessivamente a profundidade da fonte entre 2 e 15km. O melhor resultado, isto é, aquele que produziu o menor RMS entre o conjunto dos sismogramas observados e correspondentes sintéticos, resultou, para o sismo de 5 de Abril, num mecanismo normal com planos azimute=152°, inclinação=44° e ângulo de deslizamento= -88° (convenção de Aki) a 10 km de profundidade. Para o sismo de 7 de abril a melhor solução de fonte pontual corresponde também a um mecanismo de falha normal, azimute=125, inclinação=52° e ângulo de deslizamento=-81° (convenção de Aki), com o hipocentro a 6km de profundidade.

Na segunda fase, foi estimado o modelo de rotura destes sismos a partir do cálculo da distribuição de deslizamentos sobre o plano de falha obtido na fase anterior, por inversão da forma de onda [7]. Assim, os planos de rotura foram orientados de acordo com a geometria obtida na fase anterior e por forma a conterem na sua superfície o hipocentro calculado também na fase anterior (profundidades de 10km e 6km respetivamente). Para cada evento foram testados os dois planos possíveis obtidos na fase anterior, sendo escolhido como plano de rotura o que produz a mínima variância (melhor ajuste entre o conjunto de formas de onda observadas e sintéticas), de acordo com o critério definido em [7]. No processo de configuração do problema de inversão foram testados várias combinações para os parâmetros que é necessário fixar: comprimento e largura da falha; dimensão da malha que a subdivide (sub-falhas) e velocidade de rotura. Em ambos os sismos, os melhores resultados foram obtidos com uma grelha de 3km de malha e velocidade de rotura 1.5km/s. É de salientar que, pela

dimensão das fontes destes dois sismos, o conteúdo espectral das formas de onda utilizadas não permite uma análise de diretividade [26].

Para o evento de 5 de Abril chegou-se a um modelo de fonte com um momento sísmico total de $2,7 \times 10^{18}$ N.m, que envolve um plano de falha com 15×12 km² sobre o qual se distribuem os deslizamentos que se concentram maioritariamente sobre uma asperidade alongada na direção NW-SE (Fig. 4, painel da esquerda).

Para o evento de 7 de Abril, o momento sísmico escalar obtido foi de 1.4×10^{18} N.m, e os deslizamentos distribuem-se também na direção NW-SE, sobre um plano de rotura com 12×9 km²; a rotura propaga-se a partir do hipocentro para NW (Fig. 4, painel da direita).

Na Fig. 4 estão ainda representados os mecanismos e a função temporal da fonte, que mostra um tempo de rotura de 12 s para o sismo de 5 de Abril e 10s para o de 7 de Abril.

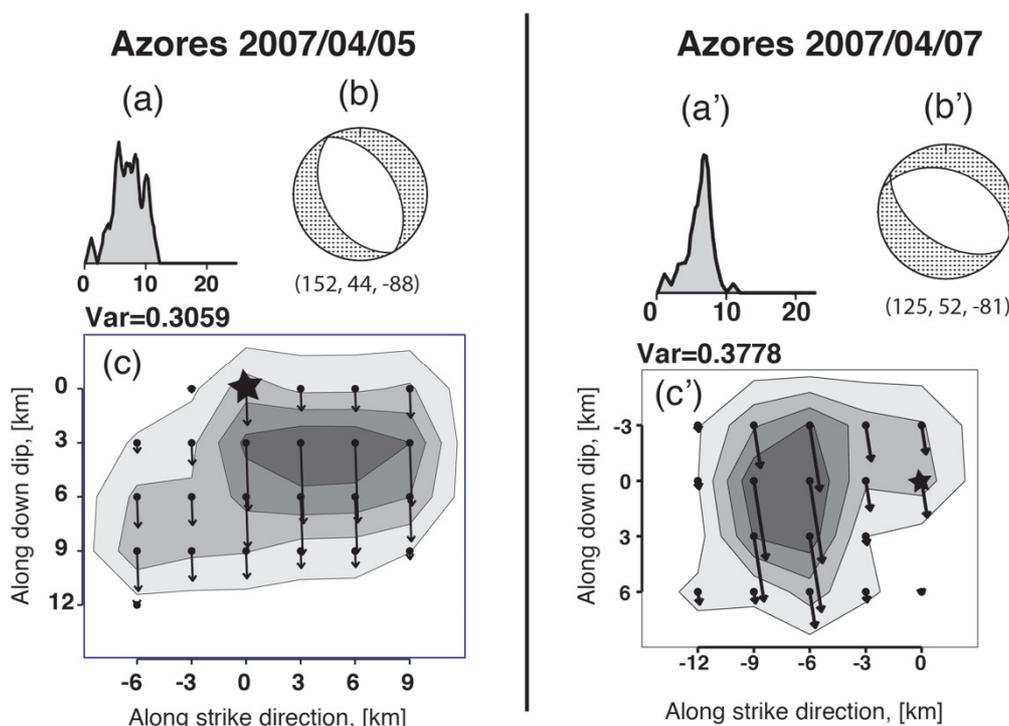


Figura 4: Resultados da inversão da forma de onda para estudo do modelo de rotura dos sismos de 5 de Abril de 2007 (painel da esquerda) e 7 de Abril de 2007 (painel da direita). (a e a') Função temporal da fonte; (b e b') Solução focal; (c e c') distribuição de deslizamentos (setas) e momento sísmico (nível de cinzento das isolinhas) sobre o plano de falha, onde a estrela representa o local do início da rotura. “Var” representa a variância entre as formas de onda observadas e as sintéticas segundo o critério de [7].

5. CONCLUSÕES

Sabe-se que para além das grandes quantidades de dados sísmicos digitais que se registam na atualidade através da moderna instrumentação, existe uma outra classe de dados, antigos e analógicos, alguns com grande qualidade, que arquivam os movimentos de importantes sismos mal conhecidos do passado. Raramente estes

registos tem uma aplicação que vá além da leitura do tempo e sentido do movimento das primeiras fases. A principal razão desse desperdício está na dificuldade de transposição desses dados para a linguagem digital utilizada pelos novos métodos de análise da forma de onda, como os de inversão para o estudo da fonte. Pensamos que o método proposto responde a algumas das dificuldades encontradas nessa tradução analógico-digital e por isso pode facilitar novos estudos para eventos antigos, como o do sismo de 1939, cuja fonte será em breve modelada com os dados produzidos neste trabalho.

Qualquer análise que se faça sobre a atividade tectónica da faixa São Miguel-Glória, a partir dos mecanismos de sismos publicados, fará notar três singularidades: os sismos de 4 e 5 de Julho de 1966 e o grande sismo de 8 de maio de 1939. Relativamente ao sismo de 1939, os resultados obtidos neste trabalho, ainda que sujeitos a confirmação após a inversão que pretendemos fazer em breve, mostram uma localização mais próxima do que se julga ser a fronteira de placas e um mecanismo mais condizente com a generalidade dos eventos estudados.

O estudo da fonte dos sismos de 2007 mais uma vez reforçam a uniformidade do padrão de fratura da zona.

Outro aspecto peculiar da atividade sísmica desta zona e cujo estudo estamos a aprofundar, é o facto de em vários dos episódios de maior atividade sísmica, o sismo principal surgir acompanhado de outro de equivalente magnitude, segundo um padrão que alguns autores chamam dupletos.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi cofinanciado pela União Europeia através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, enquadrado no COMPETE 2020 (Programa Operacional da Competitividade e Internacionalização) através do projeto ICT (UID/GEO/04683/2013) com a referência POCI-01-0145-FEDER-007690 e por Fundos Nacionais através da FCT, Portugal, no âmbito dos projetos ICT-UID/GEO/04683/2013, PTDC/CTE-GIX/099540/2008, PTDC/GEO-FIQ/3522/2012, e PTDC/CTE-GIX/121957/2010. Também contribuíram para o trabalho: a) CRUP através da Ação Integrada Luso- Espanhola E-112/08; 2) projectos espanhóis MINECO, ALERTES (CGL2010-19803-C03-01) e ALERTES-RIM (CGL2013-45724-C01-01), Ordem CIN/1934/2010. Os autores agradecem ainda ao Dr. J. M. Martinez Solares e J. Barco, do IGN, Madrid, que contribuíram com a relocalização do sismo de 1939, e ao Dr. J. Dewey do USGS (Boulder) e ao Sr. J.M. Tordesilla do observatório de Toledo, que forneceram parte dos sismogramas de 1939 utilizados.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Borges, J. F., Bezzeghoud M., Buforn, E., Pro, C. & Fitas, A. (2007) The 1980, 1997 and 1998 Azores earthquakes and some seismo-tectonic implications. *Tectonophysics*, 435(1–4), 37–54, doi:10.1016/j.tecto.2007.01.008.
- [2] Buforn, E., Udías, A. and Colombás, M. A. (1988) Seismicity, source mechanisms and tectonics of the Azores-Gibraltar plate boundary. *Tectonophysics*, 152(1–2), 89–118, doi:10.1016/0040-1951(88)90031-5.
- [3] Nunes, J. C. e Ribeiro, E. (2001) Caracterização da sismicidade instrumental dos Açores no period 1950–1980. *SISMICA, Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Açores*.
- [4] Matias, L., Dias, N. A., Morais, I., Vales, D., Carrilho, F., Madeira, J., Gaspar, J. L., Senos, L. & Silveira, A. B. (2007) The 9th of July 1998 Faial Island (Azores, North Atlantic) seismic sequence. *J. Seismol.*, 11(3), 275–298, doi:10.1007/s10950-007-9052-4.
- [5] Bezzeghoud, M., Borges, J. F., Caldeira, B. (2012) Fontes sísmicas ao longo da fronteira de placas tectónicas entre os Açores e a Argélia: um modelo

- sismotectónico. In: R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, J.C. Kullberg (Eds), *Geologia de Portugal, vol. 2, Escolar Editora*, 747-790. - Identificador: <http://hdl.handle.net/10174/7058>
- [6] Bezzeghoud, M.; Adam, C., Buforn, E., Borges, J. F & Caldeira, B. (2014) Seismicity along the Azores-Gibraltar region and global plate kinematics. *J. Seismol.*, 18, 2: 205 - 220. doi: 10.1007/s10950-013-9416-x.
- [7] Kikuchi, M. & Kanamori H. (1991) Inversion of complex body waves—III, *Bull. Seis. Soc. Am*, 81(6), 2335–2350.
- [8] C. Pro, E. Buforn, M. Bezzeghoud y A. Udias (2013) The earthquakes of 29 July 2003, 12 February 2007, and 17 December 2009 in the region of Cape Saint Vincent (SW Iberia) and their relation with the 1755 Lisbon earthquake. *Tectonophysics*, 583, 16-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.10.010>.
- [9] Aki, K. and P.G. Richards (2002) *Quantitative Seismology*, University Science Books, Sausalito, CA.
- [10] Velasco, A. A., Ammon, C. J., & Lay, T. (1994). Empirical green function deconvolution of broadband surface waves: Rupture directivity of the 1992 Landers, California (Mw= 7.3), earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 735-750.
- [11] Vallée, M., Charléty, J., Ferreira, A. M., Delouis, B., & Vergoz, J. (2011) SCARDEC: a new technique for the rapid determination of seismic moment magnitude, focal mechanism and source time functions for large earthquakes using body-wave deconvolution. *Geophysical Journal International*, 184(1), 338-358.
- [12] Kanamori, H., & Rivera, L. (2008) Source inversion of W phase: speeding up seismic tsunami warning. *Geophysical Journal International*, 175(1), 222-238.
- [13] Woodhouse, J. H., & Dziewonski, A. M. (1984) Mapping the upper mantle: three-dimensional modeling of Earth structure by inversion of seismic waveforms. *J. geophys. Res*, 89(5953-5986), 3.
- [14] Fryer, G. J., & Frazer, L. N. (1987) Seismic waves in stratified anisotropic media—II. Elastodynamic eigensolutions for some anisotropic systems. *Geophysical Journal International*, 91(1), 73-101.
- [15] Takeuchi, H., & Saito, M. (1972). Seismic surface waves. *Methods in computational physics*, 11, 217-295.
- [16] Geller, R. J., & Ohminato, T. (1994) Computation of synthetic seismograms and their partial derivatives for heterogeneous media with arbitrary natural boundary conditions using the Direct Solution Method. *Geophysical Journal International*, 116(2), 421-446.
- [17] Kawai, K., Takeuchi, N., & Geller, R. J. (2006) Complete synthetic seismograms up to 2 Hz for transversely isotropic spherically symmetric media. *Geophysical Journal International*, 164(2), 411-424.
- [18] Bertero, M., Bindi, D., Boccacci, P., Cattaneo, M., Eva, C., & Lanza, V. (1997). Application of the projected Landweber method to the estimation of the source time function in seismology. *Inverse Problems*, 13(2), 465.
- [19] Benz, H. M., & Herrmann, R. B. (2014) Rapid Estimates of the Source Time Function and Mw using Empirical Green's Function Deconvolution. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- [20] Ligorria, J. P., & Ammon, C. J. (1999) Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bulletin of the seismological Society of America*, 89(5), 1395-1400.
- [21] Kennett, B.L.N. (Compiler and Editor), (1991) *IASPEI 1991 Seismological Tables. Bibliotech*, Canberra, Australia, 167 pp.
- [22] Udías, A., Arroyo, A. L. & Mezcua, J. (1976) Sismotectonic of the Azores-Alboran region. *Tectonophysics*, 31(3–4), 259–289, doi:10.1016/0040-1951(76)90121-9.
- [23] Bouchon, M. (1976) Teleseismic body wave radiation from a seismic source in a layered médium. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 47, 515-530.
- [24] Dias, N. A., Matias, L., Lourenço, N., Madeira, J., Carrilho, F. & Gaspar, J.L. (2007) Crustal seismic velocity structure near Faial and Pico Islands (AZORES), from local earthquake tomography. *Tectonophysics* 445(3-4), 301-317.
- [25] Jiménez-Munt, I., Fernández, M., Torne, M., & Bird, P. (2001) The transition from

- linear to diffuse plate boundary in the Azores–Gibraltar region: results from a thin-sheet model. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(2), 175-189.
- [26] Caldeira B., Bezzeghoud M, Borges JF. (2010) DIRDOP: a directivity approach to determining the seismic rupture velocity vector. *J Seismology*, 14, 565–600, DOI 10.1007/s10950-009-9183-x