

Sismo 1998 - Açores

UMA DÉCADA DEPOIS



EDIÇÃO

C. SOUSA OLIVEIRA, ANÍBAL COSTA, JOÃO C. NUNES

Sismicidade e sismotectónica dos Açores: implicações geodinâmicas

Seismicity and seismotectonics of Azores: Geodynamic Implications

J. F. Borges⁽¹⁾, Bento Caldeira⁽¹⁾, M. Bezzeghoud⁽¹⁾ e E. Buforn⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidade de Évora, ⁽²⁾ Universidad Complutense, Madrid

Abstract

In the last third six years various research works have been produced to study the earthquake mechanism of events M equal or greater than 6, in order to characterize the geodynamic complexity. In this work we summarize these studies and present their main conclusions. The analysis of focal mechanisms indicates evidences of two zones with different patterns of movement and rates of deformation. In zone I, between longitude 30°W and 27°W, most current situations are left strike slip with horizontal E-W compression axis and N-S traction, with deformation rate of 6.7mm/yr. In zone II, between longitude 27°W and 23°W, the seismic tensor indicates a normal mechanism with horizontal NE-SW traction axis and a deformation rate of 3.1 mm/yr.

1. Introdução

Desde que há memória, a vida das populações Açorianas tem sido marcada por terramotos mais ou menos severos, função da proximidade e da magnitude. Esta actividade sísmica, umas vezes de origem vulcânica outras de natureza tectónica, tem, em qualquer dos casos, sido o fenómeno da natureza que ao longo dos tempos mais dramaticamente afectou as populações destas ilhas quer pela destruição provocada, quer pelo número de vidas humanas perdidas. Os impactes sociais e económicos destes fenómenos

são imensos (veja-se as consequências recentes do sismo da Terceira de 1980 e do sismo do Faial de 1998) e por isso impõem-se medidas tendentes à minimização do risco que passam, em larga medida, pelo desenvolvimento das 3 seguintes vertentes:

- 1. Aumento da capacidade de observação do fenómeno sísmico na região a diferentes escalas espaço-temporais** - é certo que nas últimas décadas temos vindo a assistir a uma melhoria substancial da monitorização da actividade sísmica na região. Foi um esforço que saudamos, reconhecendo, no entanto, que há ainda muito a fazer nalguns domínios, nomeadamente: compatibilização dos dados e sensores, disponibilização de dados em tempo real, supressão de lacunas azimutais da rede por instalação de OBS, monitorização de movimentos sísmicos intensos, estabelecimento de capacidade de monitorização de crises sísmicas através da instalação de redes móveis e actualização homogeneização dos catálogos sísmicos.
- 2. Estabelecimento de modelos sismotectónicos e geodinâmicos aperfeiçoados** - relativamente ao modelo geodinâmico capaz de fornecer uma justificação plena para os fenómenos observados (em particular os mecanismos focais (Borges *et al.*, 2007) dos sismos mais energéticos, morfologia (Lourenço e *tal.*, 1998) e as observações geodésicas (Fernandes *et al.*, 2004) não existe ainda um consenso estabelecido.

3. Desenvolvimento da capacidade de simular cenários tendo em vista previsão dos movimentos sísmicos intensos dos solos e suas consequências ao nível dos edificados - a capacidade de simular assenta fundamentalmente nas características da fonte e é fortemente dependente do meio, o qual é ainda hoje mal conhecido (Grandin *et al.*, 2007; Carvalho *et al.*, 2008).

Atendendo ao levantamento acima apontado conclui-se que o conhecimento da fonte dos eventos sísmicos desta região representa um contributo essencial para a resposta aos tópicos (1) e (2), e, em última análise, para a caracterização do risco sísmico na região Açores.

No trabalho que se apresenta procurou-se fazer uma breve caracterização sismotectónica da região Açores no contexto da Fronteira Açores Gibraltar através dos resultados dos trabalhos que ao longo dos últimos 36 anos mais contribuíram para o conhecimento da fonte sísmica. Por fim são apresentados alguns resultados que incorporam a actividade sísmica dos últimos anos e que permitem caracterizar o estado actual da tensão e deformação sísmica na região.

2. Sismotectónica e geodinâmica da região Açores-Gibraltar

O estudo da sismicidade da região Açores-Gibraltar (Figura 1a) baseia-se, fundamentalmente em dados instrumentais registados pelas redes locais e regionais; para sismos de maiores magnitudes ou mais afastados relativamente aquelas redes foram ainda usados dados das redes globais. A localização dos eventos sísmicos e o cálculo da respectiva magnitude fornece-nos uma imagem, ainda que incompleta, da actividade associada aos principais acidentes tectónicos activos - fronteiras de placas e zonas de fractura.

A sismicidade histórica, enquanto complemento da instrumental, assume fundamental importância

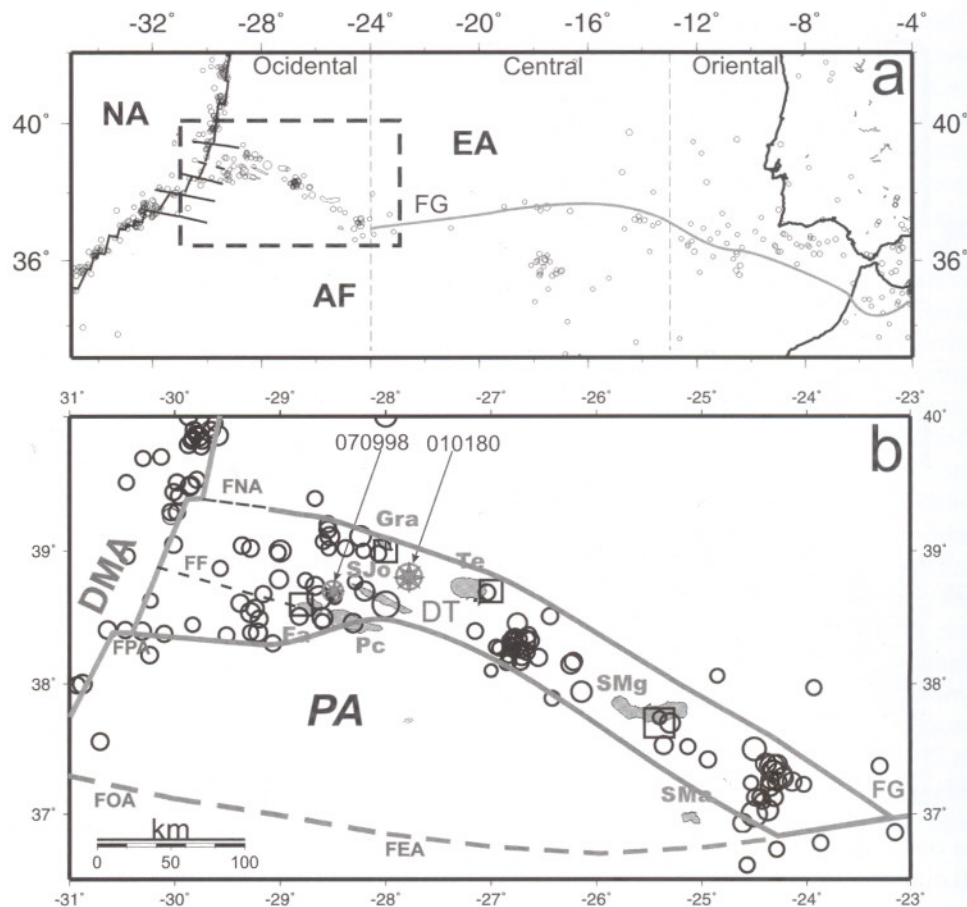
para a caracterização da actividade sísmica. Ela é com frequência a única fonte de informação sobre a recorrência dos grandes sismos, com períodos superiores à idade dos primeiros registos instrumentais. A informação histórica disponível, baseada na descrição dos efeitos destrutivos provocados pelos sismos, apresenta lacunas espaciais e temporais que se devem, em grande parte, à distribuição geográfica das populações. Assim, enquanto para o território continental português existem relatos históricos de sismos que remontam ao ano 33 A.C, para a região dos Açores essas informações não recuam além dos princípios do século XVI, época em que se iniciou o povoamento das ilhas. Por estes motivos, toda a região oceânica compreendida entre as ilhas e o continente apresenta uma lacuna de informação histórica a qual não é possível colmatar. Numa primeira análise do mapa de epicentros (Figura 1a) constata-se que os três ramos da junção tripla dos Açores se apresentam bem definidos até à longitude de 24°O, a partir da qual se observa uma ausência de sismicidade (gap sísmico) que se prolonga até à longitude de 18°O. Para leste deste meridiano os epicentros apresentam-se dispersos por uma vasta área definindo uma faixa de intensa sismicidade até à região de Gibraltar

Tendo por base toda a informação sobre sismicidade possível de reunir, esta vasta região é tradicionalmente subdividida em três sectores (Buforn *et al.*, 1988): a fracção mais ocidental, designada por *Sector Ocidental*, corresponde à zona da Plataforma dos Açores e estende-se desde a Dorsal Médio-Atlântica até à latitude de 24°O; o *Sector Central* inicia-se na Falha GLORIA (FG) e prolonga-se até à latitude de 13°O; segue-se o *Sector Oriental* que se estende desde a Crista Tore-Madeira (aproximadamente a 13°O) até Gibraltar.

O sector situado mais a ocidente corresponde à zona de implantação da Plataforma dos Açores (PA). Morfológicamente apresenta-se como uma estrutura triangular com uma área aproximada de 400.000 km², delimitada, grosso modo, pela linha batimétrica dos

Figura 1

(a). Sismicidade da região Açores-Gibraltar para o período 1973-2007 para magnitudes $M \geq 4.0$ (NEIC). (b). Sismicidade instrumental (círculos) e histórica (quadrados) da região Açores. Os nomes das ilhas são: Fa = Faial, Pc = Pico, SJo = São Jorge, Gra = Graciosa, Te = Terceira, SMg = São Miguel, SMa = Santa Maria. Destaque para os sismos de 1 de Janeiro de 1980 e de 9 de Julho de 1998. DMA = Dorsal Medio-Atlântica; DT = Dorsal da Terceira; FNA = Zona de Fractura Norte Açores; FEA = Zona de Fractura Este Açores; FF = Fractura do Faial; FPA = Zona de Fractura Princesa Alice; FOA = Zona de Fractura Oeste Açores; FEA = Zona de Fractura Oeste Açores; GF = Falha GLORIA; PA = Plataforma dos Açores; NA = Placa Norte-Americana; EA = Placa Eurasiática; AF = Placa Africana.



2000 m (Figura 1-b). A PA destaca-se claramente da planície abissal cujas profundidades podem ultrapassar os 3500 m e apresenta uma topografia acentuadamente irregular constituída por picos e cristas vulcânicos que atingem a superfície em sete sítios, que correspondem a sete das nove ilhas dos Açores (as ilhas Flores e Corvo encontram-se já no interior da placa NA).

Os limites da Plataforma dos Açores são (Figura 1b): a oeste, a Dorsal Medio-Atlântica (DMA); a Sul, a Zona de Fractura Este Açores (FEA); a Norte, a Zona de Fractura Norte Açores (FNA) e um complexo

alinhamento que constitui a denominada Crista da Terceira, com orientação ONO-ESE e alongando-se para leste até atingir a Falha GLORIA (FG).

O acidente tectónico que domina esta região é a DMA que intersecta aproximadamente o ponto médio entre as ilhas das Flores e Graciosa. A sua orientação (Figura 1a) varia de $N10^\circ E$ para $N20^\circ E$ à medida que se progride para sul sofre alterações morfológicas: (a) torna-se menos rugosa, ao ponto do seu vale mediano, bem vincado em outras latitudes, deixar praticamente de existir possivelmente devido à influência de uma pluma do manto que actua sob

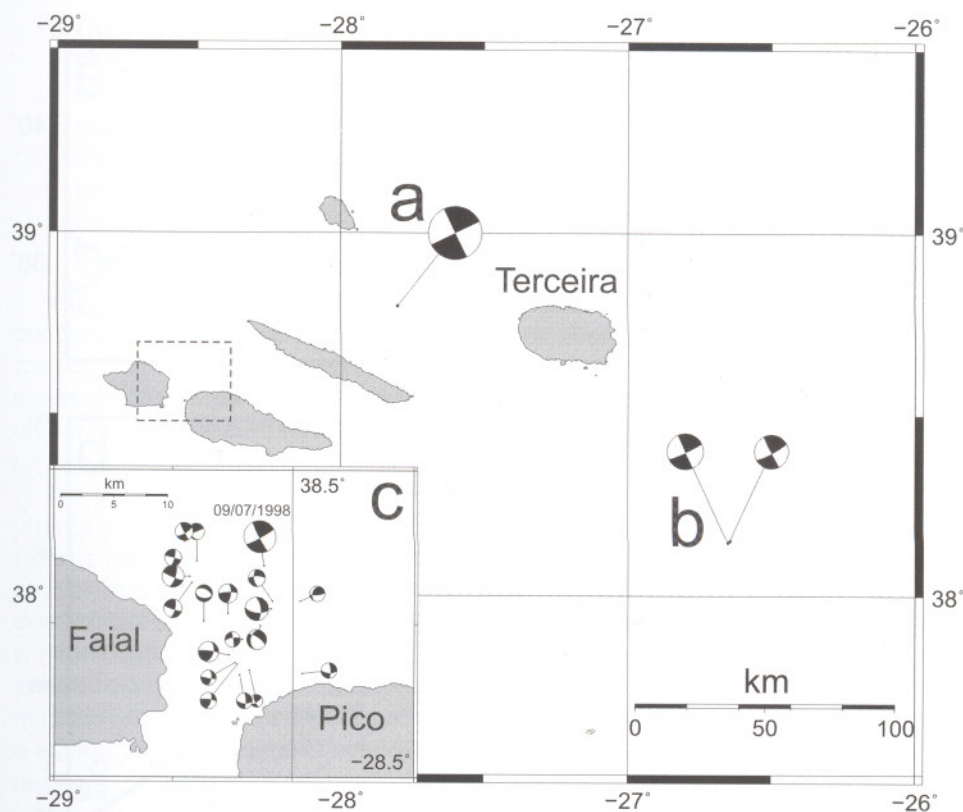


Figura 2

Mecanismos focais obtidos em três campanhas de observação sísmica: a) Mecanismo compósito das réplicas do sismo de 1 de Janeiro de 1980 (Hirn *et al.*, 1980); b) Campanha de OBS's realizada em 1992, em 27 dias, na região dos Açores na qual se obtiveram mecanismos focais de dois sismos ($M=3.2$ e $M=3.4$ com epicentros localizados próximo do sismo de 1 de Janeiro de 1980) (Miranda *et al.*, 1998); c) Mecanismos focais das principais réplicas do sismo de 9 de Julho de 1998 (Matias *et al.* 2007).

a base da plataforma - ponto quente dos Açores (Lourenço *et al.*, 1998; Silveira *et al.*, 2006); (b) a sua espessura sofre uma redução acentuada (Luis *et al.*, 1994); (c) o vale mediano, que a caracteriza noutras latitudes, é aqui praticamente inexistente,

Nesta região a DMA apresenta cinco fracturas principais com uma orientação aproximada E-O, (Figura 1b). Elas são, de norte para sul: a FNA; a Zona de Fractura do Faial (FF); a Zona de Fractura Banco Açor (FA); Zona de Fractura banco Princesa Alice (FPA); a Zona de Fractura Oeste dos Açores (FOA), também designada por Fractura dos Açores, e que pode ser considerada, devido às evidências morfológicas, como um prolongamento para leste, até à FG, da FEA (prolongamento a tracejado (Figura 1b) que define o

limite Sul do PA ao qual não se conhece associado a ela qualquer evento sísmico significativo).

A Plataforma de Açores, formada por crosta oceânica anormalmente espessa, poderá estar associada à existência de uma pluma do manto. Os Argumentos a favor da existência da referida pluma baseiam-se nas anomalias topográficas e de gravidade, bem como da elevada espessura crustal e valores anómalos das velocidades das ondas P e S (Schilling, 1975; Zhang *et al.*, 1992; Montagner *et al.*, 2001; Montelli *et al.*, 2004; Silveira *et al.*, 2006) A reforçar esta hipótese existe ainda o facto de se observarem fortes semelhanças entre o tipo de lavas encontradas nos Açores e as que se podem encontrar em regiões como a Islândia cuja origem se encontra claramente associada a um *hot-spot* (Madureira *et al.*, 2005).

Asimow *et al.* (2004) propõem em alternativa o que chamam de modelo *wet-spot*. Segundo esse modelo, o denominado *hot-spot* dos Açores poderá ser explicado por uma anomalia de fusão que se deverá, segundo os autores, não a uma anomalia térmica, mas à presença de água no material mantélico. Segundo estes autores, o modelo proposto seria capaz de justificar em simultâneo a anomalia da espessura costal e a presença de elementos químicos cuja origem é normalmente associada a um *hot-spot*. Contudo, Anderson (2005) defende que anomalias negativas na velocidade de propagação das ondas sísmicas não significam, necessariamente, a existência de um manto quente. A composição química, a mineralogia, a presença de voláteis, a inelasticidade e a anisotropia podem também causar zonas de baixa. As plumas mantélicas continuam ainda a ser alvo de intensos debates e controvérsia no que diz respeito à sua origem (Anderson, 2005).

Os modelos cinemáticos globais prevêm velocidades de expansão para DMA que variam de norte para sul da seguinte forma: (a) de acordo com o modelo Nuvel-1A (DeMets *et al.*, 1990), a norte da plataforma a velocidade prevista é de cerca de 1.7 cm/ano, sendo o valor médio a Sul de 1,2 cm/ano (ambas com direcção paralela às falhas transformantes); (b) o modelo proposto por Luis *et al.* (1994), sugere que a taxa de expansão da DMA na região dos Açores diminuiu continuamente de 4 cm/ano para 1,4 cm/ano, no intervalo de 10 a 3,85 MA, aumentando depois até valores de 2,5 cm/ano segundo o azimute N100°O. Os mesmos modelos (DeMets *et al.*, 1990 e Luis *et al.*, 1994) consideram que o terceiro braço da JTA apresenta, nas proximidades desta junção, uma movimentação relativa entre a placa Ea e a Af do tipo desligamento direito em trans-tensão com componente em extensão de 3 mm/ano. Trata-se de uma taxa de expansão consideravelmente baixa, o que confere a esta fronteira características de expansão ultra-lenta (< 10 mm/ano).

Enquanto que a origem e natureza dos dois primeiros braços da junção tripla não oferecem dúvidas (crista oceânica com divergência na direcção EO), o mesmo não se pode dizer em relação ao terceiro braço desta junção, cujo modelo de funcionamento suscita ainda alguma controvérsia. Alguns autores (Krause *et al.*, 1970; Udías, *et al.*, 1976; Buforn *et al.*, 1988) consideram-no um centro de expansão normal, enquanto outros (McKenzie, 1972 e Searle, 1980) o tomam como centro de expansão oblíqua. Madeira (1990) propõem outro modelo em que o terceiro ramo funcionaria como transformante *leaky* (transformante com uma componente de abertura). Recentemente, Lourenço *et al.* (1998) propõem, baseados em dados batimétricos, um modelo de fronteira difusa, que actua simultaneamente com centro de expansão oblíqua, ultra-lenta e como transformante que acomoda o movimento relativo entre as placas EA e AF. Ainda segundo os defensores deste modelo, esta região poderá considerar-se como um caso particular de uma crista ultra-lenta na qual o regime transtensional e a herança tectónica subjacente desempenham um papel preponderante na ascensão magmática que ocorre em duas direcções preferenciais N120°E e N150°E, condicionadas pelas pequenas alterações do campo regional da tensão (N-S a NO-SE, à medida que nos afastamos da Dorsal).

3. Sismicidade dos Açores

Devido à proximidade geográfica à Junção tripla dos Açores, onde confluem as três placas NA, AF e EA, o arquipélago encontra-se sujeito a uma actividade sísmica intensa. Esta sismicidade é essencialmente caracterizada por eventos superficiais (profundidades hipocentrais que não ultrapassam a dezena de quilómetros) e de magnitude reduzida ($M < 5$) a moderada ($5 \leq M \leq 6$) - embora existam registos instrumentais de dois eventos de magnitude $M \geq 7$: um a 8 de Maio de 1939 com epicentro a este da ilha Sta Maria e o recente sismo de 1 de Janeiro de

1980 localizado entre as ilhas Terceira e Graciosa. Os eventos organizam-se geralmente em sequências sísmicas e localizam-se maioritariamente em áreas submarinas

Dados compilados por Nunes *et al.* (2001) desde o início do povoamento levam-nos a concluir que os Açores foram afectados por 13 sismos de intensidade igual ou superior a VII (Quadro I), tendo estes provocado cerca de 6000 vítimas mortais e a destruição generalizada de algumas Ilhas do Arquipélago.

Apesar de desde o início do século XX se dispor de informação sísmica instrumental dos Açores, somente a partir dos anos 80, após o sismo de 1 de Janeiro do mesmo ano, a rede regional foi reformulada quer no número de estações, quer na sua qualidade, permitindo uma melhoria considerável na precisão das localizações e na detectibilidade da própria rede.

A análise da sismicidade de magnitude superior a 4.0 fornecida pela rede mundial (Figura 1) permite-nos afirmar que os epicentros dos sismos desta região se dispõem por uma estreita faixa coincidente, grosso modo, com o eixo de distribuição das ilhas. Esta faixa, habitualmente designada por "Dorsal da Terceira" ou "Eixo da Terceira", parte da Crista Média Atlântica (30°O), apresenta uma largura de ~180 km e possui orientação aproximada ONO-ESE; aos 27°O deflecte para NO-SE enquanto sofre um estreitamento para aproximada de ~80 km de largura; acaba por se extinguir a 24°O, ponto que marca o início da Falha GLORIA.

4. Mecanismos focais

Aceitando que o mecanismo de cada sismo é consequência da geodinâmica da região que envolve a fonte, é compreensível a importância que tem o estudo dos mecanismos focais dos sismos da região Açores para a caracterização da sua complexa geodinâmica. Nesse sentido tem vindo a ser realizados desde 1972 diversos estudos de fonte sísmica na região Açores-Gibraltar, estudos esses que se basearam nas polaridades e na modelação da forma das

ondas volúmicas. Estes estudos visam a caracterização da sismotectónica e geodinâmica desta região.

Em virtude do carácter tendencialmente moderado da actividade sísmica nos Açores, aliado à fraca cobertura azimutal dos eventos – desfavorável distribuição das estações relativamente aos epicentros –, a obtenção de mecanismos focais para esta zona revela-se frequentemente uma tarefa difícil. Daí que o número de soluções de mecanismo focal actualmente existentes seja relativamente reduzida quando comparada com o que se passa em Portugal Continental, ou mesmo em outras regiões do Globo. Consequentemente, a quase totalidade das soluções actualmente disponíveis correspondem aos eventos de maior magnitude (superior 5.5), e foram calculadas por instituições à escala global ou regional (NEIC- National Earthquake Information Center; USGS - U.S. Geological Survey; grupo de sismologia da Universidade de Harvard ou; EMSC - European-Mediterranean Seismological Centre), ou ainda em resultado de estudos baseados em dados regionais e telessísmicos. Importa destacar alguns destes estudos cujo contributo para a compreensão da geodinâmica desta região foram significativos.

Os primeiros trabalhos no âmbito do mecanismo focal foram feitos por McKenzie (1972). Foi com base nestes resultados e no conhecimento da sismicidade que estes autores estabeleceram os primeiros modelos geodinâmicos para a região Açores-Gibraltar.

Posteriormente, os trabalhos desenvolvidos por Grimison *et al.* (1988), baseados na modelação das formas de ondas de registos telesísmicos de longo período das estações World Wide Standardized Seismograph Network (WWSSN), permitiram obter o mecanismo focal do sismo de 1 de Janeiro de 1980 e pôr pela primeira vez em evidência o carácter complexo do processo de ruptura que caracteriza os sismos desta região.

Buforn *et al.* (1988) analisaram, entre outros, oito mecanismos focais de eventos localizados sobre a Plataforma dos Açores (onde constata diversidade

de mecanismos sem qualquer padrão identificável) e onze sismos sobre a CMA. (mecanismos de falha normal, e desligamento, tipicamente associados a uma dorsal em expansão). Estes resultados permitiram traçar um esboço mais detalhado do comportamento geodinâmico da área e determinar a respectiva taxa de deformação sísmica.

Com a finalidade de se estudar as réplicas do sismo de 1 de Janeiro de 1980, foi instalada nas ilhas Terceira, S. Jorge, Graciosa e Pico, uma rede telemétrica de estações sismográficas de curto período (Hirn *et al.*, 1980). A distribuição dos epicentros das réplicas definiu claramente um alinhamento na direcção N150°E que coincide com um dos planos do mecanismo focal do sismo de 1 de Janeiro de 1980 (o plano que corresponde à movimentação em desligamento esquerdo). As réplicas permitiram ainda o cálculo de um mecanismo composto o qual coincide com o do evento principal (Figura 2a).

Em 1992 realizou-se uma campanha de 27 dias na região dos Açores, que consistiu na recolha de dados de sismicidade natural utilizando-se uma rede de estações sísmicas submarinas. A distribuição dos epicentros permitiu a confirmação de que a sismicidade se distribui pela faixa correspondente ao eixo da Terceira (Miranda *et al.*, 1998). Uma análise mais detalhada da distribuição dos epicentros permitiu a identificação de alinhamentos com azimutes coincidentes com a orientação da falha do sismo de 1 de Janeiro de 1980. Durante o período de registo ocorreram dois eventos de magnitude moderada (magnitudes 3.2 e 3.4), com epicentros localizados próximo do sismo de 1 de Janeiro de 1980. A solução de mecanismo focal obtida (Figura 2b) é do tipo desligamento, com planos nodais similares aos do sismo de 1 de Janeiro de 1980 (Buforn *et al.*, 1988; Borges *et al.*, 2007).

Na sequência do sismo de 9 de Julho de 1998 foi instalada nas ilhas do Faial, Pico e S Jorge uma rede sismográfica constituída por 7 estações autónomas, com sismómetros de curto período. A boa cobertura azimutal propiciada por esta rede e a elevada dinâ-

mica das estações contribuíram para a localização, com elevada precisão, das réplicas deste sismo. Ao contrário do que sucedeu no sismo do dia 1 de Janeiro de 1980, neste caso os alinhamentos definidos pelas réplicas ocorrem segundo duas direcções preferenciais, aproximadamente coincidentes com as dos planos nodais do mecanismo do evento principal, não tendo sido deste modo possível identificar o plano de falha responsável pelo choque principal (Vales *et al.*, 2001). Dado o elevado número de réplicas deste sismo foi possível ainda calcular 18 mecanismos focais onde dominam claramente movimentação do tipo desligamento (Dias, 2005; Matias *et al.*, 2007) (Figura 2c).

Os primeiros estudos de sismos dos Açores recorrendo a modelos de fonte extensa foram realizados por Borges (2003) e por Borges *et al.* (2007). Foi um trabalho que só foi possível devido à existência de registos digitais: de longo período do sismo 01/01/1980 (Mw=6.8), obtidos pela rede GDSN; de banda larga do sismo de 27/07/1997 (Mw=5.9) obtidos pela rede mundial; - de banda larga do sismo de 09/07/1998 (Mw=6.0) obtidos pela rede mundial.

Dois importantes resultados deste trabalho (Borges *et al.*, 2007) são a obtenção do verdadeiro plano de falha por aplicação do efeito da directividade e a descrição da ruptura à custa de um modelo de falha extensa. O estudo da directividade aponta, quer para o sismo de 1980 quer para o sismo de 1998, para movimentação esquerda na direcção NNE-SSO. Os mecanismos focais permitem identificar, em cada região, o estilo de movimentação tectónica actual, possibilitando as correlações entre este tipo de informação geofísica e os dados de natureza geológica. Em alguns casos - para três eventos da região Açores estudados - é possível efectuar uma análise do processo de ruptura (Borges *et al.*, 2007), o que nos conduz à identificação das heterogeneidades na zona focal. As direcções principais do campo da tensão podem obter-se a partir dos mecanismos focais (direcções dos eixos P, e T dos mecanismos)

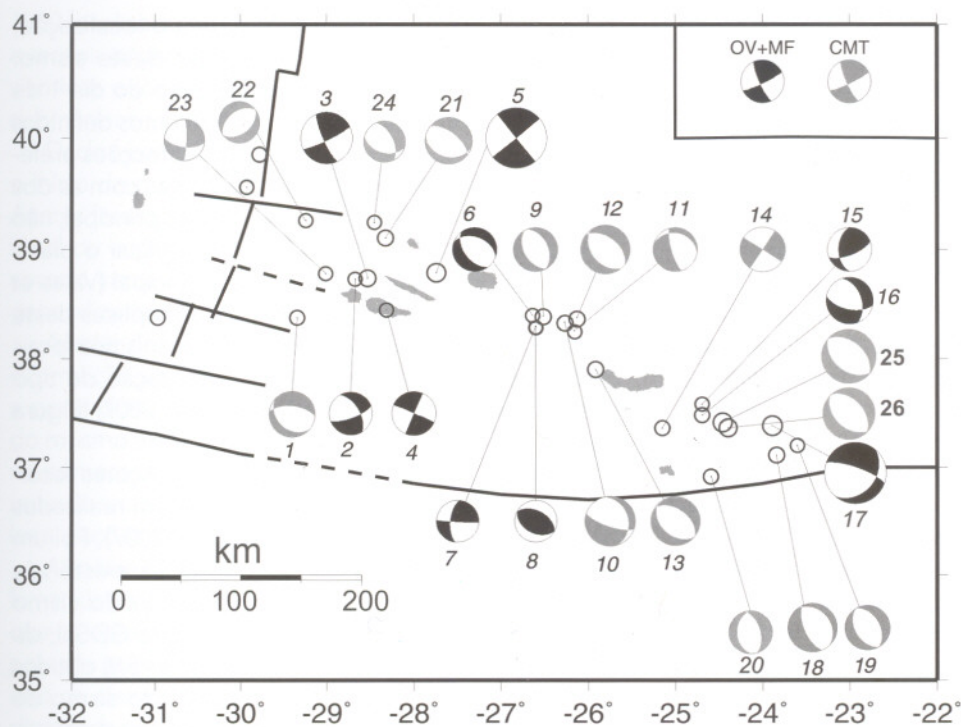


Figura 3

Mecanismos focais da região dos Açores. A preto: soluções obtidas por inversão das ondas volúmicas. A cinza: Mecanismos do Centroide (CMT). Os números correspondem aos mecanismos do Quadro II. A linha a cinza representa o limite da área sísmicamente activa.

e permitem definir a orientação média da tensão na região. Este dado, conjuntamente com o momento sísmico total libertado num dado período, obtido a partir do momento ou magnitude dos sismos, permite calcular a taxa de deformação sísmica, aferir os modelos de deformação baseados em métodos independentes e, em última análise, aprofundar o conhecimento da geodinâmica da região.

5. Deformação sísmica

No Quadro II encontram-se listados os mecanismos focais de magnitude ≥ 5 disponíveis para a região Açores, bem como os seus parâmetros e respectivas referências representados na Figura 3. Os mecanismos a preto foram obtidos a partir da modelação das ondas volúmicas (OV) e das polaridades (MF) e os mecanismos a cinzento são obtidos a partir

do método do centroide (CMT). Constata-se, pela análise da referida Figura, que apesar do número de mecanismos ser reduzido, entre o ponto triplo e a ilha Terceira, que designamos por Zona I, existe um claro domínio de mecanismos do tipo desligamento com planos NNO-SSE e NNE-SSO, ao passo que entre esta última e a falha GLORIA (Zona II) o mecanismo predominante é o do tipo normal com planos de orientação NO-SE.

Como se compreende, a classificação do mecanismo focal médio para uma região, salvo raras excepções, é difícil de estabelecer, já que a generalidade dos eventos apresenta componentes mistas. Para contornar o problema para esta região recorreu-se ao cálculo do tensor momento sísmico total para a área, definido como a soma dos tensores momento sísmico das soluções individuais:

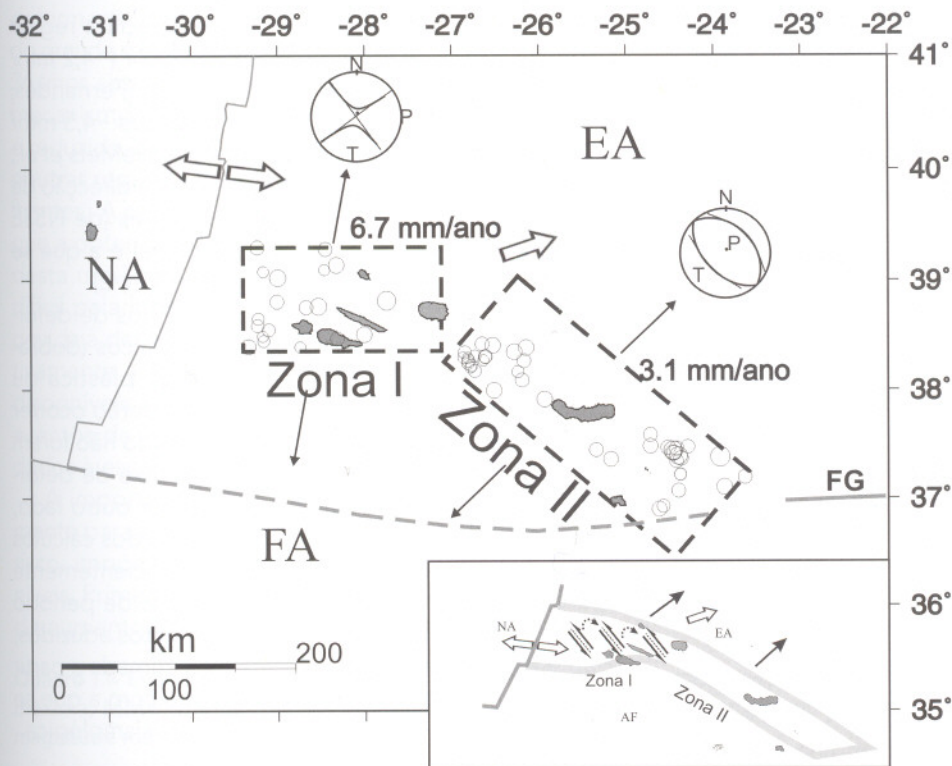


Figura 4

Sismotectónica da região dos Açores. As setas a branco representam o movimento relativo previsto pelo modelo Nuvel-1A. As setas estreitas representam os eixos T dos mecanismos correspondentes aos tensores momento sísmico calculados. Os números correspondem à velocidade horizontal obtida a partir dos dados sísmológicos. O esquema no canto inferior direito representa um modelo hipotético de deformação distribuída para a região.

$$M_{ij}^{total} = \sum_{k=1}^N M_o^k m_{ij}^k \quad (1)$$

onde N é o número de sismos, M_o o momento escalar de cada evento e m_{ij}^k os tensores momento sísmico individuais. Sismos de grande magnitude, com elevados valores de M_o , contribuem para a estimativa do tensor momento sísmico. A partir das soluções do Quadro II e tendo em conta a equação (1), foram calculadas as componentes M_{ij} para as duas zonas que lhe correspondem os mecanismos representados na Figura 4: na Zona I, o tensor momento sísmico total obtido corresponde a um mecanismo do tipo desligamento com eixos de compressão horizontal e tracção orientados, respectivamente, nas direcções E-W e N-S e uma componente "não duplo par" de

8%. Para a Zona II, o tensor momento sísmico total corresponde a um mecanismo de falha normal com eixos de tracção orientados segundo NE-SW (orientação Normal ao eixo do Eixo da Terceira), e uma componente "não duplo par" de 14%. A reduzida percentagem de afastamento de ambos os tensores em relação à solução "duplo par" valida a representatividade dos mecanismos de cada zona, evidenciando claramente a diferença de mecanismo de facturação e, eventualmente, de regime de tensão.

Assiste-se, pois, a uma rotação da tensão e compressão da Zona I para a Zona II facto que está em clara concordância com os resultados obtidos por Lourenço *et al.* (1998) relativamente às características morfológicas do fundo oceânico.

Tomando como ponto de partida a sismicidade e os mecanismos focais, foi calculada a taxa de defor-

mação sísmica para cada uma das Zonas I e II. Para esse fim foram seleccionados os sismos de magnitude $M_s \geq 4.0$ que tiveram lugar na região durante o período compreendido entre 1923 e 2007. A taxa de deformação sísmica foi estimada a partir da expressão (2) (Bezzeghoud et al., 1999; Borges et al., 2007):

$$\dot{\Delta u} = \frac{\sum M_o^i}{\mu LWT}, \quad (2)$$

onde M_o é o momento sísmico escalar do sismo, μ coeficiente de rigidez do meio, LW é a área da Falha e T o período a que respeitam os dados. Relativamente aos sismos para os quais não existe informação directa sobre o momento sísmico escalar utilizou-se uma fórmula de conversão M_s para M_o adequada à região em estudo (Borges, 2003). No Quadro III são apresentados, para as duas zonas, os parâmetros utilizados no cálculo da taxa de deformação sísmica a partir da equação (2).

A partir destes resultados e do tensor momento sísmico pode concluir-se que a taxa de deformação sísmica para as Zonas I e II é de 6.7 mm/ano e 3.1 mm/ano, respectivamente (Figura 4), o que corresponde na Zona II, a um movimento em distensão horizontal com uma taxa de 2.3 mm/ano na direcção N46°E. Na Zona I a relação entre a taxa de deformação e o movimento relativo entre placas é mais difícil de estabelecer, já que nesta região ocorre essencialmente movimentação do tipo desligamento. Se considerarmos a hipótese de que a Zona I representa uma extensa área de deformação confinada pelas placas EA e AF, na qual o movimento relativo entre estas placas é acomodado por rotação de blocos (segundo o modelo de McKenzie e Jackson (1986), então poderemos concluir que na Zona I a deformação corresponde a uma extensão na direcção N53°E (direcção inferida a partir do tensor momento sísmico da região).

A taxa de expansão média para toda a região (Zonas I e II) é 4.2 mm/ano, igual ao valor (~4,2 mm/ano) obtido a partir de dados de GPS (Fernandes, 2004; McClusky et al., 2003), e similar aos ~4,5 mm/ano fornecidos pelo modelo Nuvel-1A (DeMets et al., 1990). Consta-se uma diferença entre a direcção de extensão dada pelos mecanismos focais (de N53E e N46E na Zona I e II, respectivamente) e a que se obtém a partir do modelo Nuvel-1A (N71°E).

Há que ter em conta que outros tipos de deformação originada por processos assísmicos (dobramentos, espessamento, deformação plástica ou processos lentos de deslizamento) poderão ocorrer sobre a Plataforma dos Açores, e contudo não foram considerados, o que significa que a taxa de deformação poderá estar sub-estimada. Por outro lado, o catálogo sísmico que está na origem dos cálculos aqui apresentados poderá não ser suficientemente alargado para ter em conta os eventos de período de recorrência elevado. Pelos argumentos aduzidos, não é espectável que a deformação estimada a partir das observações geodésicas coincida com a que se obteve a partir dos dados de natureza sismológica.

6. Conclusões

A região dos Açores pode ser considerada uma região de sismicidade moderada. A sua localização próxima do ponto triplo associado a uma dorsal lenta confere-lhe essa característica. A compreensão do fenómeno sísmico dos Açores exige o estabelecimento de um modelo geodinâmico que permita explicar satisfatoriamente, às diferentes escalas espacio-temporais, todos os fenómenos observáveis, sejam eles de natureza sísmica, magmática, geo-morfológica geodésica e electromagnética. O estudo da fonte dos sismos ocorridos apresenta-se como a forma mais directa para atingir esse objectivo por várias ordens de razão: permite a identificação e qualificação das falhas; permite caracterizar o campo de tensão e consequentemente estimar taxas de

deformação. Apesar da importância reconhecida e do grande mérito dos trabalhos realizados nos últimos 36 anos sobre a temática, o número de soluções de mecanismo focal actualmente existentes da região é reduzido quando comparado com o que se passa noutras regiões do Globo com características semelhantes. A principal razão desta escassez deve-se a que a obtenção dos mecanismos focais dos eventos desta região se revela frequentemente uma tarefa difícil pela limitada cobertura azimutal dos eventos devida à desfavorável distribuição das estações relativamente aos epicentros. As soluções actualmente disponíveis correspondem quase exclusivamente a eventos de maior magnitude, capazes de produzir dados à escala global.

A importância deste conhecimento, nomeadamente para a procura de medidas minimizadoras de risco, impõe que se desenvolvam esforços a vários níveis. Primeiro conseguir melhores dados por meio do aumento da capacidade de observação sísmica

na região Açores, depois fazer um esforço de investigação no sentido do aperfeiçoamento dos modelos sismotectónicos e geodinâmicos e no desenvolvimento da capacidade de simular cenários tendo em vista previsão dos movimentos fortes do solo e suas consequências para o edificado.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito dos projectos PTDC/CTE-GIN/82704/2006, RISTE CGL6-10311-C03-01/BTE, Acções Integradas Luso-Espanholas CRUP/E-112/08 e HP2007-089 e contou com o apoio do Centro de Geofísica Évora (Projecto SEISMOLITOS). Agradece-se a todas as instituições que contribuíram com os dados para este estudo (IRIS, IM, e USGS).

Quadro I – Eventos Históricos e Instrumentais mais sentidos na Região Açores (Nunes *et al.* (2001)). I_0 = Intensidade máxima, MM= Mercalli Modificada, mb= magnitude das ondas internas, Ms= magnitude ondas superficiais, Mw= magnitude momento

Data (dd/mm/aaaa)	Latitude	Longitude	I_0 (MM)	Magnitude	Localização
22/10/1522	37.7°N	25.4°W	X	-	S. Miguel
24/05/1614	-	-	IX	-	Terceira
09/07/1757	38.6°N	28.0°W	XI?	-	S. Jorge
21/01/1837	-	-	IX?	-	Graciosa
15/06/1841	-	-	IX	-	Terceira
31/08/1926	38.5°N	28.6°W	X	-	Faial
08/05/1939	37.0°N	24.5°W	VII	7.0-7.1	S. Maria
26/06/1952	37.7°N	25.3°W	VII	-	S. Miguel
26/06/1952	38.7°N	28.2°W	VIII	5.5 mb	S. Miguel
13/05/1958	38.6°N	28.8°W	VIII/IX	-	Faial
21/02/1964	38.7°N	28.2°W	VIII	5.5 mb	S. Jorge
01/01/1980	38.8°N	27.8°W	VIII/IX	7.2 Ms	Terceira
09/07/1998	38.7°N	28.5°W	VIII/IX	6.2 Mw	Faial

Quadro II – Parâmetros dos mecanismos focais dos Açores. CMT = Tensor momento do centroide (Harvard); BUF= Buforn et al., 1988; BOR= Borges et al., 2007. As magnitudes referenciadas por, w e s indicam, respectivamente, M_w e M_s

Nº	Data (d/m/ano)	Lat (°N)	Lon (°E)	Prof (km)	M	Mo ($\times 10^{17}$ Nm)	Strike	Dip	Rake	REF.
1	20/01/1993	38.39	-29.34	15	5.4w	1.20	132	33	-59	CMT
2	11/12/1973	38.74	-28.67	15	5.0w	0.34	329	58	-20	BUF
3	09/07/1998	38.65	-28.63	7	6.0w	14	153	85	6	BOR
4	23/11/1973	38.46	-28.31	15	5.1s	2.0	23	90	-179	BUF
5	01/01/1980	38.81	-27.78	7	6.8w	190	149	85	-2	BOR
6	28/06/1997	38.41	-26.64	15	5.1w	0.58	290	44	-114	CMT
8	20/04/1968	38.30	-26.60	15	4.6w	0.09	117	42	89	BUF
7	06/09/1964	38.30	-26.60	15	5.1w	0.54	185	62	3	BUF
9	27/06/1997	38.33	-26.68	7	5.8w	7.0	290	44	-114	BOR
10	21/11/1988	38.34	-26.27	15	5.9w	7.10	345	29	-37	CMT
11	27/06/1997	38.26	-26.16	15	5.2w	0.62	284	27	-147	CMT
12	02/12/1981	38.38	-26.13	15	5.6w	3.20	141	42	-80	CMT
13	21/01/1989	37.92	-25.92	15	5.7w	3.40	131	41	-87	CMT
14	16/10/1988	37.38	-25.16	15	5.3w	0.89	303	90	180	CMT
15	05/07/1966	37.60	-24.70	18	5.0w	0.41	180	48	30	BUF
16	04/07/1966	37.50	-24.70	10	5.5w	1.90	341	49	-42	BUF
17	08/05/1939	37.40	-23.90	15	7.1s	199	41	35	-154	BUF
18	09/03/1996	37.13	-23.85	15	5.7w	3.80	319	28	-106	CMT
19	09/12/1991	37.22	-23.61	15	5.2w	0.82	330	45	-90	CMT
20	09/09/1984	36.93	-24.60	12	5.3w	0.95	178	37	-79	CMT
21	26/06/1989	39.11	-28.32	15	5.8w	5.40	105	32	-110	CMT
22	23/09/1989	39.27	-29.24	15	5.1w	0.44	233	45	-90	CMT
23	01/08/2000	38.79	-29.01	15	5.1w	0.51	97	62	-170	CMT
24	30/11/2002	39.25	-28.45	15	5.1w	0.52	106	45	-129	CMT
25	05/04/2007	37.45	-24.62	12	6.2w	41	129	44	-89	CMT
26	04/11/2007	37.40	-24.39	12	6.0w	11	133	44	-87	CMT

Quadro III – Taxa de deformação calculada a partir de (2) para as duas zonas (I e II) baseada nos dados da Tabela II - T=84 anos, $\mu = 3.3 \times 10^{11}$ dyne cm^{-2} ; o valor de W é escolhido tendo em conta a inclinação do plano de falha e admitindo que este plano deverá ocupar toda a camada sísmica (10 km)

Zonas	L(km)	W(km)	M_0 ($\times 10^{16}$ Nm)	Dip (°)	Taxa de deformação sísmica (mm/ano)
Zona I	172	10	22	90	6.7
Zona II	250	14	30	45	3.1