

# Exumação do manto na cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial: Protursão de serpentina, megamullion ou compressão tectônica ?

Kenji Freire Motoki LAGEMAR/UFF, Akihisa Motoki DMPI/UERJ; Susanna Eleonora Sichel LAGEMAR/UFF, Thomas Ferreira da Costa Campos DG/UFRN

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

## Abstract

This paper shows tectonic process for the oceanic mantle exhumation of the Saint Peter and Saint Paul peridotite ridge, Equatorial Atlantic Ocean. The serpentine protrusion is incompatible with low-grade serpentinization and high Bouguer anomaly of the North Elevation. The megamullion is inconsistent with mylonitic texture, absence of gabbro, and accidental morphology. The tectonic compression is compatible with all of the observations, as conjugated tectonic fractures, focal mechanism of the earthquakes, east-west direction of the peridotite ridge, low-degree serpentinization, and intense active

uplift, being the most plausible model. The span of the western-most transform fault is not exactly parallel to the plate motion, which generates near north-south compression. In this sense, this peridotite ridge is a pressure-ridge formed by right lateral strike-slip displacement of the Saint Paul transform fault.

## Introduction

A cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, na região central do Oceano Atlântico Equatorial, tem direção leste-oeste, com 100 km de comprimento, 25 km de largura e 3500 m de altura relativa. O Arquipélago de São Pedro e São Paulo corresponde ao topo de este maciço, que é constituído por rochas ultramáficas do manto oceânico, sendo a única localidade do Oceano Atlântico em que ocorre a exposição do manto acima do nível do mar. A cadeia peridotítica está em soerguimento tectônico ativo o mais intenso do Brasil, com uma taxa de 1.5 mm/ano (Motoki, A. et al., 2009; Campos et al., 2010).

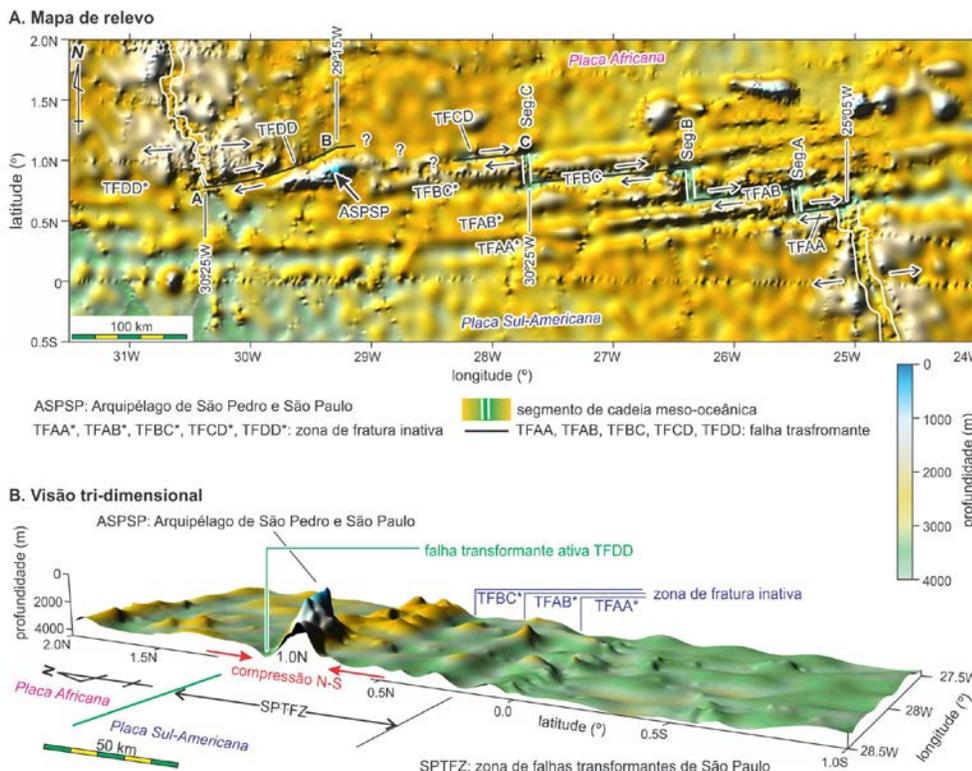


Figura 1. Cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, com base na batimetria de dados de satélite de TOPEX ver. 15.1. A) Mapa de relevo; B) Visão tri-dimensional.

A gênese dessa está em discussão: Por que não há cobertura da crosta oceânica; Qual é o mecanismo da a exumação do manto; Como é que a cadeia peridotítica foi soerguida; O que é a força motriz do tectônico; Por que se gera esta força motriz. As pesquisas realizadas vêm acumulando importantes dados geológicos e geofísicos.

Este trabalho apresenta a comparação entre as idéias tectônicas existentes sobre a gênese da cadeia peridotítica, apresentando o modelo mais plausível.

### Dados topográficos e gravimétricos

As análises da órbita de satélites artificiais fornecem informações de anomalia gravimétrica ar-livre. Utilizando os dados obtidos por batimetria e gravimetria de navios como referências primárias (*benchmark*), pode-se elaborar mapas batimétricos e gravimétricos que cobre uma grande área de região oceânica (Smith & Sandwell, 1997). A partir de 2005, foi incorporada uma elevada quantidade de dados de navios na elaboração dos mapas, junto com as inovações técnicas (Sandwell & Smith, 2009). O TOPEX ver. 15.1 e Gravity Anomaly ver. 20 possuem resolução aparente respectiva de 0.9 km e 1.85 km, cobrindo a faixa entre 72°N e 72°S. A resolução vertical estimada é 50 m. O EGM2008 possui 4.5 km de resolução aparente.

O cálculo de anomalia Bouguer simples e a confecção dos diagramas de interpretação gravimétrica foram realizados pelo software original Schwelt ver. 1.0, adotando-se a densidade da crosta como 2.65 g/cm, da água do mar como 1.03 g/cm e o constante de gravidade como  $6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2\text{kg}$ .

Os dados geológicos, petrológicos e geotectônicos são originados de trabalhos anteriores e as observações inéditas dos autores.

### Características petrográficas

As rochas constituintes no topo da cadeia peridotítica são expostas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Campos et al., 2003; Sichel et al., 2008). As rochas dos taludes laterais foram coletadas pelos mergulhos profundos (Hekinian et al., 2000). Essas são peridotito do manto oceânico. Gabro e basalto são limitados.

Na parte central da cadeia peridotítica, encontra-se um graben de direção leste-oeste, chamado de Graben Longitudinal. O bloco norte deste, denominado Elevação Norte, é constituído por peridotito milonítico com intensa deformação plástica (Figure 3A), que possuem porfiroclastos de olivina, ortopiroxênio e clinopiroxênios. Esta rocha intercala níveis de kaersutíto.

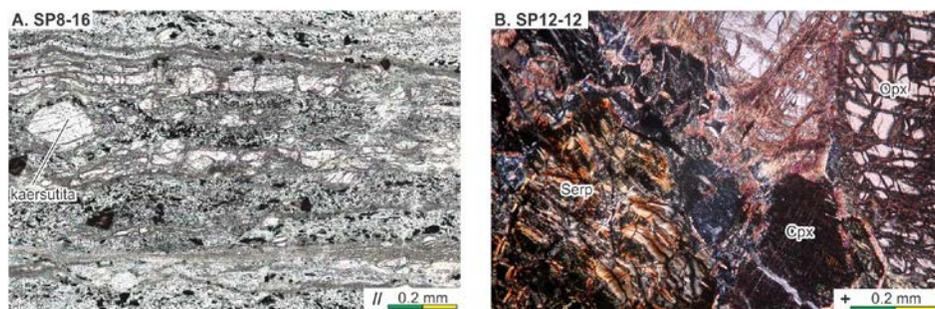


Figure 3.

Fotomicrografias das amostras coletadas pelos mergulhos profundos por submersível científico Nautile: A) Peridotito milonítico da Elevação Norte, nicos paralelas; B) Peridotito não deformado da Elevação Sul, nicos cruzados. As fotos são originadas de Sichel et al. (2012). Serp - serpentinita; Opx - ortopiroxênio; Cpx - clinopiroxênio.

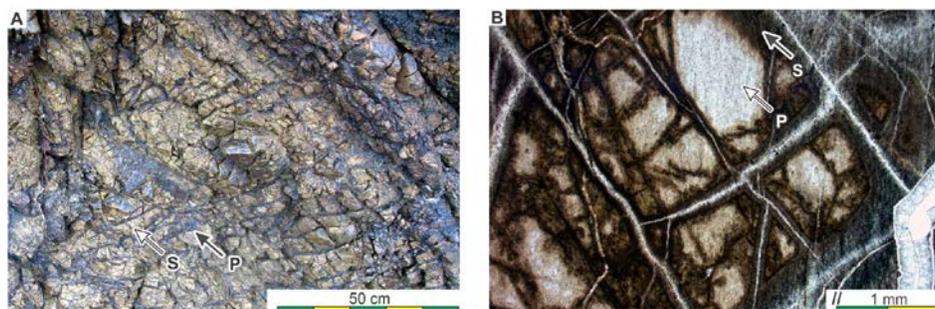


Figure 4.

Estruturas *Kernel* do peridotito milonítico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo: A) Estrutura macroscópica no afloramento. B) Textura na lâmina delgada, nicos paralelos; As fotos são originadas de Sichel et al. (2012). P - peridotito não serpentinitizado (parte clara); S - peridotito serpentinitizado (parte escura).

Apesar de que as rochas ultramáficas estarem em contato com a água do mar, a serpentinitização o peridotito milonítico é de baixo grau. Na Ilha Belmonte do Arquipélago, ocorre um afloramento de peridotito milonítico não serpentinitizado. As rochas em torno desse apresentam serpentinitização parcial, demonstrando estrutura *Kernel* (Figure 4).

Por outro lado, rochas constituintes do bloco sul do Graben Longitudinal, chamado de Elevação Sul, são peridotito serpentinitizado. A deformação plástica é de baixo grau com eventual presença de porfiroblastos de olivina e piroxênios (Figure 3B). Tais rochas mantélicas são originadas de manto superficial de pequena

profundidade, que ocorrem nas zonas de espalhamento amagmático (*amagmatic spreading*) como constituintes de *megamullions*.

### Soerguimento ativo

A Elevação Norte da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo é caracterizada por escarpas altas e taludes íngremes. O flanco norte tem uma declividade de 45° e o franco sul possui a escarpa de 1500 m de altura relativa. A morfologia é extremamente acidentada sugere um tectonismo muito intenso e recente.

As análises morfológicas para o Arquipélago de São Pedro e São Paulo com o auxílio da técnica de seppômen (Motoki A. et al., 2008; Couto et al., 2010; Aires et al., 2012) revelaram a plataforma de abrasão marinha do Flandriano, de cerca de 6000 anos atas, em uma altitude de 9 m, indicando soerguimento de 1.5

mm/ano nos últimos 6000 anos (Motoki A. et al., 2009). Esta taxa está de acordo com as datações  $^{14}\text{C}$  para algas calcárias da Ilha Belmonte (Campos et al., 2010).

### Gravimetria de satélite

A Figura 5 apresenta anomalias ar-livre e Bouguer para a área em torno da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, segundo EGM2008. A cadeia peridotítica apresenta altas anomalias ar-livre e Bouguer. Esta observação sugere que a cadeia peridotítica é constituída por rochas de alta densidade, corroborando as observações geológicas e petrográficas.

O diagrama de interpretação gravimétrica em torno da cadeia peridotítica (Figura 6) indica que o maciço é sustentado pela força tectônica de soerguimento ativo e/ou fimeza mecânica do embasamento. A compensação isostática é apenas secundária.

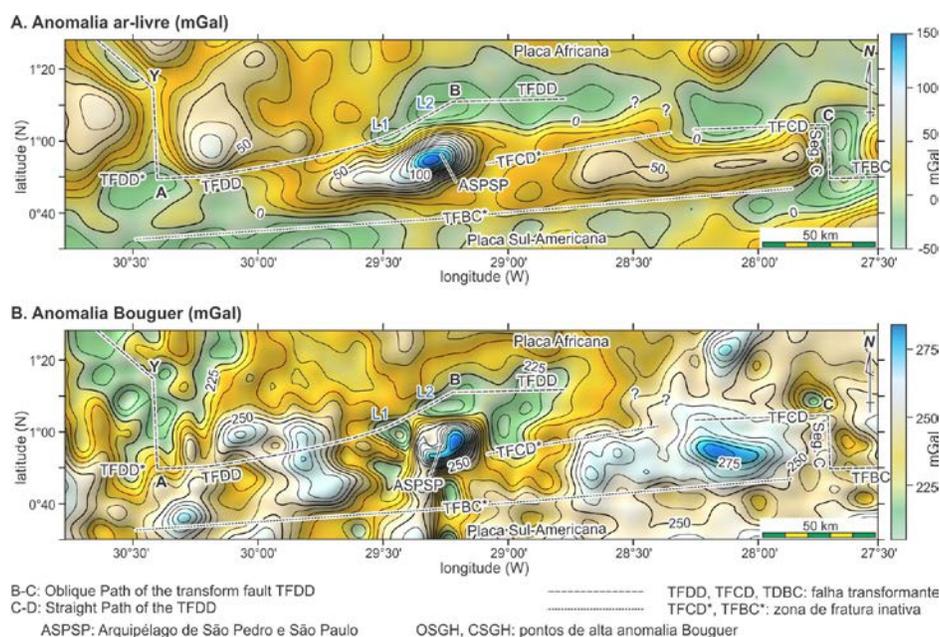


Figura 5.

Mapa de anomalias gravimétricas para o limítrofe noroeste da zona de falhas transformantes de São Paulo conforme EGM2008: A) Ar-livre; B) Bouguer. Seg. C é um segmento da cadeia meso-oceânica, TFBC, TFCD e TFDD são falhas transformantes e TFBC\*, TFCD\* e TFDD são zonas de fratura inativa.

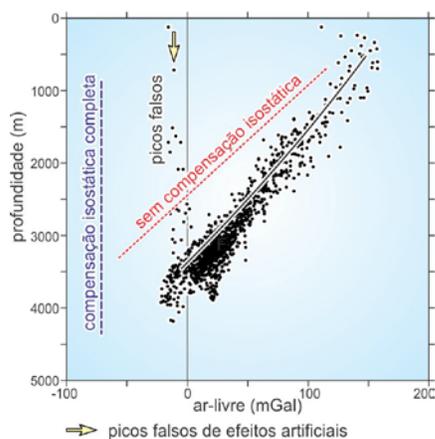


Figura 6. Diagrama de interpretação gravimétrica para a área da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo.

### Compressão quase norte-sul

As fraturas tectônicas observadas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo mostram um sistema conjugal indicativo de compressão quase norte-sul tendendo ligeiramente a NNW-SSE. (Campos et al., 2013; Figura 7). O mecanismo focal de alguns terremotos que ocorreram entre 1971 e 1988 (Wolfe et al., 1993) apresentam a compressão da mesma direção (Figura 8).

### Modelos propostos por trabalhos anteriores

Existem três modelos até hoje propostos para gênese tectônica da cadeia peridotítica: 1) Protursão de serpentina (Bonatti, 1976); 2) Megamullion (Sichel et al., 2011); 3) Tectonismo de compressão (Sichel et al., 2012; Campos et al., 2013).

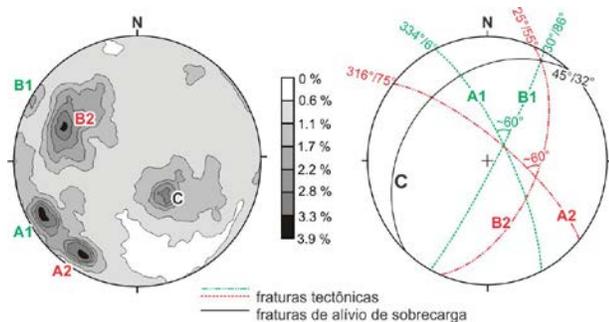


Figura 7. Projeção estereográfica das 5438 fraturas medidas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Campos et al., 2013).

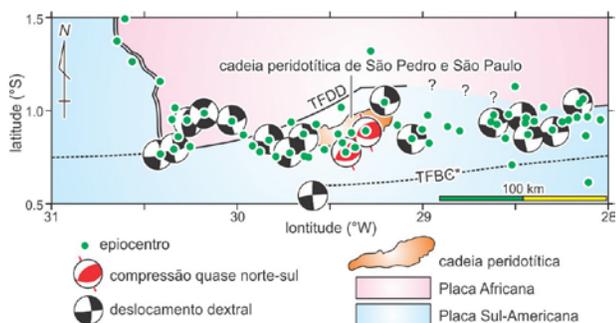


Figura 8. Epicentros e mecanismos focais para os terremotos que ocorreram de 1971 a 1988 (Wolfe et al., 1993). O contato das placas oceânicas é proposto pelo presente, trabalho modificado de Sichel et al. (2012).

A protursão de serpentina explica que o soerguimento ocorreu pela diferença densimétrica entre o peridotito quase totalmente serpentinizada e da crosta oceânica. Entretanto, as amostras das ilhas e dos mergulhos profundos apresentam serpentinização limitada. Portanto, a cadeia peridotítica é constituída principalmente por peridotito não serpentinizada. A alta densidade indicada pela alta anomalia Bouguer e a sustentação dinâmica do maciço sem equilíbrio isostático. Além disso, as rochas ultramáficas tem textura milonítica e são originadas de uma profundidade grande do manto oceânico onde ocorre intensa deformação plástica. Essas observações são desfavoráveis ao modelo de protursão de serpentina.

A maioria das exposições *in-situ* do manto oceânico é originada de espalhamento amagmático (Tucholke & Lin, 1994; Sauter et al., 2004; Schouten et al., 2010). A ausência da cobertura de crosta oceânica é devida à escassez do magmatismo. No contato divergente das placas, ocorre a falha normal de baixo ângulo denominada falha de descolamento. O manto exumado está presente no bloco inferior desta falha. Este tipo de maciço da exumação do manto, denominado megamullion (Blackman et al., 1998; Tucholke et al., 1998; 2001; Ohara et al., 2001), tem forma de carapaça de tartaruga, com uma altura de 1000 m (e.g. Blackman et al., 1998). Na superfície, ocorrem pequenas elevações e depressões lineares paralelas à falha transformante, a estrutura chamada de corrugação. Megamullion é constituído principalmente por peridotito serpentinizado e

gabro. O serpentinito é originado do manto raso e possui muito pouca deformação plástica. O gabro apresenta eventualmente textura bandada.

As rochas da Elevação Norte têm forte deformação plástica e baixo nível de serpentinização, indicando sua origem profunda de zona dúctil abaixo da falha transformante antiga. No maciço, não há presença macia de gabro. Além disso, a cadeia peridotítica localiza-se longe do contato divergente das placas. A elevação morfológica é alta e estreita. Essas observações são desfavoráveis ao modelo de megamullion, apesar de que a zona de falhas transformantes de São Paulo é caracterizada por manto frio. Por outro lado, as rochas peridotíticas serpentinizadas e não deformadas da Elevação Sul possuem aspectos similares àquelas de megamullion, sendo de origem .

### Compressão tectônica

O modelo do tectonismo de compressão é baseado nas fraturas tectônicas conjugais e mecanismo focal dos terremotos. Ambos indicam que o eixo de compressão é quase norte-sul, com ligeira tendência de WNW-SES. A direção leste-oeste da cadeia peridotítica, a alta declividade dos taludes laterais e o intenso soerguimento tectônico são favoráveis a este modelo. O baixo grau de serpentinização da Elevação Norte e a baixa contribuição de compensação isostática são devidos ao intenso soerguimento ativo. A saliência morfológica da cadeia peridotítica é sustentada pelo soerguimento ativo. Este modelo explica todas as observações geológicas e geofísicas obtidas, sendo idéia a mais consistente.

Entretanto, na zona de falha transformante de São Paulo, o tectonismo prevalecente é deslocamento transcorrente sinistral e a compressão não ocorre em condição normal. Conforme o vale de rifte de  $30^{\circ}25'W$  e os breakaways, a direção de movimento da Placa Africana relativa à Placa Sul-Americana é  $N85^{\circ}W$ , que é paralela às falhas transformantes e zonas de fratura inativa desta área. Entretanto, o trecho final da falha transformante no limítrofe noroeste da zona de falha, o trecho oblíquo da TFDD (Figura 9), não é exatamente paralelo ao movimento das placas, havendo discrepância direcional máxima de  $20^{\circ}$ .

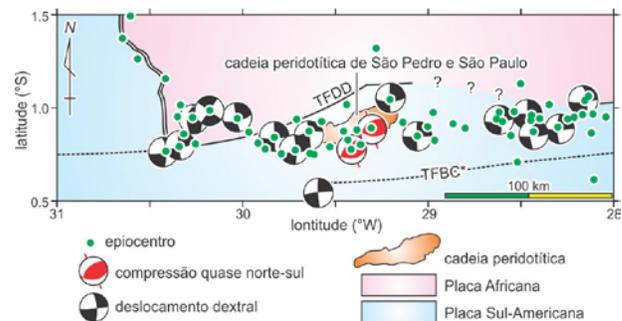


Figura 9. Interpretação geotectônica da morfologia submarina para a área em torno da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo.

Quando a direção da falha transcorrente não é paralela ao movimento dos dois blocos, ocorre o esforço de compressão ou de distensão em direção perpendicular à falha transcorrente. Os relevos morfológicos positivos e negativos gerados por este fenômeno são denominados, respectivamente, cadeia de pressão (*pressure-ridge*) e baixada de distensão (*pull-apart lowland, sag pond*; Figura 10). Os fenômenos são conhecidos em várias falhas transcorrentes ativas.

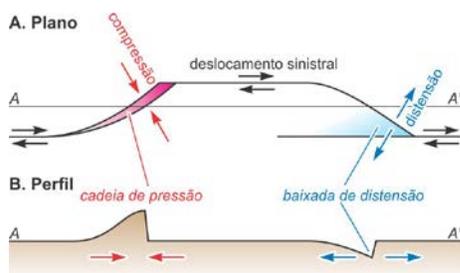


Figura 10. Cadeia de pressão e baixada de distensão originados de movimento dextral da falha transcorrente.

O eixo do esforço de compressão da cadeia peridotítica, evidenciado pelas fraturas tectônicas, mecanismo focal e direção da cadeia peridotítica é quase norte-sul tendendo ligeiramente a WNW-ESSE, que é perpendicular ao trecho oblíquo da TFDD. Desta forma, a cadeia peridotítica é considerada como uma cadeia de pressão formada pelo movimento transcorrente dextral da falha transformante TFDD.

Dentre os conhecimentos dos autores, a cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo é o primeiro exemplo do maciço de exumação do manto oceânico que é originado de tectonismo da cadeia de pressão.

### Conclusões

Os dados geológicos e geofísicos disponíveis levam os autores às seguintes conclusões sobre a gênese tectônica da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial.

1. O modelo de protusão de serpentina é incompatível com o baixo grau de serpentinização peridotito milonítico e a alta anomalia gravimétrica Bouguer da Elevação Norte. A cadeia peridotítica está longe de estar em compensação isostática. Além disso, o modelo não explica a compressão norte-sul evidenciada pelas fraturas conjugais e mecanismo focal dos terremotos.

O modelo de megamullion é inconsistente com o alto grau de deformação plástica da rocha peridotítica representada pela textura milonítica e o baixo grau de serpentinização das rochas constituintes da Elevação Norte e a ausência de gabro na cadeia peridotítica. A localização geotectônica e características morfológicas também são incompatíveis. Por outro lado, o peridotito não deformado da Elevação Sul é similar ao serpentinito constituinte de megamullions.

3. O modelo de tectonismo de compressão é compatível com todas as observações geológicas e geofísicas disponíveis, tais como as fraturas tectônicas conjugais, o mecanismo focal dos terremotos, a direção leste-oeste e a morfologia acidentada da cadeia peridotítica, o baixo grau de serpentinização e o intenso soergimento ativo que sustenta dinamicamente a elevação morfológica da cadeia peridotítica. Desta forma, esta idéia é a mais aplausível.

4. A compressão tectônica é originada da direção excepcional da falha transformante que não é exatamente paralela ao movimento relativa das placas. Neste sentido, a cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo é considerada como uma cadeia de pressão formada pelo movimento transcorrente dextral da Falha Transformante de São Paulo.

### Agradecimento

Os autores agradecem à CNPq, FAPERJ e PETROBRAS pelos apoios financeiros para equipamentos da informática utilizados, custeios para os trabalhos de campo e materiais de consumo. São gratos também à SECIRM para a logística ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

### Reference

- Bonatti E., 1976. Serpentine protrusions in the oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 32, 107-113.
- Campos, T.F.C., Virgens-Neto, J., Amorim, V.A., Hartmann, L.A., Petta, R.A., 2003. Modificações metamórficas das rochas milonitizadas do complexo ultramáfico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial. *Geochimica Brasiliensis* 17, 81-90
- Campos, T.F.C., Bezerra, F.H.R., Srivastava, N.K., Vieira, M.M., Vita-Finzi, C., 2010. Holocene tectonic uplift of the St Peter and St Paul Rocks (Equatorial Atlantic), consistent with emplacement by extrusion. *Marine Geology*. 271, 177-186.
- Campos, T.F.C., Motoki, A., Motoki, K.F., Sichel, S.E., Vargas, T., Szatmari, P., 2013. Tectonic fracture system of the Saint Peter and Saint Paul Rock, Equatorial Atlantic Ocean, and its relation to the north-south compression and active uplift tectonism. *Geofísica Internacional*, Ciudad del Mexico. (submission)
- Hekinian, R., Juteau, T., Gracia, E., Udintsev, G., Sichel, B., Sichel, S.E., Apprioual, R., 2000. Submersible observations of Equatorial Atlantic Mantle: The St. Paul Fracture Zone region. *Marine Geophysical Research*, 21: 529-560.
- Motoki, A., Sichel, S.E., Campos, T.F.C., Srivastava, N.K., Soares, R.S., 2009. Present-day uplift rate of the Saint Peter and Saint Paul Islets, Equatorial Atlantic Ocean. *REM-Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, 62-3, 331-342.
- Sichel, S.E., Esperança, S., Motoki, A., Maia, M., Mello, S.L.M., Horan, M.F., 2008. Geophysical and geochemical indications for existence of cold upper

- mantle beneath the Equatorial Atlantic Ocean. *Revista de Sociedade Brasileira de Geofísica*. 26-1, 69-86.
- Sichel, S.E., Esperança, S., Motoki, A., Maia, M., Horan, M.F., Szatmari, P., 2011. Cold upper mantle evidences of the abyssal peridotite of Saint Peter Saint Paul Rocks and adjacent areas, Equatorial Atlantic Ocean: Fossil slab beneath the Gondwana? Abstracts of Gondwana 14. Búzios, Brazil. 260.
- Sichel, S.E., Motoki, A., Campos, T.F.C., Angel-Amaya, J., Vargas, T., Maia, M., Baptista Neto, J.A., Koga, M.S., Motoki, K.F., Simões, L.S.A., Gorini, M.A., Szatmari, P., 2012. Origin and characterization of the mantle rocks of the Saint Peter and Saint Paul Rocks, Equatorial Atlantic Ocean. *Boletim de Geociências da Petrobras*. (in press)
- Smith, W.H., Sandwell, D.T., 1994. Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry. *Journal of Geophysical Research*, 99-B2, 21803-21824.