



Soerguimento ativo da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, como a consequência de direção da falha transformante São Paulo oblíqua ao seu movimento transcorrente

Akihisa Motoki, DMPI/UERJ

Susanna Eleonora Sichel, LAGEMAR/UFF

Marcia Maia, IUEM, França

Thomas Ferreira Costa Campos, DG/UFRN

Kenji Freire Motoki, LAGEMAR/UFF

Copyright 2010, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

The Saint Peter Saint Paul Peridotite Ridge is present at the Equatorial Atlantic Ocean, which is 100km long, 20km wide, and 3800m, and composed of abyssal mantle peridotite. The geomorphologic analyses for the wave-cut bench and the ^{14}C datings for coral fossils of the Saint Peter Saint Paul Rocks at the top of the peridotite ridge indicate the active tectonic uplift with annual rate of 0.7 mm in last 6000 years. The preliminary results of the tectonic fracture analyses suggests the compression stress in direction N-S to NNW-SSE. The peridotite ridge is present close dot the Saint Paul transform fault. The span between $29^{\circ}20'W$ to $30^{\circ}20'W$ of this fault has strike of about $N75^{\circ}E$, which is oblique to its strike-slip movement, $N86^{\circ}E$. It is considered that the N-S compression is generated by the above-mentioned direction discrepancy. That is, the Saint Peter Saint Paul peridotite ridge is considered to be a pressure-ridge of the Saint Paul transform fault.

Keyword: Saint Peter Saint Pual Rock, Tectonic uplift, Pressure ridge.

Resumo

A cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo está presente no Oceano Atlântico Equatorial, com 100 km de comprimento, 20 km de largura e 3800 m de altura relativa e composta de peridotito do manto abissal. As análises geomorfológicas para a plataforma de abrasão marinha e as datações ^{14}C para os fósseis coralígenos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo no topo da cadeia peridotítica indicam o soerguimento tectônico ativo com taxa anual de 0.7 mm nos últimos 6000 anos. As análises preliminares das fraturas tectônicas sugerem a compressão tectônica em direção N-S a NNW-SSE. A cadeia peridotítica está presente ao longo da falha transformante de São Paulo. O trecho entre $29^{\circ}20'W$ e $30^{\circ}20'W$ desta falha tem a direção em torno de $N75^{\circ}E$, que é oblíqua ao seu movimento transcorrente, $N86^{\circ}E$. Considera-se que a compressão N-S é originada da discordância de direção acima citada. Isto é, a cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo é

considerada como uma cadeia de pressão da falha transformante São Paulo.

Palavras-chave: Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Soerguimento tectônico, Cadeia de pressão.

Introdução

A cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo está presente na zona de falha transformante de São Paulo no Oceano Atlântico Equatorial, com 100 km de comprimento, 20 km de largura e 3800 m de altura relativa. No topo desta cadeia, ocorre o Arquipélago de São Pedro e São Paulo na coordenada de $N00^{\circ}55.1'$, $W29^{\circ}20.7'$, em cerca de 1010 km ao nordeste da cidade de Natal, RN (Figura 1). Geralmente, falhas transformantes e zonas de fratura abissal formam depressões morfológicas lineares (Schilling et al., 1995; Thibaud et al., 1998) e são de centenas metros mais profundos do que a planície abissal adjacente. Em certas localidades, o peridotito do manto abissal está exposto diretamente no leito do oceano, formando morro elíptico de forma de carapaça, chamado de *megamullion* (e.g. Blackman et al., 1998; Tucholke et al., 1998; Campos et al., 2003). Megamullions são encontrados nas áreas em que ocorre a expansão das placas oceânicas em baixa velocidade e/ou o manto abissal de baixa temperatura (Cann et al., 1997; Whitmarsh et al., 2001). A região equatorial do Oceano Atlântico tem essas condições (Hekinian et al., 2000; Gung & Romanowicz, 2004).

A cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo é muito diferente das feições submarinas de zonas de falha transformante e das áreas de megamullion. A rocha ultramáfica do manto abissal forma a saliência morfológica muito alta na área pequena (Figura 2; Sichel et al., 2008; Motoki et al., 2009). Além disso, os materiais constituintes da cadeia peridotítica são as rochas ultramáficas de alta densidade. Portanto, é necessário um intenso tectonismo de soerguimento para justificar a cadeia tão alta composta de rochas tão densas. De fato, as pesquisas da plataforma de abrasão marinha do Flandriano e nas datações ^{14}C para os fósseis de coral, detectaram o soerguimento ativo com a

Soerguimento ativo da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial

taxa de 1.5 mm/ano relativo ao nível do mar nos últimos 6000 anos (Motoki et al., 2009; Campos et al., 2010). Considerando a regressão marinha desde a Transgressão

Flandriana até o presente, a taxa absoluta de soerguimento é 0.7 mm/ano.

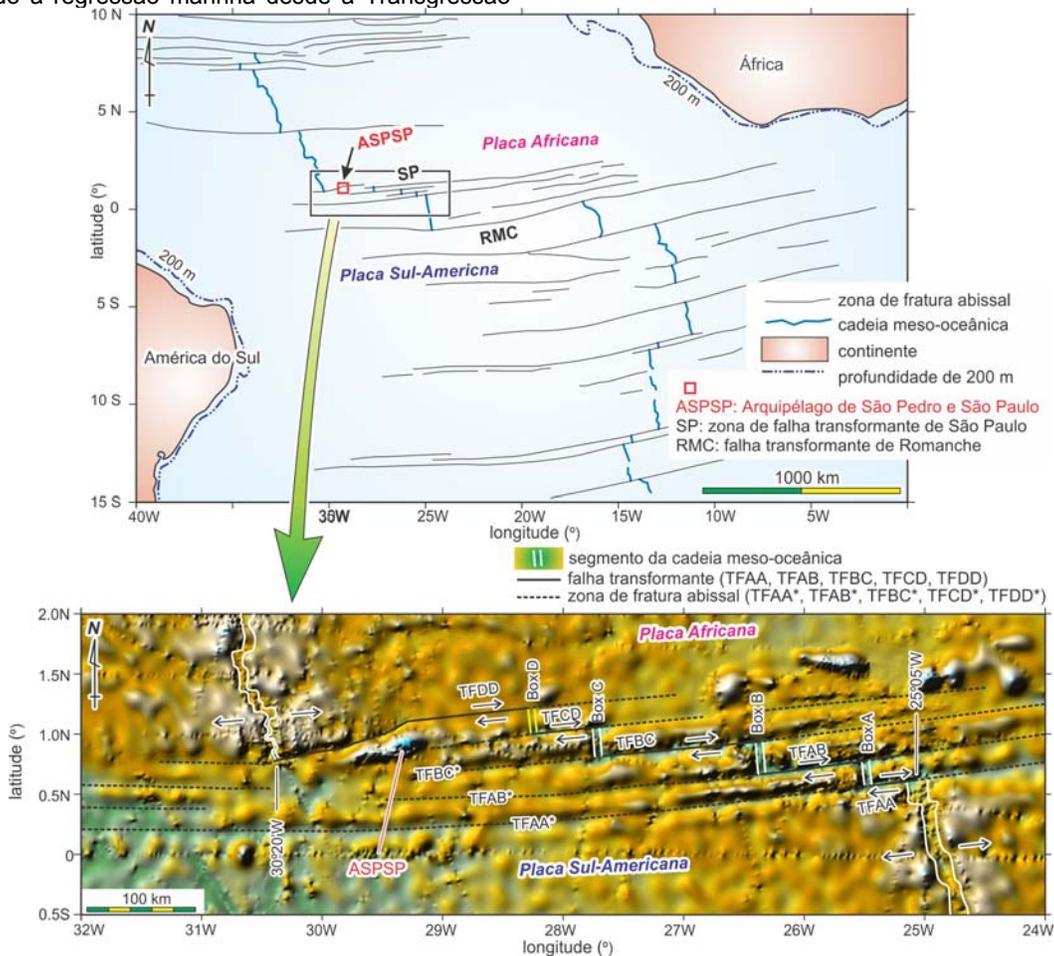


Figura 1. Mapa de localização do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo no Oceano Atlântico Equatorial, com base no mapa de batimetria predita de TOPO ver. 12.1 com a resolução aparente de 1.85 km. As TFAB, TFBC e TFCD são falhas transformantes e as TFAA*, TFAB*, TFBC*, TFCD* e TFDD* são zonas de fratura abissal.

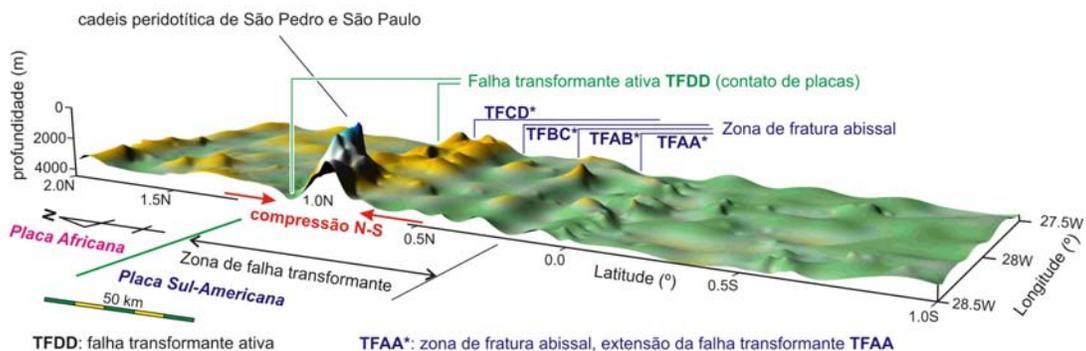


Figura 2. Morfologia submarina da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo com base nos banco de dados do TOPO. A resolução aparente é 1.85 km.

Nos últimos anos, ocorreu um notável avanço nos estudos morfo-tectônicos e estruturais do Arquipélago e da cadeia

peridotítica. Desta forma, o processo, o mecanismo e a história do soerguimento estão sendo esclarecidos pouco a

pouco. Os autores apresentam os resultados das pesquisas recentes e discute o mecanismo de soerguimento da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo como a consequência da discordância na direção entre a falha transformante e do seu movimento transcorrente, considerando a cadeia peridotítica como uma cadeia de pressão (*pressure-ridge*) de falha transcorrente ativa.

Metodologia

Dentre as técnicas adotadas destacam-se as seguintes: 1) Batimetria predita de versão mais recente; 2) Técnica de seppômen; 3) Datações ¹⁴C para fósseis coralígenos.

A batimetria predita é o método para confeccionar o mapa batimétrico com base nas análises de órbita de satélite. Em comparação com a batimetria sonora, a resolução deste método é baixa, porém o mapa cobre todas as regiões oceânicas entre as latitudes 72°N e 72°S. A resolução aparente da primeira versão do TOPO foi 3.7 km, porém a resolução verdadeira foi muito inferior. Por outro lado, as versões mais novas acrescentaram os dados por navios e, portanto em algumas áreas os mapas batimétricos têm a resolução verdadeira de 1.85 km (TOPO) ou 0.9 km (GEBCO). Durante o período de 2007 a 2009, muitos dados de navios foram acrescentado e, portanto houve um notável aprimoramento nas áreas ao longo de falhas transformantes, zonas de fratura abissal e segmentos de cadeia meso-oceânica dentro da zona de falha transformante de São Paulo. A versão utilizada para o presente trabalho é de Scripps Institute of Oceanography, University of Califórnia - San Diego, *Topography* v.12.1 com a resolução aparente de 1.85 km.

O seppômen é o método para análises geomorfológicas que reconstitui paleo-superfícies (e.g. Motoki et al., 2008;

2009). O mapa de seppômen apresenta a morfologia simplificada antes dos efeitos de erosão vertical. O mapa de seppômen para o Arquipélago de São Pedro e São Paulo reconstitui a plataforma de abrasão marinha formada durante a Transgressão Flandriana, o que estima a taxa de soerguimento após a Transgressão Flandriana, ou seja, nos últimos 6000 anos.

As datações geocronológicas pelo método de ¹⁴C determina a idade de formação de coral do depósito sedimentar composto de carbonatos. A comparação entre as idades com as altitudes de ocorrências determina a taxa de soerguimento nos últimos 6000 anos.

Morfologia submarina

Falhas transformantes e zonas de fratura abissal formam depressões lineares. Em certas localidades, o peridotito do manto abissal está exposto diretamente no fundo do oceano formando morro elíptico de forma de carapaça, chamado de *megamullion* (e.g. Blackman et al., 1998; Tucholke et al., 1998). Megamullions ocorrem nas áreas da expansão das placas oceânicas em baixa velocidade e/ou o manto abissal de baixa temperatura (Cann et al., 1997; Whitmarsh et al., 2001). A região do Oceano Atlântico Equatorial está com essas condições (Hekinian et al., 2000; Gung & Romanowicz, 2004; Sichel et al., 2008).

Entretanto, a morfologia submarina da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo é muito diferente de zonas de falha transformante ou da área de *megamullion*. A rocha ultramáfica do manto abissal forma uma saliência morfológica alta e estreita (Sichel et al., 2008; Motoki et al., 2009), sugerindo um intenso tectonismo de soerguimento (Figura 3).

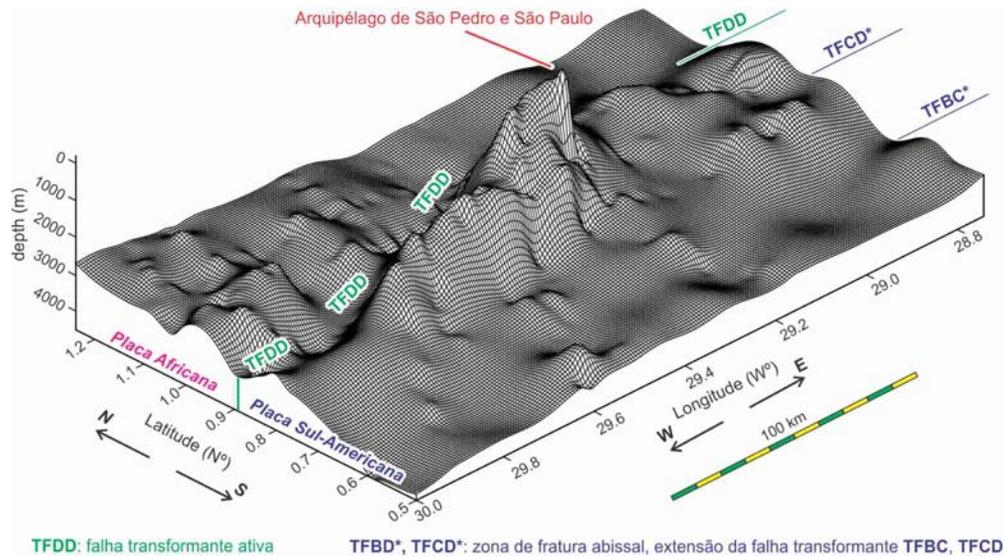


Figura 3. Morfologia submarina da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo com base nos banco de dados do TOPO, do Scripps Institute of Oceanography, University of Califórnia - San Diego.

Soerguimento ativo da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial

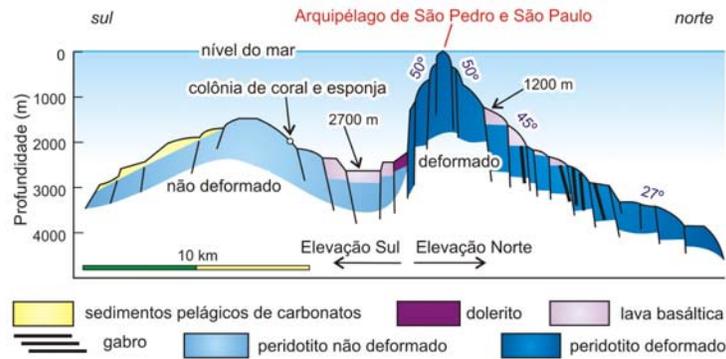


Figura 4. Perfis da morfologia submarina em direção norte-sul em torno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo com base na compilação dos 6 mergulhos profundos pelo submersível *Nautilus*, segundo Hekinian et al. (2000). A escala vertical é exagerada em 2 vezes da horizontal.

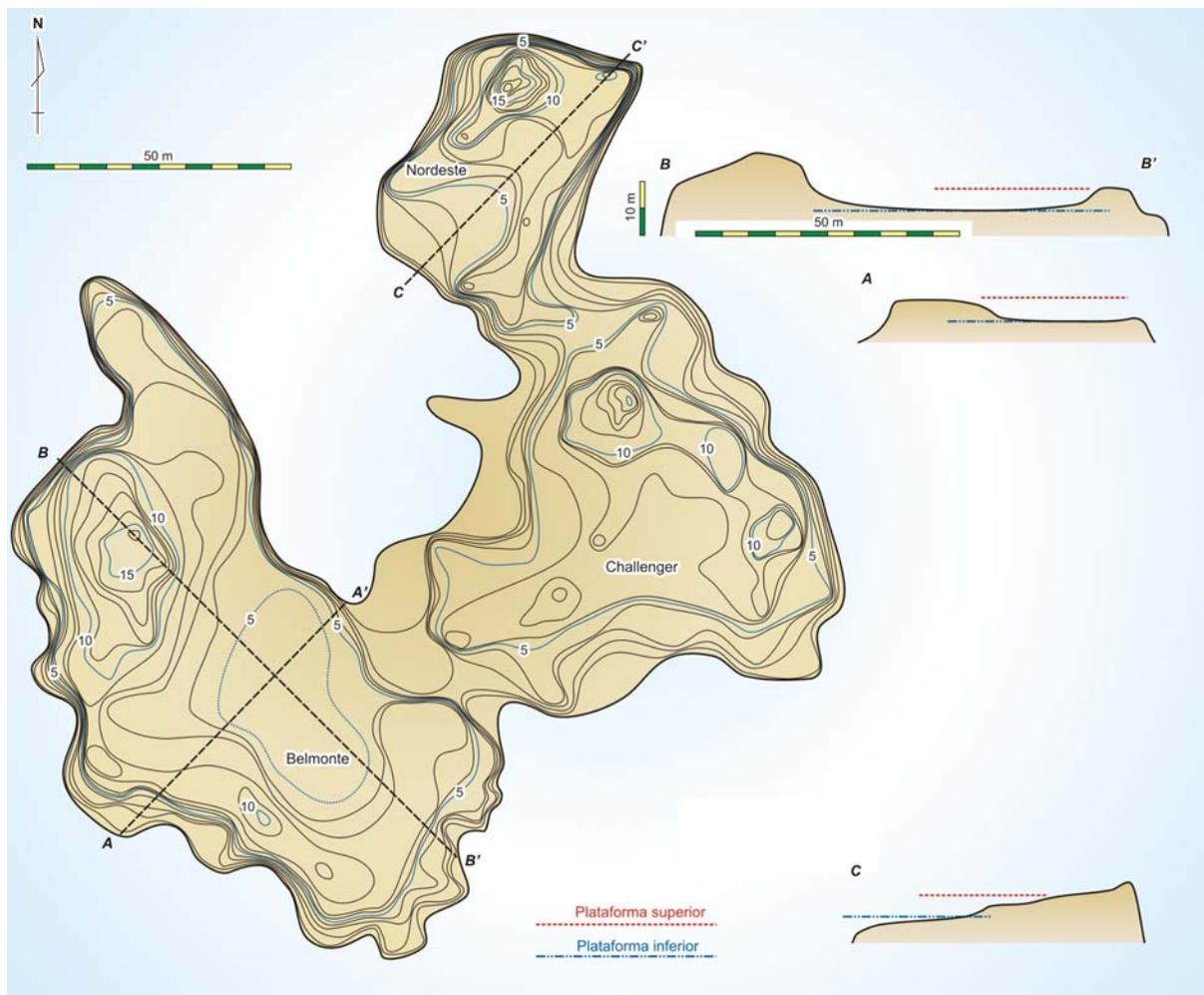


Figura 5. Mapa de seppômen das ilhas Belmonte, Sudeste (Challenger) e Nordeste com base na malha de 10 m, confeccionado a partir do mapa topográfico de 1:500.

Os flancos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo apresentam rampas laterais de ângulos elevados. O perfil morfológico ao longo da latitude 29°20'W, com base na

batimetria predita, demonstra no flanco sul da cadeia peridotítica a rampa de 50° de declividade média com altura relativa de 2000 m (Figura 4). No flanco norte, observa-se a

rampa de 20° de declividade média com altura relativa de 1600 m.

Plataforma de abrasão marinha

Na superfície das ilhas e os penedos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo ocorrem patamares nivelados na faixa de altitude de 4 a 10 m. Esses ocupam 27% da área emersa total, consideradas como plataforma de abrasão marinha.

O mapa de seppômen com base na malha de 10 m de intervalo visualiza claramente as plataformas acima citadas (Figura 5). O histograma de distribuição altimétrica mostra dois níveis de extensão grande, nas altitudes de 4 a 5 m e de 7 a 9 m, denominadas respectivamente a plataforma inferior e a plataforma superior (Figura 6). As plataformas estão distribuídas nas três ilhas acima citadas nas mesmas faixas de altitude. O fato indica que o soerguimento tectônico ocorreu de maneira uniforme, sem basculamento ou soerguimento diferenciado entre as ilhas, pelo menos após a formação das plataformas.

A plataforma superior é mais acidentada com a dispersão altimétrica maior do que a plataforma inferior sugerindo que sua formação foi mais antiga. Campos et al. (2003; 2010) demonstraram a existência de depósitos sedimentares biogênicos na plataforma superior que contém fósseis coralígenos indicativos de ambiente de paleo-enseada. Desta forma, a plataforma superior é correlacionada à Transgressão Flandriana formada há 6000 anos e a plataforma inferior é atribuída à erosão posterior da referida transgressão cujo processo erosivo continua até o presente. A escassez de fósseis coralígenos na plataforma inferior apóia a opinião de que esta plataforma foi formada pela erosão recente. Com base nesta idéia, calcula-se a taxa de soerguimento relativo ao nível do mar nos últimos 6000 anos como 1.5 mm/ano, isto é, taxa absoluta de 0.7 mm/ano. Esta taxa é alta, sendo comparável com aquela das faixas orogênicas ativas.

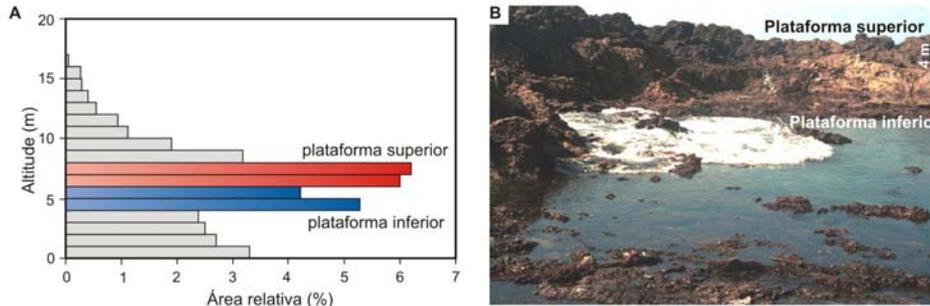


Figura 6. Histograma de distribuição altimétrica dos níveis de seppômen (A), indicando presença da plataforma superior, com altitude de 5 m, e plataforma inferior, com altitude de 8 m (B).

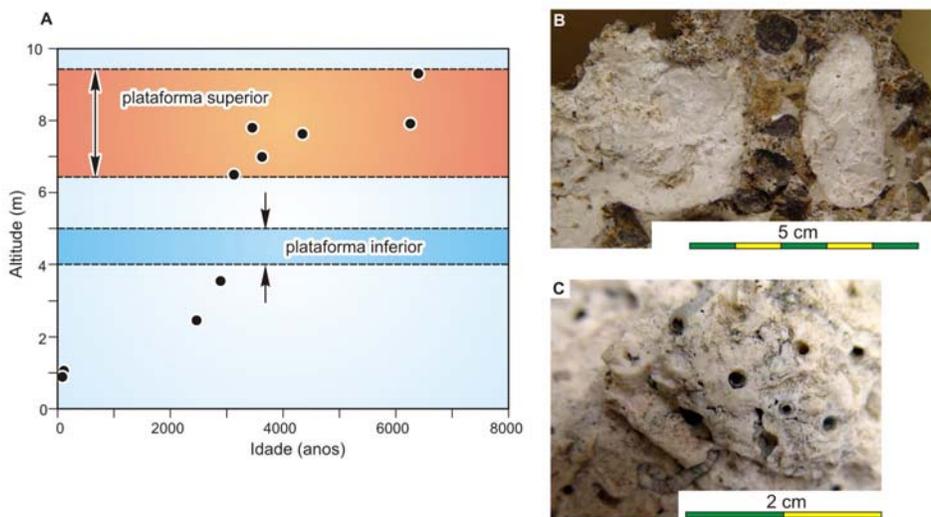


Figura 7. Correlação entre as idades ¹⁴C dos fósseis coralígenos coletados da Ilha Belmonte sua altura de ocorrência em relação às plataformas de abrasão marinha (A). Os fósseis são: B) Melobésia; C) Melobésia e vermitídeos.

Datações pelo método ^{14}C

Foram realizadas dez datações pelo método ^{14}C para os fósseis coralígenos coletados a partir da Ilha Belmonte (Campos et al., 2010). Dentre essas, seis são as amostras originadas da plataforma superior. Os fósseis de idades antigas tendem a ocorrer em pontos mais altos e, os jovens, em pontos mais baixos (Figura 7). A relação entre as idades e as altitudes indica a taxa de soerguimento relativo ao nível do mar nos últimos 6600 anos como 1.5 mm/ano, com a taxa absoluta de soerguimento como 0.7 mm/ano. Esta estimativa é idêntica daquela da plataforma de abrasão marinha.

Fraturas tectônicas

Campos et al. (2010) realizaram medidas de fraturas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo com número total 5438 (Figura 8). Os pontos A1, A2, B1 e B2 são para as fraturas de alto ângulo e, o ponto C é para as de baixo ângulo. Os grupos de alto ângulo e de baixo ângulo estão distintamente separados e são fáceis a serem identificados. Os pontos A1 e B1 são de maiores frequências. As médias de *direction* e *dip* do A1 são 334° e 76° e, aquelas para o ponto B1, 30° e 86° . Esses cruzam em 64° formando um sistema de fraturas conjugadas com o eixo de esforço de compressão, σ_1 , de $N3^\circ W$. O ponto A2 tem *direction* e *dip* em média de 316° e 75° , e o ponto B2, 25° e 55° . Esses cruzam em 69° constituindo um sistema de fraturas conjugadas com o σ_1 de $N10^\circ W$. O resultado acima citado indica a existência do esforço de compressão quase N-S.

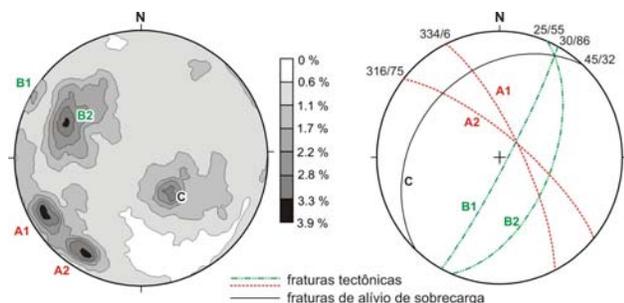


Figura 8. Projeção estereográfica para as fraturas medidas nas Ilhas Belmonte, Challenger, Nordeste e Cabral e na Pedra Coutinho, em total 5438 medidas.

Discussões

O tectonismo principal na zona de falhas transformantes é o movimento transcorrente e, portanto não ocorre intensa compressão e conseqüente soerguimento rápido em condições normais. A cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo é um raro exemplo da exposição do manto abissal acima do nível do mar nas em regiões oceânicas. Apesar da grande importância científica, o mecanismo tectônico do soerguimento não foi esclarecido.

A zona de falhas transformantes de São Paulo é composta de cinco falhas e esses têm direção geral de $N86^\circ E$ (Figura 1), o que indica a direção do movimento transcorrente entre as placas Sul-Americana e Africana. Entretanto, a falha TFDD, que está presente na borda noroeste da referida

zona transformante, não é linear, mas sim, apresenta uma inflexão. O trecho oriental, entre $W28^\circ 20'$ e $W29^\circ 20'$, é paralelo à direção acima citada. Entretanto, o trecho ocidental, entre $W29^\circ 20'$ a $W30^\circ 20'$, tem direção $N75^\circ E$, que é oblíqua ao movimento transcorrente. Portanto, ocorre a compressão sub-perpendicular à direção da falha, isto é, N-S com ligeira tendência de NW-SE. Esta direção é a mesma daquela do eixo do esforço de compressão indicada pelas fraturas tectônicas.

Neste sentido, a cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo é a cadeia de pressão (*pressure ridge*) da falha transformante TFDD. A cadeia de pressão é observada comumente no ponto de inflexão de falha ativa de movimento transcorrente

Com base na taxa de soerguimento atual de 0.7 mm/ano e a altura da cadeia peridotítica do São Pedro e São Paulo de 3800 m, são necessários cerca de 5 milhões de anos para a formação desta saliência morfológica. Por outro lado, o trecho ocidental do TFDD tem comprimento aproximado de 110 km. Calculando a taxa de expansão da cadeia meso-oceânica desta região, em torno de 1.6 cm/ano, considera-se que em 7 Ma o ponto de inflexão estava presente no Box D, $W28^\circ 20'$. Desta forma, o soerguimento da cadeia meso-oceânica está ativo nos últimos 7 milhões de anos. A estimativa do início do soerguimento tectônico com base no comprimento do trecho ocidental, 5 Ma, é pouco mais antiga do que a mesma na taxa de soerguimento, 7 Ma. Desta forma, a atividade tectônica de soerguimento pode estar em aceleração desde o seu início.

Agradecimentos

Os autores são gratos à SECIRM (Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e PETROBRAS (Petróleo do Brasil, S.A.) para os apoios logísticos e financeiros para expedições de campo ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo, instrumentos de laboratório e bolsas de estudo. Os autores agradecem à FAPERJ (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Carlos Chagas Filho) e FUNPEC (Fundação Norteriograndense de Pesquisa e Cultura) para os apoios de instrumento para trabalhos de campo, materiais para escritório e recursos da informática.

Referências

- Blackman, D.K., Cann, D.J.R., Janssen, B., Smith, D.K. 1998. Origin of extensional core complexes evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone. *Journal of Geophysical Research*, 103, 21315-21333.
- 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., Virgens Neto, J., Amorim, V.A., Hartmann, L.A., Petta, R.A. 2003. Modificações metassomáticas das rochas milonitizadas do complexo

ultramáfico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial. *Geochimica Brasiliensis*, 17-2, 81-90.

Cann, J.R., Blackman, D.K., Smith, D.K., McAllister, E., Janssen, B., Mello, S., Avgerions, E., Pascoe, A.R., Escarin, J. 1997. Corrugated slip surfaces formed at ridge transform interactions on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 385, 329-332.

Gung, Y. & Romanowicz, B. 2004. Q tomography of the upper mantle using three component long period waveforms, *Geophysical Journal International*. 157, 813-830.

Hekinian, R., Juteau, T., Gracia, E., Udintsev, G., Sichter, 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., Petrakis, G.H., Sichel, S.E., Cardoso, C.E., Melo, R.C., Soares, R., Motoki, K.F. 2008. Origem dos relevos do Maciço Sienítico do Mendanha, RJ, com base nas análises geomorfológicas e sua relação com a hipótese do Vulcão de Nova Iguaçu. *Geociências*, Rio Claro, 27-1, 99-115.

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. *Revista Escola de Minas*, 62-3. 331-342.

Schilling, J.G., Ruppel, C., Davis, A.N., McCully, B., Tighe, S.A., Kingsley, R.H., Lin, J. 1995. Thermal structure of the mantle beneath the equatorial Mid-Atlantic Ridge: Inferences from the spatial variation of dredged basalt glass compositions. *Journal of Geophysical Research*, 100-B6, 10057-10076.

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.

Thibaud, R., Gente, P., Maia, M. 1998. A systematic analysis of the Mid-Atlantic Ridge morphology and gravity between 15°N and 40°N: constraints of the thermal structure. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24223-24243.

Tucholke, B.E., Lin, J., Kleinrock, M.C. 1998. Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complex on the Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Geophysical Research*, 103, 9857-9866.

Whitmarsh, R.B., Manatschal, G., Minshull, T.A. 2001. Evolution of magma-poor continental margins from rifting to seafloor spreading. *Nature*, 143, 150-154.