

MORFOLOGIA ABISSAL EM TORNO DO ARQUIPÉLAGO DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO, OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL, E SUA RELAÇÃO AO TECTONISMO DE SOERGUMENTO ATIVO

Akihisa Motoki¹, Susanna Eleonora Sichel², Thomas Ferreira da Costa Campos³,
Thais Vargas¹, Rodrigo Soares², Kenji Frerire Motoki²

RESUMO

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo é situado no Oceano Atlântico Equatorial no topo da elevação morfológica com 100 km de comprimento, 20 km de largura e 3800 m de altura, composta de peridotito do manto abissal. A morfologia submarina é caracterizada por encostas íngremes e escarpas sub-verticais, sugerindo que o Arquipélago é formado por tectonismo recente ou ativo. O mapa de seppômen mostra a plataforma de abrasão marinha de 7~9 m de altitude. Considerando esta plataforma como formada durante a Transgressão Flandriana, a taxa de soergimento nos últimos 6000 anos é calculada como 1.5 mm/ano. As datações ¹⁴C para fósseis de coral também indicam a mesma taxa de soergimento nos últimos 6600 anos. Considerando a regressão do nível do mar desde o Flandriano até o presente, calcula-se a taxa absoluta de soergimento como 0.7 mm/ano. As fraturas tectônicas indicam o esforço de compressão N-S, que corrobora com o mecanismo focal dos terremotos recentes desta área. Supõe-se que a rocha ultramáfica do manto abissal já tinha sido exposta no fundo do oceano e essa é espremida pelo tectonismo de compressão N-S, formando a cadeia peridotítica de 3800 m de altura nos últimos 7 milhões de anos.

Palavras chave: Arquipélago de São Pedro e São Paulo; soergimento ativo; Tectonismo de compressão; Fratura tectônica; Cadeia Peridotítica.

ABSTRACT

The Saint Peter Saint Paul Rocks is situated at the Equatorial Atlantic Ocean on the top of the morphologic elevation which is 100km long, 20km wide, and 3800m high constituted by abyssal mantle peridotite. The submarine morphology is characterised by steep slopes and sub-vertical scarps, suggesting that the Rocks are formed by recent or active tectonism. The summit level map shows a wave-cut bench of 7~9 m above sea level. Considering this wave-cut bench to be formed during the Flandrian Transgression, the uplift rate in recent 6000 years is calculated as 1.5 mm/year. The ¹⁴C datings for the coral fossils also indicate the same rate in recent 6600 years. Considering the sea level regression from the Flandrian up to the present, the absolute uplift rate is calculated to be 0.7mm/year. The tectonic fractures indicate N-S compression stress, which corroborate with the recent earthquake focal mechanism of this area. It is supposed that the abyssal mantle ultramafic rocks had been exposed on the ocean bottom and it was squeezed out by N-S compression tectonism to form the peridotite ridge of 3800m in height in recent 7 millions years.

Keyword: Saint Peter Saint Paul Rocks; Active uplift; Compression tectonism; Tectonic fracture; Peridotite ridge.

1. Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
rochasornamentais@yahoo.com.br, thaisvargasuerj@gmail.com

2. Departamento de Geologia, Universidade Federal Fluminense.
susanna@igeo.uff.br, rodrigoss@yahoo.com.br, kenji_dl@hotmail.com

3. Departamento de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
thomascampos@geologia.ufrn.br

INTRODUÇÃO

O Arquipélago de Paulo situa-se na região equatorial do Oceano Atlântico, na coordenada de N00°55.1', W29°20.7', aproximadamente 1010 km ao nordeste da cidade de Natal, RN (Figura 1). A área total emersa é cerca de 13 mil m² e a altitude máxima é de 19 m. O arquipélago ocorre na zona de falha transformante de São Paulo, que tem direção E-W, comprimento total de 630 km e movimento transcorrente dextral. Na zona de falhas, observam-se quatro segmentos intratransformantes. A taxa de expansão da cadeia mesoceânica dessa região é em torno de 1.5 cm/ano para cada lado e, portanto, a velocidade de deslocamento da falha transformante é cerca de 3 cm/ano. Nessa área, ocorre o manto superior de baixa temperatura, denominado ponto frio (*cold-spot*, *coldzone*; e.g. Gurnis et al., 1998; Ritzwoller et al., 2003; Sichel et al., 2008).

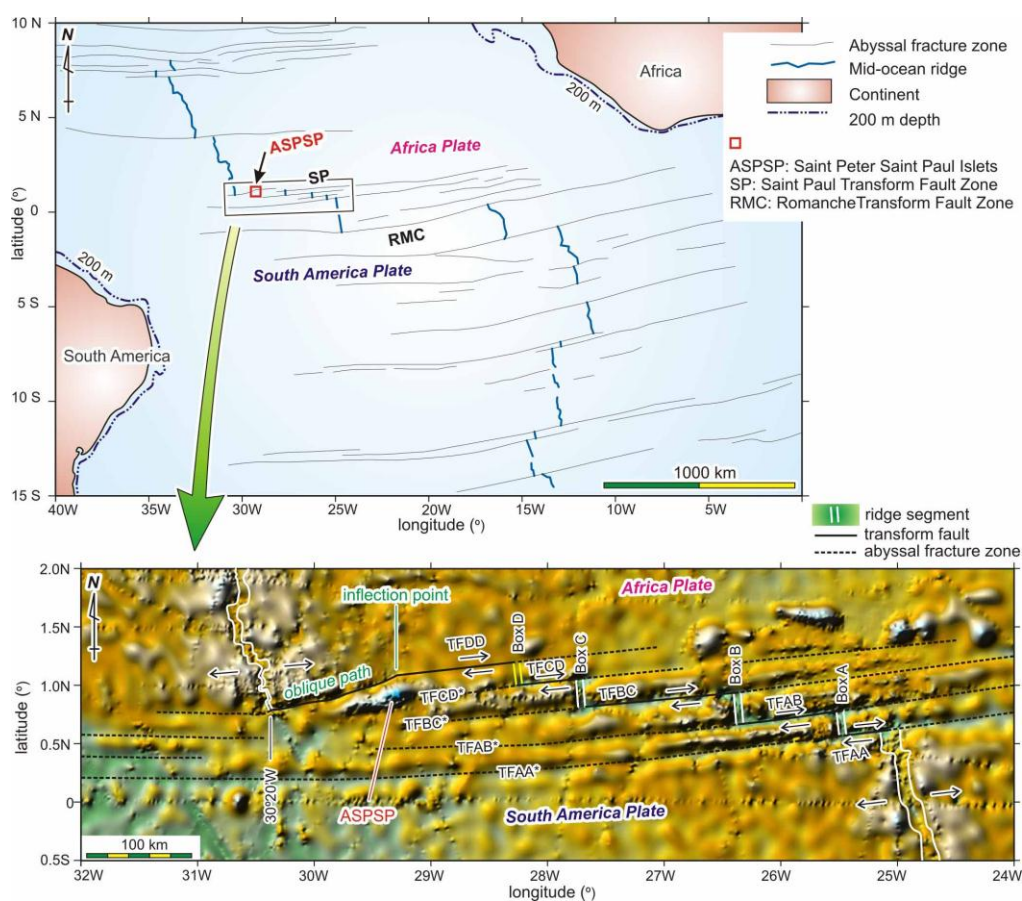


Figura 1. Mapa de localização do Arquipélago de São Pedro e São Paulo situado no Oceano Atlântico Equatorial e o mapa de batimetria predita para o Oceano Atlântico Equatorial com base na batimetria predito Topo ver. 12.1 com a resolução aparente de 1.85 km. Os dados são baixados de *Scripps Institute of Oceanography, University of California - San Diego*. As TFAB, TFBC e TFCD são falhas transformantes respectivamente entre os segmentos *Box A* e *Box B*, *Box B* e *Box C* e, *Box C* e *Box D*. A TFAA é a falha transformante no sul do *Box A* e, a TFDD, no norte do *Box D*. As TFAA*, TFAB*, TFBC*, DFCD* e TFDD* correspondem às zonas de fratura abissal da extensão das falhas transformantes, respectivamente, da TFAA, TFAB, TFBC, DFCD e TFDD.

Sendo diferente da ilha de Fernando de Noronha, arquipélago de Abrolhos e Ilha de Trindade, o Arquipélago de São Pedro e São Paulo não é constituído por rochas de origem vulcânica. As rochas constituintes são peridotitos serpentinizados do manto abissal (e.g. Tilley, 1947; Campos et al., 2003; Sichel et al., 2008). O manto oceânico está exposto diretamente na superfície da Terra, sem cobertura da crosta oceânica de composição basáltica. O arquipélago de São Pedro e São Paulo é a única localidade oceânica até hoje conhecida em que ocorre a exposição *in-situ* do manto abissal acima do nível do mar no Oceano Atlântico. As rochas ultramáficas intensamente fraturadas sugerem a existência de um intenso movimento tectônico. Esse tectonismo está ativo até o presente.

Os autores apresentam características geomorfológicas do arquipélago de São Pedro e São Paulo, com atenção especial para a morfologia submarina, para as plataformas de abrasão marinha e para as datações de ^{14}C para os fósseis coralígenos da ilha Belmonte. A aplicação da técnica de seppômen (*summit level map*) é um destaque metodológico. Com base nesses dados, os autores estimam a taxa de soerguimento tectônico atual.

METODOLOGIA

Nas regiões oceânicas, a órbita de satélite apresenta variação conforme anomalia gravimétrica *free-air* de cada localidade. Considerando a anomalia gravimétrica como devida à diferença de espessura da lâmina de água, pode-se estimar a profundidade do mar. Com base nesse princípio, Smith e Sandwell (1997) elaboraram o mapa mundial de profundidade estimada, denominado mapa de batimetria predita. A resolução nivelada do mapa da primeira versão foi 2.0', correspondendo a 3.7 km na região equatorial. Entretanto, a resolução verdadeira foi mais grossa, de 10 a 20 km, com a heterogeneidade regional. Por outro lado, o mapa cobre todas as regiões oceânicas entre as latitudes 72°N e 72°S.

Conforme o acúmulo dos dados de satélite, a exatidão topográfica dos dados batimétricos é aprimorada dia por dia. A versão mais nova está distribuída na homepage do *Scripps Institute of Oceanography, University of Califórnia - San Diego* (UCSD-SIO, 2009). O presente trabalho adota a *Topography* v.12.1. Esse mapa tem resolução nivelada de 1.0', que corresponde a 1.85 km na região equatorial e sua resolução é aprimorada através da incorporação dos dados de batimetria por navio. A visão tridimensional foi confeccionada com o auxílio de Surfer™ v. 8.0, utilizando-se a interpolação por *Radial Basis Function*.

Cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo estão presentes no topo de uma elevação submarina de 90 km de comprimento, 20 km de largura e 3800 m de altura, denominada cadeia Peridotítica do São Pedro e São Paulo (Figura 2).

Falhas transformantes e zonas de fratura abissal geralmente formam depressões lineares com profundidade de centenas metros maiores do que a planície abissal adjacente. 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; 2001; Ohara et al., 2001). 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; Ritzwoller et al., 2003; Canales et al., 2004). A região do Oceano Atlântico Equatorial tem essas condições (Hekinian et al., 2000; Gung & Romanowicz, 2004; Sichel et al., 2008).

Entretanto, a morfologia submarina ao redor do Arquipélago é diferente de zonas de falha transformante e de *megamullion*. A rocha ultramáfica do manto abissal forma uma saliência morfológica com altura relativa de 3800 m (Sichel et al., 2008; Motoki et al., 2009). Essa cadeia peridotítica é incomparavelmente maior do que outras feições submarinas desta região e, isso pode ser justificada por um intenso tectonismo de soerguimento (Figura 3).

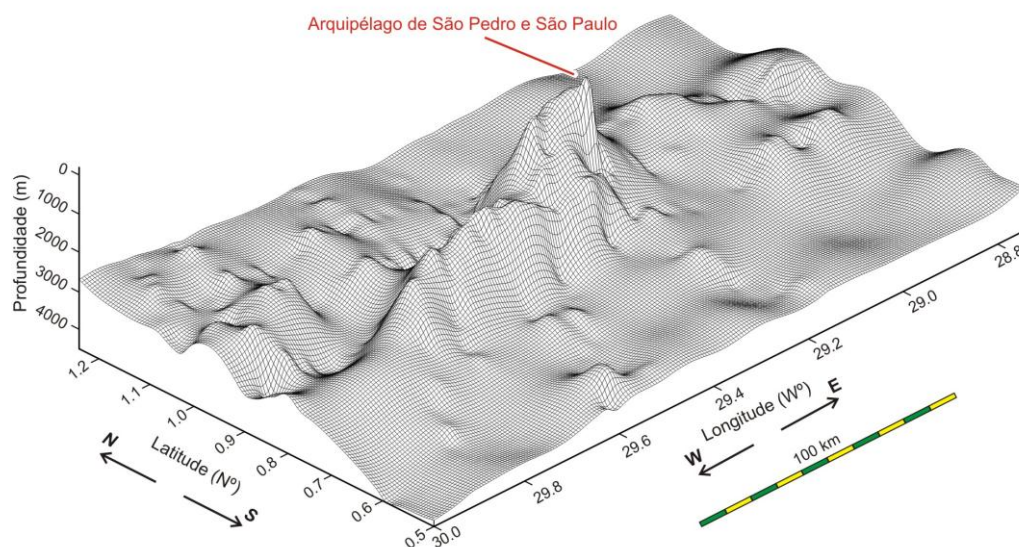


Figura 2. Morfologia submarina da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo com base nos banco de dados do TOPO, do *Scripps Institute of Oceanography, University of California - San Diego*. A resolução aparente é 1.85 km.

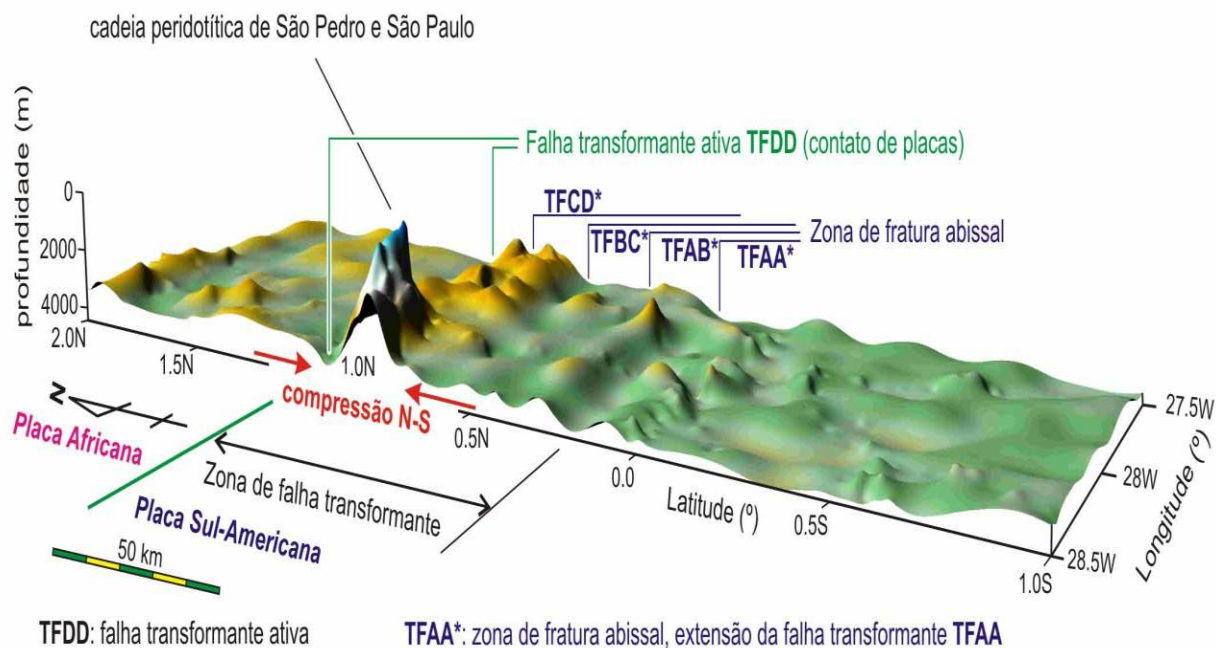


Figura 3. Seção transversal da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo com base na batimetria predita com a resolução aparente de 1.85 km. Os dados de versão 12.1 estão em disponibilidade em *Scripps Institute of Oceanography, University of California - San Diego*.

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, baseado 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.

Os seis mergulhos profundos por submersível científico *Nautil* em torno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, que foram realizados durante 1997 a 1998 (Hekinian et al., 2000), revelaram que a morfologia submarina é, de fato, ainda mais acidentada (Figura 4). Os flancos norte e sul na proximidade do Arquipélago têm declividade de 50°. No flanco sul, ocorre uma escarpa subvertical de 1500 m de altura e um graben paralelo à escarpa. Observam-se várias escarpas com altura maior do que 100 m. A batimetria local por um barco mostrou que a morfologia acidentada ocorre também em localidades rasas. Não se observa planície submarina rasa coberta por grandes recifes de coral.

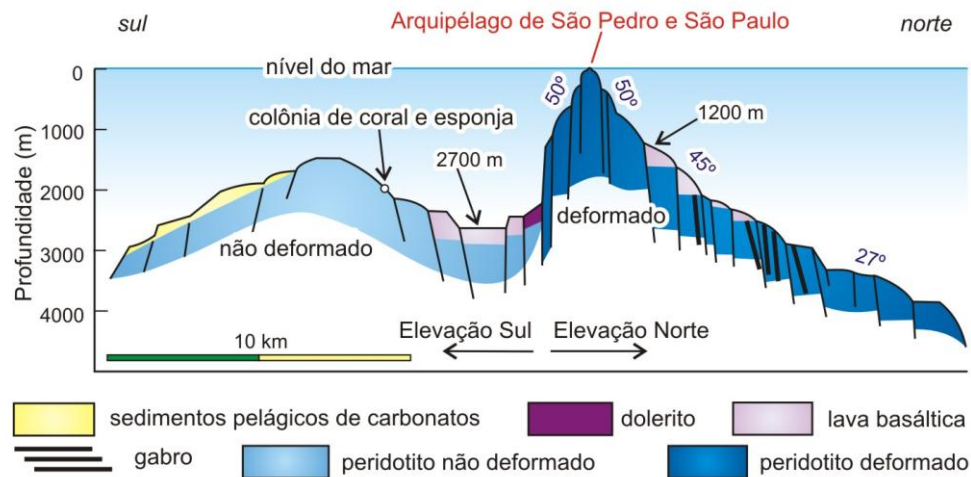


Figura 4. Perfis da morfologia submarina em direção norte-sul em torno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo: A) a batimetria predita ao longo da latitude 29°20'W; B) compilação dos 6 mergulhos profundos pelo submersível *Nautilo*, segundo Hekinian et al. (2000). A escala vertical é exagerada em 2 vezes da horizontal.

A morfologia caracterizada por várias escarpas de grande altura, é instável. Este fato sugere que a Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo foi formada recentemente, talvez nos últimos milhões de anos. Considera-se que o tectonismo de soerguimento continua até o presente.

Plataforma de abrasão marinha

As ilhas e os penedos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo estão espalhados em uma área de 400 x 200 m, com altitude relativamente nivelada. Observam-se patamares em torno de 4 a 10 m acima do nível do mar que ocupam 27% da área emersa total. Como o Arquipélago não possui praias, o patamar é considerado como plataforma de abrasão marinha (*wave-cut bench*).

O mapa de seppômen com base na malha de 10 m de intervalo ilustra a existência de duas plataformas nas ilhas de Belmonte, Sudeste e Nordeste (Figura 5). O histograma de distribuição altimétrica mostra dois níveis de maior extensão, 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. Este 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 superfície das plataformas apresenta forte efeito intempérico sobre as rochas ultramáficas. A plataforma inferior é relativamente lisa e apresenta uma boa convergência na distribuição altimétrica na faixa de 4 a 5 m de altitude, com possível extensão até 6 m. Estas observações sugerem que a idade da sua formação é jovem.

A plataforma superior ocorre na faixa de altitude de 7 a 9 m, podendo ser estendida até 10 m. A superfície é mais acidentada e a dispersão altimétrica é maior, sugerindo que sua formação foi mais antiga do que a plataforma inferior. Campos et al. (2005; 2009) demonstraram a existência de depósitos sedimentares biogenéticos na plataforma superior que contém fósseis coralígenos indicativos de ambiente de paleo-enseada.

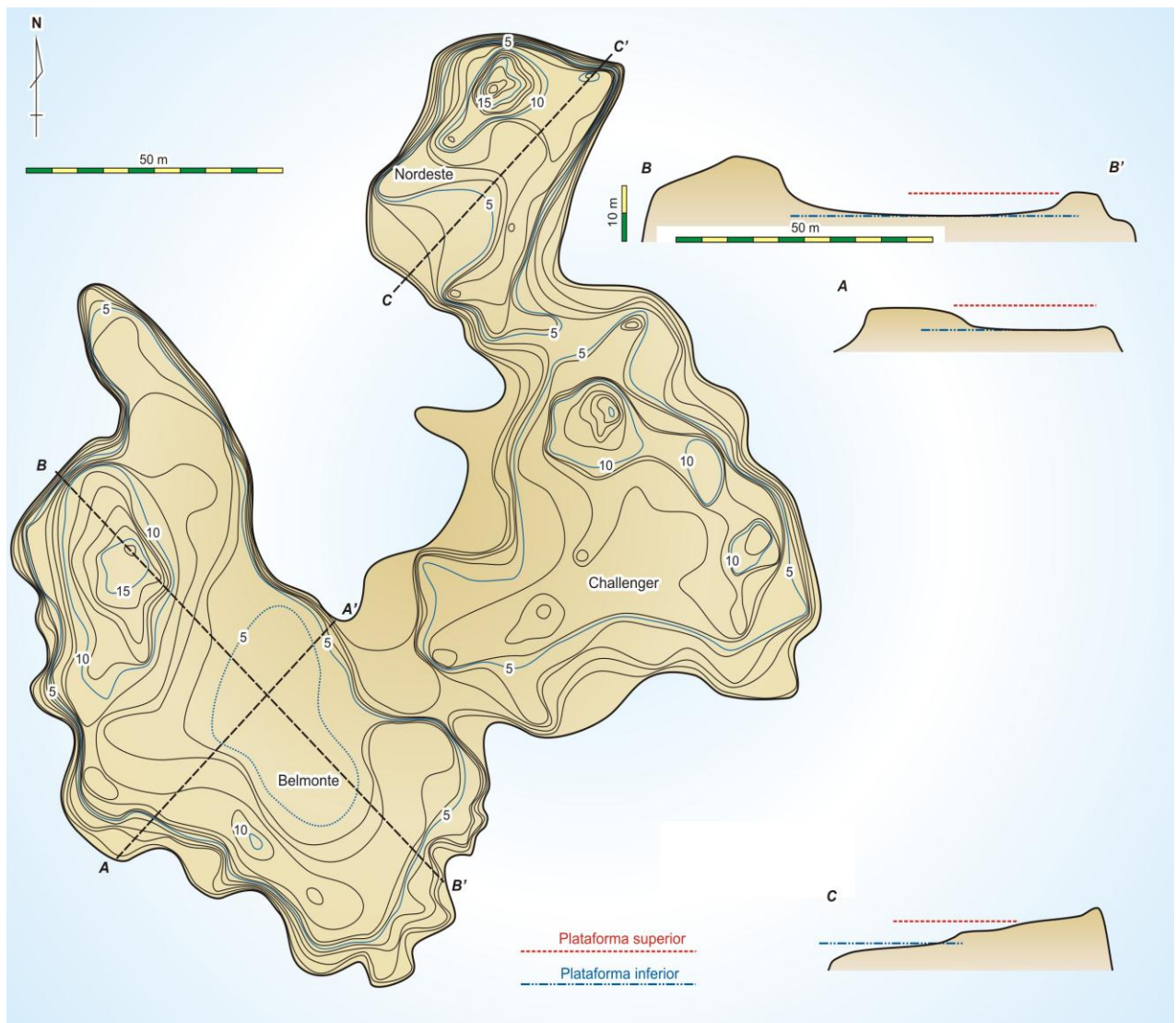


Figura 5. Mapa de seppômen das ilhas Belmonte, Sudeste (Challenger) e Nordeste com base na malha de 10 m, confeccionado a partir do mapa topográfico de 1:500 (Moraes et al., 1997).

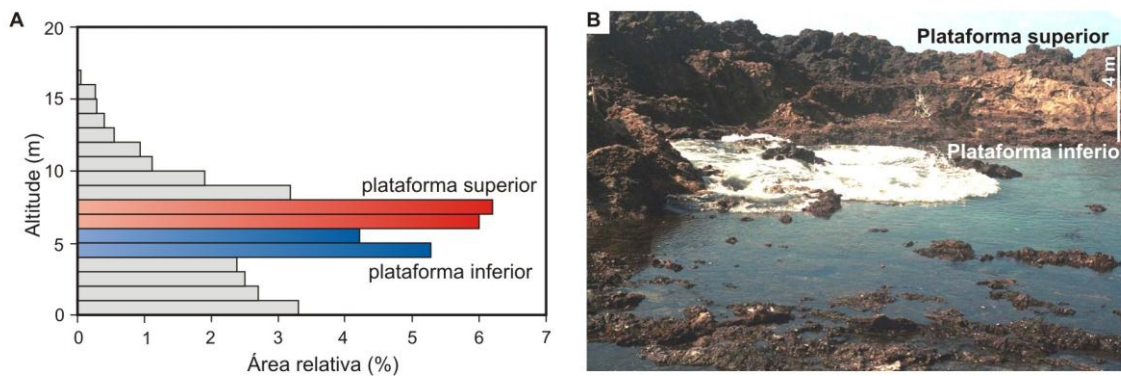


Figura 6. Histograma de distribuição altimétrica dos níveis de seppômen (A), indicando presença da plataforma superior, com altitude de 5 m, e plataforma inferior, com altitude de 8 m (B). As áreas de faixas altimétricas foram calculadas com o auxílio de software Wilbur (Motoki et al., 2006).

Datação ^{14}C para fósseis coralígenos

Foram realizadas dez datações pelo método ^{14}C para os fósseis coralígenos coletados a partir da Ilha Belmonte. Dentre essas, seis são as amostras originadas da plataforma superior. Os fósseis de idades antigas tendem a ocorrer em pontos mais altos (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. Considerando a regressão do nível do mar nos últimos 6600 mil anos, calcula-se a taxa absoluta de soerguimento como 0.7 mm/ano.

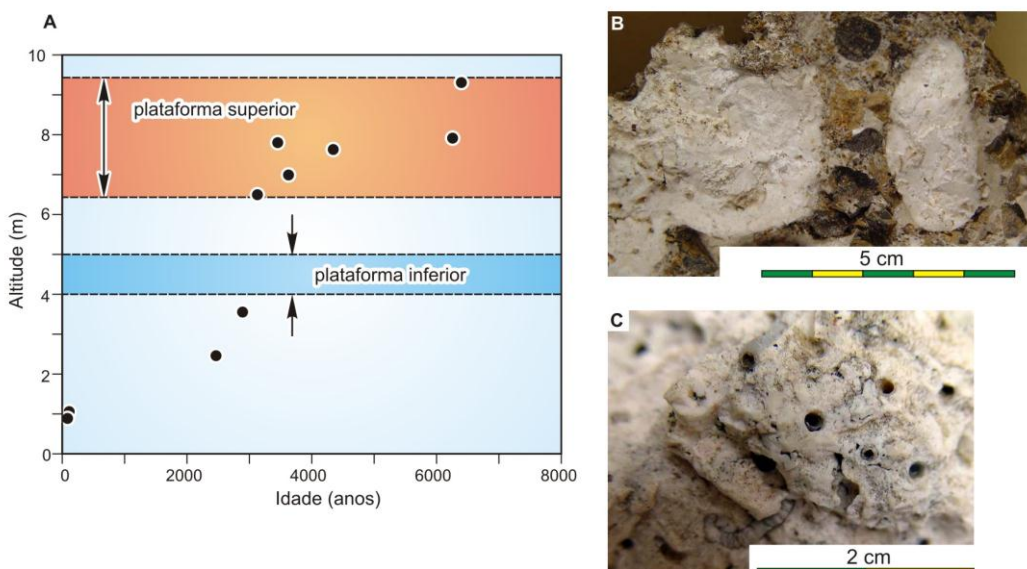


Figura 7. Correlação entre as idades ^{14}C dos fósseis coralígenos coletados da Ilha Belmonte sua altura de ocorrência em relação às plataformas de abrasão marinha (A). Os fósseis são: B) Melobésia; C) Melobésia e vermitídeos.

Estimativas das taxas de soerguimento tectônico

Plataforma de abrasão marinha é formada em um período em que o nível do mar era alto e estável. Tal condição ocorre em transgressões marinhas durante períodos interglaciais. Últimos eventos mundiais de transgressões interglaciais ocorrerem em 6 mil anos e 125 mil anos atrás (e.g. Shackelton, 1987), denominados respectivamente a Flandriana e a Sangamoniana. Em ambos os períodos, o nível do mar era cerca de 5 m acima do nível atual (Figura 8). Desta forma, as plataformas, inferior e superior, podem ser correlacionadas respectivamente aos eventos Flandriano e Sangamoniano.

A partir da diferença cronológica das duas transgressões e do desnível entre as duas plataformas, calcula-se a taxa de soerguimento do Arquipélago de São Pedro e São Paulo nos últimos 125 mil anos como de 0.03 a 0.04 mm/ano. Conforme esta idéia, no período glacial Mindel, há cerca de 140 mil anos, a plataforma superior já estava acima do nível do mar e tem sido emersa até o presente. No Período Glacial Würm, 20 mil anos atrás, a plataforma formava um platô de 140 m de altitude.

De acordo com essa taxa de soerguimento, são necessários 126 milhões de anos para que ocorra um soerguimento tectônico de 3800 m e conseqüente surgimento do Arquipélago. Entretanto, a abertura do Oceano Atlântico Equatorial ocorreu em cerca de 80 Ma e a falha transformante de São Paulo, em torno de 40 Ma. Portanto, o tectonismo de 126 milhões de anos é uma duração longa demais. Conseqüentemente, a taxa soerguimento de 0.03 a 0.04 mm/ano parece muito insuficiente para explicar o surgimento do Arquipélago.

Uma alternativa é que a plataforma superior seja correlacionada à Transgressão Flandriana enquanto a plataforma inferior à erosão posterior por onda de ressaca. Com base na idade da transgressão Flandriana e do desnível entre a plataforma superior e o nível do mar daquele tempo, estima-se a velocidade de soerguimento tectônico relativo ao nível do mar nos últimos 6 mil anos como de 1.5 mm/ano, isto é, com taxa absoluta de soerguimento de 0.7 mm/ano. Esta taxa é a mesma com a estimativa com base nas datações ¹⁴C para fósseis coralígenos. A escassez de fósseis coralígenos na plataforma inferior apóia a opinião de que esta plataforma foi formada pela erosão recente.

Fraturas medidas no campo

Os autores realizaram em total 5438 medidas de fraturas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (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°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°W.

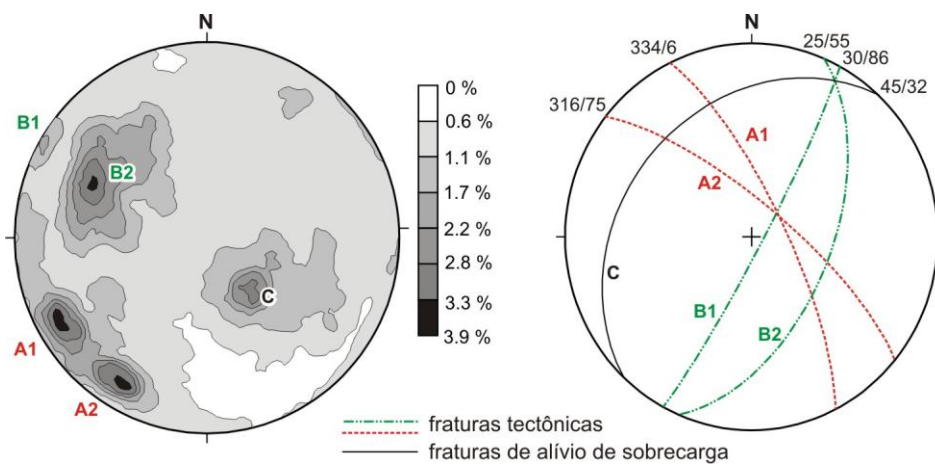


Figura 8. Projeção estereográfica para as fraturas medidas nas Ilhas Belmonte, Challenger, Nordeste e Cabral e na Pedra Coutinho, em total 5438 medidas.

A cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo tem extensão leste-oeste com a direção geral aproximada de N80°E. A cadeia peridotítica é incomparavelmente mais alta do que as outras estruturas submarinas desta região (Figura 3). Conforme a explicação anterior, as análises de fraturas tectônicas indicaram o esforço de compressão em direção norte-sul com ligeira tendência ao noroeste-sudoeste, em torno de N10°W.

CONCLUSÕES

As análises geomorfológicas do fundo do oceano e da plataforma de abrasão marinha do Arquipélago de São Pedro e São Paulo apresentam as seguintes conclusões:

1. A morfologia submarina ao redor do Arquipélago apresenta relevos acidentados, com presença de escarpas subverticais. Não há plataforma rasa coberta por grandes recifes de coral.
2. O mapa de seppômen revela a existência de duas plataformas de abrasão marinha, com altitudes respectivas 7 a 9 m.

3. Há uniformidade nos níveis altimétricos das plataformas de abrasão marinha entre as ilhotas, o que indica não haver basculamento tectônico ou soerguimento diferenciado entre as ilhas.
4. Considerando a plataforma como originada da Transgressão Flandriana e a plataforma inferior como de erosão posterior, calculou-se a taxa de soerguimento relativo ao nível do mar de 1.5 mm/ano nos últimos 6 mil anos, isto é, soerguimento absoluto de 0.7 mm/ano.
6. As datações ^{14}C para os fósseis coralígenos coletados da plataforma superior da Ilha Belmonte indicam uma taxa de soerguimento de 1.5 mm/ano nos últimos 6600 anos, isto é, soerguimento absoluto de 0.7 mm/ano.
7. As fraturas tectônicas medidas durante os trabalhos de campo mostram as direções preferenciais similares, N23°E e N34°W. Essas também formam o sistema conjugal com o eixo de compressão de N10°W.
8. Os resultados das análises de fraturas tectônicas indicam o esforço de compressão norte-sul com ligeira tendência a noroeste-sudeste. Esses estão de acordo com os mecanismos focais de dois terremotos que ocorreram na proximidade da cadeia peridotítica.

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 Norterio-grandense de Pesquisa e Cultura) para os apoios de instrumento para trabalhos de campo, materiais para escritório e recursos da informática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLACKMAN, D.K., CANN, D.J.R., JANSSEN, B., SMITH, D.K. Origin of extensional core complexes evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone. **Journal of Geophysical Research**, v, 103, p. 21315-21333, 1998.

CAMPOS, T.F.C., VIRGENS NETO, J., AMORIM, V.A., HARTMANN, L.A., PETTA, R.A. Modificações metassomáticas das rochas milonitizadas do complexo ultramáfico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial. **Geochimica Brasiliensis**, v. 17, n. 2, p. 81-90, 2003.

CANALES, J.P., TUCHOLKE, B.E., COLLINS, J.A. Seismic reflection imaging of an oceanic detachment fault: Atlantis megamullion (Mid-Atlantic Ridge, 30°10'N). **Earth and Planetary Science Letters**, v. 232, p. 543-560, 2004.

CAMPOS, T.F.C., BEZERRA, F.H.R., SRIVASTAVA, N.K., VIEIRA, M.M., VITA-FINZI, C. Holocene tectonic uplift of the St Peter and St Paul Rocks (Equatorial Atlantic), consistent with emplacement by extrusion. **Marine Geology**, v. 271, p. 177-186, 2010.

CANN, J.R.; BLACKMAN, D.K.; SMITH, D.K.; MCALLISTER, E.; JANSSEN, B.; MELLO, S.; AVGERIONS, E.; PASCOE, A.R.; ESCARIN, J. Corrugated slip surfaces formed at ridge transform interactions on the Mid-Atlantic Ridge. **Nature**, v. 385, p. 329-332, 1997.

GUNG, Y., ROMANOWICZ, B. Q tomography of the upper mantle using three component long period waveforms, **Geophysical Journal International**. v. 157, p. 813-830, 2004.

GURNIS, M., MUELLER, R.D., MORESI, L. Cretaceous vertical motion of Australia and the Australian-Antarctic Discordance, **Science**, v. 279, p. 1499-1504, 1998.

HEKINIAN, R., JUTEAU, T., GRACIA, E., UDINTSEV, G., SICHLER, B., SICHEL, S.E., APPRIOUAL, R. Submersible observations of Equatorial Atlantic Mantle: The St. Paul Fracture Zone region. **Marine Geophysical Research**, v. 21, p. 529-560, 2000.

MOTOKI, A., SICHEL, S.E., CAMPOS, T.F.C., SRIVASTAVA, N.K., SOARES, R.S. Present-day uplift rate of the Saint Peter and Saint Paul Islets, Equatorial Atlantic Ocean. **Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3. p. 331-342, 2009.

RITZWOLLER, M.H., SHAPIRO, N.M., LEAHY, G.M. A resolved mantle anomaly as the cause of the Australian-Antarctic discordance, **Journal of Geophysical Research**, v. 108-B12, p. 2559, 2003.

SHACKELTON, N.J. Oxygen isotope analyses, ice volume, and sea level. **Quaternary Science Review**, v. 6, p. 183-190, 1987.

SICHEL, S.E., ESPERANÇA, S., MOTOKI, A., MAIA, M., MELLO, S.L.M., HORAN, M.F. Geophysical and geochemical indications for existence of cold upper mantle beneath the Equatorial Atlantic Ocean. **Revista de Sociedade Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 1, p. 69-86, 2008.

SMITH, W.H., SANDWELL, D.T. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. **Science Magazine**, v. 277, issue 5334, p. 1957-1962, 1997.

TILLEY, C.E. Dunite mylonite of St. Paul's rocks (Atlantic). **American Journal of Science**, v. 245, 483-491, 1947.

TUCHOLKE, B.E., FUJIOKA, K., ISHIHARA, T., HIRTH, G., KINOSHITA, M. Submersible study of an oceanic megamullion in the central North Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 16145-16161, 2001.

TUCHOLKE, B.E., LIN, J., KLEINROCK, M.C. Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complex on the Mid-Atlantic Ridge. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 9857-9866, 1998.

UCSD-SIO. Measured and estimated seafloor topography. Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diago. http://topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html. Acesso em 10 de abril de 2009.

WHITMARSH, R.B., MANATSCHAL, G., MINSHULL, T.A. Evolution of magma-poor continental margins from rifting to seafloor spreading. **Nature**, v. 143, p. 150-154, 2001.