



**Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo,
Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos
Abiogenéticos por Serpentinização**

Mantle Rock Exhumation at Saint Peter and Saint Paul Islets, Equatorial Atlantic Ocean, and its
Implication to Possible Generation of Abiogenic Hydrocarbons by Serpentinization

Akihisa Motoki¹ (In memoriam); Susanna Eleonora Sichel²; Thais Vargas¹; Peter Szatmari³;
Alcides Nobrega Sial⁴; José Antônio Baptista Neto²; Isa Brehme²;
Kenji Freire Motoki^{2,5} & Aurélio Kasakewitch Ribeiro¹

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia, Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea,
Rua São Francisco Xavier 524, Bloco A, Sala 4023, Maracanã, 20550-990 Rio de Janeiro, Brasil

²Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geologia, Laboratório de Geologia do Mar
Avenida General Milton Tavares de Souza s/n, 4 andar, Gragoatá, 24210-340 Niterói, Brasil

³PETROBRAS - CENPES - Avenida Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária, 21941-915, Rio de Janeiro, Brasil

⁴Universidade Federal do Pernambuco Departamento de Geologia,.

Rua Manoel de Almeida 65, Apartamento 501, Graças, 52011-140 Recife, Brasil

⁵MAG, Mar Ambiente e Geologia. Rua Visconde de Inhauma, 37, 20091-007 Rio de Janeiro, Brasil

E-mails: motokiakihisa@gmail.com, susannasichel@id.uff.br, thais@uerj.br,

szatmari@petrobras.com.br, sial@ufpe.br, jabneto@id.uff.br, isabrehme@id.uff.br, kenji_dl@hotmail.com, aureliokr@uol.com.br

Recebido em: 10/07/2014 Aprovado em: 15/01/2015

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2015_1_05_20

Resumo

Este trabalho apresenta a exumação das rochas mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua implicação na possível geração de hidrocarbonetos abiogenéticos por serpentinização. Na zona de falhas transformantes de São Paulo, observam-se duas condições tectônicas contrastadas para exumação do manto: Distensão no centro de espalhamento amagmático e compressão ao longo da cadeia de transpressão. No fundo do oceano, as rochas ultramáficas do manto exumado reagem quimicamente com a água do mar gerando energia térmica e hidrocarbonetos abiogenéticos, o fenômeno denominado serpentinização. O espalhamento amagmático com a formação de megamullion ocorre ao longo dos segmentos inter-transformantes da cadeia meso-oceânica. As rochas ultramáficas são originadas no manto superficial e possuem serpentinização avançada e deformação plástica pouco expressiva. Os porfiroblastos de olivina apresentam fraturamento rúptil. Por outro lado, a cadeia de transpressão ocorre ao longo do trecho da falha transformante em que a direção da falha e o movimento relativo das placas são oblíquos. Devido à discordância direcional, o movimento transcorrente gera o esforço de compressão perpendicular à falha. Este esforço levanta o manto profundo subjacente a partir da profundidade de deformação dúctil até a superfície da Terra. A cadeia de transpressão no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, denominada Cadeia de Brachiosaurus, é o único exemplo confirmado exumação do manto acima do nível do mar no Oceano Atlântico. As rochas do manto têm serpentinização pouco expressiva e deformação plástica extremamente desenvolvida, apresentando textura milonítica. Os porfiroclastos e a matriz apresentam tanto o fraturamento rúptil quanto a deformação plástica.

Palavras-chave: Exumação do manto; serpentinização; hidrocarboneto abiogenético; Zona de falhas transformantes de São Paulo; cadeia de transpressão

Abstract

This paper presents the mantle rock exhumation at Saint Peter and Saint Paul Islets, Equatorial Atlantic Ocean, and its implication to possible generation of abiogenic hydrocarbons by serpentinization. In Saint Paul transform fault zone, there are two contrasting tectonic processes for mantle exhumation: Extension at amagmatic spreading centre and compression along a pressure ridge. On the ocean bottom, the ultramafic rocks of exhumed mantle react chemically with sea-water generating heat and abiogenic hydrocarbons, the phenomenon called serpentinisation. The amagmatic spreading with megamullion formation occurs along inter-transform ridge segments. The ultramafic rocks are originated from uppermost mantle and have advanced serpentinisation and little expressive plastic deformation. The olivine porphyroblasts show brittle fracturing. On the other hand, the pressure-ridge occurs along the transform fault span where the fault directions and relative plate motion are oblique. Due to the direction discordance, the strike-slip movement of the transform fault generates compression stress perpendicular to the fault. This stress squeezes out the underlying deep mantle from the ductile deformation depth up to the Earth's surface. The pressure ridge at Saint Peter and Saint Paulo Islet, namely Brachiosaurus Ridge, is the only confirmed example of mantle exhumation above sea level in Atlantic Ocean. The mantle rocks have little expressive serpentinisation and extremely developed plastic deformation, showing mylonitic texture. The porphyroclasts and matrix show either brittle fracturing or plastic deformation.

Keywords: Mantle exhumation; serpentinisation; abiogenic hydrocarbon; Saint Paul transform fault zone; pressure-ridge

1 Introdução

A teoria de origem biogenética de petróleo e gás natural é a idéia amplamente aceita nas comunidades científicas. Esse modelo explica que os materiais orgânicos biogenéticos na superfície da Terra são depositados em bacias sedimentares junto com sedimentos clásticos finos, formando folhelhos e rochas afins, denominadas rochas geradoras. Os materiais orgânicos se transformam parcialmente em hidrocarbonetos por efeitos geotérmicos. Sob condições favoráveis de permeabilidade e sobrecarga, esses migram para a parte superior das formações sedimentares e são armazenados nos poros e fraturas das rochas reservatórias. Quando ocorre uma camada selante sobre a reservatória, formam-se depósitos de petróleo.

As razões isotópicas de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dos hidrocarbonetos leves medidas nos campos petrolíferos indicam craqueamento térmico de moléculas grandes (Stah, 1979; Prinzhofer & Pernaton, 1997; Clayton, 1991). Esta condição está de acordo com o modelo biogenético. A teoria justifica a distribuição de grandes jazidas de petróleo em regiões limitadas onde ocorrem bacias sedimentares com alta taxa de sedimentação. A idéia geral é que a maioria dos recursos de petróleo e gás já foi descoberta e está em extração. Desta forma, os hidrocarbonetos energéticos do mundo estão ao rumo de esgotamento.

Além da idéia biogenética, existe o modelo da origem abiogenética de petróleo e gás, apresentada por Gold (1985) entre outros. Este autor considera que os materiais orgânicos dos recursos energéticos químicos são de origem cósmica. Durante a formação da Terra, os hidrocarbonetos foram armazenados no manto superior na forma de CH_4 . As jazidas conhecidas de petróleo e gás corresponderiam aos materiais orgânicos que vazaram do reservatório primordial no manto superior. Dessa forma, os depósitos de hidrocarbonetos poderiam ocorrer, também, no embasamento da crosta continental, como no caso da Ucrânia (Kutcherov & Krayushkin, 2010). As reservas atuais corresponderiam a uma pequena parte da abundância mundial e, portanto haverá novas descobertas de imensos campos de petróleo.

Encontra-se uma outra teoria abiogenética baseada na produção industrial de combustível líquido a partir de CO , CO_2 e H_2 pela síntese

catalítica Fischer-Tropsch (Szatmari, 1989). Durante a Segunda Guerra Mundial, este processo industrial forneceu parte do combustível ao exercito alemão. O mesmo processo químico ocorre na natureza durante a serpentinização de rochas ultramáficas, gerando hidrogênio e metano pela redução de H_2O e CO_2 , produzindo parte da reserva mundial de petróleo (Anderson, 1984; Mims & McCandlish, 1985; Salvi & Williams-Jones, 1997; Schulz, 1999; Taran *et al.*, 2007; Etiope & Lollar, 2013; Etiope *et al.*, 2013a; Etiope *et al.*, 2013b).

A serpentinização, o hidrotermalismo de baixa temperatura e a conseqüente geração de hidrocarbonetos abiogenéticos ocorrem nas localidades em que rochas ultramáficas do manto estão expostas no fundo do oceano. A geração abiogenética de CH_4 e sua emissão a partir de chaminés hidrotermais são observadas em algumas localidades do mundo, especialmente no Oceano Atlântico Norte (Früh-Green *et al.*, 2003; Kelley *et al.*, 2005). Entretanto, no Brasil ainda não houve pesquisas geológicas sob este ponto de vista.

Com base nas pesquisas recentes, os autores apresentam as condições tectônicas para a geração potencial de hidrocarbonetos abiogenéticos pela serpentinização na zona de falha transformante de São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial. Os estudos estão em andamento e, não há ainda neste momento as evidências diretas da geração de hidrocarbonetos leves.

2 Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

A geração abiogenética de hidrocarbonetos atrai um grande interesse das comunidades científicas. No ano 2005, a AAPG abriu uma seção especial sobre este tema, reconhecendo como uma fonte secundária da reserva mundial do hidrocarboneto (Jenden *et al.*, 1993; Lollar *et al.*, 2002; 2006; Potter & Konnerup-Madsen, 2003; Katz *et al.*, 2008; Glasby, 2006; Kutcherov & Krayushkin, 2010).

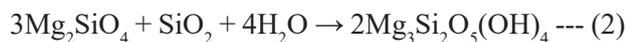
As reações químicas de serpentinização são exotérmicas (Allen & Seyfried Jr., 2004) e provocam hidrotermalismo de baixa temperatura de 40° a 90° (Moody, 1976; Proskurowski *et al.*, 2006). A energia térmica gera H_2 e CH_4 através da redução

de H₂O e CO₂. O líquido hidrotermal é alcalino, com pH de 9 a 11, e contém alto teor de hidrogênio e hidrocarbonetos leves, principalmente CH₄. Esses são emitidos a partir de chaminés de carbonatos (Berndt *et al.*, 1996). A serpentinização é um grupo de reações químicas que ocorrem entre minerais máficos e água, principalmente a transformação de olivina em serpentina. O processo é complexo, sendo representado pelas próximas reações.

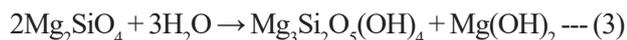
Fayalita + água → magnetita + sílica + hidrogênio



Forsterita + sílica → serpentina



Forsterita + água → serpentina + brucita



A reação (1) gera hidrogênio, que reduz o CO₂ em CH₄ (Proskurowski *et al.*, 2008). O Atlantis megamullion, situada em torno da latitude 30°N ao longo da cadeia meso-oceânica do Oceano Atlântico, possui um campo hidrotermal de baixa temperatura, a localidade conhecida como Lost City (Früh-Green *et al.*, 2003), onde ocorre um complexo eco-sistema (Kelley *et al.*, 2005; Brazelton *et al.*, 2006). Nesta localidade, o CH₄ abiogenético alimenta bactérias e a cadeia alimentar superior, transformando o material orgânico abiogenético em biomassas de alto nível de polimerização. O campo hidrotermal Rainbow, que se situa cerca de 36°N, expõe rochas ultramáficas do manto. Sendo diferente da Lost City, o hidrotermalismo é de alta temperatura.

3 Exumação do Manto por Espalhamento Amagmático

A serpentinização em grande escala ocorre no fundo do oceano em que o manto está exposto. A exumação do manto e sua exposição no fundo do oceano, sem cobertura da crosta, são de rara ocorrência mundial. Na zona de falhas transformantes de São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, observam-se duas condições tectônicas

contrastadas para a exumação do manto: 1) Tectonismo de distensão no contato divergente de placas de espalhamento amagmático; 2) Tectonismo de compressão na cadeia de transpressão ao longo da falha transformante.

Nas cadeias meso-oceânicas, ocorre ascensão do manto subjacente de acordo com o espalhamento das placas. Quando a taxa de espalhamento é alta, o tempo para resfriamento do manto em ascensão não é suficiente e, portanto ocorre a fusão parcial do manto por descompressão quase adiabática gerando magma basáltico. Este é o processo de formação da crosta oceânica. Este tipo de espalhamento é denominado espalhamento magmático normal.

Por outro lado, quando a taxa de espalhamento é baixa, o manto em ascensão tem o tempo suficiente para resfriamento e, portanto não se pode gerar a quantidade suficiente do magma para formar a crosta oceânica. Neste caso, ocorre localmente a exposição do manto no fundo do oceano, o fenômeno denominado exumação do manto. No contato divergente de placas deste tipo, ao invés de graben de rifte, ocorre a falha normal de baixo ângulo denominada falha de descolamento (*detachment fault*; Brun *et al.*, 1994; Whitmarsh *et al.*, 2001; Canales *et al.*, 2004; Escartín *et al.*, 2008). Tal espalhamento é denominado espalhamento amagmático ou espalhamento tectônico (*amagmatic spreading*; *tectonic spreading*; Tucholke & Lin, 1994; Michael *et al.*, 2003; Cannat *et al.*, 2006; Dick *et al.*, 2003).

O Oceano Atlântico Norte tem baixa taxa de espalhamento e a geração do magma na cadeia meso-oceânica é menos intenso do que o Oceano Pacífico. Mesmo assim, o resfriamento do manto ascendente ainda não é suficiente e ocorre o espalhamento magmático normal na maioria dos trechos da cadeia. A exumação do manto ocorre apenas nas áreas limitadas em que a temperatura do manto é anormalmente baixa, denominadas ponto frio (*cold-spot*; Cann *et al.*, 1997; Ohara *et al.*, 2001; Whitmarsh *et al.*, 2001; Ritzwoller *et al.*, 2003; Canales *et al.*, 2004), tal como Oceano Atlântico Equatorial.

No contato do espalhamento amagmático, o maciço com exposição do manto ocorre no bloco inferior da falha de descolamento, apresentando a saliência morfológica na forma de carapaça de

Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

tartaruga, denominada megamullion (Figura 1; Blackman *et al.*, 1998; Tucholke *et al.*, 1998; 2001; 2008; Ohara *et al.*, 2001). A saliência morfológica é constituída principalmente por peridotito serpentizado e gabro. A superfície é caracterizada pelos relevos lineares com direção perpendicular à cadeia meso-oceânica, chamados de corrugação (*corrugation*; Ohara *et al.*, 2001; Fujiwara *et al.*, 2003).

As rochas ultramáficas do manto expostas na superfície de megamullions são caracterizadas por alto grau de serpentinização e muito baixo grau de deformação plástica com porfiroblastos de olivina, ortopiroxênio e clinopiroxênio de tamanho milimétrico (Figura 2). Os porfiroblastos apresentam textura de fragmentação rúptil. Observam-se fraturas não lineares com largura milimétrica a submilimétrica preenchidas por carbonatos (Figura 2A, seta). No campo, encontram-se os veios de carbonatos com espessura até 50 cm e uma parte desses pode ser conduto de chaminé hidrotermal de baixa temperatura.

No Oceano Atlântico Norte, houve estudos detalhados do espalhamento amagmático, tais como da zona de fratura de Atlantis e de Kane (Blackman

et al., 1998; Canales *et al.*, 2004. Schouten *et al.*, 2010). No Atlantis Megamullion, foi observado hidrotermalismo de baixa temperatura com a formação de chaminés de carbonatos e a conseqüente geração de metano abiogenético por serpentinização (Früh-Green *et al.*, 2003; Kelley *et al.*, 2005; Proskurowski *et al.*, 2008).

A região central do Oceano Atlântico Equatorial é caracterizada pelo manto subjacente de baixa temperatura (Bonatti *et al.*, 1993; Hekinian *et al.*, 2000; Gung & Romanowicz, 2004; Sichel *et al.*, 2008). Na zona de falhas transformantes de São Paulo, o espalhamento amagmático ocorre nos segmentos inter-transformantes, ou seja, centros de espalhamento das placas. Um típico exemplo foi observado nos flancos do segmento A (Hekinian *et al.*, 2000; Figuras 3, 4). O espalhamento amagmático ocorre também nos segmentos B e C, porém as exposições do manto são menos expressivas apesar das sugestões geofísicas (Motoki K. *et al.*, 2014). Na Figura 3, a área assombreada corresponde ao ponto frio (*cold-spot*) em que ocorre o manto subjacente de baixa temperatura, alta anomalia Bouguer, alta velocidade de ondas sísmicas e alto fator Q (Sichel *et al.*, 2008).

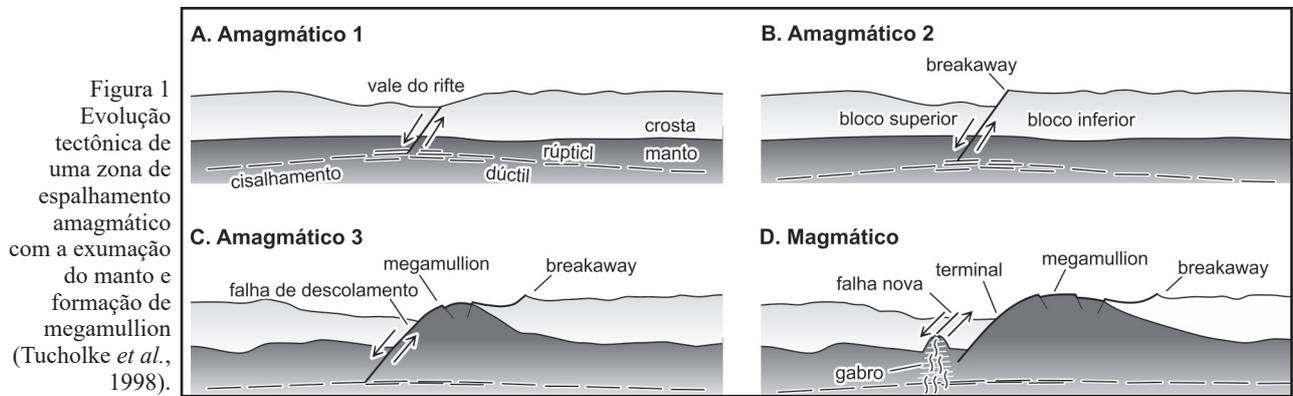
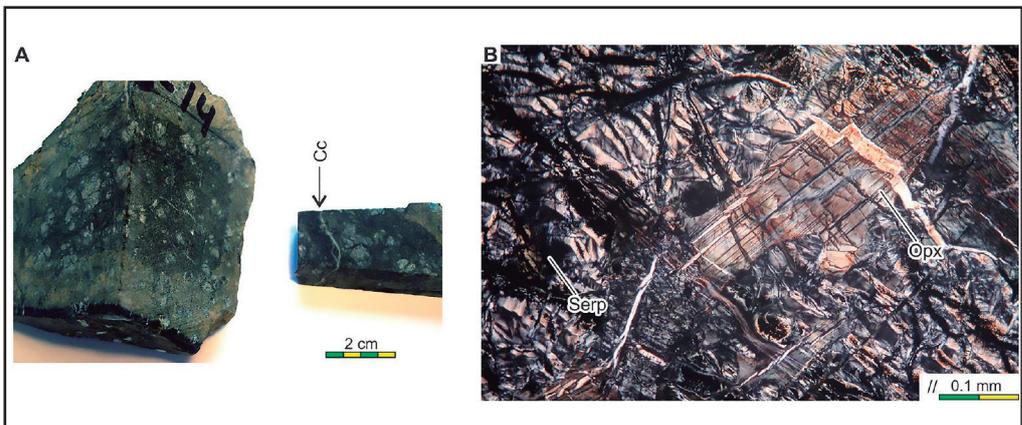


Figura 1 Evolução tectônica de uma zona de espalhamento amagmático com a exumação do manto e formação de megamullion (Tucholke *et al.*, 1998).

Figura 2 Rocha ultramáfica do manto não deformada e altamente serpentizada da zona de falhas transformantes de São Paulo. A rocha é exposta na superfície do megamullion formado no Mioceno (Sichel *et al.*, 2011):
 A. Visão macroscópica;
 B. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.
 Serp - serpentina;
 Opx - ortopiroxênio;
 Cc-carbonatos.



Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

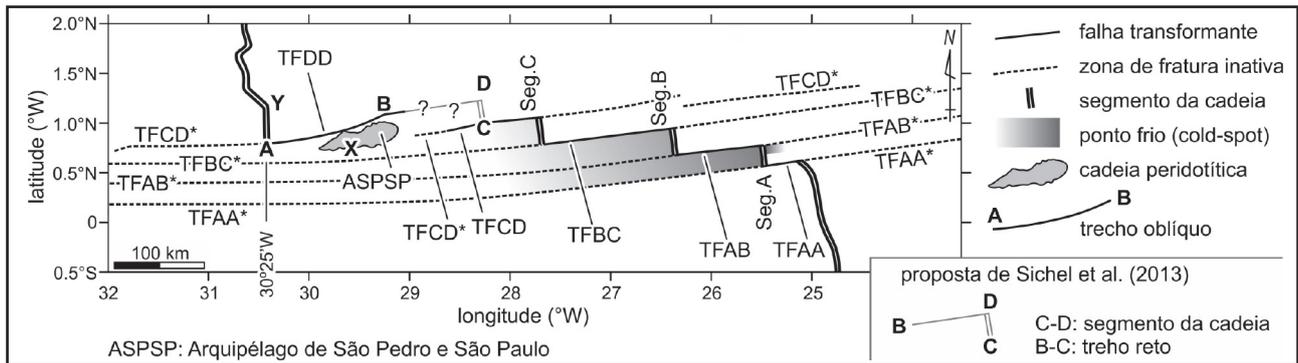


Figura 3 Mapa geotectônico da zona de falhas transformantes de São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, modificado de Sichel *et al.* (2011) e Motoki K. *et al.* (2014). O segmento D, C-D, e o trecho reto da falha transformante, B-C, foram propostos por Sichel *et al.* (2011). Os dados morfológicos e geofísicos não indicam claramente o plano de contato das placas na parte entre B e C, onde é indicada por “?”. ASPSP: Arquipélago de São Pedro e São Paulo

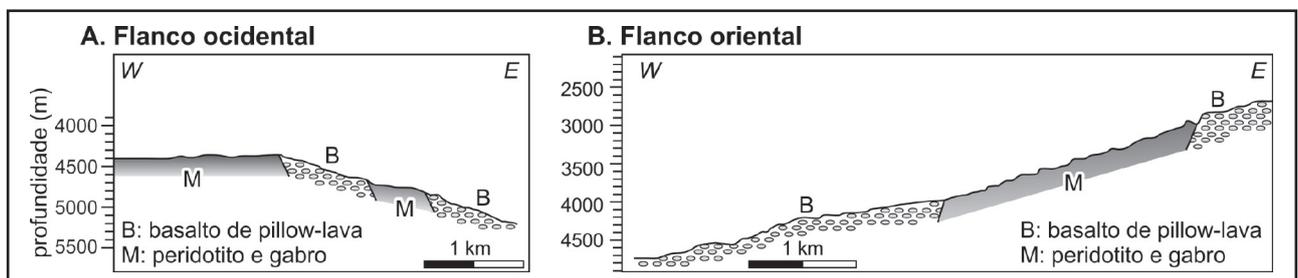


Figura 4 Exposição de rochas ultramáficas no fundo do oceano nos flancos do segmento A pelo espalhamento amagmático. As figuras são simplificadas de Hekinian *et al.* (2000): A. Flanco ocidental, Placa Sul-Americana; B. Flanco oriental, Placa Africana. B - basalto de pillow-lava que representa a superfície da crosta oceânica; M - peridotito não deformado e gabro que constituem de megamullion.

4 Exumação do Manto por Transpressão

A zona de falhas transformantes de São Paulo é caracterizada por um tectonismo de movimento transcorrente dextral. Portanto, em condições normais esforço de compressão é pouco provável. Entretanto, no limítrofe noroeste da zona de falha transformante de São Paulo, observa-se excepcionalmente a compressão.

O esforço de compressão e a distensão ao longo de uma falha transcorrente ocorrem nos trechos em que as direções da falha transformante e do movimento relativo das placas não são paralelas. Em uma falha de deslocamento dextral com direção leste-oeste, quando o trecho da falha tem direção local nordeste-sudoeste, gera-se a compressão perpendicular à falha a conseqüente. Esta compressão forma uma saliência morfológica linear paralela ao trecho da falha, denominada cadeia de transpressão (*pressure-ridge*). Por outro lado, quando o trecho tem direção local noroeste-sudeste, ocorre a distensão formando uma depressão morfológica denominada bacia de distensão (*pull-apart basin*; Figura 5). Os fenômenos acima citados são conhecidos nas falhas transcorrentes ativas (Burford, & Harsh,

1980; Garfunkel *et al.* 1981; Goldfinger *et al.*, 1996; Unsworth *et al.*, 1997; Allen *et al.*, 2013).

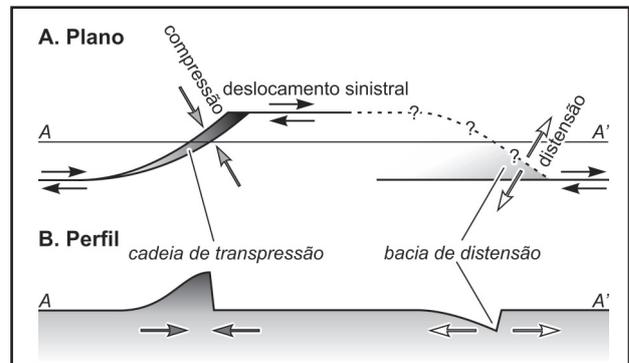


Figura 5 Ilustração esquemática para a gênese tectônica de cadeia de transpressão (*pressure-ridge*) e bacia de distensão (*pull-apart basin*), que são originadas do movimento dextral da falha transcorrente nos trechos onde a direção da falha e o movimento dos blocos não são paralelos.

A zona de falha transcorrente de São Paulo é constituída, pelo menos, por quatro falhas transformantes e três segmentos inter-transformantes de cadeia, ou seja, centros de espalhamento de placas oceânicas. Na maioria das partes, o contato entre as placa Sul-Americana e Africana é evidenciada claramente pela morfologia submarina.

Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

Na porção limítrofe nordeste da zona de falhas transformantes, ocorre uma elevação morfológica com 100 km de comprimento, 25 km de largura, 3500 m de altura relativa e a direção aproximada leste-oeste, denominada de cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo (Motoki *et al.*, 2009; Sichel *et al.*, 2011). Este nome é confuso com o Arquipélago de São Pedro e São Paulo e, portanto os autores chamam de Cadeia de Brachiosaurus (*Brachiosaurus Ridge*; Figura 6) devida à sua forma tridimensional, seguindo o exemplo de Godzilla Megamullion do Oceano Pacífico (Ohara *et al.*, 2001; Harigane *et al.*, 2011; Loocke *et al.*, 2013).

Esta cadeia é muito maior do que as feições submarinas adjacentes (Figura 6A). Essa não é um edifício vulcânico por que é composta de rochas ultramáficas do manto oceânico. O Arquipélago de São Pedro e São Paulo ocorre no topo desta cadeia, sendo a única localidade do Oceano Atlântico em que ocorre a exposição *in-situ* do manto acima do nível do mar. No Arquipélago, observa-se o soerguimento ativo com uma taxa de 1.5 mm/ano (Motoki A. *et al.*, 2009; Campos *et al.*, 2010). Este é o tectonismo ativo mais intenso do Brasil. A grande altura, a morfologia altamente acidentada, a declividade extraordinariamente alta dos flancos e a alta velocidade de soerguimento são incompatíveis com o modelo de megamullion.

Hekinian *et al.* (2000) e Brunelli & Seyler (2010) consideraram que o contato entre as placas oceânicas de falha transformante estria ao longo da linha reta que liga os pontos A e C (Figura 3). O contato estimado proposto por esses autores cruza longitudinalmente com a cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo, formando um pequeno graben denominado graben longitudinal. Entretanto, a morfologia submarina e a anomalia gravimétrica ar-livre, bem como a direção da estrutura milonítica e das fraturas tectônicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, não estão de acordo com a idéia acima citada (Sichel *et al.*, 2011; Motoki K. *et al.*, 2014).

Os dados morfológicos e gravimétricos indicam que o contato das placas é mais complexo, sendo que a falha transformante ativa está presente no trecho curvado entre A e B. A direção do trecho é excepcionalmente oblíqua ao movimento relativo entre as placas Sul-Americana e Africana, sendo denominado trecho oblíquo (*oblique span*). Devido à discordância direcional, ocorre o esforço de compressão em direção sub-perpendicular à falha. A Cadeia de Brachiosaurus está na localidade em que ocorre o ângulo máximo entre a falha transformante e a direção geral de movimento das placas (Figura 3).

A cadeia peridotítica é constituída principalmente pelo peridotito com textura milonítica alta-

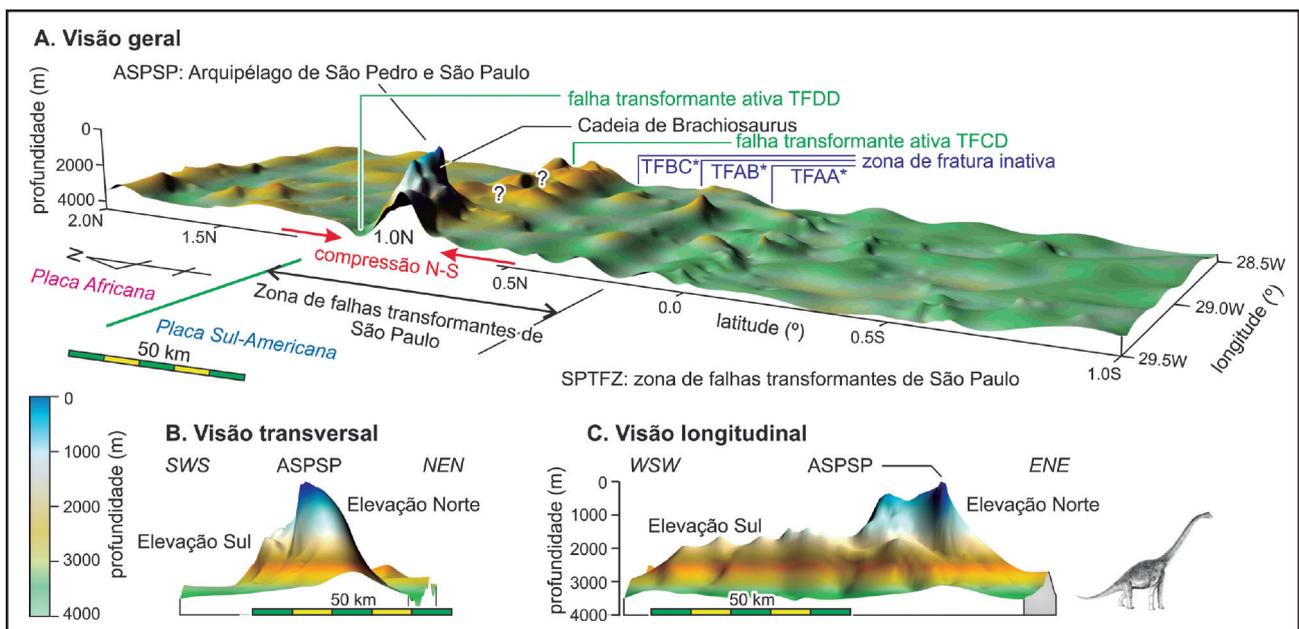


Figura 6 Morfologia submarina da Cadeia de Brachiosaurus com base nos dados topográficos de satélite TOPEX versão 17.1: A. Visão oblíqua; B. Visão Transversal; C. Visão longitudinal. As características morfológicas e gravimétricas da falha transformante TFCD não continuam até a Cadeia de Brachiosaurus.

Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

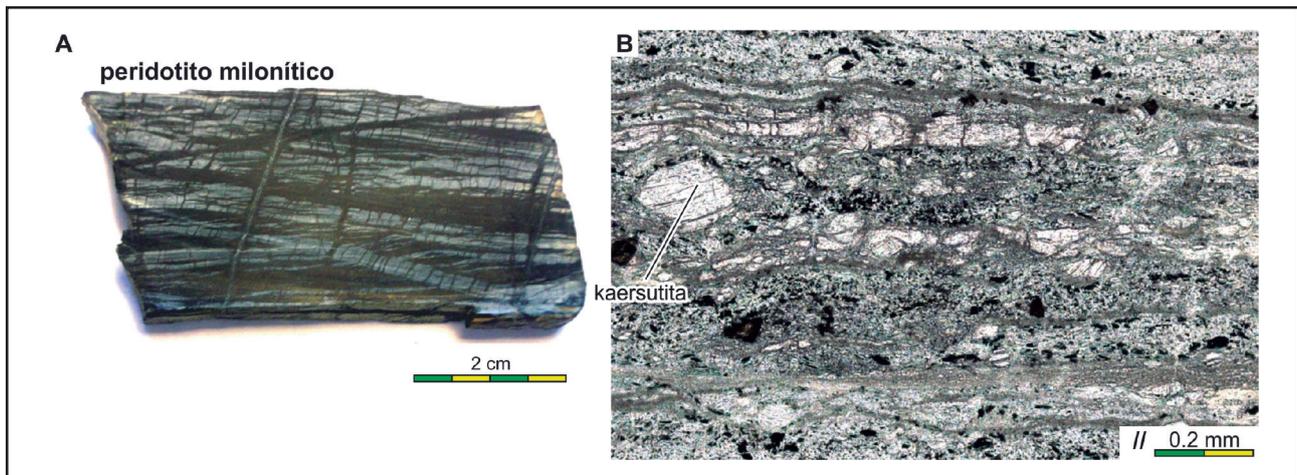


Figura 7 Rocha ultramáfica do manto com alto grau de deformação plástica e baixo grau de serpentinização da Cadeia de Brachiosaurus (Sichel *et al.*, 2011): A. Visão macroscópica; B. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.

mente desenvolvida (Figura 7A). A serpentinização é parcial e, em algumas localidades, ocorre a rocha ultramáfica praticamente não serpentinizada. A anomalia gravimétrica Bouguer da cadeia peridotítica é alta, indicando rocha ultramáfica não serpentinizada de alta densidade (Motoki K. *et al.*, 2014). Ao microscópio, observam-se tanto a textura de deformação dúctil (Figura 7B) quanto de comportamento rúptil. Encontram-se porfiroclastos submilimétricos de olivina, ortopiroxênio, clinopiroxênio e anfibólio. Apesar de que a cadeia peridotítica se situa na zona de manto frio, a exumação do manto na cadeia peridotítica não está relacionada diretamente ao espalhamento amagmático.

5 Evidências da Compressão Tectônica

A Cadeia de Brachiosaurus é uma feição morfológica submarina peculiar sugerindo um tectonismo raro. A alta densidade das rochas constituintes é incompatível aos mecanismos de soerguimento isostático, tal como protursão de serpentina (*serpentine protrusion*; Bonatti, 1976). Foram encontradas quatro evidências indicativas do esforço de compressão (Sichel *et al.*, 2011; Motoki K. *et al.*, 2014): 1) Forma e direção da cadeia peridotítica; 2) Fraturas tectônicas; 3) Mecanismo focal dos terremotos; 4) Soerguimento ativo.

A cadeia peridotítica é uma elevação morfológica destacada, com cerca de 100 km de comprimento, 25 km de largura, 3500 m de altura e direção aproximada leste-oeste tendendo

ligeiramente a WNW-ESSE (Figura 6). Esta direção é subparalela ao trecho oblíquo. Como uma feição morfológica submarina, a declividade dos taludes é extraordinariamente alta, sendo maior que 45° (Motoki A. *et al.*, 2009; Motoki, K. *et al.*, 2013). No talude sul, ocorre uma escarpa subvertical de 1500 m de altura relativa (Hekinian *et al.*, 2000).

A cadeia peridotítica é cortada por um graben longitudinal, que constituía a falha transformante no Mioceno (Sichel *et al.*, 2011), que corresponde à zona de fratura inativa TFCD* (Figura 3). Os mergulhos profundos realizados com o auxílio de submersível científico Nautile revelaram que o graben possui profundidade relativa máxima de 1000 m e largura máxima de 4 km (Hekinian *et al.*, 2000). Porém, o graben é significativamente menor do que a depressão do trecho oblíquo, que corresponde à falha transformante TFDD, com profundidade mínima de 1500 m e largura máxima de 15 km (Figura 8). Essas características indicam que o trecho oblíquo é formado por um intenso tectonismo recente. A forma e a direção da cadeia peridotítica sugerem a compressão norte-sul, tendendo ligeiramente a NWN-ESE.

A Cadeia de Brachiosaurus situa-se na extensão ocidental da falha transformante TFCD (Figura 3, 6A). O graben longitudinal TFCD* (Figuras 3, 8), que divide a Elevação Norte e Elevação Sul, era considerada como a falha transformante ativa (Hekinian *et al.*, 2000; Brunelli & Seyler, 2010; Campos *et al.*, 2010). Se a estrutura milonítica fosse originada diretamente do deslocamento dextral

Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

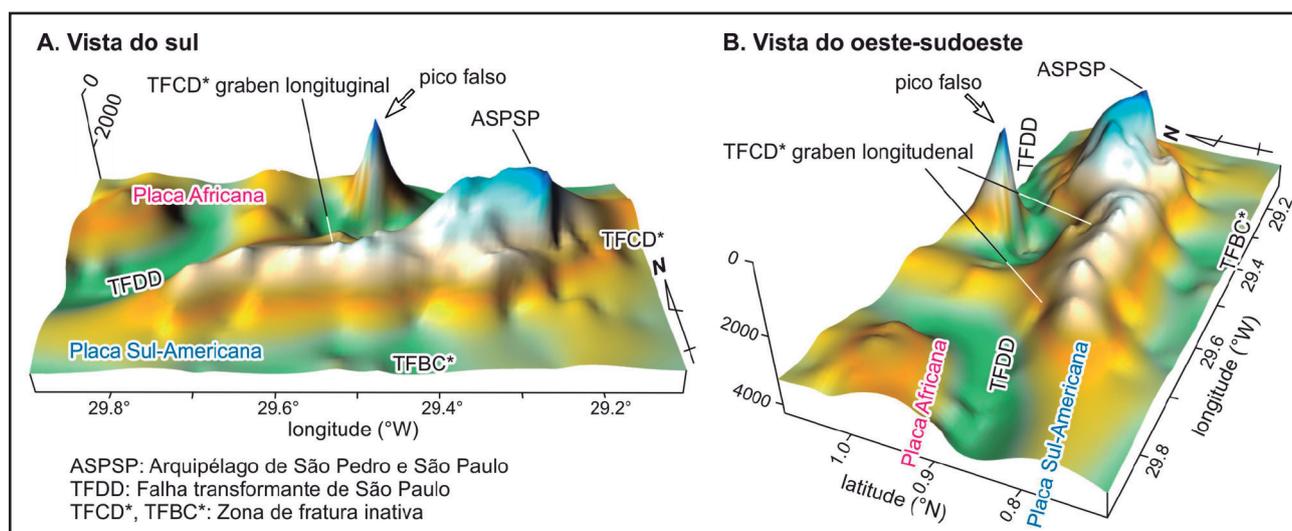


Figura 8 Visão tridimensional da morfologia submarina na área da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo (Motoki K. *et al.*, 2014), com o auxílio do software original BAZ versão 1.0 (Motoki A. *et al.*, 2011): A. Visão a partir da Placa Sul-Americana à Placa Africana; B. A falha transformante TFDD que divide Placa Africana (esquerda) e Sul-Americana (direita). . O pico falso é originado do ruído dos dados do TOPEX versão 16.0.

da falha transformante São Paulo, ou seja, TFCD, a estrutura deveria ter uma orientação uniforme na direção E-W. Entretanto, os afloramentos no Arquipélago de São Pedro e São Paulo apresentam, de fato, a estrutura milonítica tem direção geral N-S com forte deformação demonstrando uma curvatura na forma de arco (Figura 9A). Esta observação indica que a estrutura original formada abaixo da falha transformante, que tinha a orientação uniforme E-W, foi submetida ao processo posterior de deformação sinistral, que é o sentido oposto do movimento da falha transformante. A deformação acima citada sugere o encurtamento do embasamento originado por compressão N-S. Considera-se que o graben longitudinal não é uma falha transformante ativa, mas uma falha antiga sem movimento atual com deformação posterior.

A estrutura milonítica acima citada é cortada por numerosas fraturas paralelas. As fraturas sub-horizontais são originadas do alívio de sobrecarga pela erosão. As fraturas sub-verticais são de origem tectônica e apresentam duas direções preferenciais que se cruzam em cerca de 60°, constituindo um sistema conjugal de compressão quase norte-sul tendendo ligeiramente a NWN-ESE (Figura 9B). A pequena discrepância angular entre A1-A2 e B1-B2 é atribuída ao basculamento causado pelo deslizamento gravitacional (Sichel *et al.*, 2011). Isto é, o tectonismo de deslocamento dextral dúctil que ocorreu abaixo da falha transformante antiga

paralisou em um momento no tempo geológico e, o corpo milonítico foi submetido ao tectonismo recente de compressão quase N-S, resultando a deformação dúctil da estrutura milonítica e o rompimento rúptil do sistema conjugal de fraturas paralelas. O contato entre as placas Africana e Sul-Americana estava presente na posição do graben longitudinal, porém atualmente esse não se situa mais aí (Motoki *et al.*, 2010; Sichel *et al.*, 2011).

A maioria dos terremotos observados nesta área durante o período de 1971 a 1988 tem mecanismo focal de movimento transcorrente dextral, que representa o movimento normal das falhas transformantes. Entretanto, existem dois terremotos na proximidade da cadeia peridotítica indicando compressão norte-sul tendendo ligeiramente a NWN-ESE (Figura 10). Isto é, na proximidade da cadeia peridotítica ocorre o esforço de compressão. A direção da compressão é a mesma do sistema conjugal das fraturas tectônicas (Figura 9B), sugerindo que, o esforço de compressão continua até o presente.

A altitude da plataforma de abrasão marinha do Flandriano observada no Arquipélago de São Pedro e São Paulo indica o soerguimento ativo com uma taxa de 1.5 mm/ano (Motoki A. *et al.*, 2009; Figura 11A). Esta idéia é apoiada pela datação ¹⁴C para os carbonatos holocênicos coletadas da Ilha Belmonte (Campos *et al.*, 2010; Figura 9A, 11B).

Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

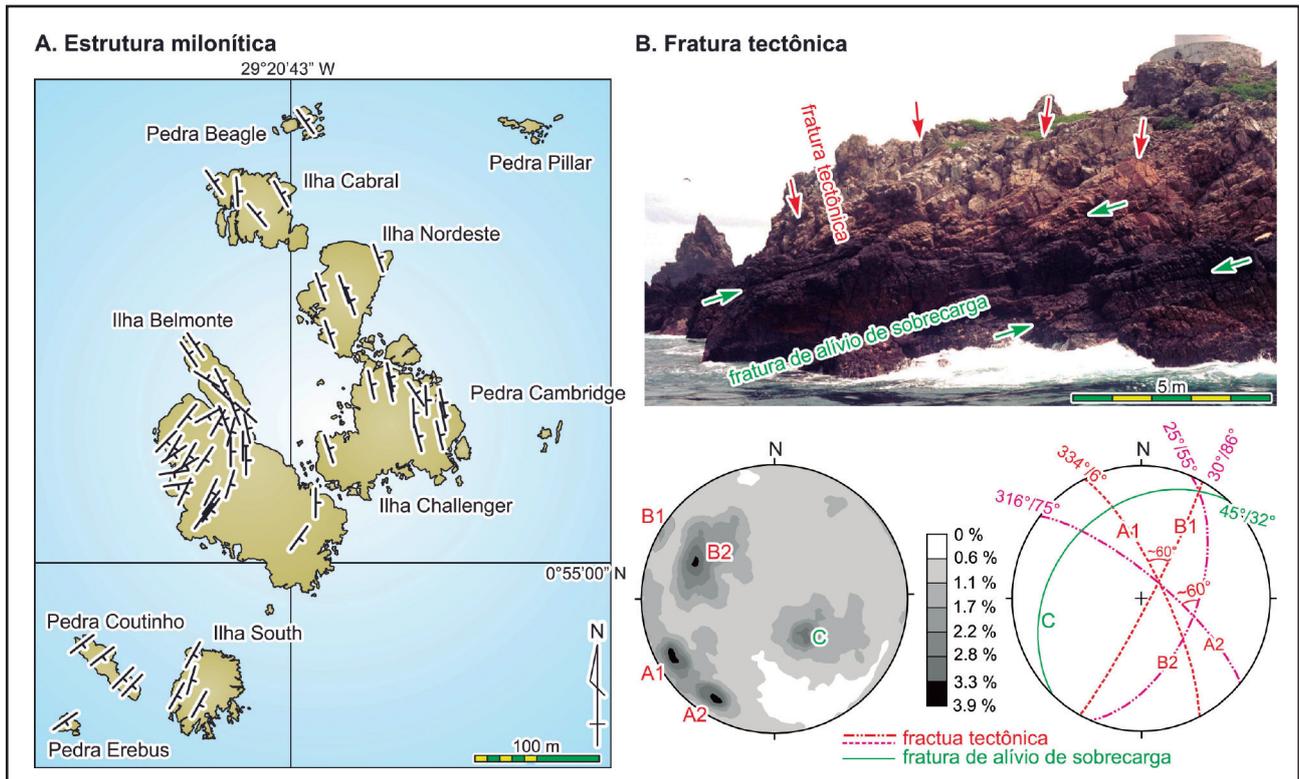


Figura 9 Estruturas de deformação no Arquipélago de São Pedro e São Paulo modificado de Motoki *et al.* (2010) e Sichel *et al.* (2011). A. Estrutura milonítica; B. Fraturas tectônicas. Os dados de campo são créditos de Luis Simões, Thomas Campos, Rodrigo Soares e Jennifer Amaya-Angel. Os nomes de ilhas e pedras são segundo SECIRM.

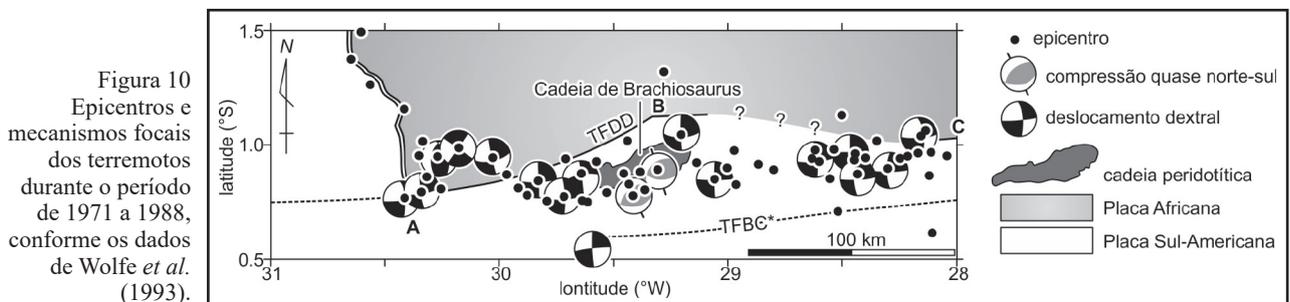


Figura 10 Epicentros e mecanismos focais dos terremotos durante o período de 1971 a 1988, conforme os dados de Wolfe *et al.* (1993).

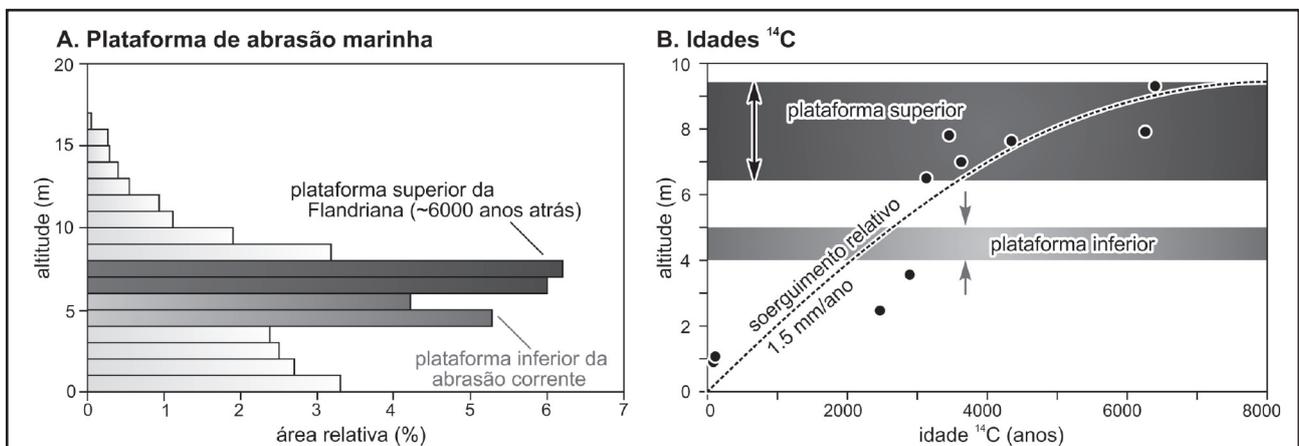


Figura 11 Evidências para o soerguimento tectônico ativo do Arquipélago de São Pedro e São Paulo com uma taxa de 1.5 mm/ano: A. Plataforma de abrasão marinha (Motoki *A. et al.*, 2009); B. Datações ^{14}C para os carbonatos da Ilha de Belmonte (Campos *et al.*, 2010).

Considera-se que, no Mioceno, as rochas do manto com textura milonítica, que estão expostas atualmente no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, constituíam a zona de cisalhamento abaixo da falha transformante na profundidade de deformação dúctil. A estrutura milonítica era de direção uniforme E-W devido ao deslocamento dextral da falha transformante São Paulo ao longo da TFCD, que se situava no graben longitudinal.

Conforme a mudança do regime tectônico local, a falha transformante mudou da localidade do graben longitudinal para a TFDD e surgiu o esforço de compressão quase N-S. As rochas ultramáficas miloníticas foram soerguidas pelo esforço de compressão a partir da profundidade da deformação dúctil no manto profundo até o nível do mar. Este tectonismo continua até o presente, sendo o soerguimento ativo mais intenso do Brasil.

6 Gênese do Trecho Oblíquo

Sichel *et al.* (2011) explicaram a peculiaridade geotectônica da zona de falhas transformantes de São Paulo propondo surgimento de um novo segmento da cadeia meso-oceânica com comprimento aproximado de 20 km que se situaria ao norte do segmento C, denominado segmento D (Figura 3). No Mioceno médio, a falha transformante situava-se ao longo da linha que liga os pontos C e D. A cerca de 8 Ma, surgiu o segmento D e ocorreu o salto do contato de placas do trecho A-C para o A-D. Desta forma, surgiu o trecho oblíquo A-B. Conforme o espalhamento do segmento D, formou-se o trecho reto B-C, elevando-se a discordância direcional do trecho oblíquo, a intensidade da compressão quase norte-sul e a velocidade de soerguimento da cadeia peridotítica. Este tectonismo seria temporário que ocorre somente na fase transitória do regime de 3 segmentos e 4 falhas transformantes para 4 segmentos e 5 falhas transformantes.

Apesar da consistência lógica do modelo, a real existência do segmento D ainda não foi confirmada. O mapa de anomalia ar-livre apresenta pequenos indícios do segmento D e do trecho reto, porém a morfologia submarina não demonstra claras evidências (Motoki K. *et al.*, 2014). Além disso, a estrutura deve ser muito estreita e rasa em comparação com os segmentos A, B e C. Em adição,

hipocentros dos terremotos durante o período de 1971 a 1988 (Wolfe *et al.*, 1993) não apóiam o modelo do segmento D. A diferença entre os dados morfológicos e gravimétricos sugere que, mesmo existindo o segmento D, este estaria soterrado por espessos depósitos sedimentares e atualmente inativo.

Diante dessas observações, os autores apresentam uma outra idéia com base na inexistência do segmento ativo D. Entre os pontos B e C (Figura 3), os dados morfológicos e gravimétricos não apresentam claramente onde está o contato das placas. Esta observação tem duas possíveis interpretações: 1) Existe um plano brusco de contato e as características morfológicas e gravimétricas são bem claras. Entretanto, os dados disponíveis não possuem a resolução suficiente para demonstrar; 2) Neste trecho, não há um plano definido de contato. De fato, os dados adotados de satélite não possuem resolução alta, porém apresentam claramente as falhas transformantes e segmentos inter-transformantes desta área. Portanto, a resolução é suficiente para determinar o contato das placas. Desta forma, a segunda idéia é mais provável.

Mesmo que não exista um plano bem definido de contato na superfície da Terra, existe certamente o movimento relativo entre as placas Sul-Americana e Africana. Caso ocorra a adesão do contato das placas (*plate boundary adhesion*) na área entre B e C, deveria haver deformação local das placas. As placas Sul-Americana e Africana desta área possuem condições térmicas diferentes do manto e, portanto as maneiras da deformação também são diferentes.

A Placa Africana que se situa no lado norte da falha transformante TFDD está sob influência do espalhamento magmático normal do trecho A-Y da cadeia meso-oceânica de 30°25'W (Figura 3), que corresponde à zona quente da Figura 12. Devido ao espalhamento magmático normal, a temperatura do manto subjacente é relativamente alta, o que permite um pequeno grau de deformação plástica da Placa Africana desta área.

Por outro lado, a Placa Sul-Americana desta área, no lado sul da falha transformante, está sob efeito do espalhamento amagmático no segmento C e, possui o manto subjacente mais frio. Portanto, a deformação na zona fria da Figura 12 é mais rúptil do que a Placa Africana. A alta anomalia Bouguer no

Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

(São Paulo Deep) podem ser complementares. Esta idéia é consistente com as observações, porém é um modelo tectônico peculiar sem exemplos conhecidos em outras regiões.

A zona de cisalhamento abaixo da falha transformante TFCD pode ter alta viscosidade devido ao manto subjacente frio. Portanto, a zona cataclástica da falha transformante pode estar consolidada através do hidrotermalismo amagmático e a conseqüente silicificação da brecha de falha. Um fenômeno similar foi observado em brechas tectônicas silicificadas da região continental (Motoki A. *et al.*, 2011; 2012). A distribuição dos epicentros (Figura 10) sugere que até mesmo o contato da parte superficial das placas esteja aderido, a parte mais profunda do manto está em movimento. O regime geotectônico incomum desta localidade é, provavelmente, um fenômeno temporário. Quando ocorrerá o rompimento da adesão, o regime tectônico retornará ao estado normal.

No presente momento, não há ainda os dados disponíveis com a resolução suficiente que definem a opção do modelo: 1) Sichel *et al.* (2011) com o segmento ativo D; 2) Adesão temporária das placas sem segmento ativo D. O segundo modelo é favorável, porém ainda não é definitivo. O argumento da proposta dos autores é ainda qualitativo e sua

comprovação não é suficiente. Para a definição de existência, ou não, do segmento ativo D, são necessários os dados batimétricos por multi-feixes, o perfil sísmico de mono-canal e a gravimetria obtido por navegações ao longo do suposto segmento D.

7 Potencialidade dos Hidrocarbonetos Abiogenéticos

A geração de hidrocarbonetos leves por serpentinização e a conseqüente formação de colônia de vidas são fenômenos observados no Oceano Atlântico Norte. Portanto, este processo é importante como uma fonte alternativa de hidrocarbonetos. Caso for confirmada a exumação do manto na COT (Zalán *et al.*, 2011; *continent-ocean transition*) por uma perfuração, a potencialidade do hidrocarbonetos abiogenéticos elevará (Figuras 14, 15). A geração dos hidrocarbonetos abiogenéticos por serpentinização não garante diretamente a formação dos depósitos e jazidas. Além disso, no Brasil o hidrotermalismo de baixa temperatura e a conseqüente geração de CH₄ ainda não foram descobertos.

Acredita-se que a maioria dos hidrocarbonetos abiogenéticos gerados na região de cadeia meso-ocênica é dispersa na água do mar. Entretanto, devido à baixa temperatura da água do mar, uma parte desse

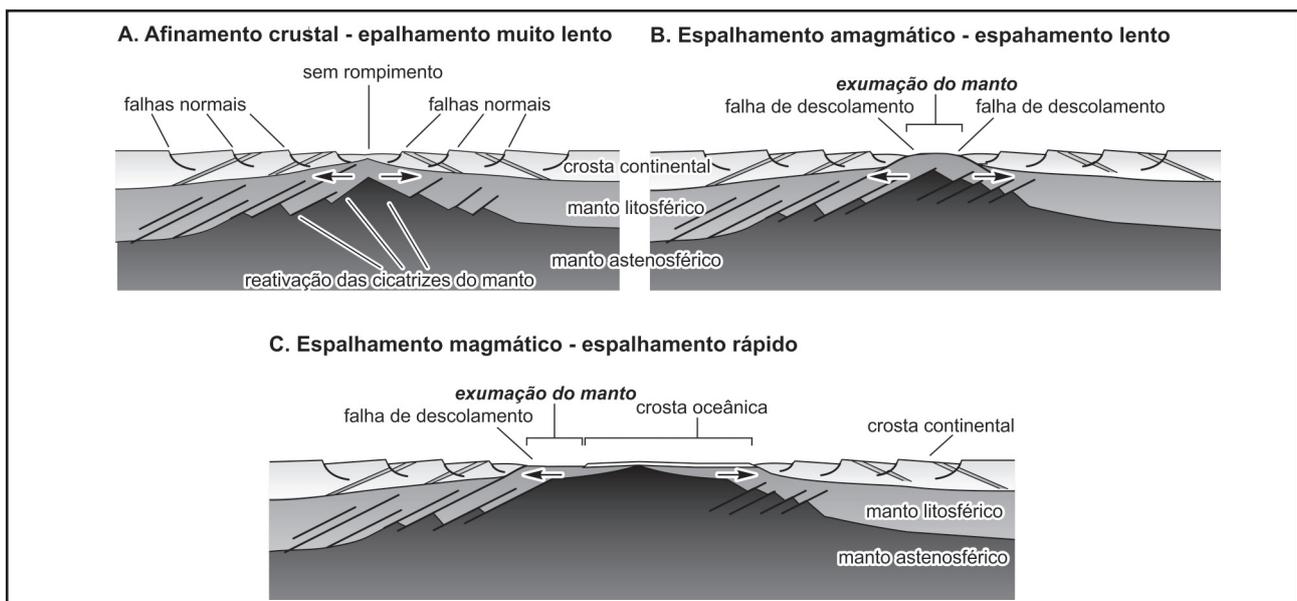


Figura 14 Modelo tectônico para a exumação do manto durante a abertura do Oceano Atlântico no alto mar das regiões sul e sudeste do Brasil (Aires *et al.*, 2012): A. Espalhamento muito lento com afinamento da crosta continental; B. Espalhamento lento de caráter amagmático com rompimento da crosta continental e exumação do manto; C. Espalhamento rápido de caráter magmatismo normal com formação da crosta oceânica.

Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

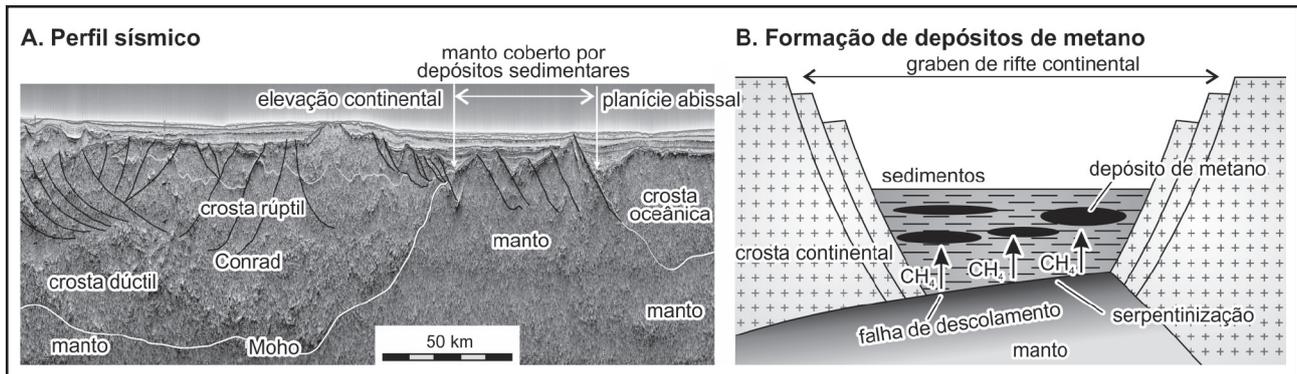


Figura 15 Processo proposto para a formação dos depósitos de hidrocarbonetos leves de origem abiogenética por serpentinização do manto exumado no Cretáceo durante o estágio inicial da abertura do Oceano Atlântico com muito baixa taxa de espalhamento: A. Perfil sísmico do COT no alto mar da Região Sudeste do Brasil (Zalán *et al.*, 2011); B. Modelo para a formação de depósitos de metano (Sichel *et al.*, 2011).

pode ser precipitada no fundo do oceano na forma de hidrato de metano. Uma outra parte do metano abiogenético pode ser transformada em biomassa de bactérias comedoras de metano e das vidas de cadeia alimentar superior. No Cretáceo, o manto exumado na COT atual devido à taxa de espalhamento muito baixa (Figura 14B) foi coberto pelos depósitos sedimentares de alta taxa de deposição e, portanto os hidrocarbonetos poderiam ter formado os depósitos dentro das formações sedimentares (Figura 15).

8 Conclusões

Os dados geológicos e geofísicos indicam as seguintes condições tectônicas para potencial ocorrência de serpentinização de rochas ultramáficas do manto e hidrotermalismo de baixa temperatura e a conseqüente geração abiogenética de hidrocarbonetos por serpentinização.

1. Serpentinização de grande escala ocorre nas localidades limitadas do fundo do oceano em que ocorre a exposição de rochas ultramáficas do manto, sem cobertura da crosta.
2. Na zona de falhas transformantes de São Paulo, ocorrem duas condições tectônicas para a exposição do manto: 1) Tectonismo de distensão no centro de espalhamento amagmático; 2) Tectonismo de compressão na cadeia de pressão.
3. No centro de espalhamento amagmático, as rochas peridotíticas apresentam alto grau de serpentinização e muito baixo

grau de deformação plástica. Este tipo de exposição mantélica é conhecido também em megamullions de outras regiões.

4. A cadeia de transpressão ocorre ao longo da falha transformante no trecho em que a falha e o movimento das placas não são paralelos. As rochas mantélicas são de baixo grau de serpentinização e extremamente alto grau de deformação plástica. A Cadeia de Brachiosaurus é um exemplo da cadeia peridotítica de exumação do manto por transpressão.

5. O modelo de rotação local em bloco no sentido dextral da Placa Sul-Americana originada da adesão temporária do contato de placas tem consistência com as observações geológicas e geofísicas, justificando simultaneamente as gêneses da cadeia peridotítica de São Pedro e São Paulo e da zona hiperabissal de São Paulo.

No presente momento, a geração de hidrocarbonetos abiogenéticos leves por serpentinização através do hidrotermalismo de baixa temperatura com chaminés hidrotermais de carbonatos é observada somente em determinadas localidades do Oceano Atlântico Norte, tal como Lost City de Atlantis Megamullion. Nas regiões oceânicas em torno do Brasil o fenômeno ainda não foi descoberto. Entretanto, a reação Fischer-Tropsch ocorre onde a rocha ultramáfica do manto exumado estão expostas no fundo do oceano. Tais localidades

Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

existem no Brasil e nas áreas adjacentes, inclusive a Cadeia de Brachiosaurus e os segmentos A, B e C. Os estudos isotópicos de carbono e oxigênio para os veios de carbonatos no corpo ultramáfico do manto exumado estão no estágio inicial de desenvolvimento.

9 Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS pelo apoio financeiro através do projeto da Rede de Estudos Tectônicos do Brasil. São gratos também ao CNPq e a FAPERJ pelo suporte financeiro para logísticas e aquisição dos materiais permanentes e materiais de consumo utilizados.

10 Referências

- Aires, J.R.; Motoki, A.; Motoki, K.F.; Motoki, D.F. & Rodrigues, J.G. 2012. Geomorphological analyses of the Teresópolis Plateau and Serra do Mar Cliff, State of Rio de Janeiro, Brazil with the help of summit level technique and ASTER GDEM, and its relation to the Cenozoic tectonism. *Anuário do Instituto de Geociências*, 35(2): 105-123.
- Allen, D.G. & Seyfried Jr., W.E. 2004. Serpentinization and heat generation: constraints from Lost City and Rainbow hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(6): 1347-1354.
- Anderson, R.B. 1984. *The Fischer-Tropsch Synthesis*, Academic Press, London, 301p.
- Berndt, M.E.; Allen, D.E. & Seyfried, Jr. W.E. 1996. Reduction of CO₂ during serpentinization of olivine at 300 °C and 500 bar. *Geology*, 24 (4): 351-354.
- 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.
- Bonatti E. 1976. Serpentine protrusions in the oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 32: 107-113.
- Bonatti, E.; Seyler, M. & Sushevskaya, N. 1993. A Cold Suboceanic Mantle Belt at the Earth's Equator. *Science*, 261(5119): 315-320.
- Brun, J.P.; Sokoutis, D. & Driesschem H.V.D. 1994. Analogue modeling of detachment fault systems and core complexes. *Geology*, 22(4): 319-322.
- Brunelli, D. & Seyler, M. 2010. Asthenospheric percolation of alkaline melts beneath the St. Paul region (Central Atlantic Ocean). *Earth and Planetary Science Letters*, 289: 393-405.
- Brazelton, W.J.; Schrenk, M.O.; Kelley D.S. & Baross, J.A. 2006. Methane and Sulfur-Metabolizing Microbial Communities Dominate the Lost City Hydrothermal Field Ecosystem. *Applied Environmental Microbiology*, 72(9): 6257-6270.
- Burford, O. & Harsh, P.W. 1980. Slip on the San Andreas fault in central California from alignment array surveys. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4): 1233-1261.
- 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.
- 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.
- Canales, J.P.; Tucholke, B.E. & Collins, J.A. 2004. Seismic reflection imaging of an oceanic detachment fault: Atlantis megamullion (Mid-Atlantic Ridge, 30°10'N). *Earth and Planetary Science Letters*, 232: 543-560.
- Cannat, M.; Sauter, D.; Mendelm V.; Ruellan, E.; Okino, K.; Escartin, J.; Combier, V. & Baala, M. 2006. Modes of seafloor generation at a melt-poor ultraslow-spreading ridge. *Geology*, 34(7): 605-608.
- Clayton, C. 1991. Carbon isotope fractionation during natural gas generation from kerogen. *Marine and Petroleum Geology*, 8(2): 232-240.
- Dick, H.J.B.; Lin, J. & Schouten, H. 2003. An ultraslow-spreading class of ocean ridge. *Nature*, 426: 405-412.
- Escartin, K.; Smith, D.K.; Cann, J.; Schouten, H.; Langmuir, C.H. & Escrig, S. 2008. Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere. *Nature*, 455: 790-794.
- Etiopie, G. & Lollar, B.S. 2013. Abiogenic methane on Earth. *Reviews of Geophysics*, 51: 1-24.
- Etiopie, G.; Tsikouras, B.; Kordella, S.; Ifandi, E.; Christodoulou, D. & Papatheodorou, G. 2013a. Methane flux and origin in the Othrys ophiolite hyperalkaline. *Chemical Geology*, 347: 161-174.
- Etiopie, G.; Vance, S.; Christensen, L.E.; Marques, J.M. & Costa, I.R. 2013b. Methane in serpentinized ultramafic rocks in mainland Portugal. *Marine and Petroleum Geology*, 45: 12-16.
- Früh-Green, G.L.; Kelley, D.S.; Bernasconi, S.M.; Karson, J.A.; Ludwig, K.A.; Butterfield, D.A.; Boschi, C. & Proskurowski, G. 2003. 30,000 Years of Hydrothermal Activity at the Lost City Vent Field. *Science*, 301(5632): 495-498.
- Garfunkel, Z.; Zak, I. & Freun, R. 1981. Active faulting in the Dead Sea rift. *Tectonophysics*, 80(1): 1-26.
- Glasby, G.P. 2006. Abiogenic Origin of Hydrocarbons: An Historical Overview. *Resource Geology*, 56(1): 83-96.
- Gold, T. 1985. The Origin of Natural Gas and Petroleum, and the Prognosis for Future Supplies. *Annual Review of Energy*, 10: 53-77.
- Goldfinger, C.; Kulm, V.D.; Yeats, R.S.; Hummon, C.; Huftile, G.J.; Niem, A.R. & McNeill, R.C. 1996. Oblique Strike-Slip Faulting of the Cascadia Submarine Forearc: The Daisy Bank Fault Zone off Central Oregon. *AGU Geophysical Monograph*, 96: 1-12.
- Gung, Y. & Romanowicz, B. 2004. Q tomography of the upper mantle using three component long period waveforms. *Geophysical Journal International*, 157: 813-830.
- Harigane, Y.; Michibayashi, K., & Ohara, Y. 2011. Relicts of deformed lithospheric mantle within serpentinites and weathered peridotites from the Godzilla Megamullion, Parece Vela Back-arc Basin, Philippine Sea. *Island Arc* 20-2, p. 174-187.
- 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

Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas; Peter Szatmari; Alcides Nobrega Sial; José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

- Fracture Zone region. *Marine Geophysical Research*, 21: 529-560.
- Jenden, P.D.; Hilton, D.R.; Kaplan, I.R. & Craig, H. 1993. Abiogenic hydrocarbons and mantle helium in oil and gas fields. The Future of Energy Gases. *United States Geological Survey Professional Paper*, 1570: 31-56.
- Katz, B.J.; Mancini, E.A. & Kitchka, A.A. 2008. A review and technical summary of the AAPG Hedberg Research Conference on "Origin of petroleum-Biogenic and/or abiogenic and its significance in hydrocarbon exploration and production". *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 92(5): 549-556.
- Kelley, D.S.; Karson, J.A.; Früh-Green, G.L.; Yoerger, D.R.; Shank, T.M.; Butterfield, D.A.; Hayes, J.M.; Schrenk, M.O.; Olson, E.J.; Proskurowski, G.; Jakuba, M.; Bradley, A.; Larson, B.; Ludwig, K.; Glickson, D.; Buckman, K.; Bradley, A.S.; Brazelton, W.J.; Roe, K.; Elend, M.J.; Delacour, A.; Bernasconi, S.M.; Lilley, M.D.; Baross, J.A.; Summons, R.E. & Sylva, S.P. 2005. A Serpentinite-Hosted Ecosystem: The Lost City Hydrothermal Field. *Science*, 307(5714): 1428-1434.
- Kutcherov, V.G. & Krayushkin, V.A. 2010. Deep-seated abiogenic origin of petroleum: From geological assessment to physical theory. *Reviews of Geophysics*, 48(1): 1-15.
- Lollar, B.S.; Lacrampe-Couloume, G.; Slater, G.F.; Ward, J.; Moser, D.P.; Gihring, T.M.; Lin, L.H. & Onstott, T.C. 2006. Unravelling abiogenic and biogenic sources of methane in the Earth's deep subsurface. *Chemical Geology*, 226(3-4): 328-339.
- Lollar, B.S.; Westgate, T.D.; Ward, J.A.; Slater, G.F. & Lacrampe-Couloume, G. 2002. Abiogenic formation of alkanes in the Earth's crust as a minor source for global hydrocarbon reservoirs. *Nature*, 416: 522-524.
- Loocke, M., Snowa, J.E., Ohara, Y. 2013. Melt stagnation in peridotites from the Godzilla Megamullion Oceanic Core Complex, Parece Vela Basin, Philippine Sea. *Lithos* 182-183: 1-10.
- Michael, P.J.; Langmuir, C.H.; Dick, H.J.B.; Show, J.E.; Goldstein, S.L.; Graham, D.W.; Lehnert, K.; Kurras, G.; Jokat, W.; Mühe, R. & Edmonds, H.N. 2003. Magmatic and amagmatic seafloor generation at the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean. *Nature*, 433: 956.
- Mims, C.A. & McCandlish, L.E. 1985. Chain growth rates in Fischer-Tropsch synthesis on an iron catalyst: an isotopic transient study. *Journal of the American Chemical Society*, 107: 696-697.
- Moody, J.B. 1976. Serpentinization: a review. *Lithos*, 9(2): 125-138.
- 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*, 62(3): 331-342.
- Motoki, A.; Sichel, S.E.; Campos, T.F.C.; Vargas, T.; Soares, R. & Motoki, K.F. 2010. Morfologia abissal em torno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua relação ao tectonismo de soerguimento ativo. *Revista de Geografia, Edição Especial*, 2: 318-330.
- Motoki, A.; Vargas, T.; Iwanuch, W.; Sichel, S.E.; Balmant, A. & Aires, J.R. 2011. Tectonic breccia of the Cabo Frio area, State of Rio de Janeiro, Brazil, intruded by Early Cretaceous mafic dyke: Evidence of the Pan-African brittle tectonism? *REM-Revista Escola de Minas*, 64(1): 25-36.
- Motoki, A.; Vargas, T.; Iwanuch, W.; Melo, D.P.; Sichel, S.E.; Balmant, A.; Aires, J.R. & Motoki, K.F. 2012. Fossil earthquake evidenced by the silicified tectonic breccia of the Cabo Frio area, State of Rio de Janeiro, Brazil, and its bearings on the genesis of stick-slip fault movement and the associated amagmatic hydrothermalism. *Anuário do Instituto de Geociências*, 35(2), 124-139.
- Motoki, K.F.; Motoki, A. & Sichel, S.E. 2014. Gravimetric structure for the abyssal mantle massif of Saint Peter and Saint Paul peridotite ridge, Equatorial Atlantic Ocean, and its relation to active uplift. *Anais da Academia Brasileira de Geologia*. (in press)
- Ohara, Y.; Yoshida, T.; Kato, Y. & Kasuga, S., 2001. Giant megamullion in the Parece Vela backarc basin. *Marine Geophysical Research*, 22: 47-61.
- Potter, J. & Konnerup-Madsen, J. 2003. A review of the occurrence and origin of abiogenic hydrocarbons in igneous rocks. Hydrocarbon in Crystalline Rocks. *Geological Society of London, Special Publications*, 214: 151-173.
- Prinzhofer, A. & Pernaton, E. 1997. Isotopically light methane in natural gas: bacterial imprint or diffusive fractionation? *Chemical Geology*, 142(1-3): 193-200.
- Proskurowski, G.; Lilley, M.D. & Kelley, D.S. 2006. Low temperature volatile production at the Lost City Hydrothermal Field, evidence from a hydrogen stable isotope geothermo meter. *Chemical Geology*, 229(4): 331-343.
- Proskurowski, G.; Lilley, M.D.; Seewald, J.S.; Früh-Green, G.L.; Olson, E.J.; Lupton, J.E.; Sylva, S.P. & Kelley, D.S. 2008. Abiogenic Hydrocarbon Production at Lost City Hydrothermal Field. *Science*, 319(5863): 604-607.
- Ritzwoller, M.H.; Shapiro, N.M. & Leahy, G.M. 2003. A resolved mantle anomaly as the cause of the Australian-Antarctic discordance. *Journal of Geophysical Research*, 108(B12): 2559.
- Salvi, S. & Williams-Jones, A.E. 1997. Fischer-Tropsch synthesis of hydrocarbons during sub-solidus alteration of the Strange Lake peralkaline granite, Quebec/Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(1): 83-99.
- Schouten, H.; Smith, D.K.; Cann, J.R. & Escartín, J. 2010. Tectonic versus magmatic extension in the presence of core complexes at slow-spreading ridges from a visualization of faulted seafloor topography. *Geology*, 38(7): 615-618.
- Schulz, H. 1999. Short history and present trends of Fischer-Tropsch synthesis. *Applied Catalysis*, 186: 3-12.
- Sichel, S.E.; Esperança, S.; Motoki, A.; Maia, M.; Horan, M.F.; Szatmari, P.; Alves, E.C.; Mello SLM. 2008. Geophysical and geochemical evidence for cold upper mantle beneath the Equatorial Atlantic Ocean. *Brazilian Journal of Geophysics* 26(1), 69-86.
- Sichel, S.E.; Esperança, S.; Motoki, A.; Maia, M.; Horan, M.F. & Szatmari, P. 2008. 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. 2011. Origin and characterization of the mantle rocks of the Saint Peter and Saint Paul Rocks, Equatorial Atlantic Ocean. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 20(1-2): 97-128.

**Exumação das Rochas Mantélicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua
Implicação na Possível Geração de Hidrocarbonetos Abiogenéticos por Serpentinização**

Akihisa Motoki (In memorian); Susanna Eleonora Sichel; Thais Vargas ; Peter Szatmari ; Alcides Nobrega Sial;
José Antônio Baptista Neto; Isa Brehme; Kenji Freire Motoki & Aurélio Kasakewitch Ribeiro

- Stah, W.J. 1979. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration. *Chemical Geology*, 20: 121-149.
- Szatmari, P. 1989. Petroleum formation by Fischer-Tropsch synthesis in plate tectonics, *American Association of Petroleum Geology Bulletin*, 73: 989-998.
- Taran, Y.A.; Kliger, G.A. & Sevastyanov, V.S. 2007. Carbon isotope effects in the open-system Fischer-Tropsch synthesis. *Geochimistry and Cosmochimistry Acta*, 71: 4474-4487.
- Tucholke, B.E. & Lin, J. 1994. A geological model for the structure of ridge segments in slow spreading ocean crust. *Journal of Geophysical Research*, 99(B6): 11937-11958.
- 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.
- Tucholke, B.E.; Fujioka, K.; Ishihara, T.; Hirth, G. & Kinoshita, M. 2001. Submersible study of an oceanic megamullion in the central North Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 106: 16145-16161.
- Tucholke, B.E.; Behn, M.D.; Buck, W.R. & Lin, J. 2008. Role of melt supply in oceanic detachment faulting and formation of megamullions. *Geology*, 36(6): 455-458.
- Unsworth, M.J.; Malin, P.E.; Egbert, G.D. & Booker, J.R. 1997. Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California. *Geology*, 25(4): 359-362.
- Whitmarsh, R.B.; Manatschal, G. & Minshull, T.A. 2001. Evolution of magma-poor continental margins from rifting to seafloor spreading. *Nature*, 143: 150-154.
- Wolfe, C.J.; Bergman, E.A. & Solomon, S.C. 1993. Oceanic transform earthquakes with unusual mechanism or locations: relation to fault geometry and state of stress in the adjacent lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 98: 16187-16211.
- Zalán, P.V.; Severino, M.C.G.; Rigoti, C.A.; Magnavita, L.P. & Bach, J.A. 2011. An Entirely New 3D-View of the Crustal and Mantle Structure of a South Atlantic Passive Margin - Santos, Campos and Espírito Santo Basins, Brazil. *American Association of Petroleum Geology, Annual Convention and Exhibition*, Houston, 12p.