

MECANISMO DE INTRUSÃO DOS CORPOS TABULARES DE COLOCAÇÃO SUB-HORIZONTAL DISCORDANTE DA ILHA DE CABO FRIO E DAS ÁREAS ADJACENTES, MUNICÍPIO DE ARRAIAL DO CABO, RJ

Akihisa Motoki ¹, Susanna Eleonora Sichel ², Davi Canabarro Savi ³, José Ribeiro Aires ⁴

(1) Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (DMPI/UERJ). Rua São Francisco Xavier, 524, Sala A4023 – Maracanã. CEP 20550-990. Rio de Janeiro, RJ. Endereço eletrônico: rochasornamentais@yahoo.com.br

(2) Departamento de Geologia, Universidade Federal Fluminense (DG/UFF). Avenida General Milton Tavares de Souza s/n, 4º andar – Gragoatá. CEP 24210-340. Niterói, RJ. Endereço eletrônico: susanna@igeo.uff.br

(3) Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Marinha do Brasil (IEAPM). Rua Kioto, 253 – Praia dos Anjos. CEP 28930-000. Arraial do Cabo, RJ. Endereço eletrônico: david_canabarro@uol.com.br

(4) Departamento de Abastecimento, Petróleo Brasileiro S.A. (ABAST/PETROBRAS). Avenida República do Chile, 65, sala 902 – Centro. CEP 20031-912. Rio de Janeiro, RJ. Endereço eletrônico: aires@petrobras.com.br

Introdução
Geologia Regional
Transição de Intrusão Sub-Vertical para Sub-Horizontal
Estágio Horizontal-Discordante
Fraturamento Hidráulico
Intrusão Dinâmica
Discussões
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Este artigo discute forma de intrusão e mecanismo de colocação dos corpos intrusivos tabulares do início do Cenozóico da área em torno da Ilha de Cabo Frio, RJ. Na área estudada, ocorrem três gerações de corpos tabulares: a primeira geração composta de lamprófiro; a segunda geração constituída por traquito com alteração deutérica; a terceira geração formada por fonólito sem alteração deutérica. Os corpos da segunda geração apresentam transição de colocação sub-vertical para sub-horizontal: nos afloramentos de baixa altura esses são sub-verticais e discordantes; nos afloramentos de altitude média, são oblíquos e concordantes; no topo, são sub-horizontais discordantes. A intrusão sub-horizontal não é originada da estrutura da rocha encaixante, portanto não pode ser justificada pelo modelo tradicional da percolação magmática ao longo de zona de fraqueza preexistente. Por outro lado, o modelo de fraturamento hidráulico causado por pressão magmática pode explicar o modo de intrusão acima citado. A transição de intrusão vertical para horizontal ocorre na profundidade em que a direção do σ_3 transforma-se de horizontal para vertical. Entretanto, a profundidade de posicionamento dos corpos traquíticos, em torno de 3 km, é grande demais para que ocorra esse fenômeno. A intrusão e conseqüente expansão volumétrica do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio e baixa densidade do magma sienítico poderiam ter reduzido o σ vertical das áreas em torno do corpo sienítico, o que possibilitou a intrusão sub-horizontal dos corpos tabulares traquíticos.

Palavras-chave: dique, sill, intrusão horizontal, preenchimento de fraturas, fraturamento hidráulico, Ilha de Cabo Frio.

ABSTRACT – *Motoki, A., Sichel, S.E., Savi, D.C., Aires, J.R. - Intrusion mechanism of tabular intrusive bodies of subhorizontal discordant emplacement of the Cabo Frio Island and the neighbour areas, State of Rio de Janeiro, Brazil.* This article discusses intrusion mode and emplacement mechanism of the Early Cenozoic tabular intrusive bodies of the areas around the Cabo Frio Island, State of Rio de Janeiro, Brazil. In the studied area, three generation of tabular bodies are found: The first generation composed of lamprophyre; the second one constituted by trachyte with deuteric alteration; the third one made up of phonolite without deuteric alteration. The second generation bodies show transition from subvertical intrusion to subhorizontal emplacement: On the outcrops of low altitude, they are subvertical-discordant; at a middle height, oblique-concordant; at the top, subhorizontal-discordant. The subhorizontal intrusion is not originated from host rock structure density and unable to be justified by the traditional model of magma fracture-fill along pre-existing weak zone. By the way, the model of hydraulic fracturing caused by magma pressure can explain the above-mentioned intrusion mode. The transition from vertical to horizontal intrusion takes place at the depth in which the σ_3 changes from horizontal to vertical. However, the emplacement site of the trachytic bodies, about 3 km, is too deep for this phenomenon. The intrusion and consequent volume expansion of the Cabo Frio Island syenitic body and low density of the syenitic magma could have reduced the σ vertical of the areas around the syenitic body, which made possible the subhorizontal intrusion of the trachytic bodies.

Keywords: dyke, sill, weak zone, horizontal intrusion, fracture-fill, hydraulic fracturing, Cabo Frio Island.

INTRODUÇÃO

Corpos intrusivos tabulares de colocação horizontal com espessura métrica ou maior são observados normalmente dentro de formações sedimentares horizontais, freqüentemente nas regiões de tectonismo

de distensão (e.g. Chevallier & Woodford, 1999; Clark et al., 2000; Kavanagh et al., 2006). Esses corpos são chamados de sills e a colocação horizontal é interpretada como devida à estratificação horizontal da rocha encaixante (e.g. Billings, 1972; Bates & Jackson, 1987). Isto é, a intrusão ao longo das zonas de fraqueza pré-existentes na rocha encaixante, tal como estratificação sedimentar, foi interpretada como mais fácil do que a intrusão por criação de uma nova fratura na rocha encaixante intacta. Essa idéia, chamada de *fracture-fill* (Motoki & Sichel, 2008), foi amplamente divulgada tanto no exterior (e.g. Bear et al., 1994; Delaney & Gartner, 1997) quanto no Brasil (e.g. Valente et al., 2005) e, está sendo tratado como um argumento óbvio sem necessidade de comprovação científica. Dessa forma, a intrusão concordante foi adotada como o critério para definição de sill.

Entretanto, existem certos fenômenos intrusivos que não podem ser justificados pelo modelo de *fracture-fill*. Como por exemplo: a maioria dos diques é de colocação vertical e sills, de colocação horizontal; sills são encontrados em formações sedimentares

jóvens de ambiente tectônico distensional, porém raramente em rochas gnáissicas de alto ângulo de inclinação; os diques são muito mais freqüentes do que sills até mesmo dentro de formações sedimentares horizontais (Motoki & Sichel, 2008).

Na área em torno do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio, encontram-se raros exemplos de corpos tabulares de intrusão discordante de colocação sub-horizontal. Para justificar a forma de intrusão, Motoki & Sichel (2008) introduziram o modelo de fraturamento hidráulico como o mecanismo alternativo para intrusão dos corpos tabulares. Entretanto, este modelo é pouco divulgado no Brasil.

Com objetivo de esclarecer o mecanismo de intrusão de corpos tabulares, os autores realizaram trabalhos de campo na Ilha de Cabo Frio com a colaboração do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - IEAPM, Marinha do Brasil. Este artigo apresenta descrições dos corpos sub-horizontais de intrusão discordante da Ilha de Cabo Frio e das áreas arredores, RJ, e consideram seu mecanismo de intrusão, seja de *fracture-fill*, ou seja, de fraturamento hidráulico.

GEOLOGIA REGIONAL

A área estudada abrange a Ilha de Cabo Frio e o Pontal de Atalaia, Município do Arraial do Cabo, RJ, situando-se na coordenada de 23°00'S, 42°00'W, cerca de 120 km ao leste da cidade do Rio de Janeiro (Figura

1). O Pontal da Atalaia e a borda oeste da Ilha de Cabo Frio têm acesso fácil, porém o lado sudeste da ilha está sem acesso terrestre, podendo ser observada apenas a partir de barcos.

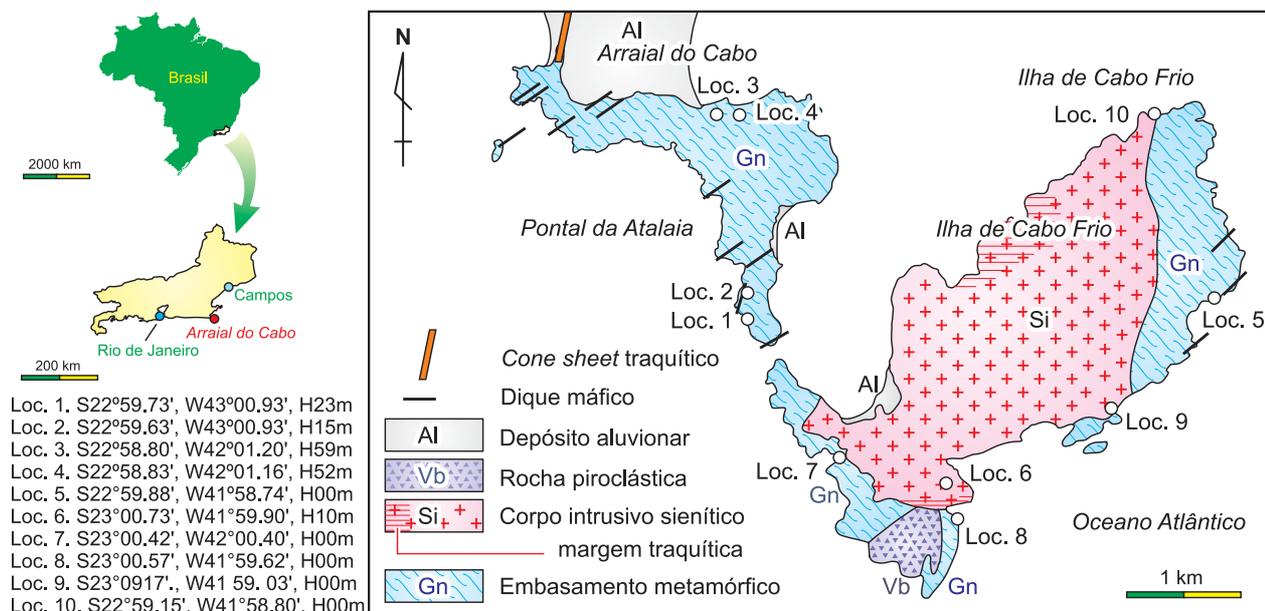


FIGURA 1. Mapa geológico da Ilha de Cabo Frio e Pontal da Atalaia, Município de Arraial do Cabo, RJ, segundo Sichel et al. (2008).

Nesta área, expõe-se o embasamento metamórfico composto de ortognaisse com atitude geral de N15°W20°E (Foto 1A). Ocorre intercalação de enclaves anfibolíticos com espessura variando de 10 cm a 5 m. Alguns enclaves máficos são discordantes do bandamento e apresentam forma fragmentada, sugerindo sua origem de xenólito capturado pelo granito

do protólito. O *strike* geral do ortognaisse desta região, chamada geotectonicamente de Bloco Cabo Frio, é significativamente diferente dos ortognaisse e paragnaisse do Terreno Oriental, de N45° a 55°E (Heilbron et al., 2000). Devido a isso, o Bloco Cabo Frio é considerado como uma parte do Craton do Congo (Schmitt et al., 2008).

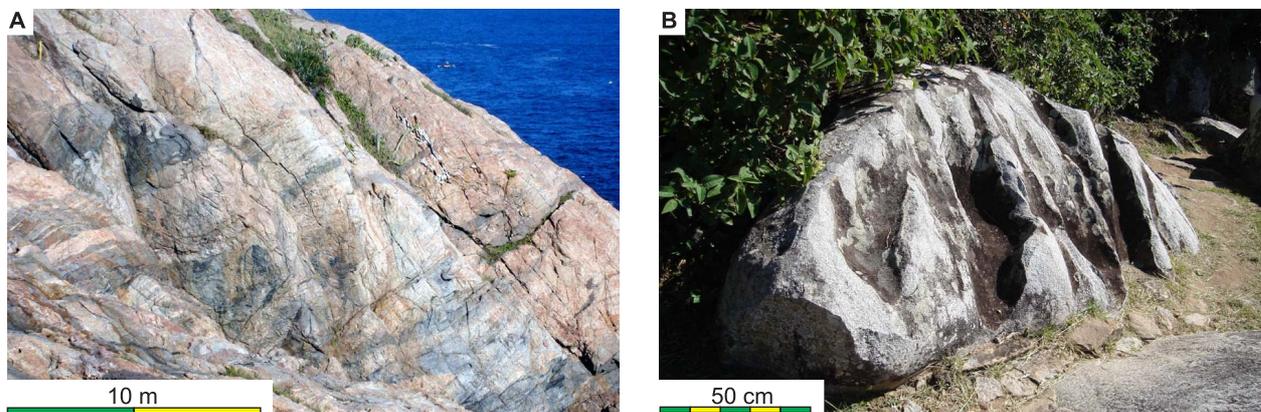


FOTO 1. Rochas constituintes principais da área estudada: A) Ortognaisse com intercalações anfibolíticas, Ponta de Boqueirão, Pontal da Atalaia, Loc. 1; B) Bloco de nefelina sienito da Ilha de Cabo Frio, Loc. 6, caracterizado por caneluras.

Até o presente, há dois conjuntos de datações U-Pb para o ortognaisse do Bloco Cabo Frio pelo método ID-TIMS (Schmitt et al., 2008), apresentando 1975 ± 6.5 Ma para a intercessão superior e 501 ± 6.0 Ma para a interseção inferior. A primeira corresponde à idade de intrusão do protólito granítico durante o Evento Hudsoniano, ou seja, Transamazônico, e a segunda, ao metamorfismo do último evento de colisão continental Pan-Africano na Faixa Ribeira (Campos Neto, 2000; Heilbron et al., 2000), denominado Orogenia Búzios (Schmitt et al., 2008). Na fase final da orogenia, foram formadas faixas de brecha tectônica cimentada por calcedônia e jaspes, de largura submétrica a métrica.

Esses corpos são cortados por diques máficos do início do Cretáceo (e.g. Motoki, 1994). Os trabalhos geoquímicos dos diques do Estado do Rio de Janeiro apresentaram que esses têm idades em torno de 137 Ma e são compostos de rochas gabróicas, tanto de alto Ti quanto de baixo Ti (Guedes et al., 2005; Valente et al., 2005). Alguns diques são de grande largura, até 10 m, e apresentam orientação segundo NE-SW a ENE-WSW. Existem os diques de direção NNW-SSE,

porém são poucos. Na área estudada, os diques máficos apresentam nítida orientação segundo N55°E. Esta direção é discordante com o bandamento do ortognaisse encaixante, com atitude geral de N20°W20°E.

O embasamento metamórfico e os diques máficos são cortados por corpos tabulares formados de rochas alcalinas máficas e félsicas, intrusivos no início do Cenozóico. Na Ilha de Cabo Frio, ocorre um corpo grande de extensão quilométrica constituído por rochas sieníticas (Sichel et al., 2008; Foto 2B), com as idades Rb-Sr na faixa de 51.2 a 54.0 Ma (Chianello, 1999). Os trabalhos anteriores interpretaram que o corpo sienítico estendesse até o Pontal da Atalaia. Entretanto, os trabalhos recentes de campo revelaram que a rocha sienítica do Pontal da Atalaia constitui um dique com largura em torno de 10 m (Motoki & Sichel, 2008). Além disso, a parte sudeste da Ilha de Cabo Frio é constituída por ortognaisse. Portanto, o tamanho confirmado do corpo sienítico é menor do que a estimativa anterior, ocupando uma área alongada em NEN-SWS com a extensão horizontal de 3.3 km x 1.8 km (Figura 1).

TRANSIÇÃO DE INTRUSÃO VERTICAL PARA HORIZONTAL

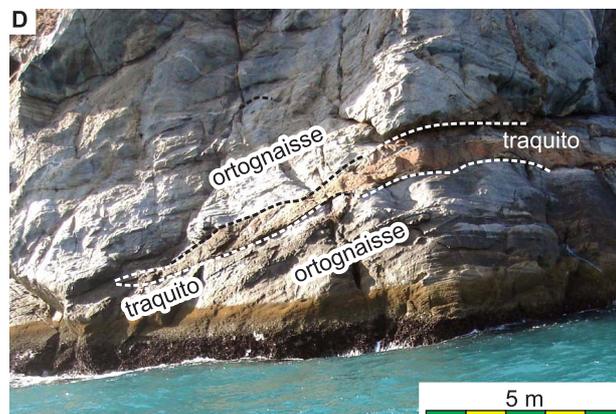
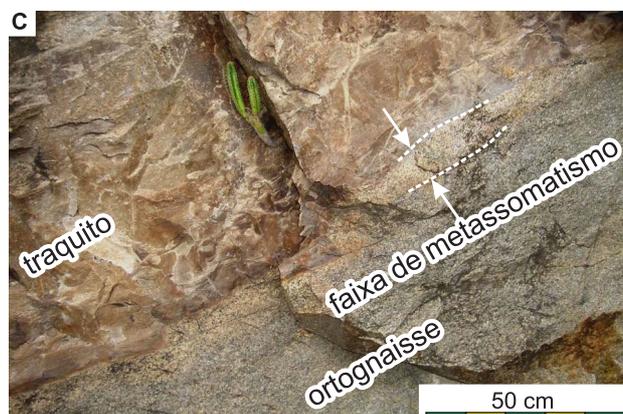
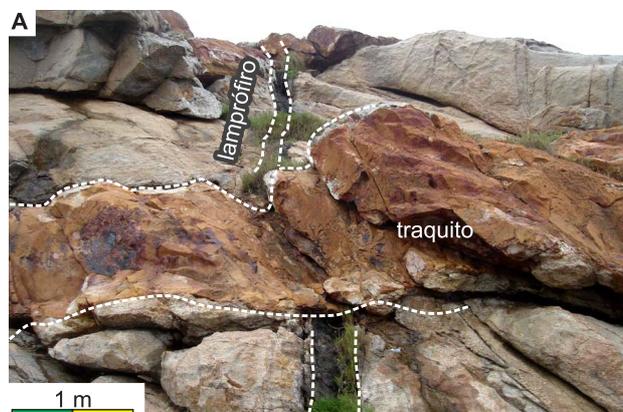
Motoki et al. (1988) observaram 92 corpos intrusivos tabulares de rochas alcalinas que estão expostos

no Pontal da Atalaia (Figura 1). Dentre esses, 61 são subverticais e 31 são oblíquos ou sub-horizontais.

Conforme as relações intrusivas e composições, esses são classificados em três gerações.

Os diques da primeira geração são constituídos por lamprófiro e têm largura inferior a 50 cm, apresentando orientação segundo NW-SE (Prancha 1A).

Esses são observados como sendo intrusivos no ortognaisse, porém, não se encontram dentro da área do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio. Este fato sugere que os diques de lamprófiro são mais antigos do que o corpo sienítico.



PRANCHA 1. Corpos intrusivos tabulares da segunda geração, compostos de traquito: A) um corpo tabular traquítico de colocação sub-horizontal que corta dique de lamprófiro, Ponta de Boqueirão, Loc. 1; B) faixas de alteração deutérica, partes escuras, dentro de um dique traquítico, parte clara, Loc. 1; C) faixa de metassomatismo ao longo do contato entre o corpo traquítico e o gnaisse encaixante, Pontal da Atalaia, Loc. 4; D) intrusão oblíqua-discordante, Loc. 1.

Os corpos da segunda geração são constituídos por traquito, caracterizado por forte efeito de alteração deutérica apresentando cores claras, de laranja clara a amarela clara (Prancha 1B, C). Esses são observados freqüentemente no ortognaisse e na brecha vulcânica, especialmente na zona de contato com o corpo sienítico. Ao se afastar do corpo sienítico, a freqüência desses corpos torna-se menor. Entretanto, não se observa dentro do corpo sienítico. Essa distribuição sugere que os corpos traquíticos tabulares são originados do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio, ou seja, correspondem à pequenas ramificações do corpo sienítico.

Os diques da terceira geração são compostos de fonolito sem alteração deutérica, mostrando cor macroscópica cinza escura. Esses ocorrem tanto no ortognaisse quanto no sienito, sendo considerados como

mais jovens do que o sienito da Ilha de Cabo Frio. A direção preferencial é NW-SE no pontal, porém E-W a ENE-WSW, na parte ocidental da ilha.

Alguns corpos da segunda geração mostram transição de intrusão sub-vertical para sub-horizontal (Figura 2). Dentre esses, dois exemplos da Ponta de Boqueirão (Loc. 1, 2; Figura 1) expõem processo integral da transição (Figura 2A; B). A transição ocorre dentro da faixa de altura de 50 m.

Nas localidades de baixa altitude, esses são subverticais e têm direção variando de NWN-SES a NEN-SWS, sendo discordantes à estrutura da rocha encaixante ortognáissica, denominando-se estágio vertical-discordante. A largura dos diques é inferior a 1 m. Nas localidades de altitude média, os corpos tornam-se oblíquos e concordantes com o bandamento

do gnaíse encaixante, chamado de estágio oblíquo-concordante. O *strike* varia entre N15°W e N15°E, com a inclinação de 20 a 40° (Figura 2C; D). A largura dos corpos é 1 a 2 m. Apesar de que a intrusão é concordante, o plano de contato não segue exatamente o bandamento (Figura 3). Em localidades mais altas, esses se transformam em sub-horizontais e discordantes, denominado estágio horizontal-discardante. Neste estágio, os corpos são de baixo ângulo de inclinação, de 5° a 20°, e têm espessura maior, de 1 a 5 m.

A transição do estágio oblíquo-concordante para o estágio horizontal-discardante é observada em vários afloramentos da área estudada.

Ao longo da margem oeste e noroeste da cidade de Arraial do Cabo (Figura 1), ocorre um dique de traquito caracterizado por alteração deutérica com a inclinação de 35° inclinado ao ESE e largura de 4 m a 20 m. Ao longo deste dique, forma-se um morro linear direcionado a NEN-SWS. O dique pode corresponder a uma parte do *cone sheet* originado do corpo nefelina sienítico.

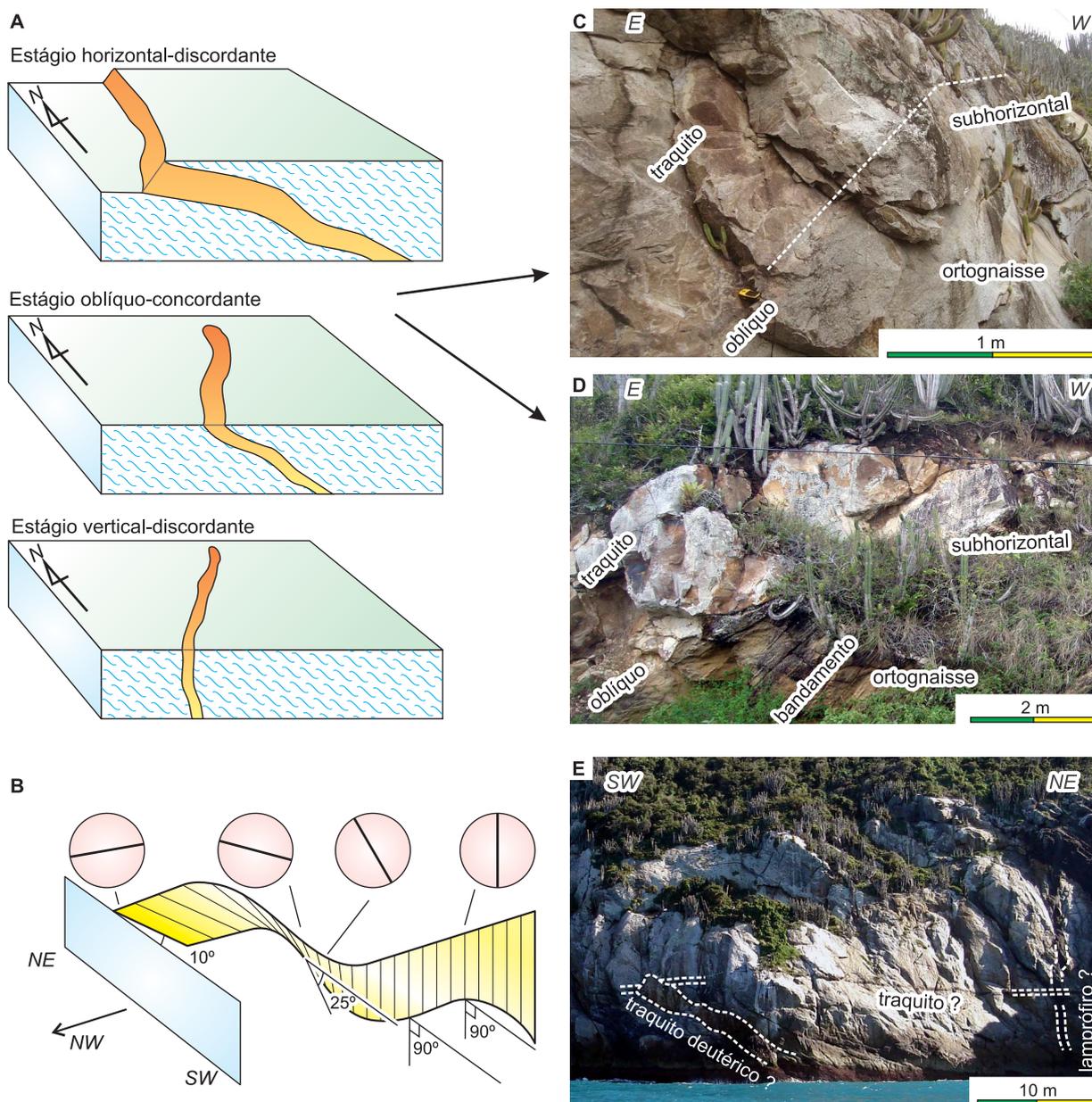


FIGURA 2. Transição helicoidal de dique para sill observada na Península do Pontal da Atalaia, Arraial do Cabo, RJ, modificada de Motoki & Sichel (2008): A) transição sob ponto de vista vertical com base nas observações de vários afloramentos; B) a mesma sob ponto de vista horizontal; C) transição do estágio oblíquo-concordante para horizontal-discardante, Pontal da Atalaia, Loc. 4; D) a mesma exposta na Loc. 3, que se observa bandamento da rocha encaixante; E) corpo sub-horizonta da Ponta do Meio, Ilha de Cabo Frio, Loc. 5.

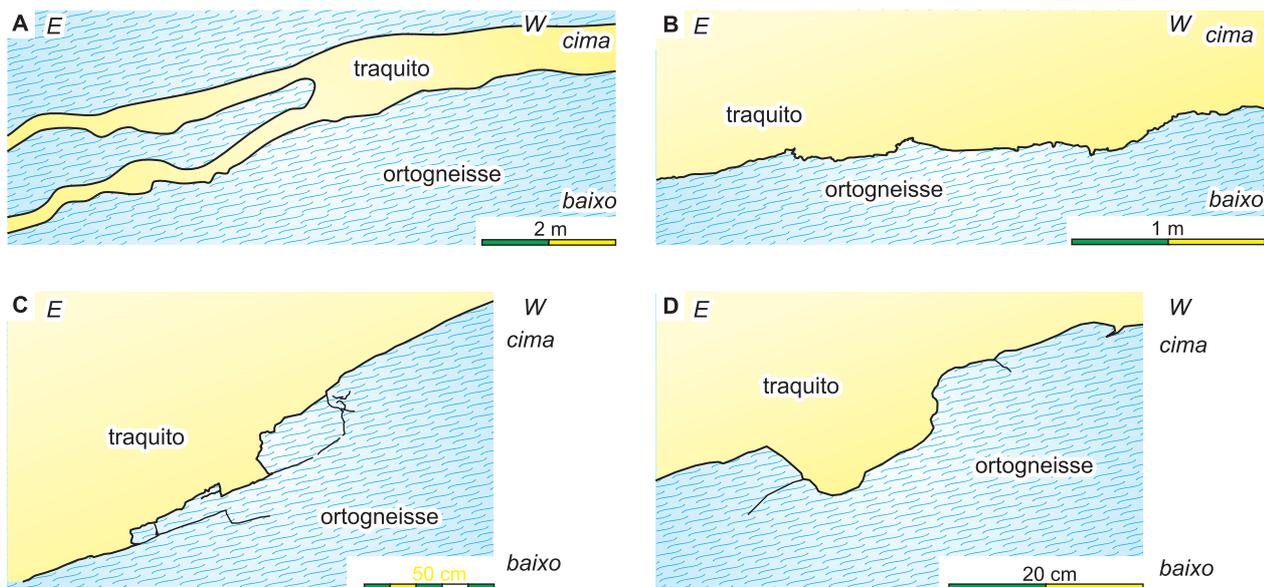


FIGURA 3. Plano de contato de corpos intrusivos traquíticos no estágio oblíquo-concordante, observados na corte vertical da trilha do Pontal da Atalaia, Loc. 4.

ESTÁGIO HORIZONTAL-DISCORDANTE

No estágio horizontal-discordante, os corpos traquíticos acima citados apresentam características peculiares: 1) intrusão discordante horizontal; 2) contatos irregulares; 3) espessura grande.

Em outras regiões, corpos intrusivos tabulares de colocação horizontal ocorrem concordantemente com a estratificação sedimentar. Portanto, os corpos sub-horizontais desta área são exemplos raros e têm importantes informações sobre o mecanismo físico de intrusão.

Os corpos do estágio horizontal-discordante e do estágio oblíquo-concordante mostram planos de contato irregular, com inflexões abruptas de baixo ângulo (Figura 3A). O plano de contato com inflexões angulosas e eventual ocorrência de fraturas são indicativas de intrusão por rompimento rúptil da rocha

encaixante (Figura 3B; C; D). Essa feição indica que a intrusão magmática ocorreu por fragmentação mecânica da rocha encaixante causada por pressão magmática, e não, por percolação do magma ao longo das fraturas pré-existentes, tais como falhas, disjunções e bandamentos.

No estágio vertical-discordante, a largura dos diques é menor do que 1 m. Porém, no estágio horizontal-discordante, a espessura aumenta para 2 a 5 m (Prancha 1A). Fenômeno similar é observado em sills de outras regiões. Por exemplo, na Província Basáltica do Paraná, os diques fornecedores do magma têm largura métrica (e.g. Motoki, 1994; Valente et al., 2005) e, os sills têm espessura de dezenas de metros, chegando a ser de mais de 100 m. As intrusões sub-horizontais tendem a ocorrer em um determinado nível.

FRATURAMENTO HIDRÁULICO

O modelo de *fracture-fill* não é capaz de justificar certos aspectos intrusivos da área estudada, tais como a intrusão por fragmentação mecânica da rocha encaixante e a transição de corpo oblíquo concordante para sub-horizontal discordante.

Os fenômenos acima citados podem ser explicados por introdução conforme o modelo de fraturamento hidráulico causado por pressão magmática (*hydraulic fracturing, magma fracturing*; e.g. Hubbert & Willis, 1957; Phillips, 1974; Emerman & Marrett, 1990; Llambías, 2003). O modelo de fratura-

mento hidráulico é fortemente apoiado por pesquisadores especializados em diques e sills como o principal mecanismo de intrusão na rocha encaixante rúptil (e.g. Rubin, 1995). Entretanto, ainda é pouco conhecido entre os geólogos de outros campos, sobretudo do Brasil.

Quando o esforço deviatório (*deviatoric stress*) é relativamente baixo, sendo inferior a 4 vezes do esforço distensional para rompimento da rocha encaixante (*tensile yield stress*), a elevação da pressão magmática cria uma fratura de distensão (*tensile*

fracture) em direção perpendicular ao σ_3 , ou seja, paralela ao plano σ_1 - σ_2 , gerando um dique de dilatação (*dilatation dyke*). No diagrama de Mohr, a pressão magmática desloca o círculo para esquerda, portanto o rompimento ocorre sobre o eixo horizontal σ , ou seja, $\tau_{xy} = 0$. Desde que $2\theta = 0$, a direção do dique é paralela ao eixo de compressão (Figura 4).

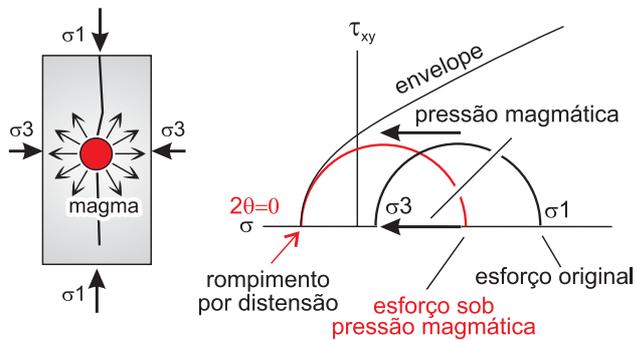


FIGURA 4. Mecanismo de intrusão através do fraturamento hidráulico por pressão magmática e conseqüente formação de dique de dilatação em uma rocha encaixante sem fraturas preexistentes, conforme Motoki & Sichel (2008).

Na crosta superior, as fraturas presentes na rocha encaixante recebem pressão litostática para que essas não se abrem. Desta forma, a intrusão ao longo de da fratura preexistente precisa de pressão magmática maior do que o esforço litostático em direção perpendicular à fratura. Dentro da crosta terrestre, o esforço litostático é suficientemente grande, portanto o fraturamento hidráulico ocorre com facilidade. A pressão magmática necessária para o fraturamento hidráulico é inferior à pressão necessária para abertura de fraturas preexistentes na rocha encaixante. Desta forma, mesmo havendo zonas de fraqueza na rocha encaixante, tais como falhas, fraturas estratificações e bandamentos, essas geralmente não constituem condutores de magma para formar diques. A direção de intrusão de diques e sills é definida por direção do σ_3 , e não, por sistemas de fratura preexistentes no corpo encaixante.

Em locais relativamente profundos, onde a sobrecarga é suficientemente grande, o σ_1 é colocado na direção vertical e, o σ_2 e o σ_3 , direções horizontais. Nesta condição, formam-se corpos intrusivos tabulares de colocação vertical. O fato justifica a predominância de diques verticais em quaisquer tipos de rocha encaixante, inclusive rochas sedimentares sub-horizontais. Diques paralelos podem ser formados, também, em corpos graníticos e sieníticos sem fraturas orientadas.

Por outro lado, na subsuperfície, a sobrecarga é pequena e, portanto em determinados casos o σ_3 pode tornar vertical. Neste caso, formam-se corpos intrusivos tabulares de colocação horizontal. A intrusão horizontal por este princípio ocorre na profundidade rasa em que o σ_3 transforma-se de horizontal para vertical (Phillips, 1974; Figura 5).

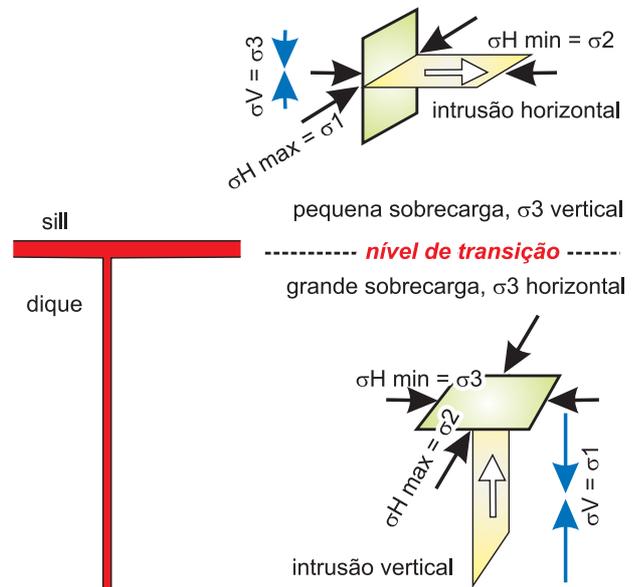


FIGURA 5. Processo de intrusão de sills por fraturamento hidráulico, visualizando a idéia de Phillips (1974).

Os trabalhos anteriores (e.g. Lister & Keer, 1991) consideraram, com base no modelo de *fracture-fill*, que a estratificação horizontal da rocha encaixante e densidade adequada do magma são fatores fundamentais para intrusão de sills. Esta idéia não pode explicar a existência de sills constituídos por magmas de baixa densidade, tais como de riolito, dacito, fonolito e traquito.

A intrusão horizontal pelo fraturamento hidráulico justifica a existência de sills de magma de baixa densidade, bem como, a intrusão discordante vertical dos corpos traquíticos da área estudada. As fraturas preexistentes e densidade do magma podem ter influências secundárias à intrusão de corpos tabulares, porém não são fatores essenciais.

Ao contrário da definição de Billings (1972), as publicações baseadas no modelo de fraturamento hidráulico chamam os corpos tabulares de intrusão sub-vertical como diques e os sub-horizontais como sills. Neste sentido, os corpos traquíticos sub-horizontais desta área são chamados de sills. Quando a zona de fraqueza preexistente na rocha encaixante é subperpendicular ao σ_3 , o magma pode intrudir-se excepcio-

nalmente ao longo dessas, formando corpos tabulares concordantes. Os sills intrusivos em formações sedimentares horizontais são os exemplos.

Os argumentos acima citados indicam que os diques não são fósseis de falhas e fraturas do tempo

geológico, mas sim, indicadores da direção de esforço tectônico durante a intrusão. Hori & Kobayashi (1980), Laughlin et al. (1983), Feraud & Campredon (1983), etc. utilizaram este princípio para reconstituição dos tectonismos durante o tempo geológico.

INTRUSÃO DINÂMICA

Quando a pressão do magma é suficientemente alta, a transformação de intrusão vertical para horizontal pode ocorrer não somente na subsuperfície, como também em locais profundos. A pressão do magma pode erguer as rochas sobrepostas na câmara magmática, reduzindo o σ vertical. Este mecanismo, denominado intrusão dinâmica, foi proposto por Phillips (1974) para explicar intrusão de *cone sheet* em uma profundidade pequena.

Ele considerou uma câmara magmática pequena de forma esférica em uma localidade não muito profunda. Quando a pressão magmática é elevada, o esforço vertical em torno nas localidades ao redor da câmara magmática diminui. Devido à sobrecarga relativamente pequena, o σ_3 torna-se vertical. Quanto maior for a pressão magmática, tanto maior será a

profundidade de ocorrência do sill. A pressão magmática pode soerguer a superfície da Terra (Figura 6A).

Além disso, a forma do corpo intrusivo também é importante para propagação do sill. O magma é um material em estado líquido portanto a pressão hidrostática gera a força em direção perpendicular à parede de contato. A pressão magmática provoca fluxo horizontal do magma dentro de um sill e esses geram o esforço na frente da propagação deste corpo intrusivo tabular. Quando a frente da propagação tem forma pontiaguda, como a ponta de faca, a pressão magmática é utilizada eficientemente para abrir a fenda horizontal e erguer a rocha sobreposta, aumentando a espessura do sill. Este fenômeno reduz o σ vertical da frente, facilitando a propagação horizontal do sill (Figura 6B).

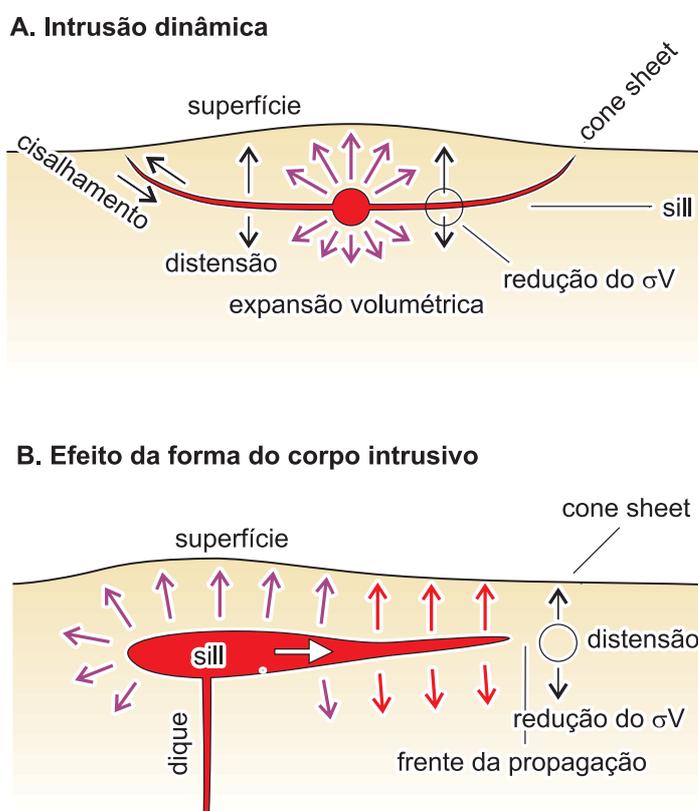


FIGURA 6. Intrusão dinâmica de corpo tabular de colocação horizontal com o auxílio de pressão magmática e conseqüente redução do σ vertical (σ_V): A) intrusão de um *cone sheet*, visualizando o modelo de Phillips (1974); B) influência da forma do corpo intrusivo e concentração do efeito para a propagação no frente do sill. A espessura dos corpos tabulares e a deformação da superfície da Terra são exageradas.

DISCUSSÕES

Conforme a explicação acima, transição de dique para sill ocorre na subsuperfície. Por outro lado, a profundidade estimada de intrusão dos corpos tabulares da área estudada é grande. As datações por traços de fissão para a apatita do embasamento metamórfico da região de Rio de Janeiro indicaram que durante o Cenozóico ocorreu soerguimento regional e conseqüente denudação de uma profundidade de 3 km (e.g. Hackspacher, 2003; Motoki et al., 2007). Esta profundidade é grande demais para que o σ_3 se torne vertical. Os corpos traquíticos têm apenas poucos metros de espessura e, acredita-se que esses corpos pequenos não são capazes de levantar as rochas sobrepostas de 3 km.

Ferrari (2001) confirmou, através de análises de sistema de fraturas, que o σ_3 da área estudada estava em direção vertical. Sendo assim, é necessária uma explicação porque o σ_3 desta área foi vertical. A intrusão do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio e conseqüente expansão do corpo intrusivo é a hipótese mais provável.

Nas escarpas costeiras da Ilha de Cabo Frio, observam-se quatro afloramentos de contatos intrusivos entre o corpo sienítico e o ortognaisse encaixante: Gruta Azul, Loc. 7; Arrependido, Loc. 8 (Foto 2); Ponta do Oratório, Loc. 9; uma localidade a oeste da Ponta Leste, Loc. 10. Os contatos das Loc. 7 e Loc. 9 são de baixo ângulo, e os das Loc. 8 e Loc. 10 são de alto ângulo. Em todos os casos, o corpo sienítico é colocado sobre o gnaisse encaixante. Isto é, o corpo sienítico tem forma tridimensional aberta para cima, sendo parecido a um filtro de coador de café. A exposição atual corresponde à parte inferior de um plutão, sendo uma fenda fornecedora do magma. A situação similar foi observada, também, nos corpos de composição

sienítica do maciço Mendanha, Nova Iguaçu, RJ (Motoki et al., 2007) e do maciço Itaúna, São Gonçalo, RJ (Motoki et al., 2008).

O corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio tem extensão de 3.3 km x 1.8 km (Figura 1). A densidade do magma sienítico é menor do que aquela da rocha encaixante ortognáissica. Considerando o tamanho do corpo comparável com a profundidade da intrusão, a expansão volumétrica pela intrusão do magma sienítico e a força de ascensão do magma pela baixa densidade poderiam ter erguido as rochas sobrepostas, provocando soerguimento do plutão.

Com base na idéia acima citada, os autores propõem o seguinte processo de intrusão. Com efeito somente da pressão magmática, formam-se corpos intrusivos tabulares de direção radial a partir da câmara magmática sienítica (Figura 7A). Este fenômeno ocorre tipicamente na zona de contato com o corpo sienítico. Certos corpos traquíticos de colocação sub-horizontal observados na Ilha de Cabo Frio, tal como do Arrependido (Foto 2B), pode ser exemplos desse. Durante a intrusão do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio, a pressão magmática do sienito diminuiu o σ vertical da área em torno do corpo sienítico em comparação com o σ vertical, colocando o σ_3 em direção vertical (Figura 7B). Dessa forma, ocorreu a intrusão sub-horizontal dos corpos traquíticos conforme o princípio da intrusão dinâmica de Phillips (1974). Com o efeito da densidade baixa do magma sienítico em comparação com a rocha encaixante, o σ vertical foi reduzida expressivamente, facilitando intensificando a intrusão dos corpos sub-horizontais (Figura 7C). Nas localidades pouco afastadas do contato, ocorreu a transição da intrusão sub-vertical para sub-horizontal pela transformação do σ_3 de vertical para horizontal (Figura 7D).

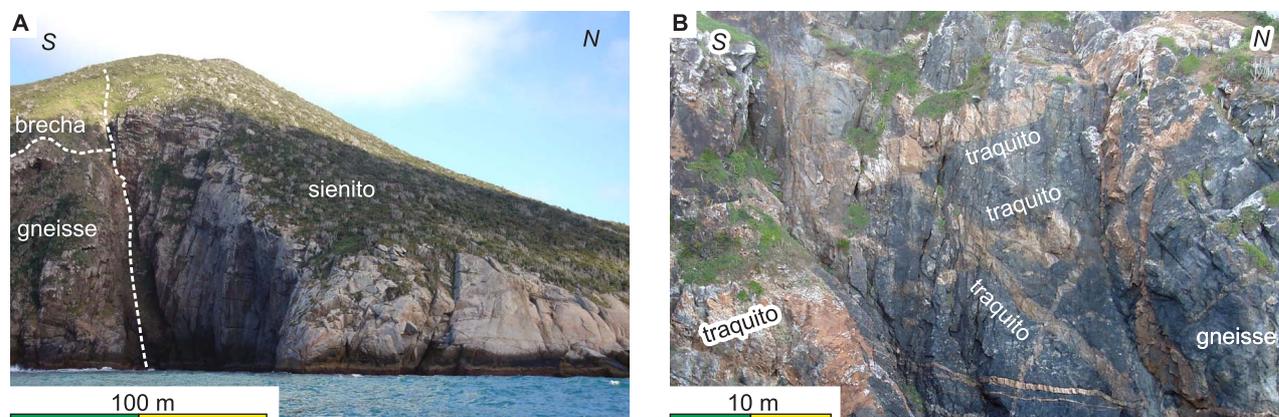


FOTO 2. Afloramentos do Arrependido, Loc. 8: A) contato intrusivo do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio com o ortognaisse encaixante; B) numerosos corpos tabulares presentes na zona de contato.

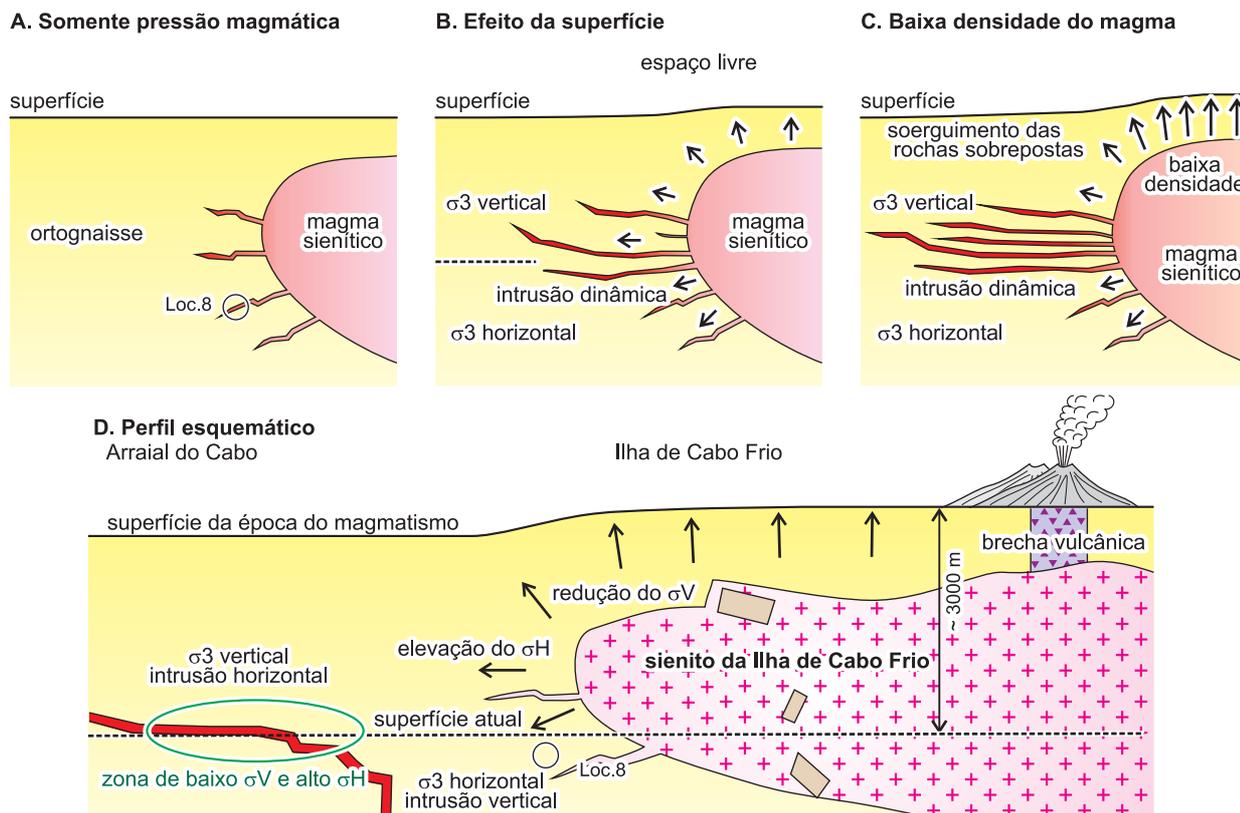


FIGURA 7. Modelo para intrusão dos corpos traquíticos sub-horizontais da área estudada através de redução do σ vertical causada por intrusão do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio: A) sob efeito da pressão magmática; B) efeito de expansão volumétrica e soerguimento das rochas sobrepostas; C) efeito adicional de baixa densidade do magma; D) perfil esquemático da época do magmatismo, modificado de Motoki & Sichel (2008). A espessura dos corpos tabulares e a deformação da superfície do terreno são exageradas.

CONCLUSÕES

As observações dos corpos traquíticos intrusivos da área em torno da Ilha de Cabo Frio, RJ, e sua consideração genética com base no princípio de fraturamento hidráulico permitem apresentar as seguintes conclusões:

1. Os corpos tabulares acima citados são classificados em três gerações: a primeira composta de lampró-firo, que é mais antiga do que a intrusão do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio; a segunda geração constituída por traquito com expressiva alteração deutérica, originada do corpo sienítico; a terceira geração formada por fonolito sem alteração deutérica, mais nova do que o corpo sienítico.
2. Certos corpos traquíticos da segunda geração apresentam transição de disposição sub-vertical para sub-horizonta: nos afloramentos de baixa altitude, esses são sub-vertical discordante; nos afloramentos de altitude média, oblíquo concordante; no topo, sub-horizonta discordante.
3. Os corpos tabulares sub-horizontais são discordantes com o bandamento do gnaíse encaixante, além disso, são compostos de rocha traquítica originada do magma de baixa densidade. Portanto a colocação sub-horizonta não é devida à estrutura da rocha encaixante, nem à densidade adequada do magma relativo à rocha encaixante. O modelo tradicional de *fracture-fill*, ou seja, da intrusão magmática ao longo de zonas de fraqueza preexistentes, não explica os fenômenos acima citados.
4. Os fenômenos intrusivos da área estudada são justificados pelo modelo de fraturamento hidráulico causado por pressão magmática, ou seja, a intrusão através da criação de uma nova fratura em direção perpendicular ao σ_3 . A transição da colocação vertical em horizontal ocorre na profundidade em que a direção do σ_3 passa de vertical para horizontal.
5. A intrusão dos corpos traquíticos sub-horizontais ocorreu em uma profundidade de 3 km. A colocação do σ_3 em direção vertical nesta profundidade

ocorreu devido à intrusão magmática e expansão volumétrica do corpo sienítico da Ilha de Cabo Frio, o que reduziram o σ vertical nas áreas adjacentes.

A baixa densidade do magma sienítico colaborou a redução do σ vertical, realizando a colocação do σ_3 em direção vertical.

AGRADECIMENTOS

O presente artigo foi preparado para a edição especial da Revista Geociências, Rio Claro, SP, com base na apresentação no 4º Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados, realizado em abril de 2008, Foz do Iguaçu, PR. Os autores agradecem à comissão organizadora pela oportunidade da presente submissão. Os autores estão gratos também ao aluno Giannis Hans Petrakis da Universidade do Estado do Rio de Janeiro pela dedicação durante os trabalhos de campo. Estamos agradecendo também ao Dr. Yoji Kobayashi da Tsukuba University (aposentado) e Dr. Tadahide Ui, da Hokkaidô University (aposentado) pelas discussões científicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BATES, R. & JACKSON, J.A. **Glossary of Geology**, 3rd edition. McGraw-Hill Book Company, 788 p., 1987.
2. BEAR, G.; BEYTH, M.; RECHES, Z. Dikes emplaced into fractured basement, Timna Igneous Complex, Israel. **Journal of Geophysical Researches**, v. 99, p. 24039-24050, 1994.
3. BILLINGS, M.P. **Structural Geology**. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 606 p., 1972.
4. CAMPOS NETO, M.C. Orogenic systems from SW-Gondwana: An approach to Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage in SE-Brazil. In: U.G. CORDANI; E.J. MILANI; A. THOMÁZ FILHO; D.A. CAMPOS (Eds.), **Tectonic Evolution of South America**, 31th International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 335-365, 2000.
5. CHEVALLIER, L. & WOODFORD, A. Morpho-tectonics and mechanism of emplacement of the dolerite rings and sills of the western Karoo, South Africa. **South African Journal of Geology**, v. 102, n. 1, p. 43-54, 1999.
6. CHIANELLO, E.L. Estudos isotópicos do lineamento de Cabo Frio e sua interpretação tectônica. Niterói, 1999. 117 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense. (inédito)
7. CLARK, B.M.; UKEN, R.; WATKEYS, M.K. Intrusion mechanisms of the southwestern Rustenburg Layered Suite as deduced from the Spruitfontein inlier. **South African Journal of Geology**, v. 103, n. 2, p. 120-127, 2000.
8. DELANEY, P.T. & GARTNER, A.E. Physical processes of shallow mafic dike emplacement near the San Rafael Swell, Utha. **Geological Society of America Bulletin**, v. 109, p. 1117-1192, 1997.
9. EMERMAN, S.H. & MARRETT, R. Why dikes?. **Geology**, v. 18, n. 3, p. 231-233, 1990.
10. FERAUD, G. & CAMPREDON, R. Geochronology and structural study of Tertiary and Quaternary dikes in southern France and Sardinia: An example of utilization of dike swarms as paleostress indicators. **Tectonophysics**, v. 98, p. 297-325, 1983.
11. FERRARI, A.L. Evolução Tectônica do Graben da Guanabara. São Paulo, 2001. 412 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. (inédito).
12. GUEDES, E.; HEILBRON, M.; VASCONCELOS, P.M.; VALERIANO, C.M.; ALMEIDA, J.C.H.; TEIXEIRA, W.; THOMÁZ FILHO, A. K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of dykes emplaced in the on-shore basement of the Santos Basin, Resende area, SE. Brazil: implications for the south Atlantic opening and Tertiary reactivation. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 18, p. 371-182, 2005.
13. HACKSPACHER, P.C.; RIBEIRO, L.F.B.; RIBEIRO, M.C.S.; FETTER, A.H.; HADLER, J.C.N.; TELLO, C.A.S.; DANTAS E.L.S. Consolidation and Break-up of the South American Platform in Southeastern Brazil: Tectonothermal and Denudation Histories. **Gondwana Research**, v. 7, n. 1, p. 91-101, 2003.
14. HEILBRON, M.; MOHRIAK, W.; VALERIANO, C.M.; MILANI, E.; ALMEIDA, J.C.A.; TUPINAMBÁ, M. From collision to extension: the roots of the southeastern continental margin of Brazil. **Geophysical Monograph**, American Geophysical Union, v. 115, p. 1-32, 2000.
15. HORI, K. & KOBAYASHI, Y. Determination of tectonic stress orientation in the Sunda Arc by means of dyke method. **Bulletin of the Volcanological Society of Japan**, v. 25, n. 1, p. 33-44, 1980.
16. HUBBERT, M.K. & WILLIS, D.G. Mechanics of hydraulic fracturing. **Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers**, v. 210, p. 153-164, 1957.
17. KAVANAGH, J.L.; MENAND, T.; SPARKS, S.J. An experimental investigation of sill formation and propagation in layered elastic media. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 245, n. 3-4, p. 799-813, 2006.
18. LAUGHLIN, A.W.; ALDRICH, M.J.; VANIMAN, D.T. Tectonic implications of mid-Tertiary dikes in west-central New Mexico. **Geology**, v. 11, p. 45-48, 1983.
19. LISTER, J.R. & KERR, R.C. Fluid-mechanical models of crack propagation and their application to magma transport in dykes. **Journal of Geophysical Researches**, v. 96, p. 10049-10077, 1991.
20. LLAMBÍAS, E.J. **Geología de los Cuerpos Ígneos**. Serie B Didáctica y complementaria, 27, Buenos Aires, Asociación Geológica Argentina, 182 p., 2003.
21. MOTOKI, A. A possible fossil earthquake swarm? - Relationship between Mesozoic basaltic dykes and their linkage faults. **Journal of Geography**, v. 103, n. 3, p. 548-557, 1994.
22. MOTOKI, A. & SICHEL, S.E. Hydraulic fracturing as possible mechanism of dyke-sill transition and horizontal discordant intrusion: an example of Arraial do Cano area, State of Rio de Janeiro, Brazil. **Geofísica Internacional**, Cuidad del Mexico, v. 47, n. 1, p. 13-25, 2008 (a).
23. MOTOKI, A.; ÁVILA, C.A.; ROIG, H.L. Estudos litológicos e geológicos dos corpos tabulares no município de Arraial do Cabo, RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. **Anais...** Belém, Sociedade Brasileira de Geologia, 1988, v. 6, p. 2727-2739.

24. MOTOKI, A.; SICHEL, S.E.; SOARES, R.; NEVES, J.L.P.; AIRES, J.R. Geological, lithological, and petrographical characteristics of the Itaúna Alkaline Intrusive Complex, São Gonçalo, State of Rio de Janeiro, Brazil, with special attention of its emplace mode. **Geociências**, v. 27, n. 1, p. 31-42, 2008 (b).
25. MOTOKI, A.; SOARES, R.; NETTO, A.M.; SICHEL, S.E.; AIRES, J.R.; LOBATO, M. Reavaliação do modelo genético do Vulcão de Nova Iguaçu, RJ: origem eruptiva ou intrusão subvulcânica ? **Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 4, p. 583-592, 2007.
26. PHILLIPS, W.J. The dynamic emplacement of cone sheets. **Tectonophysics**, v. 24, p. 69-84, 1974.
27. RUBIN, A.M. Tensile fracture of rock at high confining pressure: implications for dike propagation. **Journal of Geophysical Researches**, v. 98, p. 15919-15935, 1993.
28. SCHMITT, R.S.; TROUW, R.A.J.; VAN SCHMUS, R.; PASSCHIER, C.W. Cambrian orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil) and correlations within West Gondwana: ties that bind underwater. In: PANKHURST, R.J., TROUW, R.A., BRITO NEVES, B.B., DE WIT, J.J. (Eds.) **West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region**. Geological Society of London, Special Publications, v. 294, p. 279-296, 2008.
29. SICHEL, S.E.; MOTOKI, A.; SAVI, D.C.; SOARES, R. Subvolcanic vent-filling welded tuff breccia of the Cabo Frio Island, State of Rio de Janeiro, Brazil. **Revista Escola de Minas**, 2008. (in press)
30. VALENTE, S.; DUARTE, B.P.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J.C.H.; VALLADARES, C.S.; GUEDES, E.; TETZNER, W.; LOBO, J.; CORVAL, A.; DUTRA, T.; SOARES, L.H.; SOUZA, F.M.; VINHA, J.; FAMALLI, N. Mapa de enxame de diques da Serra do Mar. In: SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 3, 2005, Cabo Frio. **Anais...** Cabo Frio, Sociedade Brasileira de Geologia, 2005, CD-ROM.

*Manuscrito Recebido em: 28 de julho de 2008
Revisado e Aceito em: 24 de novembro de 2008*