

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Minas



ISSN 0104-0553

BT/PMI/086

**Evolução Magmática e Modelo
Metalogenético dos Granitos
Mineralizados da Região de Pitinga,
Amazonas, Brasil**

**Sara Lais Rahal Lenharo
Helmut Born**

São Paulo - 1998

1022 928

FICHA CATALOGRÁFICA

Lenharo, Sara Lais Rahal

Evolução magmática e modelo metalogenético dos granitos mineralizados da região de Pitinga, Amazonas, Brasil / S.L.R. Lenharo, H. Born. São Paulo : EPUSP, 1998.

28 p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/086)

1. Estanho 2. Metais raros 3. Granitos 4. Mineralização I. Born, Helmut II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas III. Título IV. Série

ISSN 0104-0553

CDU 553.45
553.493
553.521
553

O presente trabalho é uma versão abreviada da tese de doutorado apresentada por Sara Laís Rahal Lenharo, sob a orientação do Prof. Dr. Helmut Born, "Evolução Magmática e Modelo Metalogenético dos Granitos Mineralizados da Região de Pitinga, Amazonas, Brasil" com defesa realizada em 01/10/98.

A íntegra da tese encontra-se à disposição dos interessados com o autor e na Biblioteca do Depto. de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP.

Evolução Magmática e Modelo Metalogenético dos Granitos Mineralizados da Região de Pitinga, Amazonas, Brasil

1. Considerações sobre o Tema

Importante mineralização de estanho (Sn), metais raros (Zr, Nb, Ta, Y, ETR) e criolita está associada aos Maciços Água Boa e Madeira na Mina de Pitinga, localizada na parte norte do Cráton Amazônico. Esses Maciços são o resultado de sucessivos estágios de injeção magmática, seguidos por processos hidrotermais tardios, que, conjuntamente, conduziram a uma associação polimetálica singular e de porte extremamente significativo.

Atualmente, o Pitinga abriga o único grande depósito conhecido de criolita no mundo, o qual está associado às mineralizações de estanho e metais raros. A criolita é usada como um fundente no processo de siderurgia do alumínio, na fabricação de abrasivos (pó para polimento), como pesticida, na fabricação de porcelana, vitrificação de materiais e como cimento branco para aplicação dental. Desde o esgotamento da jazida de Ivigtut, Groenlândia, há vários anos, a criolita (Na_3AlF_6) é produzida sinteticamente.

Os depósitos de estanho, em sua maioria, estão espacial, temporal e provavelmente geneticamente relacionados a rochas magmáticas de composição granítica ou seus equivalentes vulcânicos. Essas rochas comumente constituem “batólitos compostos”, nos quais os granitos associados aos depósitos de estanho geralmente equivalem aos termos mais evoluídos, correspondendo às fases tardias do batólito.

Em comparação a granitos alcalinos normais, os granitos estaníferos apresentam enriquecimento em uma variedade de elementos, como SiO_2 , alcalis, B, F, Be, Li, Rb, Ga, Sn, Nb, Ta, Zn, W, U, Th, Zr, Y e ETR, e empobrecimento em TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , FeO , P_2O_5 , Ba, Sr e Eu. Os modelos de distribuição dos elementos-traço em granitos estaníferos, bem como as condições de equilíbrio petroquímico em seus níveis de intrusão mais elevados, apontam para o importante papel da cristalização fracionada, durante sua evolução magmática (Lehmann, 1990).

Pitcher (1993) efetuou uma análise geral dos modelos de depósitos de estanho. Segundo um dos modelos vigentes, durante um ciclo de fusão parcial (partial melting) teria ocorrido a coleta do metal contido em sedimentos clásticos, seguida de cristalização fracionada promovida por enriquecimento em voláteis. Essa evolução, por sua vez, conduziu à intrusão de granitos tipo S portadores de ilmenita, durante orogenia relacionada a colisão continental. Um outro ambiente importante para formação de depósitos de estanho ocorre em associação com granitos alcalinos relacionados a complexos anelares anorogênicos (tipo A), provenientes de magmas altamente evoluídos. Pollard et al. (1995), no entanto, enfatizaram que aspectos mineralógicos e geoquímicos dos granitos estaníferos resultam de extensiva cristalização fracionada, motivo pelo qual interpretações baseadas na provável composição da rocha-fonte devem ser tratadas com reserva.

Blevin e Chappell (1992) destacam que a mineralização de estanho, no cinturão dobrado de idade paleozóica do leste da Austrália, está associada a granitos tipo S e I, os quais derivam de magmas caracterizados por baixa fugacidade de oxigênio e que sofreram cristalização fracionada. Considerando o comportamento do estanho, baseado no par de “redox” $\text{Sn}^{4+}/\text{Sn}^{2+}$, em condições oxidantes (série magnetita) o Sn^{4+} com coordenação octaédrica tem raio iônico similar ao do Ti^{4+} e Fe^{3+} , substituindo esses ions em minerais tais como biotita, hornblenda, titanita, ilmenita e magnetita. Disso resulta empobrecimento em Sn durante o fracionamento de magmas oxidantes. Em magmas redutores, por sua vez, durante a cristalização fracionada pode haver acúmulo de Sn^{2+} na fase fundida, que se concentra na fase aquosa exsolvida.

Ishihara (1977), considerando granitos do tipo I e S, correlacionou as mineralizações de Sn, Be, W e F com granitos da série ilmenita (relacionada a um ambiente de formação redutor). Essas rochas apresentam menos de 0,1% em volume de opacos (ilmenita), além de pirrotita e grafita como acessórios, sendo isentos de magnetita, fato que evidencia a baixa fugacidade de oxigênio nesses magmas. Já as mineralizações de metais base, Au-Ag e Mo estão relacionadas a granitos da série magnetita (ambiente oxidante).

Elementos com diferentes valências, como o estanho, podem portanto ser diretamente afetados pelo estado de oxidação do magma. Em magmas relativamente oxidados, como já mencionado, o Sn^{4+} substituindo outros cátions, resulta num coeficiente de distribuição total "cristal/melt" > 1 , com conseqüente diminuição na concentração de Sn durante o fracionamento. Em magmas relativamente reduzidos, por outro lado, o Sn^{2+} terá um coeficiente de distribuição total "cristal/melt" < 1 , fato que acarretará um aumento na concentração de Sn com o fracionamento.

Granitos anorogênicos (tipo A), comumente relacionados a mineralizações de estanho e metais raros, têm índices de saturação em alumina (razões A/CNK) variáveis, compreendendo composições peraluminosas, metaluminosas e peralcalinas; todos esses tipos apresentam baixo CaO, Al_2O_3 , H_2O , Ba, Sr e Eu; alto Fe/Mg, F, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, K/Na, ETR, Zr, Nb e Ta; e razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ altamente variável (Clarke, 1992). A origem dos granitos tipo A é controversa e os modelos sugeridos variam entre: evolução direta de magmas derivados do manto; fontes crustais residuais; fontes metassomatizadas; e fontes tonalítica-granodioríticas. Esses modelos geralmente envolvem fusão parcial (Collins et al., 1982; Creaser et al., 1991) ou assimilação combinada com cristalização fracionada (Barker, 1991).

De acordo com Haapala (1988), rochas graníticas são mais comuns em áreas de escudos pré-cambrianos. Nessas regiões, as suítes graníticas com capacidade óbvia de gerar depósitos de estanho são representadas por granitos rapakivi proterozóicos, que comumente constituem um grupo de complexos graníticos anorogênicos a pós-orogênicos.

Haapala et al. (1996), numa síntese sobre os granitos rapakivi, comentam que eles são proterozóicos, na grande maioria, constituindo uma parte essencial de várias áreas cratônicas pré-cambrianas. Geoquimicamente, quando comparadas às rochas graníticas em geral, essas rochas são metaluminosas a ligeiramente peraluminosas, caracterizadas por elevados conteúdos de Si, Fe/Mg, F, K, Zn, Ga, Rb, Zr, Hf, Th, U e ETR (exceto Eu) e baixos conteúdos de Ca, Mg, Al, P e Sr. Em diagramas discriminantes, os granitos rapakivi posicionam-se no campo dos granitos tipo A e intra-placa. Os granitos rapakivi associam-se a depósitos polimetálicos de estanho e ferro-cobre. Os depósitos de Sn (-W-Be-Zn-Pb-Ag) tipo greisen, skarn e em veios, mais comumente, ocorrem associados às fases finais especializadas de topázio-microclínio-albita-granitos.

Haapala e Ramo (1992) destacaram que a cristalização fracionada dos granitos rapakivi geralmente resulta em um "trend" peraluminoso para o líquido residual. As rochas formadas no estágio final normalmente são portadoras de topázio e apresentam baixas razões de K/Na, altos conteúdos de F, Ga, Rb e Sn e baixos conteúdos de Ba e Sr, além de distribuição dos ETR do tipo aplainado, evidenciando um enriquecimento em ETR pesados.

A evolução geral dos granitos rapakivi da Finlândia, descrita por Haapala (1988), foi assim definida: hornblenda-biotita-fayalita granito \Rightarrow granito rapakivi normal \Rightarrow biotita-granito \Rightarrow topázio-granito. Essa evolução é marcada pelo aumento de SiO_2 e diminuição de Al_2O_3 , FeO, MgO, CaO, TiO_2 e MnO, sendo o fácies mais evoluído, geralmente, portador de mineralizações de Sn, Be, W, Zn, Pb e Cu. Esse "trend" evolutivo demonstra a capacidade que os processos de diferenciação magmática possuem de atuar em sistemas graníticos.

Mineralização do tipo "greisen" ocorre nas áreas dos granitos Eurajoki (Maciço Laitila) e Kymi (Maciço Wiborg) na Finlândia. De acordo com Haapala (1978), em ambos os casos a mineralização está associada a intrusões complexas em forma de cúpula, portadoras

de topázio, ou seja, variedades do estágio tardio de granitos rapakivi. No Brasil, os depósitos estaníferos de Rondônia estão associados aos granitos rapakivi do Proterozóico Médio, incluindo granitos alcalinos, greisen e brechas.

No Pitinga, a mineralização polimetálica (Sn, Zr, Nb-Ta, Y, F, criolita, etc) está associada ao albita-granito. Outra mineralização estanífera associada a albita-granito foi registrada por Leite Jr e Bettencourt (1992), que descreveram o primeiro caso de albita leucogranito na Província Estanífera de Rondônia. Albita-granito pertence ao grupo de rochas granitóides relacionadas a mineralizações de metais raros.

De acordo com Pollard (1995), os mesmos processos de fracionamento químico que concentram estanho também resultam na elevação do conteúdo de metais raros nos magmas graníticos, sendo que essas mineralizações comumente estão associadas.

Kovalenko (1978) classificou os granitóides a metais raros em três tipos geoquímicos: 1) tipo geoquímico “Li-F”, que contém mineralizações de Ta, Li, Sn e as vezes W; 2) tipo geoquímico “padrão”, que inclui mineralizações de W, Mo, Be e raramente Ta e Sn; e 3) granitóides “agpaíticos”, que contém depósitos de TR, Y, Nb e Zr. Os granitóides do “tipo Li-F” exibem estrutura interna complexa, com fases iniciais alasquíticas e fases finais incluindo albita-granito portador de amazonita, zinnwaldita ou lepidolita. Seus análogos efusivos e subvulcânicos são: ongonito e riolito rico em F. Os granitos “tipo padrão” têm uma composição granítica média pobre em Ca. Os granitóides do “tipo agpaítico” formam maciços individuais ou conectados com granitos a biotita ou “tipo Li-F”.

Mineralologicamente, os granitóides a metais raros dos tipos “Li-F” e “padrão” de Kovalenko (1978) são peraluminosos, ricos e pobres em F, respectivamente, enquanto o tipo “agpaítico” é, naturalmente, peralcalino.

Segundo Pollard (1995), os depósitos de metais raros associados a granitos ocorrem desde o Proterozóico Inferior até o Mesozóico, posicionam-se em níveis relativamente rasos (< 4 km) e, de acordo com o índice de saturação em alumina (ASI) da rocha hospedeira, podem ser classificados em dois grandes grupos ou variedades: peraluminosos e peralcalinos.

As variedades peraluminosas geralmente ocorrem em cinturões dobrados, como plútons pós-orogênicos, estando associadas predominantemente com mineralizações de Ta(-Sn) contendo topázio primário e micas ricas em Li. A mineralização (columbita-tantalita, microlita e cassiterita rica em Ta) encontra-se disseminada nas partes apicais do fácies mais evoluído do corpo granítico. Os granitos são enriquecidos em Al_2O_3 , Na_2O , F, Li, Rb, Cs, Ga, Nb, Sn e Ta, têm elevada razão Ta/Nb, e são empobrecidos em TiO_2 , MgO, CaO, Zr, Sr e Eu.

As variedades peralcalinas contendo arfvedsonita e egrina primárias, em sua maioria, foram posicionadas durante eventos extensionais, ou migraram para porções mais elevadas a partir de “hot spots” do manto em antigas regiões cratônicas, formando complexos anelares subvulcânicos. Esses complexos estão associados a mineralizações de Zr-Nb-ETR(-Be-Y-Sn-Ta). As mineralizações são do tipo disseminada, predominando minerais de Zr, Nb e ETR formados durante a cristalização do magma ou durante alteração hidrotermal pervasiva (metassomatismo Na e Ca). Os granitos peralcalinos são caracterizados por altos conteúdos de Fe, F, Nb, Zr, Rb, Sn e ETR, baixos conteúdos de CaO, Ba e Sr e baixa razão Ta/Nb.

Pela literatura acima referida, albita-granito peraluminoso está comumente associado a mineralizações de Be, Li, Ta, Sn e W, enquanto que albita-granito peralcalino comumente apresenta mineralizações de Nb, Zr, Y, Th, U e ETR.

Neste contexto, o albita-granito peralcalino associado aos granitos rapakivi de idade proterozóica da Mina de Pitinga (Maciços Água Boa e Madeira), com elevados conteúdos de criolita, zircão, cassiterita, columbita-tantalita e pirocloro, xenotima, torita e micas litínicas, destoa dos modelos usuais, constituindo um exemplo único de significado mundial.

Os estilos de mineralização na Mina de Pitinga incluem: 1) cassiterita-topázio-mica-quartzo-greisen (Daoud, 1988; Borges et al., 1996) e episienito sódico portador de cassiterita

(Costi. et al., 1996a e b), associados ao Maciço Água Boa; e 2) mineralização disseminada de criolita-zircão-cassiterita-pirocloro-columbita-tantalita-xenotima-torita em Li-mica-albita-granito, associada ao Maciço Madeira. A mineralização de criolita é maciça em várias partes do albita-granito. Lenharo et al. (1997a), identificaram um fácies granítico tardio, portador de topázio, diretamente relacionado à mineralização de estanho no Maciço Água Boa.

2. Situação Geológica

A região da Mina de Pitinga compreende as seguintes unidades do Mesoproterozóico, que se desenvolveram sob condições anorogênicas intraplaca: Adamelito Água Branca, Supergrupo Uatumã (Grupo Iricoumé e Suíte Intrusiva Mapuera), Formação Urupi, Formação Quarenta Ilhas e Suíte Intrusiva Abonari.

A Mina de Pitinga é composta predominantemente por rochas vulcânicas ácidas e piroclásticas do Grupo Iricoumé, de idade U-Pb de 1662 (+42 -33) Ma (Schobbenhaus et al., 1994). Além disso, foram delimitados três corpos graníticos alcalinos atribuídos à Suíte Intrusiva Abonari (Horbe et al., 1985; Daoud e Antonietto Jr., 1985; Daoud, 1988; Horbe et al., 1991), denominados Maciços Água Boa, Madeira e Europa. Os dois primeiros situam-se na porção central da área em estudo, enquanto que o Granito Europa se localiza na porção noroeste.

Os Maciços Água Boa e Madeira (respectivamente, 1679±30 Ma e 1691±34 Ma, Rb-Sr em rocha total) são intrusivos nas rochas vulcânicas ácidas e piroclásticas do Grupo Iricoumé (1662 +42 -33 Ma). Os Granitos de Pitinga foram correlacionados à Suíte Intrusiva Abonari, embora determinações posteriores de idade revelassem inconsistência nessa correlação. Além disso, uma correlação cogenética entre o fácies rapakivi do Maciço Madeira e as rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé foi sugerida. Para o fácies albita-granito de núcleo do Maciço Madeira, a idade U/Pb de 1834±6 Ma foi determinada.

A partir da implantação do Projeto Pitinga em 1982, vários trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos na região (Carvalho Filho et al., 1984; Horbe et al., 1985; Daoud e Antonietto Jr., 1985; Macambira et al., 1987; Daoud, 1988; Horbe et al., 1991; Teixeira et al., 1992; Schobbenhaus et al., 1994; Costi et al., 1995; Costi et al., 1996 a e b; Borges, et al., 1996), buscando, principalmente, definir as principais características geológicas, petrográficas e econômicas dos Maciços Água Boa e Madeira.

Horbe et al. (1991) consideram que, quimicamente, os Granitos do Pitinga se caracterizam pelos altos conteúdos de SiO₂, Na₂O, K₂O e F, e baixos conteúdos de MgO, CaO e P₂O₅, que determinam seu caráter alcalino. Entre os elementos traço, altos valores de Zr, Y, Rb, Nb, Li e Sn são evidentes.

De acordo com Macambira et al. (1987), Daoud (1988) e Horbe et al. (1991), as rochas graníticas do Pitinga, além de alcalinas, possuem caráter metaluminoso a peraluminoso, sendo classificadas como granitos tipo A, apresentando claro “trend” de diferenciação.

Daoud (1988) admite que os dados petrológicos dos granitos anorogênicos intraplaca do Pitinga indicam temperaturas de cristalização no intervalo de 600 a 700°C e posicionamento em níveis crustais rasos, a cerca de 1 km de profundidade. O posicionamento dos Maciços Água Boa e Madeira ocorreu sob um regime tectônico extensional e localizado em fraturas profundas. O autor se refere, ainda, a mecanismos de posicionamento interpretados como uma combinação de processos de “stoping” com subsequente colapso de caldeira.

2.1. Maciço Água Boa

O Maciço Água Boa tem forma elíptica, alongada segundo a direção NE-SW. Abrange uma superfície de aproximadamente 350 Km², sendo constituído, segundo Daoud (1988), por três fácies petrograficamente distintos, cuja ordem de posicionamento obedece às relações

verificadas no campo: 1) granito rapakivi equigranular (fácies precoce), com granulação média a grossa, que ocorre ao longo das bordas nordeste, sudeste e oeste do batólito; 2) granito porfirítico fino, que forma faixas alongadas e estreitas, dispostas segundo o eixo maior do batólito; e 3) biotita-granito equigranular médio a grosso, de maior extensão superficial, associado com veios de microgranito subordinados. Mapeamentos básicos não divulgados do Maciço Água Boa, realizados por Daoud, identificaram duas pequenas porções de granito porfirítico de granulação média e uma porção de biotita-granito branco, associadas ao granito porfirítico fino na parte central do batólito.

Adicionalmente, foi identificado um fácies porfirítico fino portador de topázio, que ocorre predominantemente como faixas alongadas na parte central do batólito e representa o estágio mais evoluído do Maciço Água Boa (Lenharo et al., 1997a). O fácies granito porfirítico fino de borda é considerado uma margem de resfriamento do fácies biotita-granito.

A mineralização de Sn no Maciço Água Boa relaciona-se a processos pós-magmáticos de alteração hidrotermal e ocorre como veios de mica-topázio-quartzo-greisen com cassiterita, alojados ao longo de falhas que cortam o biotita-granito. Os veios de greisen são verticalizados, com espessura centimétrica a métrica.

Ainda em relação às mineralizações associadas ao Maciço Água Boa, Costi et al. (1996 a e b) descrevem, pela primeira vez, a presença de episienitos sódicos metassomáticos, mineralizados em estanho, no fácies biotita-granito.

2.2. Maciço Madeira

O Maciço Madeira, que abrange uma superfície de cerca de 60 km², é também um corpo alongado na direção NE-SW, totalmente circundado por rochas vulcânicas ácidas, e foi mapeado como um corpo separado do Maciço Água Boa por um estreito corredor dessas rochas vulcânicas. Segundo Costi (1996 - comunicação oral), com as atividades de lavra alcançando a área de contato, verificou-se que esse corredor de rochas vulcânicas é muito mais estreito e descontínuo do que registrado nos mapas geológicos. Aparentemente, os dois corpos graníticos fazem parte de uma única estrutura, separados apenas por uma falha de extensão regional, de direção NW-SE.

O Maciço Madeira também apresenta três fácies distintos, em termos petrográficos, geoquímicos e metalogenéticos, cujas relações temporais e espaciais foram determinadas com base em dados de campo. Esses fácies são: 1) granito rapakivi porfirítico a equigranular (fácies precoce), de granulação fina a grossa, que ocorre ao longo da borda nordeste e nas porções sudeste e sudoeste do batólito; 2) biotita-granito equigranular, localmente porfirítico, de granulação fina a média e com ampla distribuição, além de uma fase subordinada de microgranito em veios (Daoud, 1988); e 3) albita-granito, geralmente porfirítico, de granulação fina a grossa, que ocorre na porção central do corpo (Daoud, 1988; Costi et al., 1995). De acordo com Horbe et al. (1985), Horbe et al. (1991), e Teixeira et al. (1992), esse último fácies mais evoluído representaria um apogranito, ou seja, granito fortemente albitizado (alteração pós-magmática), contendo altos teores de metais raros.

O albita-granito contém importante mineralização disseminada de cassiterita, zircão, columbita-tantalita-pirocloro, xenotima e criolita. No manto de alteração, com espessura média de 30 m, a mineralização disseminada apresenta-se enriquecida, porém isenta de criolita. Na rocha fresca distingue-se: 1) mineralização de criolita maciça e 2) mineralização de criolita disseminada associada a mica litinífera, ambas restritas ao albita-granito de núcleo; e 3) mineralização disseminada de cassiterita, xenotima, zircão e columbita-tantalita, tanto no albita-granito de núcleo como de borda.

A mineralização de criolita maciça constitui dois corpos situados a cerca de 150 m do topo do albita-granito de núcleo, podendo representar os produtos de um magma imiscível

extremamente rico em F, que se separou durante a cristalização do albita granito (Lenharo et al., 1997 b).

Salienta-se a marcante correspondência das variedades petrográficas dos corpos graníticos Água Boa e Madeira, representadas por um fácies com textura rapakivi e outro, posterior, com textura equigranular e portador de biotita.

3. Relações de Campo

Os Maciços Água Boa e Madeira são intrusivos e separados por um estreito corredor de rochas vulcânicas Iricoumé. Xenólitos, milimétricos a métricos, da rocha vulcânica encaixante são encontrados próximo aos contatos, nos Maciços Água Boa e Madeira. A separação dos dois corpos graníticos, por sua vez, pode estar associada a falhamentos extensionais regionais de direção NW-SE.

Com base nas relações de campo, concluiu-se que as relações cronológicas e a sequência evolutiva entre os fácies são definidas por sucessivas injeções de magma.

No Maciço Madeira: 1) O contato entre os fácies rapakivi e biotita-granito é abrupto e xenólitos do granito rapakivi são encontrados no fácies biotita-granito; 2) Veios de microgranito, como uma fase tardia, cortam os fácies rapakivi e biotita-granito; 3) Uma auréola metassomática de contato (sub-fácies de borda) circunda o albita-granito de núcleo; 4) Os contatos entre o albita-granito e os fácies rapakivi e biotita-granito geralmente ocorrem através do sub-fácies de borda, com mergulhos centrífugos de 25 a 45°; e 5) Localmente, próximo ao contato, são observados veios de greisen.

No Maciço Água Boa: 1) No campo, não foi possível observar o contato entre os fácies rapakivi e biotita-granito, mas, características mineralógicas e texturais, permitem definir que o granito rapakivi foi o primeiro fácies a se formar; 2) Entre os fácies biotita-granito e granito porfirítico fino, este último compreendendo o fácies marginal de biotita-granito porfirítico fino e o fácies topázio-granito, são observados tanto contatos abruptos como transicionais; 3) Dentro do fácies biotita-granito ocorrem xenólitos de aparência similar ao fácies porfirítico fino, que compreende tanto a fase marginal do biotita-granito porfirítico fino como o topázio-granito; 4) “Rocha matriz” do fácies topázio-granito engloba porções dos fácies rapakivi e biotita-granito; e 5) Diques e/ou “sills” de microgranito, apresentando veios de greisen associados, cortam os fácies biotita-granito e topázio-granito.

Em testemunhos de sondagem, os contatos do fácies rapakivi e do biotita-granito com o topázio-granito porfirítico formam uma rocha transicional, definida como “rocha matriz”. A “rocha matriz” apresenta porções de granito rapakivi ou biotita-granito de granulação grossa a média, circundadas por massas anastomosadas e filmes intergranulares de topázio-granito porfirítico fino. O topázio-granito geralmente apresenta fenocristais orientados, sugerindo fluxo magmático.

Conclui-se que o posicionamento dos Maciços Água Boa e Madeira se deu em nível raso, devido às seguintes constatações: 1) Os Maciços são intrusivos em rochas vulcânicas aproximadamente contemporâneas; 2) Os contatos entre os diferentes fácies e das rochas vulcânicas não deformadas com os Maciços são predominantemente nítidos e abruptos; 3) As intrusões não apresentam foliação tectônica; e 4) Não há auréolas metamórficas de contato.

Os perfis topográficos, perpendiculares ao eixo maior dos Maciços Água Boa e Madeira, indicam que os contatos das rochas vulcânicas com os Maciços e entre os seus diferentes fácies são predominantemente sub-verticais a verticais.

Em escala regional, os Maciços Água Boa e Madeira podem ser relacionados a um complexo sistema de falhas e os corpos intrusivos são alongados em sentido paralelo a uma dessas direções preferenciais de falhamento (NE-SW). A última fase do Maciço Água Boa (topázio-granito), em particular, mostra uma conspícua forma de dique com orientação NE-SW.

Os Maciços Água Boa e Madeira podem ter aproveitado fraturas rúpteis (“exploited brittle fractures”) durante o posicionamento, empurrando lateralmente as rochas encaixantes. O albita-granito, que constitui o último fácies do Maciço Madeira, apresenta contatos sub-horizontais e sub-verticais, podendo ter se posicionado através do mesmo mecanismo geral, envolvendo porém deslocamento vertical das rochas encaixantes.

4. Medidas de Susceptibilidade Magnética

As medidas de susceptibilidade magnética sugerem que o fácies rapakivi pertence à série magnetita, indicando condições oxidantes de formação, enquanto que as condições de fugacidade de oxigênio durante a formação do biotita-granito e topázio-granito foram redutoras, o que deve se refletir nas razões $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$.

Tabela 1: Susceptibilidade Magnética dos fácies graníticos

Granito	Fácies	Susceptibilidade Magnética (SI)			Número de Amostras
		Máximo	Mínimo	Média	
Água Boa	Rapakivi	1112	43	472	19
Água Boa	Biotita	231	0	26	35
Água Boa	Biotita-porfirítico	13	0	6	5
Água Boa	Topázio	3	0	0,3	11
Água Boa	“Rocha matriz”	0	0	0	7
Água Boa	Microgranito	0	0	0	2
Madeira	Rapakivi	1777	3	389	15
Madeira	Biotita	72	0	5	14
Madeira	Albita Núcleo	601	0	382	4
Madeira	Albita Borda	3	0	0,4	7
	Rapakivi Geral	1777	3	424	34
	Biotita Geral	231	0	20	49
	Diques máficos Geral	2083	47	747	3
	Vulcânicas Iricoumé	2085	43	1386	5

Os valores de susceptibilidade magnética do albita-granito de núcleo do Maciço Madeira indicam condições de formação oxidantes, que podem ser relacionadas tanto a uma rocha-fonte diferente, como a um processo de oxidação ocorrido durante a ascensão e posicionamento do albita-granito.

5. Estudos Petrográficos

5.1. Granito Rapakivi

Os fácies rapakivi dos Maciços Água Boa e Madeira abrangem dois tipos texturais principais, um deles predominantemente inequigranular porfirítico (Maciço Madeira) e outro equigranular a inequigranular raramente porfirítico (Maciço Água Boa). Ambos mostram textura rapakivi, intercrescimento granofírico e aspectos comuns de alteração, como “coroas-trocadas” (swapped rims) de albita.

As diferenças principais entre os fácies rapakivi dos Maciços Água Boa e Madeira se referem essencialmente à textura (Tabela 2) e à quantidade e modo de ocorrência da titanita e

anfibólio. O fácies rapakivi Madeira contém uma quantidade maior de titanita primária, do que o fácies rapakivi Água Boa, onde, além de subordinada a titanita geralmente constitui uma fase secundária relacionada à alteração das micas.

Tabela 2: Comparação entre os fácies rapakivi dos Maciços Água Boa e Madeira

	Fácies Rapakivi Água Boa	Fácies Rapakivi Madeira
Textura Geral	Equigranular&Inequigranular Seriada	Inequigranular Porfíritica
Intercrescimento	Granofírico	Granofírico
Sobrecrescimento	Rapakivi & anti-rapakivi	Rapakivi & anti-rapakivi
Minerais Predominantes	K-Fd, qz, plag, bio, anf	K-Fd, qz, plag, bio, anf
Minerais Acessórios	Opa, Zr, Fl, Ti, TR, Apa	Opa, Zr, Fl, Ti, TR, Apa
Composição Modal (%)	KFd=52, Qz=34, Pl=7, Bi=5, Anf=1	KFd=52, Qz=35, Pl=4, Bi=7, Anf=2
Minerais de Alteração	Sericita, albita, hematita, clorita, titanita	Seric., alb., hemat., clorita, muscovita
Minerais Preenchimento	Fluorita, mica	Fluorita, albita, mica, quartzo
Outros	Veios de carbonato	Veios de carbonato e biotita

5.2. Biotita-granito

Os fácies biotita-granito dos Maciços Água Boa e Madeira também são constituídos por dois tipos texturais principais, um tipo sistematicamente inequigranular seriado, ocasionalmente porfíritico (Maciço Água Boa) e outro tipo, denominado “miscelâneo”, composto por rochas que variam de equigranular a inequigranular seriado a porfíritico (Maciço Madeira). Ambos os tipos geralmente apresentam alteração por sericita no centro dos grãos de plagioclásio e raro intercrescimento granofírico. Aspectos de alteração, como “swapped rims” de albita, oxidação e sericitização, são comuns.

Adicionalmente, três sub-fácies podem ser reconhecidas no biotita-granito do Maciço Água Boa, pois: 1) Na parte norte do batólito, plagioclásio está presente apenas na forma de pertitas e na textura “swapped rims”, indicando um caráter hipersolvus para esse sub-fácies, denominado norte-biotita-granito; 2) Amostras provenientes da parte sul do Maciço Água Boa contêm predominantemente plagioclásio com núcleo mais cálcico, indicado pela alteração sericítica, constituindo o sub-fácies sul-biotita-granito; 3) Amostras do biotita-granito associadas ao topázio-granito, na parte central e oeste do batólito, contêm plagioclásio cálcico e sódico e predominantemente mica de coloração creme a marron pálido, constituindo o sub-fácies denominado topázio-biotita-granito.

As principais características dos fácies biotita-granito dos Maciços Água Boa e Madeira estão sumarizadas na Tabela 3.

Tabela 3: Comparação entre os fácies biotita dos Maciços Água Boa e Madeira

	Fácies Biotita Água Boa	Fácies Biotita Madeira
Textura Geral	Inequigranular seriada	Equigranul.&Inequigr.Seriada-Porfíritica
Intercrescimento	Fracamente granofírico	Granofírico
Sobrecrescimento	Plagioclásio Zonado	Plagioclásio Zonado
Minerais Predominantes	K-Fd, qz, plag, bio	K-Fd, qz, plag, bio
Minerais Acessórios	Fluo, Opa, Zir, Top, Apat?	Fluorita, Opacos, Zircão, Topázio
Composição Modal (%)	K-Fd=46, qz=40, pl=10, bi=4	K-Fd=50, qz=42, pl=3, bi=5
Minerais de Alteração	seric., alb., hemat., fluor., carbon., clorita	sericita, albita, hematita, fluorita, clorita
Minerais Preenchimento	Fluorita, mica, albita	Fluorita, mica, albita, clorita
Outros		Veios de fluorita, albita e biotita

O fácies biotita-granito Água Boa é exclusivamente inequigranular seriado, enquanto o fácies biotita-granito Madeira apresenta uma ampla variação nas texturas gerais. No entanto, o Maciço Água Boa também apresenta uma variedade de biotita-granito de textura porfirítica fina (fácies biotita-granito porfirítico), representativa de margem de resfriamento.

5.3. Topázio-granito porfirítico do Maciço Água Boa

O fácies topázio-granito porfirítico do Maciço Água Boa é de coloração branca acinzentada a rosada, inequigranular porfirítico, geralmente com fenocristais de quartzo arredondado e feldspatos branco e rosa retangulares (0,5 a 3 cm de comprimento). A matriz é homogênea, de granulação fina e composta de quartzo, feldspatos rosa e branco e biotita. Em algumas amostras, são observadas texturas granofíricas. O topázio-granito contém zonas ou manchas de granulação grossa, constituídas por quartzo, mica e fluorita, e é cortado por veios compostos por quartzo e mica (greisen).

O topázio-granito porfirítico é dividido em três sub-tipos texturais de acordo com a abundância dos fenocristais e a natureza de seus limites, respectivamente: “membro terminal” (“end member”), com menos de 50 % de fenocristais com limites aproximadamente regulares; “membro intermediário”, com menos de 50 % de fenocristais com limites dendríticos, provavelmente relacionados a absorção e crescimento durante a cristalização da matriz; e “rocha matriz”, com mais de 50 % de fenocristais com aspectos de absorção e crescimento. Embora os três sub-tipos apresentem diferentes características e quantidades de fenocristais, todos eles têm muitos aspectos texturais semelhantes, incluindo intercrescimentos granofíricos e dendríticos, plagioclásios zonados e geralmente dois tipos diferentes de matriz.

Com base na composição modal estimada em seções delgadas (Tabela 4), observa-se que os três sub-tipos texturais do topázio-granito porfirítico apresentam um decréscimo de K-feldspato peritítico e aumento de quartzo e plagioclásio, a partir do sub-tipo “rocha matriz” para o “membro terminal”. A quantidade de mica apresenta apenas uma ligeira variação.

Tabela 4: Composição modal dos sub-tipos texturais de Topázio-granito porfirítico

Tipo Textural	Fenocristais	Matriz	K-Fd peritítico			Quartzo			Plagioclásio			Mica		
			Fenoc	Matriz	Total	Fenoc	Matriz	Total	Fenoc	Matriz	Total	Fenoc	Matriz	Total
Mb. Terminal	20% (7-35)	80% (65-93)	10% (2-20)	24% (10-30)	34% (30-37)	8% (4-10)	35% (30-40)	43% (39-48)	3% (0-7)	17% (12-20)	20% (12-25)	0% (0)	3% (3-4)	3% (3-4)
Intermediário	36% (20-50)	64% (50-80)	16% (7-25)	19% (10-30)	35% (20-45)	15% (8-35)	27% (15-38)	42% (30-55)	4% (0-15)	15% (7-18)	19% (12-28)	0,4% (0-3)	3,6% (2-5)	4% (3-5)
Rocha matriz	68% (55-90)	32% (10-45)	35% (20-45)	9% (2-15)	44% (35-50)	24% (17-38)	13% (5-20)	37% (32-43)	7% (0-15)	8% (3-10)	15% (10-23)	2% (0-3)	2% (0-3)	4% (3-5)

As principais características petrográficas e texturais dos três sub-tipos de topázio-granito porfirítico estão sumarizados na Tabela 5. Utilizando-se a amostragem realizada, em 25 seções delgadas, 14 delas (56%) correspondem ao tipo “intermediário”, definindo-o como termo predominante de ocorrência do topázio-granito, sendo que o tipo “membro terminal” é responsável apenas por 24% e a “rocha matriz” por outros 20%. Os três sub-tipos de topázio-granito porfirítico apresentam várias características em comum (Tabela 5).

Tabela 5: Aspectos petrográficos e texturais dos sub-tipos de topázio-granito

Aspectos Texturais e Petrográficos	Topázio-granito porfirítico		
	Membro terminal	Intermediário	“Rocha matriz”
Composição dos Fenocristais	K-fd, qz, plag, raros agregados K-fd + núcleo plag.	Qz, K-fd, plag, agregados de K-fd+núc.plag, agreg.plag	Agregados K-fd+núcl. plag, agreg.plag e fenoc. de qz
Textura dendrítica	Fenocristais de qz ligeiramente dendríticos	Fenocristais de qz e menos comum.fenoc. K-fd e plag	Fenocristais de qz
Clusters c/ propr. óticas e limites contínuos	Raramente observados	Clusters de qz separados por matriz fina	Clusters de qz separados por matriz fina
Textura granofírica	Pouco comum	Circund.fenoc e agreg K-fd	Franja circ.agreg.K-Fd+plag
Textura rapakivi/anti-rapak	-	Agreg.plag+halo K-fd pert.	Agreg.plag+halo K-fd pert.
Composição da matriz	K-fd pouco pertítico, qz, alb, micas verde e branca	Qz, K-fd, alb, biot	Qz, K-fd, alb, biot
Tipos de matriz	1) fina a média; 2) fina a muito fina (c/ text.granof)	1) fina a média; 2) fina a muito fina (crist. rápida)	1) fina a média; 2) fina a muito fina (crist. rápida)
Inclusões	Qz e plag em fenoc.K-fd	matriz em fenoc. de qz	matriz em fenoc.de qz
Alterações	Sericitiz. em plagioclásio	swapped rims de albíta, sericitiz. em plagioclásio	swapped rims de albíta, sericitiz. em plagioclásio
Preenchimento cavidades	biotita	-	-

5.4. Albíta-granito do Maciço Madeira

O albíta-granito do Maciço Madeira compreende dois fácies, de núcleo e de borda, os quais, de acordo com Costi et al. (1995), apresentam contatos gradacionais. A transição do fácies de núcleo para o de borda é caracterizada pela substituição de criolita por fluoretos hidratados (thomsenolita e pacnolita) e desses fluoretos hidratados por fluorita, além da substituição dos anfíbólios e micas por hematita, desestabilização do pirocloro e uma ampla hematitização dos feldspatos.

O albíta-granito de núcleo é branco acinzentado, composto principalmente por albíta, K-feldspato e quartzo. Petrograficamente, é inequigranular porfirítico, composto por uma matriz fina com fenocristais arredondados, principalmente de quartzo (até 3 mm de diâmetro) e, subordinadamente, anfíbólio azul escuro a creme e K-feldspato pertítico zonado. A matriz é constituída predominantemente por albíta e K-feldspato. Os minerais acessórios incluem lepidolita, anfíbólio (riebeckita/arfvedsonita), criolita, zircão, cassiterita, pirocloro, columbita, xenotima, torita, óxidos de ferro e argilo-minerais. Esses minerais acessórios, excluindo a criolita, são geralmente subhedrais a euhedrais e de granulação média.

Os fenocristais de quartzo são subhedrais e comumente apresentam ligeiros intercrescimentos dendríticos com a matriz, conferindo aspecto anedral a subedral aos grãos. Nas partes externas dos fenocristais de quartzo observa-se inclusões de pequenos cristais de albíta e/ou criolita dispostas circular a hexagonalmente, originando a textura “bola de neve” (snow ball). Essa textura indica crescimento contemporâneo, em que os fenocristais de quartzo aprisionaram os cristais de albíta e criolita durante a cristalização simultânea.

Petrograficamente, a textura geral do albíta-granito do fácies de borda é similar àquela do fácies de núcleo. Porém, algumas porções da matriz de granulação média parecem ter se formado a partir do preenchimento de espaços vazios, apresentando cristais euhedrais de albíta e K-feldspato que cresceram das paredes para o centro. Esses centros estão preenchidos por quartzo, fluorita, opacos aciculares (hematita), mica amarela esverdeada (sericita), clorita e zircão euhedral zonado de granulação média a grossa. Esse aspecto textural, evidenciando preenchimento de espaços, está relacionado à origem do fácies de borda, possivelmente gerado a partir de uma carapaça com cavidades miarolíticas primárias que sofreram preenchimento e alteração. Hematitização intensa e amplamente distribuída confere uma coloração avermelhada

às rochas do fácies de borda. O fácies de borda do albita-granito é cortado por veios compostos de mica verde e quartzo (greisen).

6. Minerais Acessórios

O mineral acessório mais comum, presente em todos os fácies dos Maciços Água Boa e Madeira, é o zircão, que geralmente está associado à torita-uranotorita, com a qual forma uma série completa de solução sólida. No albita-granito, o zircão contém preferencialmente Hf, ao invés de Th. Os outros minerais acessórios de ocorrência muito comum, sumarizados na Tabela 6, são: rutilo e ilmenita.

Tabela 6: Principais minerais acessórios nos fácies dos Maciços Água Boa e Madeira

Mineral	Fácies Rapakivi		B.Porf.	Fácies Biotita			Topázio	Albita
	MDRG	AgBG	Fino	MDRG	Norte	Sul	Top.Bi	MDRG
Zircão	•	●	●	●	●	●	●	●
Torita		•	•	•		•		•
Magnetita	●	●						•
Jacobsita							•	
Hematita								•
Ilmenita	●	●	•	●	●	●		
Rutilo	•		●	●	●	●	●	
Titanita	●							
Apatita	•	•						
Allanita		•						
Monazita				•	•	●		•
Ce-La-Min			•	•	•	•	•	●
Xenotima			●			•	•	
Columb.Ta					•		●	●
Cassiterita								•
Criolita								●

(● = muito comum; • = comum)

A presença de cristais de zircão com mais de uma geração de crescimento nos fácies biotita- e topázio-granito, excluindo-se o sub-fácies topázio-biotita-granito, evidenciam a existência de núcleos mais antigos que podem ter sido herdados do fácies precoce ou da rocha fonte. Os fácies rapakivi e o biotita-granito porfirítico fino não apresentam cristais de zircão com núcleos mais antigos, indicando a ausência de zircão não dissolvido nesses “melts”.

Allanita, titanita e apatita estão presentes nos fácies rapakivi, enquanto monazita, columbita-tantalita e xenotima são encontrados nos fácies subsequentes. Essas duas assembléias mineralógicas indicam diferenças químicas relacionadas ao baixo conteúdo de CaO (Watt e Harley, 1993) nos “melts” mais evoluídos dos Granitos de Pitinga e, consequentemente, ao caráter mais peraluminoso dos fácies biotita- e topázio-granito e caráter peralcalino no albita-granito.

A natureza especializada dos “melts” que formaram os fácies biotita-, topázio- e albita-granito também é evidenciada pela presença de columbita, rutilo a Nb-rutilo e cassiterita.

Monazita, columbita, bastnaesita, torita, cassiterita e xenotima, que constituem minerais acessórios comuns na maioria dos fácies dos Maciços Água Boa e Madeira, foram descritos apenas nas fases mais evoluídas, portadoras de topázio, nos granitos rapakivi da Finlândia (Haapala, 1977). A torita, mineral acessório comum em todos os fácies dos Maciços Água Boa e

Madeira, parece ser de origem primária (inclusões, cristais individuais e solução sólida com o zircão) e secundária (agregados coliformes).

A solubilidade dos minerais de TR leves (allanita e monazita) é extremamente diminuída com o enriquecimento em SiO₂ e saturação em alumina (Miller e Mittlefehld, 1982). Os fosfatos do tipo xenotima são mais solúveis do que os fosfatos do tipo monazita (Keppler, 1993), o que justifica o fracionamento dos elementos terras raras leves, que cristalizam mais cedo, e dos pesados que geralmente estão enriquecidos nas fácies mais evoluídas. Já a presença de F aumenta o intervalo de temperatura de estabilidade da bastnaesita (Wyllie et al., 1996), que é dependente da fugacidade de oxigênio, e, além disso, afeta a solubilidade do rutilo e da columbita-tantalita (Keppler, op.cit.).

Rutilo, um dos minerais acessórios mais comuns nos Maciços Água Boa e Madeira, com exceção do fácies albita-granito, não é um mineral primário típico de granitos, que, usualmente contém somente ilmenita e/ou titanomagnetita (Keppler, op.cit.). O rutilo é estável apenas em granitos altamente fracionados, que se aproximam da composição haplogranítica.

A presença de possível magnetita foi observada na maioria dos fácies dos Maciços Água Boa e Madeira, com exceção dos sub-fácies sul-biotita- e topázio-biotita-granito do Maciço Água Boa, sugerindo condições oxidantes de cristalização. Além disso, a presença de pirita nos fácies rapakivi e no albita-granito confirma as condições oxidantes de formação. No fácies biotita-granito porfirítico fino, além da possível presença de magnetita, a pirita também foi observada, consubstanciando sua classificação na série magnetita de Ishihara (1977).

A presença de cassiterita com características magmáticas, nos fácies biotita- e topázio-granito do Maciço Água Boa e no albita-granito do Maciço Madeira, indica condições de cristalização oxidantes, acima do “buffer” NNO (Pichavant et al., 1996).

Em função de sua quantidade e tipologia, os minerais acessórios do fácies albita-granito provavelmente representam o produto final de uma extensiva cristalização fracionada, em que F, alcalis e fugacidade de oxigênio atuaram como agentes controladores.

7. Estudos Geoquímicos

Os Maciços Água Boa e Madeira são metaluminosos a ligeiramente peraluminosos (Tabela 7).

Tabela 7: Índice de Saturação em Alumina (ASI) dos Maciços Água Boa e Madeira

Fácies	Granito (no. amostras)	Índice A/CNK		
		Média	Mínimo	Máximo
Rapakivi	Madeira (12)	0,928	0,905	1,002
Rapakivi	Água Boa (15)	0,971	0,947	1,031
Porfirítico Fino	Água Boa (5)	1,000	0,986	1,013
Biotita	Madeira (12)	0,965	0,941	1,008
Biotita (sul)	Água Boa (11)	0,968	0,935	0,992
Biotita (norte)	Água Boa (11)	0,976	0,942	1,067
Biotita (topázio)	Água Boa (9)	1,015	0,996	1,029
Matrix rock - Biot.	Água Boa (2)	1,003	1,001	1,005
Matrix rock - Rapa	Água Boa (2)	0,963	0,955	0,971
Topázio	Água Boa (13)	1,027	0,961	1,187
Microgranito	Água Boa (2)	1,149	1,136	1,162
Albita Núcleo	Madeira (5)	0,836	0,780	0,860
Albita Borda	Madeira (8)	1,151	0,955	2,140
Vulcânicas	Iricoumé (4)	0,945	0,917	1,001

Os fácies rapakivi são essencialmente metaluminosos, com A/CNK (razão molar $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) variando de 0,905 a 1,031 e média de 0,952. Os fácies biotita-granito são predominantemente metaluminosos a ligeiramente peraluminosos, com A/CNK variando de 0,935 a 1,067 e média de 0,975; enquanto isso o índice de saturação em alumina do fácies biotita-granito porfirítico fino, na borda do Maciço Água Boa, apresenta um estreito intervalo, próximo ao limite entre granitos metaluminosos e peraluminosos. Os fácies sul-biotita e norte-biotita do Maciço Água Boa são metaluminosos, enquanto o fácies topázio-biotita é predominantemente peraluminoso. O topázio-granito também apresenta uma variação próxima ao limite entre metaluminoso e peraluminoso, com uma ligeira predominância no campo peraluminoso.

Todos os fácies dos Maciços Água Boa e Madeira comumente exibem um aumento no índice A/CNK, de metaluminoso para peraluminoso, com o incremento da SiO_2 .

O caráter geral sub-saturado dos fácies biotita-granito dos Maciços Água Boa e Madeira (A/CNK = 0,975), porém, não é consistente com suas mineralogias, as quais não apresentam anfibólio e o mineral máfico comum é a biotita. O caráter metaluminoso é, provavelmente, resultante da presença de cálcio na fluorita. A mesma distorção do índice de saturação em alumina pode ser esperada no topázio-granito, também em função da presença de cálcio na fluorita. Assumindo que 80% do flúor está acomodado em fluorita e usando sua estequiometria, parte do conteúdo de cálcio deve ser deduzido, permitindo que seja determinado um índice de saturação em alumina mais realístico. Os valores médios do índice de saturação em alumina recalculado para os fácies biotita- e topázio-granito mostram que esses fácies são predominantemente peraluminosos (Tabela 8).

Tabela 8: Média do Índice de Saturação em Alumina Recalculado

Fácies	Granito	ASI (Média Recalculada)
Biotita	Madeira	1,031
Biotita (sul)	Água Boa	1,054
Biotita (norte)	Água Boa	1,064
Biotita (topázio)	Água Boa	1,118
Topázio	Água Boa	1,108

Para estabelecer as condições de fugacidade de oxigênio, 25 análises de amostras selecionadas, principalmente dos fácies biotita-granito, foram realizadas para determinar os conteúdos de FeO e Fe_2O_3 (Tabela 9). O estado de oxidação dos magmas comumente é baseado nas medidas de: 1) susceptibilidade magnética; 2) presença de minerais acessórios, tais como magnetita (para condições oxidantes de fugacidade de oxigênio), e somente ilmenita (para condições redutoras); e 3) utilizando-se as razões $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$.

As razões $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$ versus SiO_2 são utilizadas em diagrama de variação para definir a posição dos fácies em relação as séries magnetita (oxidantes) ou ilmenita (redutores). As amostras com Fe_2O_3 igual a zero têm caráter redutor.

Todos os fácies dos Maciços Água Boa e Madeira, excluindo o fácies albita-granito de núcleo, posicionam-se no campo da série ilmenita. Somente uma amostra do fácies rapakivi localiza-se no campo da série magnetita.

Cabe salientar que várias amostras dos fácies rapakivi e biotita dos Maciços Água Boa e Madeira se posicionam nas proximidades do limite entre as duas séries, sendo esse caráter mais marcante para as amostras dos fácies rapakivi.

Tabela 9: Resultados das análises químicas de FeO e Fe₂O₃

Amostra	Fácies - Granito	Fe ₂ O ₃ Total	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /FeO
MDRG - 4	Rapakivi - Madeira	4,22	2,71	1,21	0,446
AgBG - 7	Rapakivi - Água Boa	2,62	2,07	0,32	0,154
AgBG - 36	Porfir.Fino-Água Boa	1,61	1,12	0,37	0,330
AgBG - 52	Porfir.Fino-Água Boa	1,51	1,36	0	
AgBG - 52A	Porfir.Fino-Água Boa	1,82	1,51	0,14	0,093
MDRG - 5	Biotita - Madeira	1,18	1,06	0	
MDRG - 8	Biotita - Madeira	1,48	1,33	0	
MDRG - 10	Biotita - Madeira	1,06	0,95	0	
MDRG - 13	Biotita - Madeira	0,79	0,71	0	
MDRG - 17	Biotita - Madeira	1,85	1,23	0,48	0,390
MDRG - 21	Biotita - Madeira	1,23	1,07	0,04	0,037
MDRG - 25	Biotita - Madeira	1,60	1,43	0,01	0,007
AgBG - 1	Biotita Sul - Água Boa	1,44	1,30	0	
AgBG - 8	Biotita Sul - Água Boa	1,86	1,20	0,53	0,442
AgBG - 10	Biotita Sul - Água Boa	1,73	1,35	0,23	0,170
AgBG - 38	BiotitaNorte - Água Boa	0,98	0,88	0	
AgBG - 44	BiotitaNorte - Água Boa	1,36	1,03	0,22	0,214
AgBG - 49	BiotitaNorte - Água Boa	1,49	1,31	0,03	0,023
AgBG - 65	BiotitaTopáz.-Água Boa	1,46	1,09	0,25	0,229
AgBG - 16	Topázio - Água Boa	1,14	0,99	0,04	0,040
AgBG - 27	Topázio - Água Boa	0,79	0,71	0	
AgBG - 45	Topázio - Água Boa	0,92	0,83	0	
AgBG - 69	Microgranito-Água Boa	1,16	1,04	0	
MDRG - 11A	Albita Núcleo - Madeira	2,28	0,56	1,62	2,893
MDRG - 12	Albita Borda - Madeira	2,40	2,16	0	

8. Discussão dos dados mineralógicos, petrográficos e geoquímicos

8.1. Aspectos Texturais e Evolutivos

A textura rapakivi dos Granitos de Pitinga parece ser resultante de descompressão, de acordo com o modelo proposto por Nekvasil (1991), já que nenhuma evidência para “magma mixing” foi observada. Mudanças nas condições de pressão podem estar relacionadas ao processo de posicionamento dos magmas, como exemplificado por Eklund (1996).

Nos Maciços Água Boa e Madeira, admite-se que a formação de texturas granofíricas pode estar associada a mudanças no grau de “undercooling” (maior “undercooling”) e à formação da matriz, resultantes de provável descompressão durante o posicionamento.

Dois tipos diferentes de matriz, de granulação média e fina, e a presença de fenocristais na margem porfirítica fina do biotita-granito e no topázio-granito porfirítico, indicam três estágios de cristalização, considerados associados a fenômenos de descompressão. A perda de pressão pode ser relacionada ao posicionamento dos corpos em fraturas preexistentes.

Nos fácies biotita-granito porfirítico fino e no topázio-granito do Maciço Água Boa, fenocristais de quartzo com aspectos de absorção e subsequente crescimento (intercrescimento dendrítico) também podem estar associados a perda de pressão. Essa perda de pressão causa desequilíbrio composicional no “melt”, após o que, para alcançar o re-equilíbrio em condições de pressão baixa, o sistema consome principalmente sílica até alcançar novamente a “composição mínima” (“minimum melt composition”). Tão logo o mínimo é alcançado, o crescimento de

quartzo continua, mas em baixas pressões e elevados graus de “undercooling”, como indicado pela textura dendrítica.

Posicionamento com descompressão é considerado a maior causa de absorção de quartzo, resultante do re-equilíbrio do sistema em baixas pressões. Novamente, no fácies biotita-granito porfirítico fino é mais provável que a perda de pressão tenha ocorrido devido ao posicionamento do corpo, já que esse fácies é uma margem de resfriamento. No caso do topázio-granito, que representa uma fase tardia com provável conteúdo maior de água e voláteis, o “melt” pode ter-se tornado super-saturado após o posicionamento. O subsequente crescimento dendrítico e a formação da matriz de granulação muito fina, em condições de elevado grau de “undercooling”, podem refletir o posicionamento e a separação de fase fluida tardia.

A quantidade de fenocristais de quartzo em relação àquela de quartzo na matriz do fácies topázio-granito porfirítico, também sugere dois estágios de cristalização, em condições de pressão alta e baixa, respectivamente, fortalecendo a hipótese de descompressão durante o posicionamento.

A sequência cronológica de posicionamento é estabelecida pela presença de uma “rocha matriz” do topázio-granito, que engloba e invade os fácies rapakivi e biotita-granito, definindo o topázio-granito como fácies mais evoluído do Maciço Água Boa, associado à formação dos greisen.

Os estágios de cristalização sugeridos para os fácies biotita-granito porfirítico e topázio-granito também podem representar o principal processo para todos os outros fácies dos Maciços Água Boa e Madeira, já que os fácies granito rapakivi também possuem fábrica porfirítica e textura granofírica, produzidas provavelmente por aumento no gradiente de “undercooling”, durante o posicionamento.

Os aspectos texturais do fácies albita-granito de núcleo, como fábrica porfirítica, fenocristais (Na-anfibólio e quartzo) mostrando ligeiro intercrescimento dendrítico com matriz de granulação fina e textura “snow ball”, também são similares aos outros fácies, reforçando a idéia de mecanismo de posicionamento similar.

Já os aspectos texturais do fácies albita-granito de borda, sugerem que sua origem esteja vinculada a uma carapaça do albita-granito de núcleo com cavidades miarolíticas primárias, que, subsequentemente, foram preenchidas por quartzo e depois submetidas a preenchimento e/ou alteração tardios, por sericita, hematita e fluorita.

Neste contexto, os aspectos texturais observados nas rochas maciças de criolita, sugerem uma origem magmática, possivelmente relacionada à separação de um líquido imiscível durante a cristalização do albita-granito de núcleo.

8.2. Estado de Oxidação dos Maciços Água Boa e Madeira

Nos Maciços Água Boa e Madeira, as medidas de susceptibilidade magnética indicaram condições oxidantes para os fácies rapakivi e condições redutoras para os fácies biotita. As mudanças nas condições de fugacidade de oxigênio, do fácies rapakivi para o fácies biotita, poderiam ser relacionadas a diferenças nas rochas fontes, impondo diferentes e intrínsecos estados de redox ou a processos magmáticos pós-segregação.

Os estudos petrográficos confirmaram o caráter oxidante do fácies rapakivi, através da presença de magnetita. Adicionalmente, a presença da assembléia mineralógica magnetita, titanita, quartzo e anfibólio indica altas condições de fugacidade de oxigênio (Noyes, 1983; Carmichael, 1991).

Análises químicas qualitativas e aspectos texturais, em estudos por microsonda eletrônica, mostram magnetita e ilmenita com intercrescimento “trellis” nos fácies rapakivi dos Maciços Água Boa e Madeira. Esses estudos também sugerem a presença de magnetita subhedral intercrescida com ilmenita nos fácies norte-biotita-granito, biotita-granito

porfirítico fino e topázio-granito do Maciço Água Boa e no fácies biotita-granito do Maciço Madeira.

Utilizando-se os resultados químicos, no diagrama de variação $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ versus SiO_2 , todos os fácies dos Maciços Água Boa e Madeira, excluindo o albíta-granito, são classificados na série ilmenita (condições redutoras), e várias amostras posicionam-se próximas ao limite entre as séries magnetita e ilmenita. Se este limite for considerado como uma faixa, ao invés de uma linha estreita, ambos os fácies rapakivi e biotita-granito devem ter experimentado condições oxidantes (série magnetita), que se tornaram mais redutoras com o aumento de SiO_2 .

De acordo com Ishihara (1981), a série magnetita tem razão $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ total maior que 0,5, enquanto a série ilmenita tem razão $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ menor que 0,5. Nos Maciços Água Boa e Madeira, algumas amostras dos fácies rapakivi e biotita-granito apresentam razões $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ em torno de 0,4 a 0,45. A razão $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ no albíta-granito é de 2,9.

Os resultados das diferentes técnicas não são compatíveis, mas sugerem que os fácies rapakivi dos Maciços Água Boa e Madeira foram formados sob condições oxidantes (série magnetita). Os fácies biotita parecem ter experimentado condições oxidantes que se tornaram mais redutoras durante a cristalização. Se alguns dos fácies biotita foram formados a partir de um “melt” residual dos fácies rapakivi, que têm características oxidantes, o caráter redutor do fácies biotita, inicial ou final em sua cristalização, poderia ser relacionado a processos magmáticos pós-segregação.

Além disso, se todos os fácies biotita se formaram a partir de um “melt” residual dos fácies rapakivi, seria de se esperar que o Sn mostrasse uma tendência decrescente, já que os fácies rapakivi são relacionados à série magnetita e, portanto, durante a cristalização fracionada o Sn seria empobrecido na fase residual. No entanto, os conteúdos de Sn no fácies biotita do Maciço Madeira e no fácies norte-biotita do Maciço Água Boa são ligeiramente maiores, comparados com aqueles dos fácies rapakivi. Nos fácies topázio-biotita e topázio-granito do Maciço Água Boa, o Sn apresenta-se ainda mais enriquecido.

O aumento do Sn nos fácies biotita sugere que esses fácies também podem ser pertencentes à série magnetita ou que os fácies biotita não se formaram por cristalização fracionada dos fácies rapakivi. Uma condição oxidante inicial para o fácies biotita é sugerida, por causa da possível presença de magnetita, descrita através de análises por microsonda, nos fácies norte-biotita-, topázio-biotita- e topázio-granito do Maciço Água Boa e no fácies biotita do Maciço Madeira.

No fácies sul-biotita-granito do Maciço Água Boa, o conteúdo de Sn diminui em relação ao fácies rapakivi, sugerindo que esse sub-fácies teve um caráter mais redutor.

8.3. Temperatura de Formação dos Maciços Água Boa e Madeira

De acordo com Watson e Harrison (1984), a solubilidade do Zr é função da razão catiônica ($[\text{Na}+\text{K}+2\text{Ca}]/[\text{Al}*\text{Si}]$) e da temperatura em “melts” hidratados per- ou metaluminosos. Utilizando-se essas informações para comparar com os Granitos de Pitinga, os “melts” formadores dos fácies rapakivi dos Maciços Água Boa e Madeira, que apresentam conteúdo médio de Zr de 455 e 463 ppm e razões médias catiônicas de 0,96 e 1,08, respectivamente, teriam apresentado temperaturas em torno de 930°C. As diminuições em Zr e Hf nos Maciços Água Boa e Madeira poderiam ser relacionadas ao decréscimo da solubilidade, resultante da queda da temperatura e/ou da razão catiônica, a partir dos fácies iniciais para os fácies finais, excluindo-se o albíta-granito peralcalino.

A concentração de Zr como função da composição catiônica dos “melts” fornece a temperatura magmática estimada de 930 – 860°C para os fácies rapakivi dos Maciços Água Boa e Madeira. O fácies biotita Madeira posiciona-se entre 860 – 800°C, enquanto que os

fácies biotita do Maciço Água Boa variam de 930 – 800°C. As temperaturas estimadas da saturação em zircão, nos fácies topázio-granito e microgranito, estão em torno de 800 – 750°C. A temperatura de cristalização das rochas vulcânicas cobre um amplo intervalo, de 930 a abaixo de 750°C.

Nos fácies biotita do Maciço Água Boa, o amplo intervalo das temperaturas magmáticas estimadas é referente ao conjunto dos três sub-fácies. Separadamente, o norte-biotita posiciona-se predominantemente no intervalo entre 930 – 860°C, enquanto que os sub-fácies sul-biotita e topázio-biotita-granito posicionam-se entre 860 – 800°C, estando o topázio-biotita-granito em temperaturas mais baixas que o sul-biotita-granito.

8.4. Relações Evolutivas dos Maciços Água Boa e Madeira

As relações mais importantes entre os fácies dos Maciços Água Boa e Madeira são obtidas utilizando-se diagramas que combinam elementos maiores e traço. Elementos imóveis, tais como Zr e Ti, mostram tendências evolutivas diferentes e sugerem que os magmas formadores dos vários fácies dos Maciços Água Boa e Madeira derivaram de protolitos distintos.

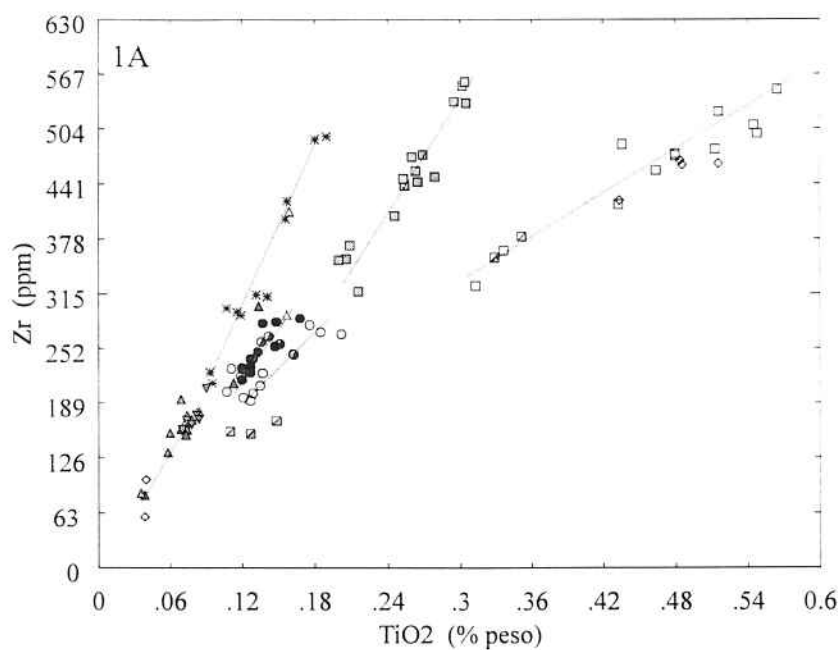
O diagrama Zr versus TiO₂ (Figura 1A), no qual o albita-granito é excluído por causa dos elevados conteúdos de Zr, mostra que a maioria dos fácies dos Maciços Água Boa e Madeira apresenta derivações iniciais diferentes.

As “linhas de correlação” dos dois fácies rapakivi têm “pontos iniciais” distintos, além de diferentes declividades, sugerindo que esses fácies não são diretamente relacionados por fracionamento de um único magma parental. Adicionalmente, os fácies biotita do Maciço Água Boa apresentam três “linhas de correlação” diferentes, relativas aos três sub-fácies (norte-, sul- e topázio-biotita-granito). Já o topázio-granito e o microgranito parecem ser os fácies mais evoluídos, relacionados ao fracionamento do biotita-granito.

No diagrama Zr versus TiO₂, o fácies biotita do Maciço Madeira é separado do fácies rapakivi e apresenta uma declividade ligeiramente diferente. Cabe salientar que as rochas vulcânicas Iricoumé posicionam-se na mesma linha de correlação do fácies rapakivi Madeira.

De acordo com Rollinson (1993), as razões de um par de elementos altamente incompatíveis, cujos coeficientes de partição total são muito similares, não variam durante o curso da cristalização fracionada e apenas irão variar um pouco durante a fusão parcial do “batch”. Assim, a declividade de uma linha de correlação, em um diagrama bivalente de dois elementos altamente incompatíveis, fornece as razões de concentração desses elementos na fonte. Adicionalmente, os pares de elementos Y-Tb, La-Ta, La-Nb, Ta-Th, Ti-Zr e Ti-Y frequentemente são considerados como tendo coeficientes de partição total muito similares, sendo usados de um modo similar ao descrito. No entanto, esse método é difícil de ser aplicado para rochas graníticas, por causa do grande número das possíveis fases menores, que incorporam muitos dos elementos traços tradicionalmente considerados como incompatíveis.

Utilizando os pares Ti-Zr e Ti-Y (Figura 1B), os fácies dos Maciços Água Boa e Madeira mostram, pelo menos, quatro grupos distintos, que sugerem diferentes fontes para esses fácies. O primeiro grupo corresponde ao fácies rapakivi Madeira, juntamente com as rochas vulcânicas Iricoumé. Um segundo grupo pode ser dividido em duas sub-séries: 1) o fácies rapakivi Água Boa, com uma declividade verticalizada; e 2) os fácies sul-biotita do Maciço Água Boa e biotita-granito Madeira, que tem uma declividade sub-horizontal e poderiam estar ligados ao fácies rapakivi da primeira sub-série. O terceiro grupo compreende os fácies norte-biotita, topázio-biotita e topázio-granito, todos do Maciço Água Boa e que apresentam uma declividade sub-horizontal. O microgranito está relacionado tanto ao segundo (segunda sub-série) como ao terceiro grupo. O quarto grupo compreende o fácies albita-granito, de núcleo e de borda.



Legenda

- ◇ Vulcânicas
- Rapakivi - Madeira
- ⊠ Assoc. rapakivi - Madeira
- Rapakivi - Água Boa
- Biotita-porfíritico - Água Boa
- Biotita - Madeira
- * Norte-biotita - Água Boa
- Sul-biotita - Água Boa
- ▼ Topázio-biotita - Água Boa
- △ Rocha Matriz - Água Boa
- ▲ Topázio - Água Boa
- ◇ Microgranito - Água Boa
- + Albita núcleo - Madeira
- × Albita borda - Madeira

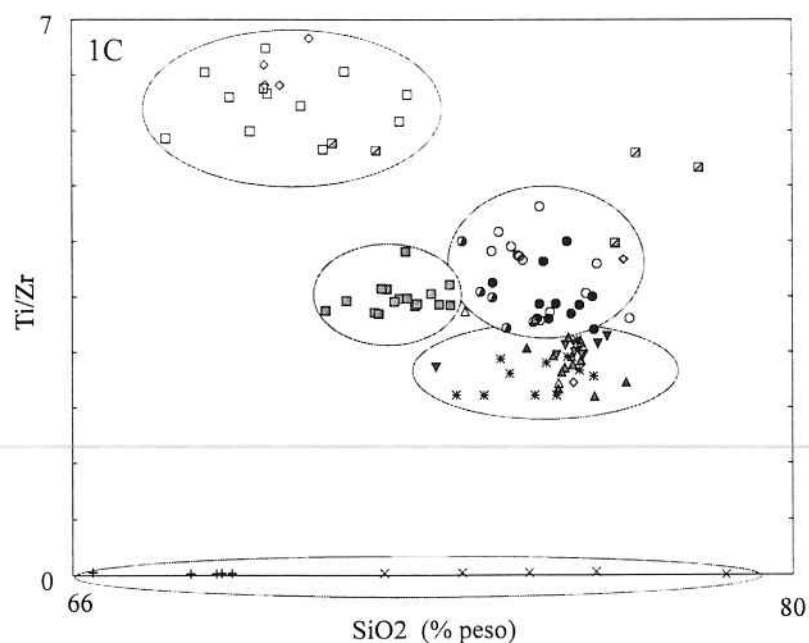
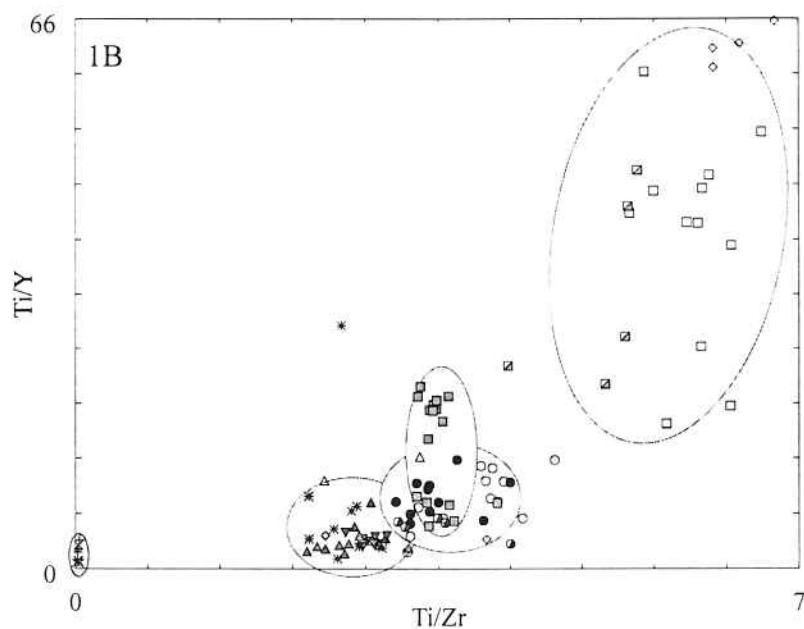


Figura 1: Diagramas de variação indicando a sequência evolutiva dos fácies dos Maciços Água Boa e Madeira

Obs: Albita-granito excluído da Figura 1A
Figuras 1B e 1C indicativas de razões nas fontes, de acordo com Rollinson (1993)

O diagrama da razão Ti/Zr versus SiO₂ (Figura 1C), além de discriminar os mesmos grupos observados na Figura 1B, mostra que o fácies rapakivi Água Boa constitui um grupo específico e os fácies sul-biotita do Maciço Água Boa e biotita-granito Madeira formam um outro grupo.

9. Considerações Finais

Os Maciços Água Boa e Madeira são intrusivos nas rochas vulcânicas Iricoumé, sendo separados por um estreito corredor dessas rochas vulcânicas. A separação dos Granitos também está potencialmente associada a falhamentos extensionais regionais de direção NW-SE. As relações temporais e evolutivas dos fácies dos Maciços Água Boa e Madeira estão relacionadas a sucessivas injeções de magma.

As principais considerações quanto ao modo de ascensão e posicionamento do maciços Água Boa e Madeira podem ser assim resumidas:

- O Maciço Água Boa é composto por três fácies principais, em ordem de posicionamento: 1) fácies rapakivi, como uma fase precoce; 2) biotita-granito, de distribuição ampla e com uma fase marginal de granito porfirítico; e 3) topázio-granito porfirítico, como a fase mais evoluída, ocorrendo na parte central do batólito. Diques e/ou sills de microgranito estão associados aos fácies biotita- e topázio-granito.
- O Maciço Madeira também é composto por três fácies principais, em ordem de posicionamento: 1) fácies rapakivi, como a fase precoce; 2) biotita-granito, de distribuição ampla e com uma fase de microgranito associada; e 3) albita-granito de núcleo com uma auréola de contato (fácies de borda).
- Os “trends” de especialização entre as injeções sucessivas, da fase precoce para a fase mais evoluída, dos Maciços Água Boa e Madeira podem ser relacionados a vários processos, como fracionamento magmático.
- Os Maciços Água Boa e Madeira podem estar associados a fraturas preexistentes porque: 1) os corpos são alongados e paralelos a uma das direções preferenciais dos falhamentos (NE-SW), notadamente, a última fase do Maciço Água Boa (topázio-granito), que apresenta uma conspícua forma de dique; 2) seções geológicas transversais indicam contatos verticais a sub-verticais; 3) em escala regional, os Maciços Água Boa e Madeira estão relacionados a um sistema de falhamentos complexo.
- Durante o posicionamento dos Granitos de Pitinga, o sistema de falhamentos extensionais preexistente pode ter sido explorado pelo “melt” várias vezes e sofrido várias aberturas, com consequente perda de pressão. O mecanismo pode compreender: 1) um primeiro estágio de cristalização lenta em equilíbrio na câmara magmática; 2) subsequente ascendência do “melt + fenocristais” e perda de pressão devido ao posicionamento em níveis crustais mais elevados; e 3) um estágio final de cristalização muito rápida devido a perda de pressão e possível separação de uma fase fluida associada às últimas fases (topázio- e albita-granito).
- A hipótese de um posicionamento associado à exploração de fraturas rígidas com sucessivas injeções, é mantida pelos aspectos texturais presentes em todos os fácies, tais como: 1) fábrica porfirítica na maioria dos fácies, como uma evidência de, no mínimo, dois estágios distintos de cristalização (lento e rápido); 2) textura rapakivi devida a descompressão antes da saturação em fase fluida no fácies rapakivi; 3) textura granofírica devida a mudanças no

grau de “undercooling” e associada à formação da matriz, como função de perda de pressão durante o posicionamento; 4) absorção e subsequente crescimento de quartzo devido a re-equilíbrio do sistema, em função da descompressão antes da saturação em fase fluida, nos fácies biotita-granito porfirítico, topázio-granito e ligeiramente no albíta-granito; e 5) dois tipos de matriz nos fácies biotita-granito porfirítico e no topázio-granito, provavelmente relacionadas a sucessivas perdas de pressão.

- O caráter mais homogêneo e o fraco desenvolvimento de intercrescimento granofírico nos fácies biotita-granito podem provavelmente ser relacionados aos seus grandes volumes e condições mais estáveis de resfriamento.

Desta forma, o modelo proposto de posicionamento em níveis crustais rasos através de exploração de fraturas rígidas, com dois ou três estágios diferentes de cristalização devido a descompressão, considera várias injeções sucessivas, produzidas por fracionamento magmático na câmara magmática ou por segregação de “batches” de fontes ligeiramente diferentes, de um magma granítico tipo-A. Esse magma era quente (900-600°C) e seco, com saturação em fluidos ocorrendo apenas após o posicionamento. O “melt” foi transportado como um “crystal mush” (fração de cristais em torno de 30 a 50%), quase adiabaticamente, possivelmente da crosta inferior a média (em torno de 5-6 Kbar) até níveis crustais elevados (em torno de 0,5-1 Kbar). Durante os estágios de cristalização e posicionamento, a descompressão deslocou o sistema para o campo de estabilidade do plagioclásio, causando absorção principalmente do quartzo e subsequente re-equilíbrio em pressões baixas.

Os Maciços Água Boa e Madeira apresentam uma tendência evolutiva geral que, inicialmente, sugere uma sequência relacionada a diferenciação magmática, do fácies rapakivi para o fácies biotita e do Maciço Madeira para o Maciço Água Boa. No entanto, diagramas de variação de elementos imóveis (Zr x TiO₂) mostram que os dois corpos graníticos e diversos fácies apresentam pontos iniciais e linhas de correlação distintos. Esses diagramas indicam que a maioria dos fácies evoluiu a partir de magmas parentais diferentes e não são relacionados entre si por processos de fracionamento, apresentando apenas fracionamento interno.

Os fracionamentos internos dos fácies dos Maciços Água Boa e Madeira, excluindo o albíta-granito, mostram enriquecimento nos conteúdos de SiO₂, Rb, Nb, Ta, Th, U, Ni, Pb, Sn, W, Cs, Ga, Yb e Lu, acompanhados pela diminuição de TiO₂, Fe₂O₃, CaO, K₂O, P₂O₅, Ba, Sr, Zr, Hf, La, Ce, Sm, Eu e Tb. Os conteúdos de Al₂O₃, Na₂O, MgO, Y e Zn apresentam “trends” irregulares.

Os dois fácies rapakivi, o fácies norte-biotita do Maciço Água Boa e o fácies albíta-granito do Maciço Madeira se formaram a partir de protolitos distintos. Os fácies mais jovens (biotita e topázio) dos Maciços Água Boa e Madeira podem ser resultantes do fracionamento dos fácies anteriores (rapakivi e norte-biotita).

Em contraste à evolução dos granitos rapakivi descrita na literatura, no caso dos Granitos Rapakivi de Pitinga, os aspectos petrográficos e geoquímicos sugerem uma evolução associada a fusão parcial de diferentes protolitos (fácies rapakivi, biotita e albíta), com prováveis processos de fracionamento posteriores, somente para formar o topázio-granito e microgranito.

Os fácies rapakivi dos Maciços Água Boa e Madeira apresentam uma composição primária enriquecida em K-feldspato; são metaluminosos, subsolvus e formaram-se sob condições anidras e pressões variáveis durante a cristalização. Suas temperaturas magmáticas posicionam-se entre as curvas experimentais de 930 a 860°C. O enriquecimento do fácies rapakivi Madeira em TiO₂, Fe₂O₃, MgO, P₂O₅ e CaO pode ser relacionado a uma fonte com quantidades relativamente maiores de anfíbólio, óxidos de Fe e Ti e apatita que o protolito

que produziu o fácies rapakivi Água Boa. Por outro lado, é provável que a fonte do fácies rapakivi Água Boa tenha sido mais enriquecida em biotita, sub-saturada em P_2O_5 , saturada em Zr e relativamente enriquecida em elementos incompatíveis (Nb, Y, Zr, ETR leves, Zn e, em menor extensão, em Ta e ETR pesados). Já o protolito do fácies rapakivi Madeira parece ter sido sub-saturado em Zr e saturado em P_2O_5 .

Os fácies rapakivi dos Maciços Água Boa e Madeira apresentam modelos de distribuição dos ETR análogos, sugerindo similaridades entre os diferentes protolitos, porém com conteúdos absolutos distintos, que são maiores no fácies rapakivi Água Boa. Essas diferenças nos conteúdos absolutos são relacionadas à saturação na fonte, antes que a diferenças de solubilidades. Em ambos os fácies rapakivi, os conteúdos de Nb, Ta, Y e ETR parecem estar mais fortemente associados aos minerais acessórios como o zircão, rutilo, torita, allanita e fluorcarbonatos de TR, do que à titanita e à apatita.

As características geoquímicas do fácies rapakivi do Maciço Madeira e das rochas vulcânicas Iricoumé são muito semelhantes, sugerindo a consanguinidade entre o fácies plutônico e as vulcânicas ácidas.

Os fácies sul-biotita do Maciço Água Boa e biotita do Maciço Madeira são predominantemente metaluminosos a peraluminosos, apresentam caráter subsolvus e “trends” similares e paralelos, que podem estar associados, por processos de fracionamento, ao fácies rapakivi precoce do Maciço Água Boa. Porém, nos diagramas discriminantes, esses fácies biotita constituem um grupo exclusivo, sugerindo uma fonte específica comum. Considerando que os dois fácies biotita sejam formados a partir de uma fonte distinta, seria difícil estabelecer as características químicas dessa fonte, por comparação com os outros fácies precoces, em função das diferenças nas condições de temperatura. Os dois fácies biotita são enriquecidos em ETR pesados em relação ao fácies rapakivi do Maciço Água Boa, que seria o “trend” esperado nos processos de fracionamento.

O fácies norte-biotita-granito do Maciço Água Boa varia de metaluminoso a peraluminoso com o aumento do conteúdo de SiO_2 , é enriquecido em potássio, formado sob condições anidras e apresenta um caráter próximo a hipersolvus. A temperatura magmática situa-se entre 930 a 860°C. A fonte do fácies norte-biotita provavelmente continha, em adição ao anfíbólio e à biotita, uma quantidade relativamente maior de plagioclásio, que teria aumentado o conteúdo de sódio no “melt” e produzido Ca-plagioclásio e clinopiroxênio como produtos sólidos, em relação ao protolito que produziu o fácies rapakivi Água Boa. A cristalização de Ca-plagioclásio está também associada ao empobrecimento em Al_2O_3 , que é consistente com o caráter metaluminoso a peraluminoso do fácies norte-biotita. Além disso, o protolito do fácies norte-biotita teria sido pobre em óxidos de Fe e Ti, sub-saturado em P_2O_5 , saturado em Zr e ETR, enriquecido em F e em elementos incompatíveis (Rb, Nb, Ta, Zr, Hf, Sn, Ga, Y, ETR leves, U e, em menor extensão, em Th e Pb), em relação à fonte do fácies rapakivi Água Boa.

Aparentemente, o enriquecimento em elementos HFS no fácies norte-biotita associa-se tanto a uma fonte saturada, como a uma maior solubilidade do “melt”, por causa dos conteúdos maiores de F e ao caráter ligeiramente mais peraluminoso. A cristalização de minerais acessórios no fácies norte-biotita, tais como monazita, ao invés de apatita, allanita e titanita, é relacionada ao baixo conteúdo de CaO e consequência do caráter mais peraluminoso.

Os fácies topázio-biotita e topázio-granito apresentam “trends” decrescentes similares, e em continuidade ao do fácies norte-biotita, sugerindo que esses fácies portadores de topázio tenham se formado a partir de um “melt” residual do fácies norte-biotita. Nos diagramas discriminantes, os três fácies (norte-biotita, topázio-biotita e topázio-granito) formam um grupo específico, sugerindo uma fonte comum para esses fácies.

O fácies topázio-biotita é predominantemente peraluminoso, subsolvus e contém plagioclásio albitico. Sua temperatura magmática é ligeiramente superior a 800°C. O fácies topázio-biotita é enriquecido em Rb, Sn, Ta, MgO e ligeiramente em P_2O_5 e Nb, e empobrecido em TiO_2 , Al_2O_3 , Ga, Zr, Hf, Y, U, Th, ETR e ligeiramente em Na_2O , Ba e Sr, em relação ao fácies norte-biotita, o que parece ser o resultado da cristalização fracionada. Em relação ao norte-biotita, o fácies topázio-biotita apresenta conteúdos absolutos menores de ETR leves e conteúdos absolutos similares de ETR pesados. Esses conteúdos menores podem estar relacionados à saturação inicial de monazita no fácies norte-biotita, que quando removida do “melt”, diminui a concentração total de ETR leves.

O topázio-granito também é predominantemente peraluminoso, subsolvus, classifica-se no tipo baixo P_2O_5 e tem, como o fácies topázio-biotita, plagioclásio sódico. A temperatura de cristalização do “melt” varia de 800 a 750°C. A baixa temperatura comparada com a dos fácies anteriores, o enriquecimento em Al, a presença de topázio e a posição no diagrama Q-Ab-Or em direção à mínima composição do “melt” em pressões de 1 kbar, sugerem que a cristalização do topázio-granito seja relacionada a processos de fracionamento em um sistema enriquecido em H_2O e/ou fluidos. Nos diagramas discriminantes, o topázio-granito se mistura com o fácies topázio-biotita, sugerindo que o topázio-granito seja formado pelo fracionamento do fácies anterior.

O topázio-granito mostra um decréscimo em F, que é acompanhado por um decréscimo em K_2O e aumento em Na_2O , em relação ao fácies topázio-biotita associado. A diminuição em F define dois grupos diferentes de topázio-granito: um grupo com maior decréscimo em K_2O , decréscimo em Rb, aumento maior em Na_2O e ligeiro aumento em Zr, em relação ao segundo grupo, que mostra aumento em Rb e decréscimo irregular em F.

O topázio-granito empobrecido em K_2O e Rb está espacialmente associado ao microgranito, que é enriquecido nesses elementos; já o topázio-granito enriquecido em Rb está associado ao microgranito, que é empobrecido em Rb. As duas amostras de microgranito também mostram distribuições distintas em relação aos alcalis, Rb, Sn, Nb e Ta, que, por sua vez, são relacionados aos greisen com “trends” inversos.

Esses vários “trends” inversos parecem ser relacionados ao tipo e quantidade de “melt” residual e ao tipo, quantidade e “timing” da separação da fase fluida que formou os microgranitos e os greisen, respectivamente.

Já o albita-granito do Maciço Madeira, que é de origem magmática, peralcalino, altamente enriquecido em Na_2O , F, Rb, Zr, Sn, Nb, Ta, Zn, U, Th, Hf, Pb e ETR pesados e cristalizou sob condições oxidantes (série magnetita), não é quimicamente relacionado aos outros fácies dos Maciços Água Boa e Madeira por processos de fracionamento. Nos diagramas discriminantes, os fácies albita-granito de núcleo e de borda constituem um grupo específico, que sugere sua origem a partir de uma fonte completamente distinta. O fácies albita-granito de borda tem suas características químicas conturbadas por processos de preenchimento e alteração superimpostos.

Geralmente, os processos de fracionamento de magmas peralcalinos têm sido invocados para substanciar o aumento em F, alcalis e elementos-traço litófilos (Zr, Nb, Y, Th, ETR) e as elevadas razões de ETR pesados/ETR leves presentes em granitos tipo-A. Esses processos são os agentes mais importantes na geração de magmas félsicos, que podem ser produzidos a partir da fusão parcial de rochas basálticas ou gabróicas, em pressões típicas da crosta inferior a média.

A única hipótese possível para a origem do albita-granito do Maciço Madeira, através de processos de diferenciação, seria estar relacionado ao Granito Europa peralcalino, que se localiza aproximadamente 15 Km a noroeste do albita-granito.

Se o albita-granito do Maciço Madeira originou-se a partir de um “melt” residual do Granito Europa, então, seria muito provável que o Granito Europa e, portanto, o albita-granito

tenham se originado por fusão parcial de uma fonte, sob condições similares àquelas que formaram os Maciços Água Boa e Madeira. Nessas condições, seria esperado que a fonte do Granito Europa fosse originalmente enriquecida em plagioclásio e anfibólio e com menores quantidades de micas, ou seja, uma composição similar a de um tonalito.

O grande enriquecimento em Zr no albíta-granito sugere que seu “melt” tenha sido originalmente muito enriquecido em alcalis, para manter a solubilidade em torno de 6.000 ppm de Zr. A complexação de Zr^{4+} dissolvido com alcalis livres não associados ao Al é o processo responsável pelas altas solubilidades do Zr em “melts” peralcalinos (Watson e Harrison, 1983).

No albíta-granito peralcalino do Maciço Madeira, os conteúdos extremamente altos de F (até 9,2 % em peso), sugerem que o “melt” teria persistido até temperaturas abaixo de 600°C, o que é consistente com a presença de albíta pura e K-feldspato.

Segundo Anfilogov et al. (1973), em uma carga granítica com cerca de 4,4 a 6,0 % em peso de NaF, o “melt” separa-se em dois “melts” imiscíveis de silicatos e fluoretos e em condições naturais, esses dois líquidos podem se separar na câmara magmática por causa das diferenças em suas densidades. Os “melts” de fluoretos seriam responsáveis pela extração de uma quantidade significativa dos elementos componentes de minérios, que podem formar complexos com o F.

A origem dos dois corpos maciços de criolita, situados aproximadamente 150 m abaixo do teto do albíta-granito, pode estar relacionada à formação de “melts” imiscíveis de fluoretos durante a cristalização do fácies de núcleo, em função dos conteúdos extremamente elevados de F e Na presentes em todo o albíta-granito peralcalino.

Considerando que o albíta-granito, mineralizado em Sn e produzido sob condições oxidantes, formou-se a partir de um “melt” residual, o estado de redox das fases anteriores teria sido redutor para concentrar Sn no albíta-granito, ou essas fases seriam sub-saturadas em Sn e, por conseguinte, já com um caráter peralcalino.

Finalmente, se o albíta-granito não for relacionado ao Granito Europa, a única outra possibilidade para sua origem seria sua formação a partir de uma fonte muito específica, tal como a fusão parcial de um sieno-granito metaluminoso especializado.

Referências

- ANFILOGOV, V.N.; GLYUK, D.S.; TRUFANOVA, L.G. (1973). Phase relations in interaction between granite and sodium fluoride at water vapor pressure of 1000 kg/cm². *Geochemistry International* 1973, v. 10, p.30-33.
- BARKER, F. (1991). Comment on “A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model”. *Geology*, v. 19, p. 1151-1152.
- BLEVIN, P.L.; CHAPPELL, B.W. (1992). The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, v.83, p. 305-316.
- BORGES, R.M.K.; DALL’AGNOL, R.; COSTI, H.T. (1996). Petrografia dos Greisens associados ao Granito Água Boa - Mina do Pitinga (AM). XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia. Anais...Magmatismo Granítico e Mineralizações Associadas. Salvador, BA, p.436-438.
- CARMICHAEL, I.S.E. (1991). The redox state of basic and silicic magmas: a reflection of their source regions?. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 106, 129-41.
- CARVALHO FILHO, N.B.; HORBE, M.A.; HORBE, A.C.; SOUZA, P.C.B. (1984). A natureza dos depósitos de cassiterita do setor Madeira, região do Pitinga, Amazonas, Brasil. II Simposium Amazônico, Anais... Manaus, SBG/NM, p. 459-461.

- CLARKE, D.B. (1992). Granitoid rocks. Topics in the Earth Sciences n^o.7. London, Chapman & Hall, 283 p.
- COLLINS, W.J.; BEAMS, S.D.; WHITE, A J.R.; CHAPPELL, B.W. (1982). Nature and origin of a A-type granites with particular reference to southeastern Australia. Contributions to Mineralogy and Petrology, v.80, p.189-200.
- COSTI, H.T. (1996)*. Grupo Paranapanema, Mina de Pitinga, Relatório Interno. Inédito.
- COSTI, H.T. e POPINI, M.V.F. (1994)*. Grupo Paranapanema, Mina de Pitinga, Relatório Interno. Inédito.
- COSTI, H.T.; DALL'AGNOL, R.; TEIXEIRA, J.T.; POPINI, M.V.F. (1995). The Albite Granite of Pitinga Mine: petrography, geochemistry and Mineralizations. Symposium on Rapakivi Granites and related rocks, Abstracts volume, August 2-5, Belém, Brazil, p.20-21.
- COSTI, H.T.; DALL'AGNOL, R.; MINUZZI, O.R.R.; TEIXEIRA, J.T. (1996 a). Episienitos sódicos mineralizados em estanho associados ao Granito Água Boa, Mina de Pitinga, Amazonas. XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia. Anais...Magmatismo Granítico e Mineralizações Associadas. Salvador, BA, p.372-374.
- COSTI, H.T.; DALL'AGNOL, R.; MINUZZI, O.R.R.; TEIXEIRA, J.T. (1996 b). Tin-bearing sodic metasomatic episyenites associated with the Agua Boa Granite, Pitinga, Amazonian Craton, Brazil. The seventh International Symposium on Rapakivi Granites and related rocks, Abstract volume, July 24-26, Helsinki, Finland, p.16.
- CREASER, R.A.; PRICE, R.C.; WORMALD, R.J. (1991). A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model. Geology, v.19, p.163-166.
- DAOUD, W.E.K. (1984)*. Grupo Paranapanema, Mina de Pitinga, Relatório Interno. Inédito.
- DAOUD, W.E.K. (1988). Granitos estaníferos de Pitinga, Amazonas: Contexto geológico e depósitos minerais associados. Universidade de Brasília, Departamento de Geociências, Tese de Mestrado (n.48), Brasília, 194 p..
- DAOUD, W.E.K. e ANTONIETTO JUNIOR, A. (1985). Geologia do granito estanífero Água Boa, Pitinga, AM. II Simpósio de Geologia da Amazônia, Anais... Belém, SBG/NN, v.3, p.17-33.
- EKLUND, O.; SHEBANOV, A.; ANDERSSON, U.B. (1996). Origin of the rapakivi texture by subisothermal decompression. The seventh international Symposium on Rapakivi Granites and related rocks, Abstract volume, Helsinki, p.19.
- HAAPALA, I. (1977). The controls of tin and related mineralizations in the rapakivi-granite areas of south-eastern Fennoscandia. Geologiska Föreningens I Stockholm Förhandlingar, v. 99, p. 130-142.
- HAAPALA, I. (1978). Petrographic and geochemical characteristics of Rapakivi granite varieties associated with greisen-type Sn, Be and W mineralizations in the Eurajoki and Kymi areas, Southern Finland. In: STEMPROK, M.; BURNOL, L.; TISCHENDORF, G. Eds. Metallization associated with acid magmatism, v. 3, Prague, Geol. Surv., p. 217-225.
- HAAPALA, I. (1988). Metallogeny of the Proterozoic Rapakivi Granites of Finland. The Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Special volume 39, Proceedings of the CIM Conference on Granite-related mineral deposits, Ed. R.P. Taylor & D.F. Strong, Sept., 1985, p.124-132.
- HAAPALA, I.; RAMO, O.T. (1992). Tectonic setting and origin of the Proterozoic Rapakivi Granites of southeastern Fennoscandia. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 83, p.165-171.
- HAAPALA, I.; EMSLIE, R.F.; RAMO, O.T. (1996). Achievements of IGCP project 315 in 1991-1996. The seventh international Symposium on Rapakivi Granites and related rocks, Abstract volume, Helsinki, p.29-30.

- HORBE, M.A.; HORBE, A.C.; TEIXEIRA, J.T.; COSTI, H.T. (1985). Granito Madeira: petrologia, petroquímica e mineralizações. II Simpósio de Geologia da Amazônia, Anais... Belém, SBG/NN, v.3, p.284-320.
- HORBE, M.A.; HORBE, A.C.; COSTI, H.T.; TEIXEIRA, J.T. (1991). Geochemical characteristics of cryolite-tin-bearing granites from the Pitinga Mine, Northwestern Brazil - A review. *Journal of Geochemical Exploration*, v.40, p.227-249.
- ISHIHARA, S. (1977). The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, v.27, p.293-305.
- ISHIHARA, S. (1981). The granitoid series and mineralization. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, p. 458-484.
- KEPPLER, H. (1993). Influence of fluorine on the enrichment of high field strength trace element in granitic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114, p.478-488.
- KOVALENKO, V.I. (1978). The genesis of rare metal granitoids and related ore deposits. In: STEMPLER, M.; BURNOL, L.; TISCHENDORF, G. Eds. *Metallization associated with acid magmatism*, v.3, Prague, Geol. Surv., p.235-247.
- LEHMANN, B. (1990). Metallogeny of tin. *Lecture Notes in Earth Sciences*, v. 32. Springer-Verlag, 211 p.
- LEITE JUNIOR, W.B.; BETTENCOURT, J.S. (1992). O Albita Leucogranito de Oriente Novo - Rondônia. 37^o. Congresso Brasileiro de Geologia, Boletim de resumos expandidos - SBG/SP, São Paulo, p.210-211.
- LENHARO, S.L.R.; POLLARD, P.J.; BORN, H.; COSTI, H.T. (1997a). Topaz-bearing porphyritic phases within the Água Boa granite, Pitinga tin mine, Amazonas, north Brazil. *Second International Symposium on Granites and Associated Mineralization*, Extended abstracts, p. 60-61.
- LENHARO, S.L.R.; POLLARD, P.J.; BORN, H. (1997b). Pitinga Tin Mine, Amazonas, Brazil: I. A unique giant rare-metals, tin, cryolite resource. *EGRU NEWS*, R.G. Taylor & P. Williams Eds., dec., p. 4- 7.
- MACAMBIRA, M.J.B.; TEIXEIRA, J.T.; DAOUD, W.E.K.; COSTI, H.T. (1987). Geochemistry, mineralizations and age of tin-bearing granites from Pitinga, Northwestern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, volume especial, *Proceedings of the International Symposium on Granites and associated mineralizations (ISGAM)*, dezembro, v.17 n^o.4, p.562-570.
- MILLER, C.F. e MITTLEFEHLDT, D.W. (1982). Depletion of light rare-earth elements in felsic magmas. *Geology*, v.10, p. 129-133.
- NEKVASIL, H. (1991). Ascent of felsic magmas and formation of rapakivi. *American Mineralogist*, v. 76, p. 1279-1290.
- NOYES, N.J.; WONES, D.R.; FREY, F.A. (1983). A tale of two plutons: petrographic and mineralogic constraints on the petrogenesis of the Red Lake and Eagle Peak Plutons, central Sierra Nevada, California. *The Journal of Geology*, v.91, n.4, p. 353-379.
- PICHAVANT, M.; HAMMOUDA, T.; SCAILLET, B. (1996). Control of redox state and Sr isotopic composition of granitic magmas: a critical evaluation of the role of source rocks. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, v. 88, p. 321-329.
- PITCHER, W.S. (1993). *The nature and origin of granite*. London, Blackie Ac.& P.- Chapman & Hall, 321 p.
- POLLARD, P.J. (1989). Geologic characteristics and genetic problems associated with the development of granite-hosted deposits of tantalum and niobium. In: MOLLER, P.; CERNY, P.; SAUPE, F. Eds. *Lanthanides, tantalum and niobium*. Berlin, Springer-Verlag, p.240-256.
- POLLARD, P.J. (1995). *Geology of Rare Metal Deposits: An Introduction and Overview*. *Economic Geology*, v.90 n^o.3, p. 489-494.

- POLLARD, P.J.; NAKAPADUNGRAT, S.; TAYLOR, R.G. (1995). The Phuket Supersuite, southwest Thailand: Fractionated I-type granites associated with Tin-Tantalum mineralization. *Economic Geology*, v.90 n.º.3, p. 586-602.
- RÄMO, O.T. e HAAPALA, I. (1995). One hundred years of Rapakivi Granite. *Mineralogy and Petrology*, v.52, p. 129-185.
- ROLLINSON, H.R. (1993). *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*. New York, Longman Scientific & Technical, 352 p..
- SCHOBENHAUS, C.; HOPPE, A.; LORK, A.; BAUMANN, A. (1994). Idade U/Pb do Magmatismo Uatumã no norte do Craton Amazônico, Escudo das Guianas (Brasil): Primeiros Resultados. 38º. Congresso Brasileiro de Geologia, Anais... Geotectonica e Geocronologia, Balneário Camboriú, SC, p.395-397.
- TEIXEIRA, J.T.; COSTI, H.T.; MINUZZI, O.R.R.; SOARES, E.A.A. (1992). Depósitos primários de criolita, cassiterita, xenotímio e columbita em apogranito - Mina do Pitinga (AM). 37º. Congresso Brasileiro de Geologia, Boletim de resumos expandidos - SBG/SP, São Paulo, p.212-213.
- WATSON, E.B. e HARRISON, T.M. (1983). Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 64, p. 295-304.
- WATSON, E.B. e HARRISON, T.M. (1984). Accessory minerals and the geochemical evolution of crustal magmatic systems: a summary and prospectus of experimental approaches. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 35, p. 19-30.
- WATT, G.R. e HARLEY, S.L. (1993). Accessory phase controls on the geochemistry of crustal melts and restites produced during water-undersaturated partial melting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 114, p. 550-566.
- WYLLIE, P.J.; JONES, A.P.; DENG, J. (1996). Rare earth elements in carbonate-rich melts from mantle to crust. In: JONES, A.P.; WALL, F.; WILLIAMS, C.T. Eds. *Rare earth minerals: chemistry, origin and ore deposits*. The Mineralogical Society Series, v.7, London, Chapman & Hall, p. 77-103.

(*) Documento acessível mediante autorização da Empresa. Grupo Paranapanema, Mina de Pitinga.

Resumo

A mina de Pitinga, AM, se destaca por possuir uma mineralização disseminada de estanho em um albita-granito peralcalino, além de abrigar o único depósito de grande porte de criolita do mundo.

A região de Pitinga é composta predominantemente por rochas vulcânicas ácidas e piroclásticas do Grupo Iricoumé, hospedeiras dos granitos multifásicos Água Boa e Madeira. Os maiores depósitos de cassiterita aluvionar ocorrem nos sistemas de rios que drenam os dois corpos graníticos. O objetivo deste estudo foi elucidar a evolução magmática dos Granitos Água Boa e Madeira, a partir de dados petrográficos, geoquímicos e geocronológicos.

Os Maciços Água Boa e Madeira, de forma oval e alongados na direção NE-SW, são compostos por três fácies principais, na seguinte ordem de posicionamento: granito rapakivi; biotita-granito; e topázio-granito no Água Boa e albita-granito no corpo Madeira.

Idades SHRIMP U/Pb e Ar/Ar situam os Maciços Água Boa e Madeira na Suíte Intrusiva Mapuera. As idades modelo T_{DM} relacionam esses granitos à Província Ventuari-Tapajós.

O modelo de posicionamento dos Maciços Água Boa e Madeira, em níveis crustais rasos, através do aproveitamento de fraturas rúpteis, com dois ou três estágios diferentes de cristalização, devidos a descompressão, considera várias injeções sucessivas, produzidas por segregação de “batches” de protolitos ligeiramente diferenciados (fácies rapakivi, biotita e albita) e por fracionamento magmático na câmara magmática (topázio), de um magma granítico tipo-A. Esse magma apresentava temperaturas elevadas (900-600°C) e condições anidras, sendo que a saturação em fluidos ocorreu apenas após o posicionamento. O “melt” foi transportado, quase adiabaticamente, de níveis crustais inferiores a médios (em torno de 5-6 Kbar) para níveis crustais elevados (em torno de 0,5-1 Kbar), na forma de um “crystal mush” contendo cerca de 30 a 50% de cristais. Durante os estágios de cristalização e posicionamento, a descompressão deslocou o sistema para o campo de estabilidade do plagioclásio, causando absorção, principalmente do quartzo, com subsequente re-equilíbrio em pressões baixas.

A formação dos Maciços Água Boa e Madeira, apresentando magnetita e pirita na maioria de seus fácies, deu-se em condições oxidantes. A cristalização em condições de alta fugacidade de oxigênio, acima do “buffer” NNO, também são consubstanciadas pela presença de cassiterita com características magmáticas.

Geoquimicamente, os Maciços Água Boa e Madeira são classificados como metaluminosos (fácies rapakivi), peraluminosos (biotita- e topázio-granitos) e peralcalinos (albita-granito).

Aspectos petrográficos e geoquímicos dos Granitos Rapakivi de Pitinga sugerem uma evolução associada a fusão parcial de diferentes fontes (fácies rapakivi, biotita- e albita-granito), com provável fracionamento posterior, do qual resultaram apenas topázio-granito, microgranito e greisen. Os valores de $\epsilon Nd_{inicial}$, sugerindo várias fases de mistura de crosta e manto, com contribuição predominantemente crustal, consubstanciam as indicações de caráter geoquímico.

O estabelecimento de quatro fontes diferentes (duas de granito rapakivi, biotita- e albita-granitos), bem como a sequência de fracionamento, que formou apenas o topázio-granito, indicam que os dois corpos graníticos se formaram de fontes diferentes e que as mineralizações de Sn (Água Boa e Madeira) e de metais raros (Madeira) não são relacionadas a fracionamento sequencial envolvendo o fácies rapakivi. Os dois corpos de criolita maciça, que ocorrem a cerca de 150 m abaixo do teto do granito, podem ser resultantes de um “melt” imiscível de fluoreto, que se separou durante a cristalização do albita-granito.

Abstract

The Pitinga mine in northern Brazil is unique in having disseminated tin mineralization hosted within a peralkaline albite-granite, and also in containing the world's only major cryolite deposit.

The Pitinga region is composed predominantly of acid volcanic and pyroclastic rocks of the Iricoumé Group, which are intruded by the multiphase Água Boa and Madeira Granites. Major alluvial cassiterite deposits occur within creek systems draining the two granitic bodies. The aim of this study was to elucidate the magmatic evolution of the Água Boa and Madeira Granites based on petrographic, geochemical and age determination data.

The oval-shaped Água Boa and Madeira Granites are elongated NE-SW and present three major facies, in order of emplacement: rapakivi-granite; biotite-granite; and topaz-granite in the Água Boa and albite-granite in the Madeira body.

SHRIMP U/Pb and Ar/Ar ages situate the Água Boa and Madeira Granites within the Mapuera Intrusive Suite. The T_2 model ages place the granites in the Ventuari-Tapajós Province.

The model of shallow level emplacement of the Água Boa and Madeira Granites, through brittle fracture exploitation with two or three different stages of crystallisation due to decompression, considers several successive injections, produced either by segregation of batches of slightly different sources (rapakivi, biotite and albite granite) or magmatic fractionation in the magma chamber (topaz), of an A-type granitic magma. The magma was hot (around 900-600°C) and anhydrous, with fluid saturation occurring after emplacement. The melt was transported as a "crystal mush" (crystal fraction between 30 to 50%) almost adiabatically, possibly from the lower-middle crust (around 5-6 kbar) to upper crustal levels (around 0.5-1 kbar). During the crystallisation and emplacement stages, decompression shifted the system into the plagioclase stability field, causing resorption mainly of quartz and subsequent re-equilibration at low pressure.

The formation of the Água Boa and Madeira Granites, with magnetite and pyrite in the majority of their facies, was under oxidising conditions. The crystallisation in high oxygen fugacity, above the NNO buffer, is supported by the presence of magmatic cassiterite.

Geochemically, the Água Boa and Madeira Granites are classified as metaluminous (rapakivi facies), peraluminous (biotite- and topaz-granite) and peralkaline (albite-granite).

Petrographic and geochemical features of the Pitinga rapakivi granites suggest an evolution associated with partial melting of different sources (rapakivi facies, biotite- and albite- granite) with a likely later fractionation process to form only the topaz granite, microgranite and greisens. The $\epsilon Nd_{initial}$ values, which suggest several mixtures between the crust and mantle with predominant crustal contribution, substantiate the geochemical indications.

The establishment of four different sources (two rapakivi-granites, biotite- and albite-granite) and the fractionation sequence which produced only the topaz-granite indicate that the two granitic bodies were formed by different sources and that Sn (Água Boa and Madeira) and rare metals (Madeira) mineralizations are not related to serial fractionation involving the rapakivi facies. Two massive bodies of cryolite occurring approximately 150 m below the roof of the granite may be products of an immiscible fluoride melt that separated during crystallisation of the albite granite.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PMI/001 - Características Geométricas da Escavação Mecânica em Mineração: Exemplo de Escavadora de Caçamba de Arraste - ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/002 - Prospecção Geoquímica Experimental na Ocorrência de Ouro Tapera Grande - PAULO BELJAVSKIS, HELMUT BORN
- BT/PMI/003 - Estudo de Processo de Dupla Flotação visando o Beneficiamento do Minério Carbonático de Fosfato de Jacupiranga - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/004 - Desenvolvimento de um Equipamento Não-Convencional em Beneficiamento Mineral: A Célula Serrana de Flotação Pneumática - RICARDO NEVES DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/005 - Aluste de Modelos Empíricos de Operação de Ciclones - HOMERO DELBONI JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/006 - Contribuição ao Estudo dos Explosivos Permissíveis - AMILTON DOS SANTOS ALMEIDA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/007 - Contribuição ao Dimensionamento de Pilares em Minas Subterrâneas de Manganês - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/008 - Exploração Mineral: Conceitos e Papel do Estado - LUIZ AUGUSTO MILANI MARTINS, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/009 - Otimização do Projeto de Pátios de Homogeneização através do Método da Simulação Condicional - FLAVIO MOREIRA FERREIRA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/010 - Considerações Gerais sobre Desmonte de Rocha: Análise de Custo - Índice de Produtividade e Otimização da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/011 - Aglomeração de Rejeitos de Fabricação de Brita para sua Reciclagem - ARTHUR PINTO CHAVES, BRADDLEY PAUL
- BT/PMI/012 - Método de Dimensionamento de Peneiras para a Classificação Granulométrica de Rochas ou Minérios - FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/013 - Processo de Beneficiamento para Obtenção de uma Carga Mineral Nobre a partir do Fosfogesso - WALTER VALERY JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/014 - Estudo da Carboxi-Metil-Celulose como Aglomerante para Pelotização - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/015 - A Influência do Amido de Milho na Eficiência de Separação Apatita/Minerais de Ganga Via Processo Serrana - LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/016 - Beneficiamento de Criolita Natural - Estado da Arte - HENRIQUE KAHN, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/017 - Estudo da Variação do Índice Energético Específico - W_i , segundo a Granulometria do Ensaio, Obtida através de um Moinho de Bolas Padrão, em Circuito Fechado - MARIO SHIRO YAMAMOTO, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/018 - Fluorita - FERNANDO FUJIMURA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/019 - O Aproveitamento de Recursos Minerais: Uma Proposta de Abordagem a Nivel Nacional - CELSO PINTO FERRAZ, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/020 - Comparação de duas Metodologias - A de Bieniawski e a de Panek, para Dimensionamento de Tirantes em Galerias Subterrâneas de Seção Retangular em Camadas Estratificadas - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/021 - Caracterização de Maços Rochosos através de Envolvimentos de Resistência por Tratamento Estatístico utilizando Dados de Laboratório do IPT Simulando Condições Geotécnicas do Maço - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/022 - Avaliação de Impactos Ambientais na Mineração de Combustíveis Fósseis Sólidos - GILDA CARNEIRO FERREIRA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/023 - O Lado Nocivo do Elemento Quartzo no Desgaste Abrasivo de Mandíbula de Britadores - FERNANDO FUJIMURA

- BT/PMI/024 - Conceitos Básicos de Iluminação de Minas Subterrâneas - SÉRGIO MEDICI DE ESTON, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/025 - Sistema Computadorizado para Ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico - ANTONIO CARLOS NUNES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/026 - Caracterização Mineralógica/Tecnológica das Apatitas de alguns Depósitos Brasileiros de Fosfato - SARA LAIS RAHAL LENHARO, HELMUT BORN
- BT/PMI/027 - Classificação de Maciços quanto à Escarificabilidade - GUILHERME DE REZENDE TAMMERIK, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/028 - Análise Comparativa de Métodos de Amostragem de Depósitos Auríferos - FÁBIO AUGUSTO DA SILVA SALVADOR, HELMUT BORN
- BT/PMI/029 - Avaliação da Qualidade de Corpos Moedores para o Minério Fosfático de Tapira - MG - GERALDO DA SILVA MAIA, JOSÉ RENATO B. DE LIMA
- BT/PMI/030 - Contribuição ao Estudo da Cominuição Inicial à Partir da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/031 - Análises Químicas na Engenharia Mineral - GIULIANA RATTI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/032 - Usos Industriais da Atapulga de Guadalupe (PI) - SALVADOR LUIZ MATOS DE ALMEIDA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/033 - Minerais Associados às Apatitas: Análise de sua Influência na Produção de Ácido Fosfórico e Fertilizantes Fosfatados - ROBERTO MATTIOLI SILVA, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/034 - Beneficiamento dos Caulins do Rio Capim e do Jari - ADÃO BENVINDO DA LUZ, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/035 - Dimensionamento de Suportes em Vias Subterrâneas - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/036 - Estudos da Modelagem Matemática da Moagem com Seixos para Talco de Diversas Procedências - MARIO VALENTE POSSA, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/037 - Mecânica de Rochas Aplicada ao Dimensionamento do Sistema de Atirantamento em Minas Subterrâneas - LEONCIO TEÓFILO CARNERO CARNERO
- BT/PMI/038 - Geometria de Minas a Céu Aberto: Fator Crítico de Sucesso da Indústria Mineral - FÁBIO JOSÉ PRATI, ANTÔNIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/039 - Substituição do Aço por Polímero e Compósitos na Indústria Automobilística do Brasil: Determinantes e Consequências para o Mercado de Minério de Ferro - WILSON TRIGUEIRO DE SOUSA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, ANTONIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/040 - Aplicação de uma Metodologia que Simule em Moinho de Laboratório Operações Contínuas de Moagem com Seixos para Talco - REGINA COELI CASSERES CARRISSO, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/041 - A Indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará - FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL, ANTONIO STELLIN JÚNIOR
- BT/PMI/042 - A Produção de Fosfato no Brasil: Uma Apreciação Histórica das Condicionantes Envolvidas - GILDO DE A. DE SÁ C. DE ALBUQUERQUE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/043 - Flotação em Coluna - Estado de Arte - JULIO CESAR GUEDES CORREIA, LAURINDO SALIES LEAL FILHO
- BT/PMI/044 - Purificação de Talco do Paraná por Flotação e Alveamento Químico - IVAN FALCÃO PONTES, LAURINDO SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/045 - Pequena Empresa - A Base para o Desenvolvimento da Mineração - GILSON EZEQUIEL FERREIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/046 - Máquinas de Flotação - ROGÉRIO CONTATO GUIMARÃES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/047 - Aspectos Tecnológicos do Beneficiamento do Carvão de Candiota (RS) - ANTONIO RODRIGUES DE CAMPOS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/048 - Efeito das Dimensões de Provetas no Dimensionamento de Espessadores - ELDON AZEVEDO MASINI, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/049 - Água no Processamento Mineral - RODICA MARIA TEODORESCU SCARLAT, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/050 - Drenagens Ácidas do Estéril Piiritoso da Mina de Urânio de Poços de Caldas: Interpretação e Implicações Ambientais - VICENTE PAULO DE SOUZA, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ

BT/PMI/051 - "Caracterização Tecnológica de Minérios Auríferos. Um Estudo de Caso: O Minério Primário da Jazida de Salamangone, AP." - MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI, HENRIQUE KAHN

BT/PMI/052 - Ensino de Engenharia de Minas - WILDOR THEODORO HENNIES

BT/PMI/053 - Redistribuição de Tensões e Desenvolvimento da Zona Clástica em Túneis Circulares - FERNANDO FUJIMURA

BT/PMI/054 - Projeto de Barragem para Reservação de Mistos de Minerais Pesados Rejeitados pelo Beneficiamento de Cassiterita na Mina do Pitinga - MARCELO PIMENTEL DE CARVALHO, EDER DE SILVIO, LINDOLFO DE SILVIO

BT/PMI/055 - A Segurança e a Organização do Trabalho em uma Mineração Subterrânea de Carvão da Região de Criciúma - Santa Catarina - DORIVAL BARREIROS, WILDOR THEODORO HENNIES

BT/PMI/056 - Diagnóstico de Lixiviação para Minérios de Ouro - VANESSA DE MACEDO TORRES, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/057 - O Estado da Arte em Tratamento de Minérios de Ouro - RONALDO DE MOREIRA HORTA, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/058 - Vias Subterrâneas em Rocha - Escavação por Explosivos - WILDOR THEODORO HENNIES, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA

BT/PMI/059 - Aumento da Seletividade na Separação da Fluorita/Calcita/Barita/Apatita por Flotação. Jazida de Mato Preto - PR - MONICA SPECK CASSOLA, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMC/060 - Desenvolvimento de Processo para Extração de Gálio do Licor de Bayer por Resinas de Troca-Iônica de Poli (Acrilamidoxima) - WALDEMAR AVRITSCHER, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO

BT/PMI/061 - Estudo de Aspectos Geomecânicos Aplicados ao Projeto de Minas Subterrâneas - EDUARDO CÉSAR SANSONE, LINEU A. AYRES DA SILVA

BT/PMI/062 - Avaliação da Recuperação de Áreas Degradadas por Mineração na Região Metropolitana de São Paulo - OMAR YAZBEK BITAR, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/063 - Avaliação Técnica dos Processos de Cianetação/Adsorção da Mina de Fazenda Brasileiro - ÁUREA MARIA DIAS, ARTHUR PINTO CHAVES

BT/PMI/064 - A Nova Configuração da Indústria de Fertilizantes Fosfatados no Brasil - YARA KULAIF, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/065 - Estudos de Flotação em Coluna com Finos de Fosfato da Ultrafertil em Escala Piloto - JOSÉ PEDRO DO NASCIMENTO, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO

BT/PMI/066 - Flotação da Apatita da Jazida de Tapira - MG - LUIZ A. F. BARROS, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO- LUIZ A. F. BARROS, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO

BT/PMI/067 - Minerais Industriais: Conceituação, Importância e Inserção na Economia - FRANCISCO REGO CHAVES FERNANDES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/068 - Atividades Micro-Sísmicas e a Ruptura de Rochas - FERNANDO FUJIMURA

BT/PMI/069 - Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais - LÍLIA MASCARENHAS SANT'AGOSTINO, HENRIQUE KAHN

BT/PMI/070 - Aplicação de Modelos Numéricos ao Projeto de Escavação por Explosivos de Túneis e Galerias - LUIZ CARLOS RUSILO, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA

BT/PMI/071 - O Estado da Arte da Cianetação de Minérios Auríferos - ROBERTO GOULART MADEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/072 - Revisão da Indústria Mineral de Titânio - ANTÔNIO HELENO DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

BT/PMI/073 - Sisteamtização de Casos de Instabilidades em Encostas Rochosas no Município de Santos, Através de Nova Metodologia de Avaliação de Estabilidade - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, WILDOR THEODORO HENNIES

BT/PMI/074 - A Minero-Metalurgia e suas Ligações com a Geologia e suas Engenharias de Minas, Metalúrgica e Química - RICARDO ALVARES DE CAMPOS CORDEIRO, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

- BT/PMI/075 - A Redução da Umidade de Minérios de Ferro com o Emprego de Microondas - FERNANDO LEOPOLDO VON KRÜGER, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/076 - Estimação de Parâmetros do Modelo Cinético de Moagem - CLÁUDIO FERNANDES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMC/077 - A Bauxita e a Indústria do Alumínio - JOSÉ CRUZ DO CARMO FLÔRES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMC/078 - Técnicas de Tratamento de Minérios para Reciclagem de Vidro - CLEUSA CRISTINA BUENO MARTHA DE SOUZA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/079 - Comparação entre Cylpebs e Bolas na Moagem Secundária da Samarco Mineração - JOAQUIM DONIZETTI DONDA, ANTONIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/080 - Calcários Dolomíticos da Região de Ouro Preto para usos na Metalurgia e como Rochas Ornamentais - MARCÍLIO DIAS DE CARVALHO, PAULO ROBERTO GOMES BRANDÃO
- BT/PMI/081 - Estudo de Reoxidação e Redução de Ferro Contido em Caulins - ADÃO BENVINDO DA LUZ, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/082 - Recuperação do Gálio Existente no Licor de Bayer de Poços de Caldas por Flotação Iônica: Estudo dos Coletores - ANA MARGARIDA MALHEIRO SANSÃO, LAURINDO DE SALLES LEAL
- BT/PMI/083 - Contribuição ao Conhecimento de Argilas de Cuba - GUILLERMO RUPERTO MARTÍN CORTÉS, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/084 - Determinação da Rugosidade da Superfície de Descontinuidades Rochosas - JOSÉ MARGARIDA DA SILVA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/085 - Serragens de Granitos para Fins Ornamentais - ANTONIO STELLIN JR

