

# PETROLOGIA E TERMOCRONOLOGIA DE GNAISSES MIGMATÍTICOS DA FAIXA DE DOBRAMENTOS ARAÇUAÍ (ESPIRITO SANTO, BRASIL)

JOSÉ M. U. MUNHÁ<sup>1</sup>, UMBERTO G. CORDANI<sup>2</sup>, COLOMBO C. G. TASSINARI<sup>2</sup> & TERESA PALÁCIOS<sup>1</sup>

**Abstract** *PETROLOGY AND THERMOCHRONOLOGY OF MIGMATITIC GNEISSES OF THE ARAÇUAÍ FOLD BELT (ESPIRITO SANTO, BRAZIL)* Migmatitic gneisses of the Araçuaí Fold Belt (Espírito Santo, Brazil) experienced granulite facies metamorphism ( $820 \pm 20$  °C;  $6.5 \pm 0.5$  kbar) during the late stages of the Brasiliano Orogeny. These conditions remained for a long period (~530 Ma ? ~480 Ma), close to peak metamorphic conditions and promoted muscovite + biotite partial melting, followed by retrograde reactions that produced late cordierite + biotite and garnet reabsorption. Fe-Mg garnet-biotite exchanges, as well as diffusion modeling, indicate cooling rates between 20 and 300 °C/Ma between 750 and 550°C. Geochronology on garnet, plagioclase, biotite and Kfeldspar yielded consistent results and cooling ages between 475 and 420 Ma. The geochronological results are consistent with diffusion models, and indicate a short period of rapid cooling followed by a longer period of slow cooling at rates close to 2°C/Ma. The initial rapid cooling is interpreted as due to the thrusting of the migmatitic gneisses onto cooler basement rocks.

**Keywords:** Petrology, Thermochronology, Gneisses, Araçuaí Belt, Brazil

**Resumo** Os gneisses migmatíticos da Faixa de Dobramentos Araçuaí foram submetidos a metamorfismo em condições da fácie granulito ( $820 \pm 30$  °C,  $6.5 \pm 0.5$  kbar) durante os estágios finais da orogenia Brasiliana. O metamorfismo de alto grau ocorreu durante longo tempo (~530 Ma ? ~480 Ma) e foi acompanhado de fusão parcial de muscovita e biotita, a que se seguiram reações retrógradas produzindo cordierita + biotita e intensa reabsorção de granada. Modelamento da troca difusiva Fe-Mg (granada-biotita) sugere taxas de resfriamento entre 20 e 300 °C/Ma, entre 750 °C e 550 °C. Geocronologia absoluta de granada, plagioclásio, biotita e feldspato potássico produziu idades de resfriamento a  $475 \pm 6$  Ma,  $473 \pm 8$  Ma,  $470 \pm 2$  Ma e 440 – 420 Ma, respectivamente. Os resultados são congruentes com os modelos de difusão, sendo consistentes com um curto período de resfriamento rápido a partir de ~480 Ma (< 10 Ma a  $\geq 60$  °C/Ma), o qual sucede declínio acentuado das taxas de resfriamento (~2 °C/Ma). A história térmica do resfriamento requer exumação inicial rápida, justapondo os gneisses migmatíticos às unidades cratonizadas mais frias. À medida que cessaram os esforços tectônicos tangenciais, a dissipação da instabilidade termo-gravitacional foi condicionada por transferência de calor condutiva e compensação isostática, em conformidade com o declínio das taxas de resfriamento.

**Palavras-chave:** Petrologia, Termocronologia, Gneisses, Faixa Araçuaí, Brasil

**INTRODUÇÃO** A área estudada situa-se na região leste do Brasil, no Estado do Espírito Santo, entre  $18^{\circ}30' e 20^{\circ}$  Sul  $40^{\circ} e 41^{\circ}$  Oeste. Sob o ponto de vista geológico, a Faixa de Dobramentos Araçuaí, bem como a Faixa Ribeira que situa-se em sua continuidade para o sul, e em conjunto com o Cinturão do “West Congo”, limitam os Cráttons do São Francisco e do Congo. O sistema orogênico Neoproterozóico - Eopaleozóico, Araçuaí - West Congo constituiu o segmento norte da Cadeia Orogênica Brasiliana/Pan-Africana, composta pelos Cinturões Móveis Ribeira, Dom Feliciano e Gariep, Damara e Kaoko, que ocorrem no sul-sudeste do Brasil e no oeste da África, respectivamente.

As rochas que afloram na área de estudo pertencem ao Grupo Paraíba do Sul, o qual inclui dois domínios litológicos (Pedrosa Soares & Wiedemann-Leonardos 2000). O mais antigo é constituído por granulitos  $\pm$  charnoquíticos e granitóides deformados (ortognaisses), que ocorrem sob a forma de núcleos preservados em meio a uma sequência mais jovem metamórfica paraderivada, onde predominam gneisses pelíticos/psamíticos migmatizados. O objetivo deste trabalho é caracterizar as condições físicas deste evento metamórfico, em particular, o regime P-T e a respectiva evolução termocronológica, contribuindo para o esclarecimento da evolução termotectônica regional.

## METAMORFISMO E MIGMATIZAÇÃO

Os gneisses

migmatíticos compreendem leucossomas quartzo-feldspáticos (+ biotita  $\pm$  granada  $\pm$  cordierita) e metapelitos, interpretados como o material fundido e resíduo refratário, respectivamente. O leucossoma constitui frequentemente  $> 10$  % das rochas expostas; contudo, oscilações no grau de fusão parcial e na eficiência dos mecanismos de segregação magnética produziram relações texturais complexas, desde intercalações íntimas entre leucossoma e metapelite com preservação de foliação/bandeado metamórfico, onde a fusão parcial e a segregação magnética foram limitadas, até situações onde o leucossoma predomina, incluindo corpos dispersos de restitos. A coalescência final destes leucossomas poderá ter originado os granitóides regionais descritos por Pedrosa Soares *et al.* (2001).

A recristalização metamórfica e migmatização relacionam-se com deformação dúctil, polifásica, em regime transpressivo (Pedrosa Soares & Wiedemann-Leonardos 2000). A anisotropia ( $S_M$ ) metamórfica principal transpõe foliação(ões) prévia, refletindo, em todas as escalas, o desenvolvimento regional de sistemas de cisalhamento dominanteamente dextral que produziram cavamentos e forte imbricação tectônica, o que resultou numa estrutura em flor com vergências para E e W, no sentido dos cráttons. O desenvolvimento frequente de porfiroblastos com  $S_i \equiv S_M$ , e a deformação incipiente nos leucossomas indicam que a maximização do regime térmico metamórfico teria ocorrido durante e/ou após o

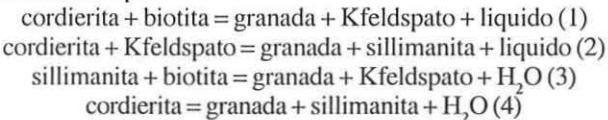
1 - Centro/Dept. Geologia, Faculdade Ciências, Univ. Lisboa, Portugal (jmunha@fc.ul.pt; tpp@fc.ul.pt)

2 - CPGeo, Instituto Geociências, Univ. São Paulo, Brasil (ucordani@usp.br; cctgassi@usp.br)

período de deformação principal.

O grau metamórfico atingiu a fácie granulito, sendo típica dos metapelitos a associação granada-biotita-cordierita-feldspato potássico-plagioclásio-quartzo ± (sillimanita, ortopiroxênio, espinélio, ilmenita). As paragêneses de alto grau estão geralmente bem preservadas, e o desenvolvimento de muscovita retrógrada, exceto a sericitização tardia dos feldspatos, raramente ocorre.

Nos gnaisses migmatíticos o bandeado composicional coincide com a foliação metamórfica é materializada pela biotita e raramente sillimanita. Esta foliação anastomosa-se entre os níveis de quartzo, feldspato potássico micropertítico e plagioclásio antipertítico, definindo a matriz, de onde sobressaem porfiroblastos de granada e cordierita. Estes porfiroblastos ocorrem em quase todas as amostras estudadas, onde podem ocorrer em cristais centimétricos. A cordierita tende a ser quimicamente homogênea na escala da lâmina delgada, e não apresenta evidências texturais que indiquem reações de reabsorção significativas. Pelo contrário, as granadas têm forma amebóide, contêm inclusões de quartzo-biotita-sillimanita-plagioclásio(raro)-ilmenita, e mostram frequentemente intensa reabsorção em zonas de reação onde se desenvolvem cordierita + feldspato potássico + biotita. Almandina e piropo são zonados, com incremento de  $Fe/(Fe+Mg)$  do núcleo dos cristais para a borda (UT-41: 0.73 → 0.81). O zoneamento pode ser concêntrico em torno do núcleo, mas também ocorre em granada adjacente à biotita e/ou cordierita. O zoneamento da razão  $Fe/(Fe+Mg)$  é retrógrado e interpretado como reflexo da difusão em volume, induzida por gradientes químicos impostos por reações contínuas do tipo:



Análises detalhadas mostram que existe correlação entre o valor  $Fe/(Fe+Mg)$  da biotita inclusa na granada e as dimensões, respectivas (UT-4:  $Fe/(Fe+Mg)_{biotita} = 0.33$ , diâmetro = 20  $\mu m$ ;  $Fe/(Fe+Mg)_{biotita} = 0.41$ , diâmetro = 200  $\mu m$ ). Isto é consistente com a interpretação de que o zoneamento Fe – Mg da granada, bem como a distribuição de  $Fe/(Fe+Mg)$  na biotita, é consequência do balanço de massa durante a dissipação difusiva dos gradientes causados pela partição Fe – Mg entre os volumes das inclusões de biotita e da granada hospedeira, o que será utilizado posteriormente para inferir taxas de resfriamento. Os valores de  $Fe/(Fe+Mg)$  na biotita também são função da respectiva localização na amostra; os valores  $Fe/(Fe+Mg)$  mais baixos são observados na biotita inclusa na granada, enquanto os mais elevados correspondem, geralmente à biotita da matriz (UT-27:  $Fe/(Fe+Mg)_{biotita na granada} < 0.45$ ;  $Fe/(Fe+Mg)_{biotita na matriz} = 0.52$ ). A heterogeneidade composicional da biotita suporta a interpretação do zoneamento concêntrico descrito na granada, e ambos podem ser explicados se considerarmos que o progresso das reações (1) e (3) no sentido retrogrado (i.e., da direita para a esquerda) incrementa os valores  $Fe/(Fe+Mg)$ , quer na granada quer na biotita em consequência de:  $Fe/Mg$  (granada)  $>>$   $Fe/Mg$  (biotita)  $>$   $Fe/Mg$  (cordierita). Assim, à medida que a granada é consumida, a borda torna-se progressivamente mais rica em Fe que o núcleo, produzindo o zoneamento composicional observado, e o  $Fe/(Fe+Mg)$  da biotita da matriz, equilibrada com as reações (1) e/ou (3), será mais elevado do que na biotita inclusa na granada, excedendo mesmo os valores  $Fe/(Fe+Mg)$  da biotita produzida durante o pico metamórfico. Este padrão composicional é característico de biotita em rochas metamórficas de alto grau, tendo consequências importantes nos

cálculos geotermométricos (Robinson 1991).

Observação notável nas amostras estudadas é a raridade da sillimanita matricial. Embora constituinte mineral freqüente, a sillimanita está, quase sempre limitada à forma de inclusões muitas vezes orientadas no interior dos porfiroblastos de granada, cordierita e feldspato potássico. Espinélio verde ( $X_{Mg} = 0.23$ , Al# = 0.96), embora raro, acompanha a sillimanita como inclusões ou intercrescimentos no interior de cordierita; associam-se-lhe, quartzo, feldspato potássico e biotita, bem como magnetita + ilmenita (tardias). Estas características modais têm implicações significativas na definição do percurso P-T metamórfico, a seguir discutido.

## Geotermobarometria: máximo térmico e fusão parcial

Geobarômetros aplicáveis às rochas estudadas incluem: granada + plagioclásio + sillimanita + quartzo (GASP), granada + ortopiroxênio + plagioclásio + quartzo (GOSP) e granada + cordierita + sillimanita + quartzo. A figura 1 mostra a gama de condições P-T inferidas destes equilíbrios, utilizando a base de dados termodinâmicos de Berman (1988) e as calibrações de Berman & Aranovich (1996). Acima das temperaturas necessárias à fusão incongruente da biotita, e ao desenvolvimento de leucossomas com granada + cordierita, as relações de equilíbrio granada + plagioclásio + sillimanita indicam pressões mínimas da ordem de 6 - 7 kbar, enquanto que a intersecção dos equilíbrios GASP, GOSP e granada + cordierita + sillimanita produzem estimativas geobarométricas consistentes de  $6.5 \pm 0.5$  kbar, a 800 - 820 °C.

Geotermometria clássica, baseada na troca Fe – Mg entre granada e biotita (Ferry & Spear 1978) não pode ser usada para estimar as temperaturas de pico metamórfico porque, conforme os argumentos anteriormente apresentados, a assunção de equilíbrio generalizado entre uma biotita qualquer e a composição nuclear dos cristais de granada, frequentemente interpretados como representativo do pico metamórfico não é demonstrável. Nas rochas estudadas, as temperaturas calculadas com base na biotita inclusa na granada e usando os núcleos de granadas e a calibração de Berman & Aranovich (1996), variam entre 650 °C e 780 °C (550–750 °C, se utilizada a calibração de Berman 1990), o que reflete a

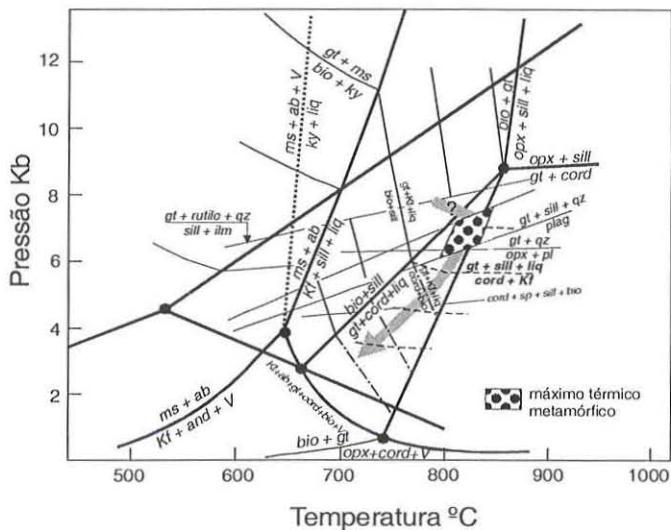
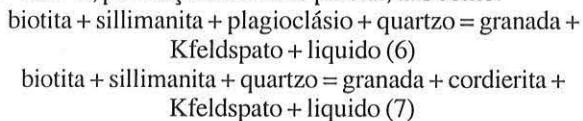


Figura 1 – Diagrama P-T para os gnaisses migmatíticos da Faixa de Dobramentos Araçuaí. Rede petrogenética adaptada de Spear et al. (1999)

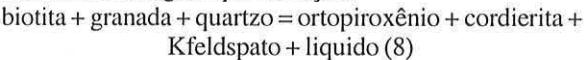
atuação do re-equilíbrio difusivo retrogradado, enquanto a biotita da matriz, como esperado produz estimativas por excesso ( $> 900^{\circ}\text{C}$ ). O valor de  $T \sim 780^{\circ}\text{C}$  deve aproximar-se, por deficiência, de  $T_{\text{max}}$ , sendo consistente com a estimativa de  $803 \pm 30^{\circ}\text{C}$ , obtida com base no método TWQ (Berman 1991, Berman & Aranovich 1996), com a paragênese granada-plagioclásio-feldspato-K-ortopiroxênio-biotita-quartzo-(cordierita ?), representativa do mais alto-grau metamórfico observado na região.

Estimativas de  $T_{\text{max}}$  podem também, com vantagem, ser obtidas com base nos dados experimentais sobre reações de fusão parcial no sistema pelítico/psamítico (Fig. 1; Spear *et al.* 1999). A abundância de migmatitos demonstra a ocorrência de evento(s) de fusão parcial nas rochas estudadas e o volume considerável de leucossoma, observável em muitos afloramentos, sugere que a fusão “desidratante” (Thompson 1982) deve ter sido dominante. A ausência de muscovita primária e a presença da associação sillimanita-feldspato potássico-quartzo requerem temperatura superior as da estabilidade da muscovita + quartzo

$\text{muscovita} + \text{quartzo} = \text{sillimanita} + \text{Kfeldspato} + \text{líquido}$  (5)  
( $T > 700^{\circ}\text{C}$ ), enquanto que o desenvolvimento progrado de granada + cordierita + feldspato potássico ocorreu provavelmente a  $T > 750 - 800^{\circ}\text{C}$ , por reações de fusão parcial, tais como:



Finalmente, a raridade/ausência da associação ortopiroxênio + cordierita, cuja ocorrência não foi constatada, mas *inferida* de pseudomorfoses, sugere que a reação:



não deve ter sido significativamente ultrapassada, o que implica em  $T \leq 850^{\circ}\text{C}$ . Estas reações, em conjunto com os dados geotermobarométricos, delimitam as condições T-P de pico metamórfico a  $820 \pm 30^{\circ}\text{C}$ ,  $6.5 \pm 0.5$  kbar (Fig. 1).

**Percorso P-T metamórfico** A memória do percurso P-T durante a evolução progressiva foi apagada pelas reações de fusão parcial a alta-T e re-equilíbrios subseqüentes. Contudo, a associação biotita + sillimanita preservada no interior da granada sugere um percurso P-T direto, eventualmente envolvendo descompressão e aquecimento até às condições de pico metamórfico, como é característico dos orógenos que envolvem sobre-espessamento da crosta seguido de colapso orogênico. A ausência de rutilo, conjugada com a presença freqüente de ilmenita, limita a descompressão a  $< 1$  kbar (Fig. 1).

As características do percurso metamórfico retrogressivo podem ser analisadas sob a perspectiva do esquema petrogenético de Spear *et al.* (1999; Fig. 1). Reabsorção de granada, cristalização tardia de cordierita + feldspato potássico  $\pm$  biotita, intercrescimentos de cordierita + espinélio + sillimanita e os porfiroblastos de granada  $\pm$  cordierita em leucossomas, indicam que o processo retrogressivo foi condicionado predominantemente pelas reações (1) e (2), com envolvimento de intensa descompressão inicial ( $dP/dT >$  reação 7). A ausência de sillimanita retrogressiva (reações 6 e 7) e muscovita secundária sugerem que o resfriamento final se processou a  $P \leq 3$  kbar.

**TAXAS DE RESFRIAMENTO: TERMOCRONOLOGIA** A trajetória P-T seguida pelos gnaises migmatíticos estudados (Fig. 1) reflete a interação entre o relaxamento térmico do segmento

crustal e a descompressão e resfriamento causados pelo subsequente transporte das rochas para a superfície. Termocronologia refere-se a história térmica do metamorfismo. Neste contexto, a determinação das taxas de resfriamento do terreno metamórfico em estudo é importante, na medida em que permite caracterizar os mecanismos responsáveis pela exumação. Em geral, quanto mais rápida a exumação, mais elevada a taxa de resfriamento.

Datações radiométricas para geocronologia absoluta, de minerais com diferentes temperaturas de fechamento (Dodson 1973), têm sido utilizadas extensivamente para inferir taxas de resfriamento em terrenos metamórficos (Heaman & Parrish 1991; McDougall & Harrison 1999). Contudo, as taxas de resfriamento podem também ser determinadas pela análise dos mecanismos de difusão em minerais metamórficos (Lasaga *et al.* 1977), referidas como “taxas de resfriamento petrológicas” (Spear & Parrish 1996). Neste estudo, a análise comparativa dos dois métodos é importante, não só para aferir a consistência interna das taxas de resfriamento determinadas em ambos, mas também porque a informação obtida se complementa.

**Taxas de resfriamento petrológicas** A teoria e métodos que utilizam os mecanismos de difusão para determinar taxas de resfriamento são descritos extensivamente na literatura especializada (Dodson 1973, Lasaga *et al.* 1977, Ehlers *et al.* 1994, Spear & Parrish 1996) não sendo, portanto, aqui discutidos.

O método adotado neste estudo é idêntico ao proposto por Spear & Parrish, (1996), que utiliza o modelamento da troca difusiva de Fe e Mg entre as inclusões de biotita e a granada hospedeira para inferir taxas de resfriamento das respectivas rochas metamórficas. Assume-se que a difusão induzida pelas variações compostionais na interface granada-biotita é dada pela alteração do coeficiente de distribuição  $K_D$  ( $\text{Mg/Fe}$ )<sup>gr-bio</sup> em resposta às variações da temperatura. Em cada caso, durante o resfriamento a granada enriquece-se em  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  enquanto que as inclusões de biotita se empobrecem, até que, a uma temperatura suficientemente baixa ( $T_c$  – temperatura de fechamento) o processo cessa. Considerando que o processo difusivo é limitado pela taxa de difusão na granada, dado por:

$$D_{\text{Fe-Mg}}^{\text{bio}} >> D_{\text{Fe-Mg}}^{\text{gr}}$$

e que o balanço de massa determina, em cada momento, a igualdade dos fluxos difusivos entre granada e biotita, as variações de  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  serão função da dimensão das inclusões com alterações compostionais mais intensas nas inclusões menores de biotita. Assim, o valor de  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  em cada inclusão de biotita pode ser transformado na respectiva  $T_c$ , por confronto com a composição do núcleo da granada hospedeira, refletindo o fluxo difusivo total granada  $\rightarrow$  biotita, que é função da evolução termocronológica.

A figura 2 representa diagramaticamente as relações  $T_c - \log$  (diâmetro biotita) nas amostras estudadas. Apesar da dispersão considerável, é aparente uma correlação entre a dimensão da biotita e as temperaturas de fechamento. A comparação entre as estimativas de  $T_c$  nas inclusões de bitotita e os resultados da simulação computacional baseados na difusão Fe – Mg na granada e biotita, também consta da figura 2.

No algoritmo computacional, as condições iniciais representam biotita e granada homogêneas à temperatura determinada para o pico metamórfico ( $T_0 \sim 800^{\circ}\text{C}$ ). Durante o resfriamento as composições na interface granada-biotita variam de acordo com

$$K_{D(\text{Mg/Fe})}^{\text{gr-bio}} = f[T(t)]$$

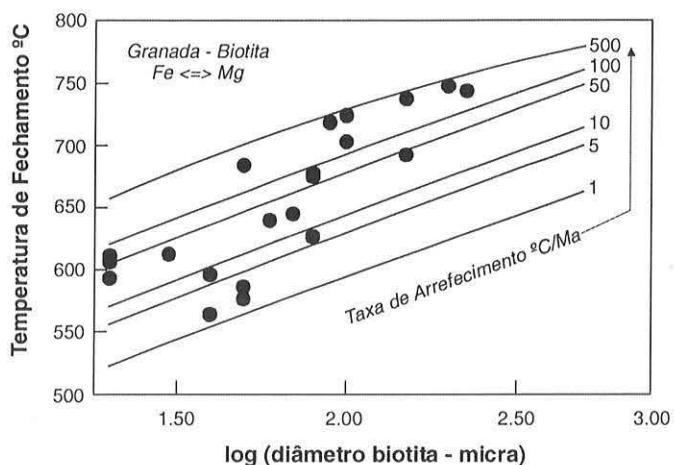


Figura 2 – Representação diagramática das relações entre a temperatura de fechamento, biotita (inclusão)-granada (Berman 1990), e a dimensão da biotita (log diâmetro – biotita). As linhas correspondem ao lugar geométrico dos pontos com igual taxa de resfriamento. Cálculos conforme com os modelos de difusão discutidos no texto.

em função da história térmica ( $T^{\circ}\text{C} = g(t\text{ Ma})$ ) simulada, e o modelo das diferenças finitas aproxima a solução da equação diferencial parcial

$$\frac{\partial C}{\partial T} = D_{Fe-Mg}^{gr} \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (10)$$

da difusão (granada - geometria esférica; biotita - cilíndrica), utilizando o coeficiente de inter-difusão Fe-Mg

$$D_{Fe-Mg}^{gr} = D_0 \times \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

calculados (Lasaga 1979) a partir dos dados experimentais de Chakraborty & Ganguly (1992).

A estimativa da taxa de resfriamento é obtida por comparação estatística com os modelos de difusão, por regressão linear dos dados geotermométricos

( $T_c^{gr-bio} = 367 + 158 \times \log [d_{\Theta_{bio}-\mu\text{m}}] ^{\circ}\text{C}$ ;  $r^2 = 0.7$ ,  $2\sigma = \pm 34 ^{\circ}\text{C}$ ) e subsequente normalização a biotita = 100  $\mu\text{m}$ . O valor

$$T_c^{gr-bio} |_{\Theta_{bio}=100\mu\text{m}} = 683 \pm 34 ^{\circ}\text{C}$$

calculado corresponde a taxas de resfriamento  $\sim 20 - 300 ^{\circ}\text{C/Ma}$ , no intervalo  $750 ^{\circ}\text{C} - 550 ^{\circ}\text{C}$  (Fig. 2), implicando rápida exumação inicial do terreno metamórfico estudado.

**Taxas de resfriamento geocronológicas** Estudos geocronológicos prévios realizados em escala regional (Siga Jr *et al.* 1982), suportam evolução poli-orogênica, evidenciando núcleos de embasamento Transamazônico ( $\sim 2$  Ga) parcialmente reativados durante o Ciclo Brasiliense. Datações U/Pb em zircão indicam instalação crustal de magmas graníticos entre 625 e 490 Ma (Noce *et al.* 2000, Pedrosa Soares & Wiedemann-Leonardos 2000, Pedrosa Soares *et al.* 2001, Silva *et al.* 2002, Medeiros *et al.* 2003), enquanto que as idades K/Ar obtidas nos gnaisses migmatíticos objeto deste estudo, sugerem que as rochas metamórficas teriam ascendido através das isotérmicas  $550 ^{\circ}\text{C} - 300 ^{\circ}\text{C}$  há  $500 - 450$  Ma (Siga Jr *et al.* 1982).

Nesta seção apresentam-se resultados preliminares da investigação geocronológica sistemática na Faixa de Dobramentos Araçuaí. A análise incidiu sobre 10 amostras (Tabelas 1 e 2), incluindo leucossomas granadíferos (UT-33cl, UT-33e, CO-9, CO-110; feldspato potássico + plagioclásio + biotita + granada + quartzo) e restitos granulíticos (UT-32, UT-32a, UT-32b, UT-32c, CO-57, PINH: granada + cordierita + feldspato potássico + plagioclásio + sillimanita + biotita + quartzo). Foram obtidas 9 novos dados isotópicos Sm/Nd, Rb/Sr e Ar/Ar em granada, plagioclásio, biotita, feldspato potássico, e rocha total (Figs. 3, 4 e 5)

A Tabela 3 e a figura 7 sintetizam os dados geocronológicos obtidos, com indicação também das temperaturas de fechamento características (Mezger *et al.* 1992, Heaman & Parrish 1991, Lovera *et al.* 1997, MacDougall & Harrison 1999) dos sistemas analisados. Em vista da temperatura máxima ( $T_{max} = 820 \pm 30 ^{\circ}\text{C}$ ) experimentada pelas rochas regionais, a datação Rb/Sr – rocha total ( $530 \pm 27$  Ma; Tabela 1, Fig. 5), obtida em diferenciados migmatíticos da Pedreira Mascarenhas (Baixo-Guandu) é interpretada como devida à reorganização mineralógica provocada pelo metamorfismo, implicando na homogeneização isotópica do Sr nos sistemas de rocha total, na escala mesoscópica de afloramento. Pelo contrário, as isócronas internas Rb/Sr, Sm/Nd e as datações Ar/Ar devem refletir idades de resfriamento subsequente, correspondendo ao tempo em que as rochas resfriaram abaixo das respectivas temperaturas de fechamento (Tabela 2). Em conformidade, as médias ponderadas das idades obtidas em granada, plagioclásio e biotita são  $475 \pm 6$  Ma,  $473 \pm 8$  Ma e  $470 \pm 2$  Ma, respectivamente. As amostras de feldspato potássico produziram datações mais jovens e um espectro de idades mais largo, ( $440 - 419$  Ma; Tabela 2), refletindo as complexidades da difusão de Ar na estrutura deste mineral (Lovera *et al.* 1997, MacDougall & Harrison 1999).

Considerando que existem diferenças apreciáveis entre as temperaturas de fechamento dos equilíbrios isotópicos  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  – granada,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  – plagioclásio e  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  – biotita (Tabela 3), é notável que as idades obtidas nesses minerais sejam tão semelhantes. Pelos valores das idades aparentes encontradas, é necessário reconhecer que o tempo decorrido entre o fechamento do sistema Sm/Nd na granada e o isolamento de Ar na biotita deve ter sido necessariamente pequeno. Embora os dados geocronológicos careçam da necessária precisão, se for assumida uma diferença temporal da ordem de 5 Ma entre as idades aparentes Sm/Nd da granada e Ar/Ar da biotita, isto seria consistente com uma taxa de resfriamento linear  $\approx 60 ^{\circ}\text{C/Ma}$ , de  $\sim 600 ^{\circ}\text{C}$  a  $\sim 300 ^{\circ}\text{C}$  (Fig. 7). A  $T < 300 ^{\circ}\text{C}$ , as datações Ar/Ar em feldspato potássico sugerem declínio significativo nas taxas de resfriamento (Fig. 7). Em contraste, a  $T > 600 ^{\circ}\text{C}$ , os dados geocronológicos não subsidiam a história térmica do terreno metamórfico. Contudo, as taxas de resfriamento petrológico, calculadas em condições mais próximas do pico metamórfico ( $550 ^{\circ}\text{C} \leq T \leq 750 ^{\circ}\text{C}$ ; fig. 2), complementam a informação geocronológica de alta temperatura. Os resultados obtidos via modelamento difusivo, granada-biotita, variam de  $\sim 20$  a  $300 ^{\circ}\text{C/Ma}$ , consistentes com os dados geocronológicos. Em particular, o elevado ajuste da regressão linear

$$T_c^{gr-bio} = f[\log(\Theta_{bio}^{\text{bio}})]$$

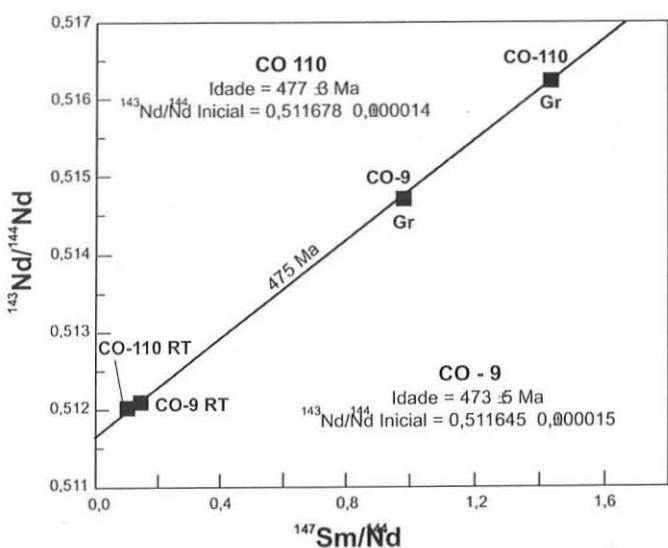
(Fig. 2), indica (Tassinari *et al.* 2004) que as rochas metamórficas resfriaram mais rapidamente ( $> 60 ^{\circ}\text{C/Ma}$ ) durante os primeiros  $100 - 150 ^{\circ}\text{C}$  ( $750 ^{\circ}\text{C} \rightarrow 650 - 600 ^{\circ}\text{C}$ ), como ilustra a figura 7. De acordo com estes dados, o regime termocronológico de alta temperatura sugere, por extrapolação dos resultados geocronológicos a partir de  $600 ^{\circ}\text{C} / 475 \pm 6$  Ma, usando taxas de resfriamento  $60 - 300 ^{\circ}\text{C}/$

*Tabela 1 - Dados analíticos Rb-Sr e Sm-Nd. Análises efetuadas no Centro de Pesquisas Geocronológicas da Universidade de São Paulo, cujos procedimentos constam de Kawashita (1972, modificado) e Sato et. al. (1995).*

| Amostra | Material | Sm (ppm) | Nd (ppm) | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $2\sigma$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | $2\sigma$ |
|---------|----------|----------|----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| CO-9    | r.total  | 8.038    | 32.617   | 0.1490                            | 0.0005    | 0.512106                          | 0.000012  |
| CO-9    | gr       | 5.179    | 3.212    | 0.9751                            | 0.0042    | 0.514664                          | 0.000018  |
| CO-110  | r.total  | 12.635   | 72.063   | 0.1060                            | 0.0004    | 0.512009                          | 0.000013  |
| CO-110  | gr       | 10.378   | 4.370    | 1.4362                            | 0.0056    | 0.516166                          | 0.000015  |
|         |          | Rb (ppm) | Sr (ppm) | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$   | $2\sigma$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$   | $2\sigma$ |
| UT-32   | r.total  | 125.6    | 381.3    | 0.955                             | 0.017     | 0.719099                          | 0.000124  |
| UT-32a  | r.total  | 83.7     | 350.3    | 0.692                             | 0.004     | 0.717137                          | 0.000028  |
| UT-32b  | r.total  | 154.9    | 329.1    | 1.365                             | 0.010     | 0.722158                          | 0.000068  |
| UT-32c  | r.total  | 85.9     | 341.2    | 0.730                             | 0.010     | 0.717639                          | 0.000075  |
| UT-33cl | r.total  | 136.1    | 302.9    | 1.302                             | 0.018     | 0.721910                          | 0.000087  |
| UT-33e  | r.total  | 157.3    | 341.8    | 1.333                             | 0.009     | 0.722071                          | 0.000117  |
| PINH    | r.total  | 168.9    | 140.5    | 3.493                             | 0.046     | 0.746049                          | 0.000022  |
| PINH    | plag     | 64.8     | 202.2    | 0.929                             | 0.005     | 0.728760                          | 0.000058  |

*Tabela 3 - Síntese dos dados geocronológicos associados às respectivas temperaturas de fechamento.*

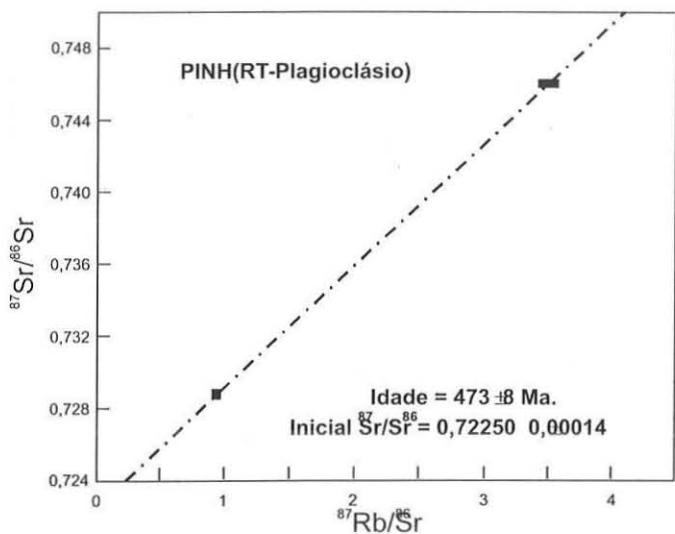
| Amostra | Método | Análise      | Idade Ma | $2\sigma$ | Tc °C     |
|---------|--------|--------------|----------|-----------|-----------|
| MASC    | Rb/Sr  | r.total      | 530      | 27        | 750 - 800 |
| CO-9    | Sm/Nd  | gr - r.total | 473      | 6         | 600       |
| CO-110  | Sm/Nd  | gr - r.total | 477      | 6         | 600       |
| PINH    | Rb/Sr  | plag-r.total | 473      | 8         | 500       |
| CO-57   | Ar/Ar  | biotita      | 471      | 3         | 300       |
| CO-110  | Ar/Ar  | biotita      | 470      | 1         | 300       |
| CO-9    | Ar/Ar  | FK           | 420      | 3         | 200       |
| CO-57   | Ar/Ar  | FK           | 419      | 5         | 200       |



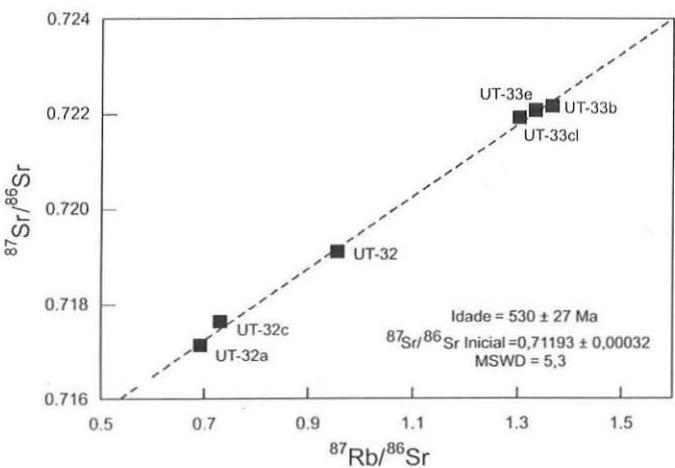
*Figura 3 - Diagrama isocrônico Sm-Nd para o par granada-rocha total das amostras CO-9 e CO-110. Idade calculada com o programa ISOPLOT (Ludwig 1999).*

Ma, que as rochas analisadas permaneceram sob condições de alto grau metamórfico ( $T \sim 750^\circ\text{C}$ ) até  $478-476(\pm 6)$  Ma (Fig. 7).

A integração dos resultados termocronológicos ilustrada na figura 7, mostra que a história térmica das rochas metamórficas na Faixa de Dobramentos Araçuaí é caracterizada por resfriamento

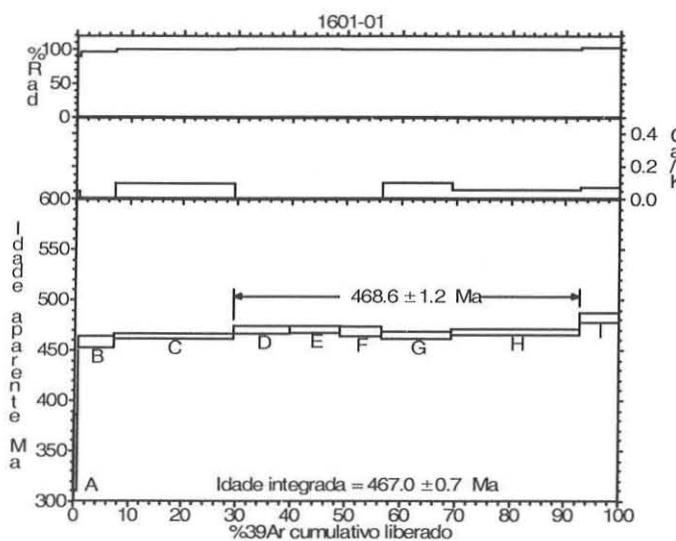


*Figura 4 - Diagrama isocrônico Rb-Sr para o par plagioclásio-rocha total da amostra PINH. Idade calculada com o programa ISOPLOT (Ludwig 1999).*



*Figura 5 - Diagrama isocrônico Rb-Sr em rocha total para as amostras UT-32 e UT-33, da Pedreira Mascarenhas (Baixo Guandu). Idade calculada com o programa ISOPLOT (Ludwig 1999).*

**CO-57 / Biotita**



**CO-110 / Biotita**

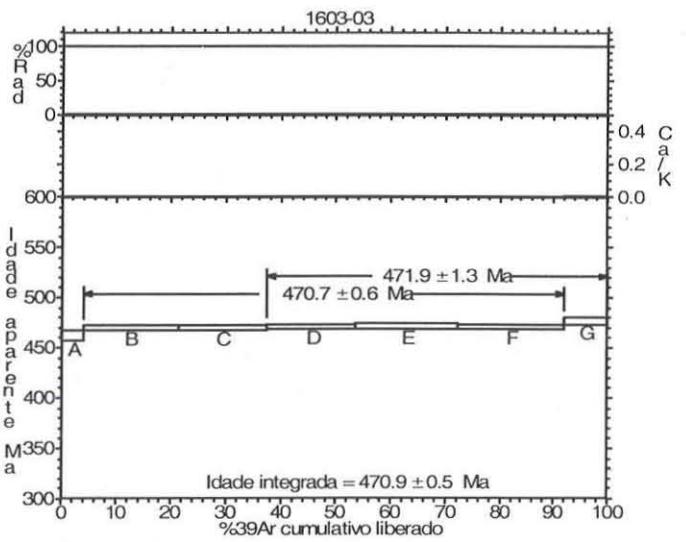
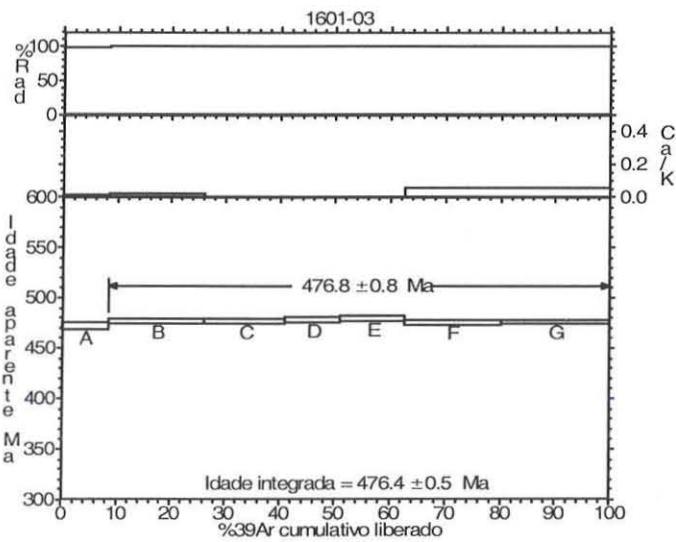
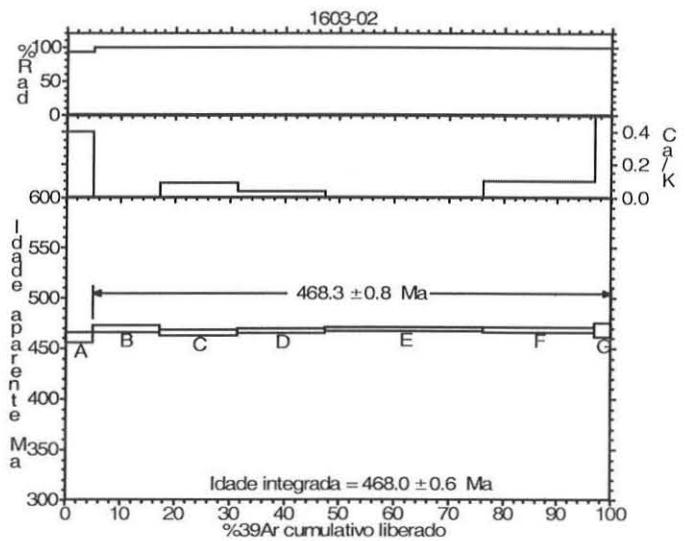
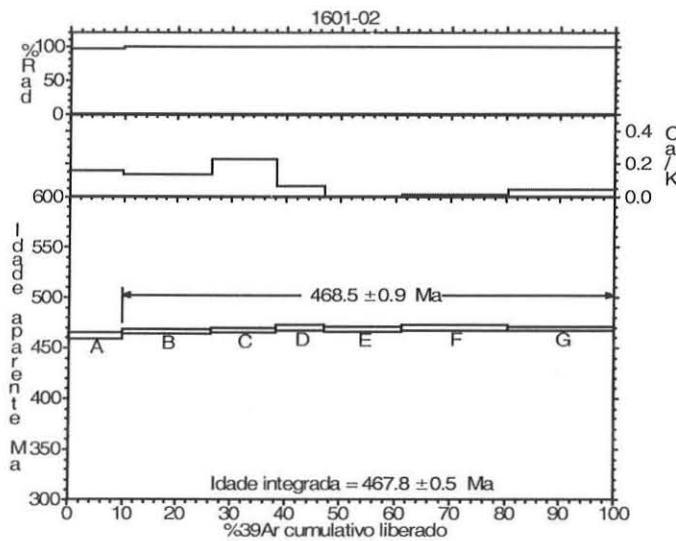
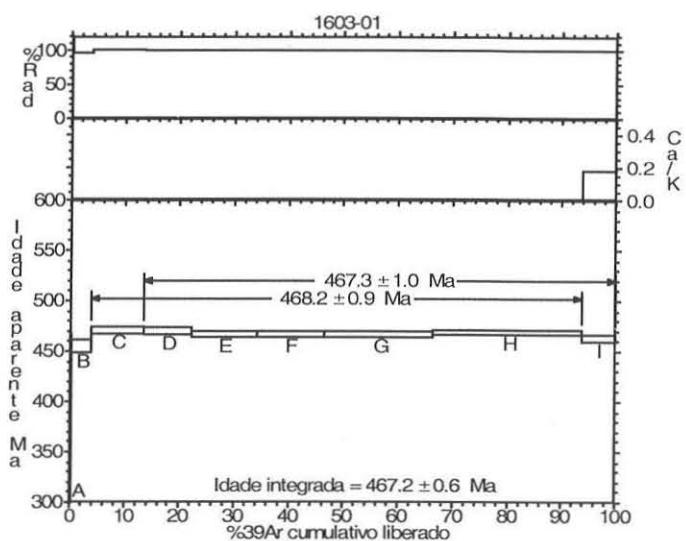
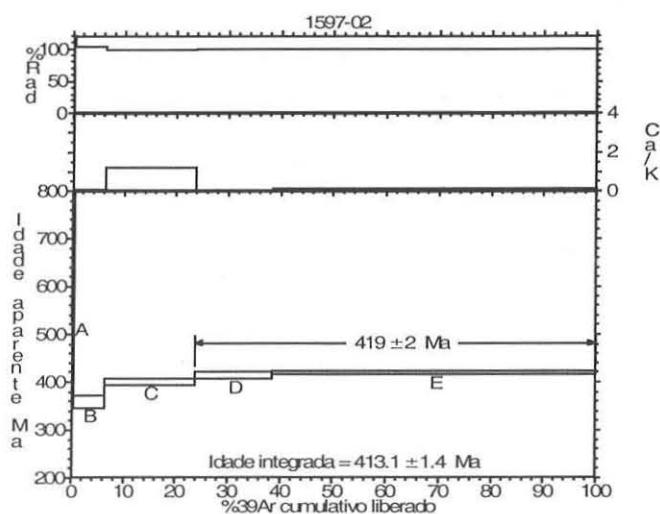


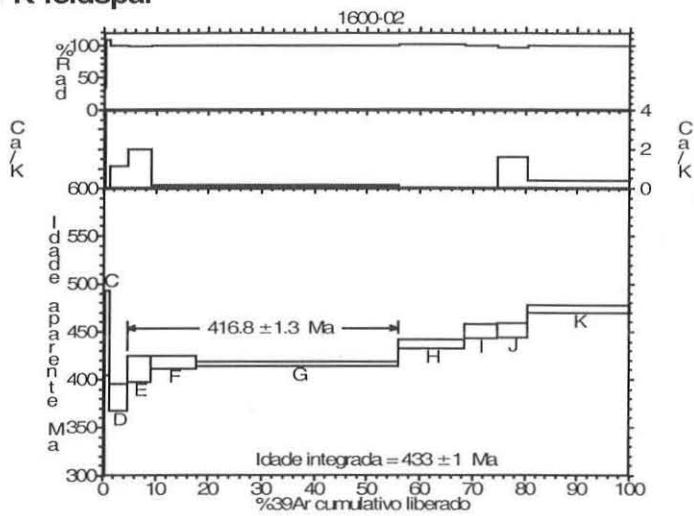
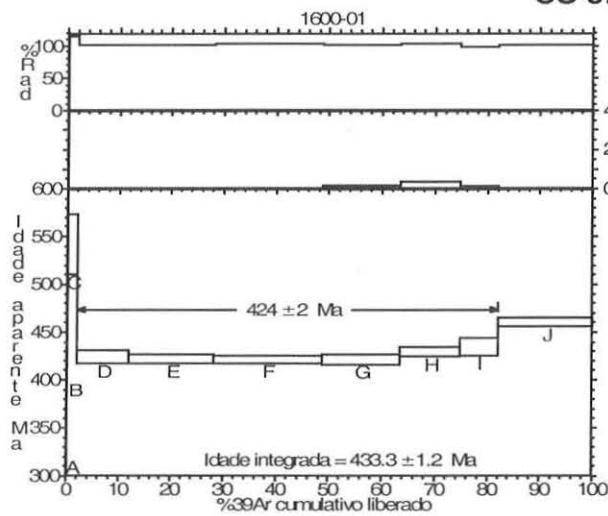
Figura 6 A - Diagramas de espectro de aquecimento por etapas  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ , mostrando idades Plateau Ar-Ar em biotita das amostras CO-57, CO-110.

## CO-9 / K-feldspar



1597-03 - Fusão total  
Idade: 419.08 ± 1.15 Ma

## CO-57 / K-feldspar



## CO-110 / K-feldspar

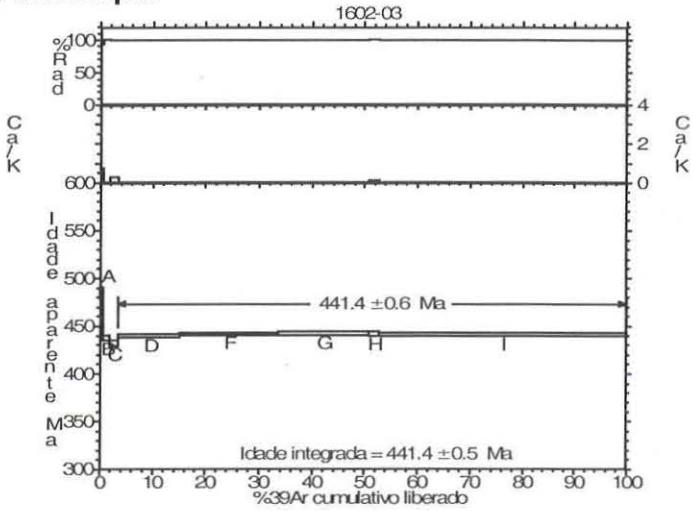
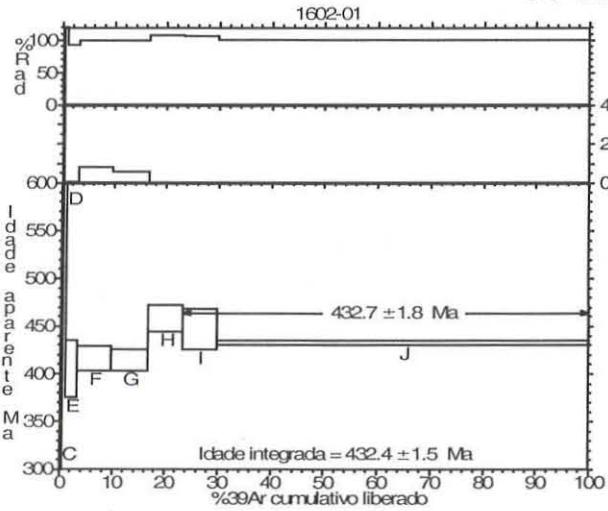


Figura 6 B - Diagramas de espectro de aquecimento por etapas  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ , mostrando idades Plateau Ar-Ar em feldspato potássico das amostras CO-9, CO-57 e CO-110.

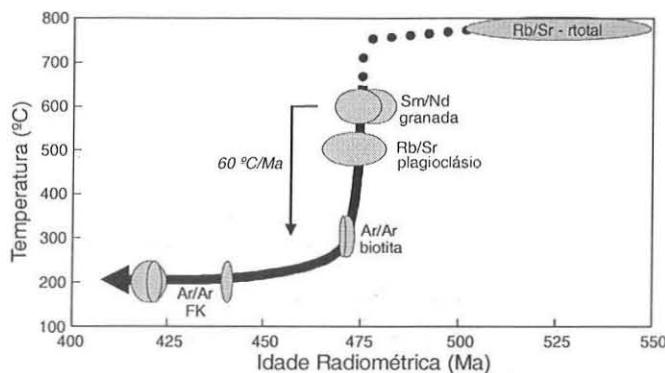


Figura 7 – Temperatura – tempo: história térmica dos gnaisses migmatíticos (vide texto).

marcadamente descontínuo. Após atingir o pico térmico (~ 530 Ma), durante longo tempo (~ 530 → ~ 480 Ma), o terreno metamórfico teria arrefecido muito lentamente, sucedendo-se um curto período ( $\leq 10$  Ma) de resfriamento (~ 750 → ~ 300 °C) mais rápido ( $\geq 60$  °C/Ma), provavelmente refletindo a maior eficiência dos esforços tectônicos durante a exumação. Forte desaceleração nas taxas de resfriamento a  $T < 300$  °C (~ 2 °C/Ma) marca nova descontinuidade na evolução termocronológica, indicando que a dominância do regime térmico advectivo, de origem tectônica, teria cessado há ~ 470 Ma.

**DISCUSSÃO E CONCLUSÕES** As condições máximas de P-T metamórfico a que estiveram submetidos os gnaisses migmatíticos da Faixa de Dobramentos Araçuaí, na área de estudo, são definidas pelos dados geotermobarométricos obtidos neste estudo, a  $6.5 \pm 0.5$  kbar,  $820 \pm 30$  °C. A abundância de leucossomas e texturas de reação indicam que eventos de fusão parcial, desidratante teriam atuado nestas rochas. Em conjunto com o padrão de zoneamento composicional, as observações petrográficas sugerem que a cristalização tardia de cordierita + feldspato potássico + biotita, e a intensa reabsorção de granada, teriam sido induzidas por reações retrogressivas sob alta-temperatura, refletindo a solidificação *in situ* dos líquidos silicatados não segregados. A análise textural indica que as condições de pico metamórfico e fusão parcial teriam evoluído desde síncronos a tardios em relação à deformação responsável pelo desenvolvimento da foliação metamórfica.

As condições de máximo térmico, inferido da geotermometria (820 °C), foram elevadas relativamente à profundidade (20 – 25 km), implicando incremento do gradiente geotérmico em relação à geotérmica continental típica das regiões estáveis. O incremento da produção interna de calor e o relaxamento térmico resultantes de eventual sobre-espessamento tectônico, associado ao metamorfismo, são claramente inadequados para explicar as temperaturas observadas, sendo necessário recorrer a fontes de calor suplementares. De fato, o longo período de incubação sob alta temperatura, inferido da análise termocronológica, requer manutenção de alto fluxo termal numa região crustal relativamente estável, sendo implícito que o orógeno foi significativamente adelgizado durante o tempo decorrido (~ 40 - 70 Ma) entre o evento colisional (sobre-espessamento crustal) e a aquisição da estrutura térmica inerente ao pico metamórfico regional. Os corpos plutônicos da região poderiam constituir, localmente, fonte de calor apropriada. Contudo, o metamorfismo tem distribuição regional, não se justificando atribuir a fonte de calor a nenhuma intrusão

em particular. Neste contexto, é significativo que os padrões geocronológico e geoquímico dos granitóides regionais indiquem incremento progressivo de componente mantélico nesses magmas durante o período 535 – 490 Ma (Ludka *et al.* 1998, Pedrosa Soares & Wiedemann-Leonardos 2000, Martins *et al.* 2004), correspondendo aos estádios magmáticos pós-colisionais da evolução Brasiliana. Os resultados termocronológicos obtidos neste estudo sugerem que as rochas, da Faixa Araçuaí foram submetidas a condições de alto grau metamórfico entre ~ 530 Ma e ~ 480 Ma. Portanto, é possível que atividade magmática mantélica possa ter contribuído para a estrutura térmica observada. Delaminação litosférica e consequente ascensão do manto astenosférico, com acreção magmática na base da crosta (Kay & Kay 1993), são características do re-equilíbrio gravitacional nos estádios pós-colisionais em muitos orógenos. Este mesmo processo poderia ter sido responsável pelo incremento do fluxo calorífico durante o metamorfismo regional na Faixa Araçuaí, induzindo fusão parcial e elevação da geotérmica continental, como requerem os dados geotermobarométricos.

O modelamento da troca Fe-Mg difusiva entre inclusões de biotita e granada hospedeira sugere taxas de resfriamento (750 °C → 550 °C) de ~ 300 - 20 °C/Ma, enquanto que os resultados geocronológicos indicam taxas de resfriamento (600 °C → 300 °C) de ~ 60 °C/Ma. O conjunto de dados obtidos por ambos os métodos é consistente com resfriamento rápido a partir de ~ 480 Ma (< 10 Ma a  $\geq 60$  °C/Ma), a que se seguiu declínio acentuado das taxas de resfriamento entre ~ 470 - 420 Ma (~ 2 °C/Ma). O período de resfriamento rápido corresponde, provavelmente, aos estádios iniciais de reajuste termo-mecânico durante a evolução tardia tectônica do orógeno. Reativação das estruturas ao longo de zonas de cisalhamento é consistente com a rápida exumação dos gnaisses migmatíticos e sua justaposição às unidades cratonizadas, mais frias, refletindo o processo de colapso orogênico (Pedrosa Soares & Wiedemann-Leonardos 2000, Pedrosa Soares *et al.* 2001, Whittington *et al.* 2001). Finalmente, à medida que cessaram os esforços tectônicos tangenciais, a dissipação da instabilidade termo-gravitacional foi condicionada por transferência de calor conductiva e compensação isostática, como indica o declínio observado nas taxas de resfriamento.

Excedendo a problemática regional, a Faixa de Dobramentos Ribeira/Araçuaí é paradigmática na discussão dos conceitos da evolução secular do regime térmico de cadeias orogênicas e evidenciando a complexidade do problema. Dunlap (2000) sugere a existência de uma correlação inversa entre as idades de eventos orogênicos e as respectivas taxas de resfriamento. A ideia é simplesse baseia-se na premissa de que nas cadeias antigas ( $\pm$  compensadas isostaticamente) as unidades metamórficas profundas permanecem mais tempo sob condições P-T suficientemente próximas das temperaturas de fechamento isotópico, induzindo idades progressivamente mais recentes e, por isso, sugerindo taxas de resfriamento mais lentas. Contudo, investigações termocronológicas realizadas em vários segmentos da Faixa de Dobramentos Ribeira, com emprego dos mesmos métodos analíticos mostram um padrão bem mais complexo. No segmento São Sebastião-Bertioga, Dias Neto *et al.* (2000) demonstram que os gnaisses migmatíticos do Complexo Costeiro no Estado de São Paulo, atingiram condições de pico metamórfico na fácie granulito: (750 °C, 5-6 kbar) há  $571 \pm 10$  Ma (U/Pb-zircão), tendo posteriormente evoluído com uma taxa de resfriamento de ~ 3 °C/Ma, até ~ 400 °C há  $471 \pm 8$  Ma (Rb/Sr: plag-bio).

No presente estudo sobre o segmento setentrional da Faixa

de Dobramentos Ribeira (Faixa Araçuaí), evidenciam-se taxas de resfriamento que são claramente superiores ( $\geq 60^{\circ}\text{C/Ma}$ ), em rochas submetidas ao mesmo tipo de metamorfismo. Neste contexto, é particularmente significativo que a história térmica de baixa temperatura ( $< 400^{\circ}\text{C}$ ) no Complexo Costeiro (Dias Neto, comunicação pessoal, 2002) indique aceleração da exumação no intervalo 480 - 470 Ma, coincidindo com o climax tectonometamórfico a norte, o que é difícil de conciliar com a generalização das bases conceituais da hipótese Dunlap (2000). São, óbviamente, necessários estudos complementares detalhados em diferentes orógenos, com um espectro de idades apropriado, para caracterizar eventuais variações seculares no regime termotectônico.

**Agradecimentos** Publicação elaborada durante a licença sabática de JMunhá no Instituto de Geociências da USP com suporte da FAPESP (Processo 03/00027-4). É uma contribuição dos projetos de investigação PETROLOG (FCT-Portugal; POCTI/FEDER), *Termocronologia em Modelação Tectonometamórfica* (Cooperação Científica Internacional Brasil/Portugal- CAPES/ICCTI 042/99) e Zona Orogênica Brasiliiana no sudeste do Brasil: Idades e Evolução Geodinâmica (Processo FAPESP 03-00500-0) e ao Projeto (PRONEX nº 41.96.0899.00) Geologia isotópica Aplicada na América do Sul. Os autores agradecem aos técnicos do CPGeo-IGC USP, em especial ao Artur Onoe pelo suporte analítico e aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

## Referências

- Berman R.G. 1988. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ . *J. Petrology*, **29**:445-522.
- Berman R.G. 1990. Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. *Am. Mineral.*, **75**:328-344.
- Berman R.G. 1991. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications. *Can. Mineral.*, **29**:833-855.
- Berman R.G. & Aranovich I.Y. 1996. Optimized standard state and solution properties of minerals. I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet and ilmenite in the system  $\text{FeO}-\text{MgO}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$ . *Contrib. Mineral. Petrol.*, **126**:1-24.
- Chakraborty S. & Ganguly J. 1992. Cation diffusion in aluminosilicate garnets – experimental determination in spessartine-almandine diffusion couples, evaluation of effective binary diffusion coefficients, and applications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **111**:74-86.
- Dias Neto C.M., Munhá J., Palácios T., Tassinari C.C.G., Ribeiro A. 2000. Tectonothermal evolution of the Costeiro Complex (São Sebastião – Bertioga; SE Brazil). i: petrological and geochronological constraints. In: IUGS. 31<sup>st</sup> Intern. Geol. Congress (Rio-2000), CDROM abstracts.
- Dodson M.H. 1973. Closure temperature in cooling geological and petrological systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **40**:259-274.
- Dunlap W.J. 2000. Nature's diffusion experiment: the cooling-rate cooling-age correlation. *Geology*, **28**:139-142.
- Ehlers K., Powell R., Stuwe K. 1994. The determination of cooling rate histories from garnet-biotite equilibrium. *Am. Min.*, **79**:737-744.
- Ferry J.M. & Spear F.S. 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **66**:113-117.
- Heaman L. & Parrish R.R. 1991. U-Pb geochronology of accessory minerals. In: *Applications of Radiogenic Isotope Systems in Problems in Geology*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook 19, 59-102.
- Kawashita K. 1972. *O método Rb-Sr em rochas sedimentares, aplicação para as Bacias do Paraná e Amazonas*. Tese de Doutoramento, IG-USP, 111 p.
- Lasaga A.G. 1979. Multicomponent exchange and diffusion in silicates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**:455-469.
- Lasaga A.G., Richardson S.M., Holland H.D. 1977. The mathematics of cation diffusion and exchange between silicate minerals during retrograde metamorphism. In: S.K. Saxena & S. Battacharji (eds.) *Energetics of Geological Processes* (Springer), 354-387.
- Lovera O.M., Grove M., Harrison T.M., Mahon K.I. 1997. Systematic analysis of K feldspar 40Ar/39Ar step heating results: I. significance of activation energy determinations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**:3171-3192.
- Ludwig K. 1999. Isoplot/Ex. Berkeley Geochronological Center. Special Publication 1.
- McDougall I. & Harrison T.M. 1999. *Geochronology and Thermochronology by the 40Ar/39Ar method*. Oxford Univ. Press. London, 287 pp.
- Pedrosa Soares A.C. & Wiedemann-Leonardos C.M. 2000. Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil, In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds) – *Tectonic Evolution of South America* (31<sup>st</sup> International Geological Congress), 265-285.
- Pedrosa Soares A.C., Noce, C.M., Wiedemann-Leonardos C.M., Pinto C.P. 2001. The Araçuaí – West Congo Orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Prec. Res.*, **110** (1-4): 307-323.
- Robinson P. 1991. The eye of the petrographer, the mind of the petrologist. *Am. Mineral.*, **76**:1781-1810.
- Sato K., Tassinari C. C.G., Kawashita K., Petronilho L. 1995. O método geocronológico Sm-Nd no IG-USP e suas aplicações. *Anais Acad. Bras. de Ciências*, **67**(3): 313-336.
- Siga Jr O., Teixeira W., Cordani U.G., Kawashita K., Delhal J. 1982. O padrão geocronológico das rochas de alto grau na parte setentrional da Faixa Ribeira, a norte do Rio de Janeiro, Brasil. In: Congresso Latino Americano de Geologia, 5<sup>o</sup>, (Argentina), Actas, 349-369.
- Spear F.S., Kohn M.J., Cheney J.T. 1999. P-T paths from anatetic pelites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**:17-32.
- Spear F.S. & Parrish R.R. 1996. Petrology and cooling rates of the

Valhalla Complex, British Columbia, Canada. *J. Petrology*, 37:733-765.

Thompson A.B. 1982. Dehydration melting of pelitic rocks during anatexis. *Am. J. Sci.*, 282:1567-1595.

Manuscrito A-1510

Recebido em

Revisão dos autores em

Revisão aceita em

*Tabela 2 - Dados analíticos Ar-Ar. Análises efetuadas no Centro de Pesquisas Geocronológicas da Universidade de São Paulo, cujos procedimentos de análises constam de Vasconcelos et. al. (2002).*

| Amostra | Material  | Nº Lab                      | Laser<br>(W) | 40/39     | 38/39   | 37/39  | 36/39   | 40*/39    | %Rad  | Ar40<br>(mols) | Idade<br>(Ma) | ± (1s)<br>(Ma) |     |
|---------|-----------|-----------------------------|--------------|-----------|---------|--------|---------|-----------|-------|----------------|---------------|----------------|-----|
| CO-110  | biotita   | 1603-01A                    | 0,3          | 30,7574   | -0,0640 | 0,0000 | -0,0243 | 37,9243   | 123,3 | 2,06E-16       | 360,89        | 53,18          |     |
|         |           | 1603-01B                    | 0,6          | 51,0145   | 0,0178  | 0,0000 | 0,0062  | 49,1733   | 96,4  | 8,17E-15       | 455,39        | 3,08           |     |
|         |           | 1603-01C                    | 0,9          | 50,6572   | 0,0128  | 0,0000 | -0,0014 | 51,0798   | 100,8 | 2,08E-14       | 470,92        | 1,68           |     |
|         |           | 1603-01D                    | 1,2          | 51,0303   | 0,0147  | 0,0000 | 0,0002  | 50,9568   | 99,9  | 1,97E-14       | 469,92        | 1,79           |     |
|         |           | 1603-01E                    | 1,6          | 50,6022   | 0,0146  | 0,0000 | 0,0001  | 50,5732   | 99,9  | 2,60E-14       | 466,81        | 1,60           |     |
|         |           | 1603-01F                    | 2,0          | 50,7155   | 0,0145  | 0,0000 | 0,0004  | 50,6066   | 99,8  | 2,68E-14       | 467,08        | 1,43           |     |
|         |           | 1603-01G                    | 2,6          | 50,7777   | 0,0154  | 0,0000 | 0,0005  | 50,6159   | 99,7  | 4,38E-14       | 467,15        | 1,37           |     |
|         |           | 1603-01H                    | 3,8          | 50,8059   | 0,0150  | 0,0000 | 0,0002  | 50,7507   | 99,9  | 6,02E-14       | 468,25        | 1,29           |     |
|         |           | 1603-01I                    | 5,2          | 50,1685   | 0,0151  | 0,0911 | 0,0003  | 50,0916   | 99,8  | 1,36E-14       | 462,89        | 1,99           |     |
|         |           | 1603-02A                    | 0,6          | 53,3951   | 0,0171  | 0,2054 | 0,0120  | 49,8631   | 93,4  | 1,26E-14       | 461,02        | 2,82           |     |
|         |           | 1603-02B                    | 1,0          | 51,5237   | 0,0147  | 0,0000 | 0,0019  | 50,9543   | 98,9  | 2,95E-14       | 469,90        | 1,68           |     |
|         |           | 1603-02C                    | 1,6          | 50,8201   | 0,0151  | 0,0434 | 0,0012  | 50,4685   | 99,3  | 3,42E-14       | 465,96        | 1,37           |     |
|         |           | 1603-02D                    | 2,2          | 50,9076   | 0,0147  | 0,0197 | 0,0007  | 50,6936   | 99,6  | 3,83E-14       | 467,79        | 1,24           |     |
|         |           | 1603-02E                    | 2,9          | 50,9431   | 0,0143  | 0,0000 | 0,0002  | 50,8734   | 99,9  | 6,97E-14       | 469,25        | 0,95           |     |
|         |           | 1603-02F                    | 3,6          | 50,8897   | 0,0146  | 0,0506 | 0,0005  | 50,7558   | 99,7  | 4,95E-14       | 468,29        | 1,11           |     |
|         |           | 1603-02G                    | 5,2          | 50,7583   | 0,0130  | 0,3176 | 0,0001  | 50,7500   | 100,0 | 7,47E-15       | 468,25        | 3,56           |     |
|         |           | 1603-03A                    | 0,6          | 50,7233   | 0,0158  | 0,0000 | 0,0024  | 50,0001   | 98,6  | 1,06E-14       | 462,14        | 2,45           |     |
|         |           | 1603-03B                    | 1,0          | 51,0169   | 0,0142  | 0,0000 | 0,0002  | 50,9562   | 99,9  | 4,61E-14       | 469,92        | 1,11           |     |
|         |           | 1603-03C                    | 1,6          | 51,1767   | 0,0152  | 0,0000 | 0,0006  | 50,9950   | 99,6  | 4,23E-14       | 470,24        | 1,16           |     |
|         |           | 1603-03D                    | 2,2          | 50,9930   | 0,0145  | 0,0000 | -0,0003 | 51,0913   | 100,2 | 4,30E-14       | 471,02        | 1,18           |     |
|         |           | 1603-03E                    | 2,8          | 51,1708   | 0,0145  | 0,0000 | 0,0000  | 51,1799   | 100,0 | 4,93E-14       | 471,74        | 1,30           |     |
|         |           | 1603-03F                    | 3,6          | 51,0912   | 0,0146  | 0,0000 | 0,0001  | 51,0708   | 100,0 | 5,24E-14       | 470,85        | 1,16           |     |
|         |           | 1603-03G                    | 5,2          | 52,0405   | 0,0152  | 0,0054 | 0,0009  | 51,7754   | 99,5  | 2,13E-14       | 476,56        | 1,73           |     |
|         |           | Idade média ponderada (2s): |              |           |         |        |         |           |       |                |               | 469,2          | 1,3 |
| CO-9    | feldspato | 1597-01A                    | 0,4          | 1121,9160 | -0,4632 | 0,0000 | 0,4915  | 976,6198  | 87,0  | 5,34E-16       | -             | -              |     |
|         |           | 1597-01B                    | 0,7          | 5895,3960 | -5,8327 | 0,0000 | -0,9000 | 6160,7230 | 104,5 | 7,78E-16       | -             | -              |     |
|         |           | 1597-01C                    | 1,1          | 113,4421  | -0,2158 | 0,0000 | -0,1535 | 158,7675  | 140,0 | 2,82E-16       | 1183,50       | 131,20         |     |
|         |           | 1597-01D                    | 1,5          | 54,2559   | -0,0251 | 0,0000 | 0,0756  | 31,9085   | 58,8  | 3,04E-16       | 308,24        | 68,47          |     |
|         |           | 1597-01E                    | 2,0          | 53,5123   | -0,0003 | 0,0000 | 0,0712  | 32,4714   | 60,7  | 2,76E-16       | 313,23        | 68,30          |     |
|         |           | 1597-01F                    | 2,6          | 52,3888   | -0,1478 | 0,0000 | -0,0974 | 81,1658   | 154,9 | 2,90E-16       | 699,89        | 56,86          |     |
|         |           | 1597-01G                    | 3,3          | 46,3848   | -0,0270 | 1,6303 | 0,0147  | 42,2206   | 90,9  | 3,06E-16       | 397,57        | 46,83          |     |
|         |           | 1597-01H                    | 4,1          | 47,6679   | -0,0550 | 0,0000 | -0,0609 | 65,6648   | 137,8 | 3,04E-16       | 585,55        | 47,72          |     |
|         |           | 1597-01I                    | 4,8          | 61,9551   | -0,1695 | 0,0000 | -0,1789 | 114,7921  | 185,3 | 2,24E-16       | 925,50        | 74,29          |     |
|         |           | 1597-01J                    | 5,2          | 48,3458   | 0,0167  | 0,9780 | 0,0167  | 43,5088   | 89,9  | 1,58E-15       | 408,42        | 10,83          |     |
|         |           | 1597-02A                    | 1,1          | 47,7440   | -0,0620 | 0,0000 | -0,0953 | 75,9087   | 159,0 | 1,83E-16       | 661,92        | 66,99          |     |
|         |           | 1597-02B                    | 2,0          | 36,7863   | 0,0034  | 0,0153 | -0,0031 | 37,7084   | 102,5 | 1,68E-15       | 359,02        | 6,07           |     |
|         |           | 1597-02C                    | 3,5          | 43,3893   | 0,0139  | 0,6183 | 0,0035  | 42,4300   | 97,8  | 5,75E-15       | 399,33        | 3,34           |     |
|         |           | 1597-02D                    | 5,0          | 44,5533   | 0,0103  | 0,0000 | 0,0010  | 44,2659   | 99,4  | 5,04E-15       | 414,77        | 3,61           |     |
|         |           | 1597-02E                    | 5,2          | 44,7970   | 0,0112  | 0,0677 | -0,0001 | 44,8467   | 100,1 | 2,12E-14       | 419,62        | 1,63           |     |
|         |           | 1597-03                     | 5,2          | 44,8639   | 0,0117  | 0,0029 | 0,0003  | 44,7820   | 99,8  | 2,63E-14       | 419,08        | 1,15           |     |
|         |           | Idade média ponderada (2s): |              |           |         |        |         |           |       |                |               | 419            | 2   |

Tabela 3 - (Continuação).

| Amostra                     | Material  | Nº Lab                      | Laser<br>(W) | 40/39   | 38/39   | 37/39   | 36/39   | 40*/39   | %Rad  | Ar40<br>(mols) | Idade<br>(Ma) | ± (1s)<br>(Ma) |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------|--------------|---------|---------|---------|---------|----------|-------|----------------|---------------|----------------|
| CO-57                       | feldspato | 1600-01A                    | 0,4          | 78,2974 | -0,1674 | 10,5849 | 0,3433  | -22,4988 | -     | -              | -             | -              |
|                             |           | 1600-01B                    | 0,7          | 40,0156 | -0,1527 | 0,0000  | -0,1226 | 76,2217  | 190,5 | 8,74E-17       | 664,20        | 133,29         |
|                             |           | 1600-01C                    | 1,1          | 52,3565 | -0,0078 | 0,0000  | -0,0260 | 60,0383  | 114,7 | 1,20E-15       | 542,19        | 15,67          |
|                             |           | 1600-01D                    | 1,5          | 45,0893 | 0,0128  | 0,0000  | -0,0010 | 45,3945  | 100,7 | 5,89E-15       | 424,19        | 3,36           |
|                             |           | 1600-01E                    | 2,0          | 44,7989 | 0,0099  | 0,0117  | -0,0013 | 45,1938  | 100,9 | 9,57E-15       | 422,52        | 2,28           |
|                             |           | 1600-01F                    | 2,6          | 43,9904 | 0,0093  | 0,0043  | -0,0038 | 45,1128  | 102,6 | 1,18E-14       | 421,84        | 2,01           |
|                             |           | 1600-01G                    | 3,3          | 44,8647 | 0,0107  | 0,0866  | -0,0006 | 45,0576  | 100,4 | 8,59E-15       | 421,38        | 2,54           |
|                             |           | 1600-01H                    | 4,1          | 45,0635 | 0,0082  | 0,1707  | -0,0033 | 46,0614  | 102,2 | 6,84E-15       | 429,74        | 2,84           |
|                             |           | 1600-01I                    | 4,8          | 47,7808 | 0,0159  | 0,0531  | 0,0038  | 46,6690  | 97,7  | 4,20E-15       | 434,77        | 4,62           |
|                             |           | 1600-01J                    | 5,2          | 48,9931 | 0,0094  | 0,0009  | -0,0028 | 49,8143  | 101,7 | 1,15E-14       | 460,63        | 2,43           |
|                             |           | 1600-02A                    | 1,0          | 32,4715 | 0,2296  | 7,7777  | 0,1723  | -17,8943 | -     | -              | -             | -              |
|                             |           | 1600-02B                    | 1,6          | 45,7958 | 0,1711  | 5,9254  | 0,1028  | 15,9713  | 34,7  | 1,18E-16       | 160,86        | 132,36         |
|                             |           | 1600-02C                    | 2,2          | 44,5511 | -0,0051 | 0,0000  | -0,0127 | 48,3129  | 108,4 | 6,34E-16       | 448,33        | 22,06          |
|                             |           | 1600-02D                    | 2,8          | 40,3167 | 0,0052  | 0,5859  | 0,0002  | 40,3221  | 100,0 | 2,20E-15       | 381,45        | 7,00           |
|                             |           | 1600-02E                    | 3,5          | 45,0508 | 0,0143  | 1,0078  | 0,0044  | 43,8578  | 97,3  | 3,16E-15       | 411,35        | 6,79           |
|                             |           | 1600-02F                    | 4,8          | 44,5742 | 0,0104  | 0,0943  | -0,0002 | 44,6461  | 100,2 | 6,21E-15       | 417,95        | 3,06           |
|                             |           | 1600-02G                    | 5,2          | 44,7200 | 0,0124  | 0,0785  | 0,0007  | 44,5082  | 99,5  | 2,74E-14       | 416,80        | 1,18           |
|                             |           | 1600-02H                    | 2,5          | 46,6256 | 0,0124  | 0,0062  | -0,0013 | 46,9996  | 100,8 | 9,28E-15       | 437,51        | 2,40           |
|                             |           | 1600-02I                    | 3,0          | 48,6268 | 0,0125  | 0,0000  | 0,0001  | 48,5855  | 99,9  | 4,75E-15       | 450,57        | 3,99           |
|                             |           | 1600-02J                    | 3,8          | 50,3931 | 0,0192  | 0,8069  | 0,0058  | 48,7703  | 96,7  | 4,80E-15       | 452,09        | 3,89           |
|                             |           | 1600-02K                    | 6,0          | 52,1176 | 0,0135  | 0,1914  | 0,0025  | 51,4019  | 98,6  | 1,63E-14       | 473,53        | 2,02           |
|                             |           | 1600-03A                    | 1,0          | 46,9228 | -0,0151 | 0,0000  | -0,0114 | 50,2940  | 107,2 | 7,77E-16       | 464,54        | 17,55          |
|                             |           | 1600-03B                    | 1,6          | 42,7236 | 0,0143  | 0,3182  | 0,0031  | 41,8411  | 97,9  | 6,45E-15       | 394,36        | 2,97           |
|                             |           | 1600-03C                    | 2,2          | 42,6265 | 0,0132  | 0,1121  | 0,0001  | 42,6050  | 99,9  | 8,70E-15       | 400,81        | 2,23           |
|                             |           | 1600-03D                    | 2,7          | 42,4352 | 0,0107  | 0,0000  | -0,0023 | 43,1077  | 101,6 | 5,87E-15       | 405,05        | 3,39           |
|                             |           | 1600-03E                    | 3,3          | 43,5973 | 0,0184  | 0,6098  | 0,0033  | 42,6896  | 97,9  | 3,81E-15       | 401,52        | 5,06           |
|                             |           | 1600-03F                    | 4,8          | 43,7744 | 0,0148  | 0,3486  | 0,0007  | 43,5926  | 99,6  | 3,25E-15       | 409,12        | 5,38           |
|                             |           | 1600-03G                    | 5,2          | 49,0469 | 0,0149  | 0,1912  | 0,0028  | 48,2389  | 98,3  | 5,36E-15       | 447,72        | 3,70           |
|                             |           | 1600-03H                    | 4,0          | 52,5434 | 0,0111  | 0,3881  | -0,0007 | 52,7992  | 100,5 | 8,56E-15       | 484,82        | 2,72           |
|                             |           | 1600-03I                    | 6,0          | 50,2424 | 0,0119  | 0,0000  | 0,0000  | 50,2521  | 100,0 | 3,12E-13       | 464,19        | 0,90           |
| Idade média ponderada (2s): |           |                             |              |         |         |         |         |          |       |                | 419           | 3              |
| CO-110                      | feldspato | 1602-01A                    | 0,4          | 62,7333 | -0,4577 | 5,0073  | 0,1956  | 5,2831   | 8,4   | 4,40E-17       | 54,81         | 672,61         |
|                             |           | 1602-01B                    | 0,7          | 66,4486 | 0,1445  | 10,2292 | 0,1213  | 31,6502  | 47,3  | 1,21E-16       | 305,95        | 227,14         |
|                             |           | 1602-01C                    | 1,1          | 51,0349 | 0,1293  | 12,7428 | 0,2050  | -8,5915  | -     | -              | -             | -              |
|                             |           | 1602-01D                    | 1,5          | 62,5302 | -0,0706 | 0,0000  | -0,0713 | 83,5967  | 133,7 | 3,86E-16       | 717,18        | 48,90          |
|                             |           | 1602-01E                    | 2,0          | 46,9323 | 0,0203  | 0,0246  | 0,0128  | 43,1640  | 92,0  | 1,15E-15       | 405,52        | 14,79          |
|                             |           | 1602-01F                    | 2,6          | 44,8675 | 0,0095  | 0,3998  | 0,0015  | 44,4612  | 99,1  | 3,22E-15       | 416,40        | 6,43           |
|                             |           | 1602-01G                    | 3,2          | 44,8126 | 0,0102  | 0,3019  | 0,0019  | 44,2776  | 98,8  | 3,62E-15       | 414,87        | 5,60           |
|                             |           | 1602-01H                    | 4,0          | 45,7690 | -0,0015 | 0,0000  | -0,0127 | 49,5231  | 108,2 | 3,33E-15       | 458,25        | 6,79           |
|                             |           | 1602-01I                    | 4,8          | 45,1257 | 0,0033  | 0,0000  | -0,0102 | 48,1329  | 106,7 | 3,36E-15       | 446,85        | 10,64          |
|                             |           | 1602-01J                    | 5,2          | 46,1418 | 0,0103  | 0,0000  | -0,0009 | 46,3952  | 100,6 | 3,64E-14       | 432,50        | 1,11           |
|                             |           | 1602-02A                    | 2,5          | 98,7876 | 0,0441  | 0,0000  | 0,1670  | 49,4265  | 50,0  | 2,46E-15       | 457,46        | 25,77          |
|                             |           | 1602-02B                    | 3,8          | 46,6482 | 0,0179  | 0,0995  | 0,0051  | 45,1400  | 96,8  | 1,22E-15       | 422,07        | 12,46          |
|                             |           | 1602-02C                    | 4,8          | 49,1274 | -0,0116 | 0,0000  | -0,0194 | 54,8511  | 111,7 | 6,98E-16       | 501,27        | 21,06          |
| CO-110                      | feldspato | 1602-02D                    | 5,1          | 46,2698 | 0,0594  | 3,6740  | 0,0488  | 32,2259  | 69,5  | 3,68E-16       | 311,06        | 40,40          |
|                             |           | 1602-02E                    | 5,2          | 46,6360 | 0,0092  | 0,0000  | -0,0041 | 47,8374  | 102,6 | 1,49E-15       | 444,42        | 8,88           |
|                             |           | 1602-03A                    | 2,0          | 56,0838 | 0,0162  | 0,3930  | 0,0112  | 52,8193  | 94,2  | 9,78E-15       | 484,98        | 3,02           |
|                             |           | 1602-03B                    | 3,2          | 46,7454 | 0,0109  | 0,0000  | -0,0009 | 47,0124  | 100,6 | 2,05E-14       | 437,61        | 1,39           |
|                             |           | 1602-03C                    | 4,8          | 46,3021 | 0,0120  | 0,1481  | -0,0001 | 46,3508  | 100,1 | 2,68E-14       | 432,14        | 1,38           |
|                             |           | 1602-03D                    | 2,5          | 47,2670 | 0,0120  | 0,0000  | 0,0000  | 47,2684  | 100,0 | 1,85E-13       | 439,73        | 0,90           |
|                             |           | 1602-03F                    | 3,0          | 47,5175 | 0,0120  | 0,0000  | 0,0001  | 47,4825  | 99,9  | 3,00E-13       | 441,50        | 0,71           |
|                             |           | 1602-03G                    | 4,2          | 47,5793 | 0,0121  | 0,0061  | 0,0001  | 47,5643  | 100,0 | 2,77E-13       | 442,17        | 0,81           |
|                             |           | 1602-03H                    | 5,0          | 47,3790 | 0,0118  | 0,0474  | -0,0007 | 47,5767  | 100,4 | 3,32E-14       | 442,27        | 1,17           |
|                             |           | 1602-03I                    | 6,0          | 47,4856 | 0,0119  | 0,0015  | 0,0001  | 47,4687  | 100,0 | 7,66E-13       | 441,38        | 0,82           |
|                             |           | Idade média ponderada (2s): |              |         |         |         |         |          |       |                |               |                |
|                             |           | 2                           |              |         |         |         |         |          |       |                |               |                |

Tabela 3 - (Continuação).

| Amostra                     | Material | Nº Lab   | Laser<br>(W) | 40/39   | 38/39  | 37/39  | 36/39   | 40*/39  | %Rad  | Ar40<br>(mols) | Idade<br>(Ma) | ± (1s)<br>(Ma) |   |
|-----------------------------|----------|----------|--------------|---------|--------|--------|---------|---------|-------|----------------|---------------|----------------|---|
| CO-57                       | biotita  | 1601-01A | 0,3          | 40,7417 | 0,0257 | 0,0253 | 0,0146  | 36,4378 | 89,4  | 7,95E-16       | 348,02        | 18,76          |   |
|                             |          | 1601-01B | 0,6          | 51,5685 | 0,0144 | 0,0000 | 0,0070  | 49,5055 | 96,0  | 1,00E-14       | 458,10        | 2,97           |   |
|                             |          | 1601-01C | 0,9          | 50,7004 | 0,0137 | 0,0464 | 0,0018  | 50,1811 | 99,0  | 3,36E-14       | 463,62        | 1,23           |   |
|                             |          | 1601-01D | 1,2          | 50,6895 | 0,0119 | 0,0000 | -0,0012 | 51,0468 | 100,7 | 1,55E-14       | 470,66        | 2,18           |   |
|                             |          | 1601-01E | 1,6          | 50,5174 | 0,0118 | 0,0000 | -0,0019 | 51,0665 | 101,1 | 1,37E-14       | 470,81        | 1,58           |   |
|                             |          | 1601-01F | 2,0          | 50,7454 | 0,0118 | 0,0000 | -0,0001 | 50,7757 | 100,1 | 1,17E-14       | 468,45        | 2,47           |   |
|                             |          | 1601-01G | 2,6          | 50,4502 | 0,0126 | 0,0495 | 0,0001  | 50,4288 | 100,0 | 1,90E-14       | 465,63        | 1,75           |   |
|                             |          | 1601-01H | 3,8          | 50,8798 | 0,0131 | 0,0305 | 0,0005  | 50,7282 | 99,7  | 3,57E-14       | 468,07        | 1,25           |   |
|                             |          | 1601-01I | 5,2          | 51,4089 | 0,0103 | 0,0366 | -0,0039 | 52,5507 | 102,2 | 1,11E-14       | 482,82        | 2,41           |   |
|                             |          | 1601-02A | 0,6          | 51,9763 | 0,0143 | 0,0788 | 0,0067  | 50,0109 | 96,2  | 3,18E-14       | 462,23        | 1,52           |   |
|                             |          | 1601-02B | 0,9          | 50,7797 | 0,0126 | 0,0677 | 0,0012  | 50,4396 | 99,3  | 5,26E-14       | 465,72        | 1,19           |   |
|                             |          | 1601-02C | 1,3          | 50,8216 | 0,0124 | 0,1178 | 0,0008  | 50,6097 | 99,6  | 3,80E-14       | 467,10        | 1,27           |   |
|                             |          | 1601-02D | 1,8          | 51,1551 | 0,0119 | 0,0318 | 0,0005  | 51,0153 | 99,7  | 2,82E-14       | 470,40        | 1,29           |   |
|                             |          | 1601-02E | 2,8          | 50,9299 | 0,0120 | 0,0000 | 0,0005  | 50,7826 | 99,7  | 4,48E-14       | 468,51        | 1,33           |   |
|                             |          | 1601-02F | 3,6          | 51,2802 | 0,0132 | 0,0086 | 0,0009  | 51,0016 | 99,5  | 6,21E-14       | 470,29        | 1,23           |   |
|                             |          | 1601-02G | 5,2          | 50,9827 | 0,0123 | 0,0225 | 0,0006  | 50,8188 | 99,7  | 6,20E-14       | 468,80        | 0,98           |   |
|                             |          | 1601-03A | 0,6          | 52,3337 | 0,0132 | 0,0068 | 0,0037  | 51,2416 | 97,9  | 2,66E-14       | 472,24        | 1,65           |   |
|                             |          | 1601-03B | 0,9          | 51,8249 | 0,0129 | 0,0093 | 0,0002  | 51,7555 | 99,9  | 5,47E-14       | 476,40        | 1,08           |   |
|                             |          | 1601-03C | 1,4          | 51,6693 | 0,0121 | 0,0000 | -0,0002 | 51,7414 | 100,1 | 4,57E-14       | 476,28        | 1,21           |   |
|                             |          | 1601-03D | 2,0          | 51,8880 | 0,0123 | 0,0000 | -0,0005 | 52,0257 | 100,3 | 3,11E-14       | 478,58        | 1,41           |   |
|                             |          | 1601-03E | 2,7          | 52,0062 | 0,0121 | 0,0000 | -0,0004 | 52,1207 | 100,2 | 3,67E-14       | 479,35        | 1,53           |   |
|                             |          | 1601-03F | 3,6          | 51,8138 | 0,0129 | 0,0289 | 0,0006  | 51,6252 | 99,6  | 5,38E-14       | 475,34        | 1,20           |   |
|                             |          | 1601-03G | 5,2          | 51,7423 | 0,0121 | 0,0307 | 0,0000  | 51,7460 | 100,0 | 6,20E-14       | 476,32        | 1,08           |   |
| Idade média ponderada (2s): |          |          |              |         |        |        |         |         |       |                |               | 472            | 2 |