

Reconstrução e Comparação de Trajetórias *P-T* no Sistema de *Nappes* Andrelândia, Sul da Faixa Brasília, MG

Reconstruction and Comparison of P-T Paths in the Andrelândia Nappe System, Southern Brasília Fold Belt, MG

Rafael Gonçalves da Motta¹ (rafaelgmotta@uol.com.br), Renato de Moraes¹ (moraes@igc.usp.br), Rudolph Allard Johannes Trouw² (trouw@geologia.ufrj.br), Mário da Costa Campos Neto¹ (camposnt@usp.br)

¹Departamento de Mineralogia e Geotectônica - Instituto de Geociências - USP
R. do Lago 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP, BR

²Departamento de Geologia - Instituto de Geociências - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, BR

Recebido em 14 de abril de 2010; aceito em 24 de junho de 2010

RESUMO

O Sistema de *Nappes* Andrelândia é formado por três *nappes* principais, da base para o topo: Andrelândia, Liberdade e Três Pontas - Varginha e *klippen* associadas, Pouso Alto, Aiuruoca, Carvalhos e Serra da Natureza. Dentro do Sistema de *Nappes* Andrelândia, o metamorfismo aumenta de norte para sul e de leste para oeste, com as condições mais elevadas de temperatura e pressão sendo registradas nas rochas da *Nappe* Três Pontas - Varginha e *klippen* associadas. Amostras de rochas pelíticas e máfica das três *nappes* foram selecionadas para determinação das condições do metamorfismo, calculadas com o THERMOCALC. Para amostra da *Nappe* Andrelândia são calculadas condições de pico metamórfico de $688 \pm 35^\circ\text{C}$ e $5,63 \pm 0,9$ kbar; para a amostra da *Nappe* Liberdade $648 \pm 23^\circ\text{C}$ e $7,41 \pm 1$ kbar e; para dois granulitos pelíticos e um máfico da *Klippe* Carvalhos, respectivamente, $845 \pm 53^\circ\text{C}$ e $15,7 \pm 5,2$ kbar, $847 \pm 45^\circ\text{C}$ e $13,6 \pm 5,8$ kbar e $854 \pm 71^\circ\text{C}$ e $15 \pm 1,4$ kbar. As trajetórias *P-T* inferidas com base nas texturas observadas são horárias, típicas de cinturões colisionais.

Palavras-chave: Metamorfismo de alta pressão; Metamorfismo regional; Sistema de *Nappes* Andrelândia; Termobarometria.

ABSTRACT

The Andrelândia Nappe System consists of three main nappes, from bottom to top: the lower Andrelândia nappe, the middle Liberdade nappe and the upper Três Pontas-Varginha nappe and associated klippen, Pouso Alto, Aiuruoca, Carvalhos and Serra da Natureza. In the Andrelândia Nappe System, metamorphism increases from north to south and east to west, with the highest temperatures and pressures recorded in rocks of the Três Pontas-Varginha nappe and associated klippen. Samples of pelitic and mafic rocks were selected from the three nappes to determine the conditions of metamorphism using the program THERMOCALC. In this study, peak metamorphic conditions were calculated for the following samples: one sample of the Andrelândia Nappe ($688 \pm 35^\circ\text{C}$ and 5.63 ± 0.9 kbar), one sample of the Liberdade Nappe ($648 \pm 23^\circ\text{C}$ and 7.41 ± 1 kbar), and three samples of the Carvalhos Klippe ($845 \pm 53^\circ\text{C}$ and 15.7 ± 5.2 kbar, and $847 \pm 45^\circ\text{C}$ and 13.6 ± 5.8 kbar for two samples of pelitic granulites respectively, and $854 \pm 71^\circ\text{C}$ and 15 ± 1.4 kbar for one sample of mafic granulite). *P-T* paths inferred on the basis of the observed textures are clockwise and typical of collisional belts.

Keywords: High pressure metamorphism; Regional metamorphism; Andrelândia Nappe System; Thermobarometry.

INTRODUÇÃO

O reconhecimento da importância das faixas móveis brasileiras na evolução da Plataforma Sul-americana iniciou-se na década de 1960 (Almeida, 1967). A Faixa Brasília se destaca nesse cenário, por sua grande extensão, desde o Tocantins até o Sul de Minas Gerais (Fuck, Pimentel, Silva, 1994; Trouw, Paciullo, Ribeiro, 1994), e por apresentar grande diversidade de rochas e ambientes em cada um dos seus segmentos. A partir daí, nas décadas de 1970 e 1980, compilações geológicas em escalas regionais e aplicação de técnicas modernas para obtenção de dados geoquímicos e geocronológicos ganharam bastante destaque (e.g., Hasui, 1982; Marini et al., 1983; Santos e Brito Neves, 1984). O avanço do conhecimento da geologia da Faixa Brasília a partir de pesquisas mais específicas teve grande impulso a partir da década de 1990, com trabalhos que acoplaram detalhe nos trabalhos de campo, com técnicas analíticas modernas (e.g., Heilbron et al., 1995; Ribeiro et al., 1995; Paciullo, 1997; Junho e Mendes, 2000; Campos Neto, 2000). No entanto, os trabalhos sobre o metamorfismo são mais restritos (Campos Neto e Caby, 1999, 2000; Trouw et al., 2000a).

Com o incremento de bancos de dados termodinâmicos internamente consistentes, acoplados a programas que conseguem manipular seu conteúdo e fazer cálculos, tais como o THERMOCALC (Holland e Powell, 1998), a obtenção de cálculos *P-T* precisos, aliada ao controle textural para inferência de trajetórias *P-T*, trouxe avanço significativo para o estudo das rochas metamórficas. O presente trabalho busca contribuir para o entendimento da evolução metamórfica na porção sul da Faixa Brasília, utilizando dados petrográficos e termobarométricos.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Na porção sul da Faixa Brasília ocorre pilha metamórfica resultante da colisão neoproterozoica entre as placas Sanfranciscana e Paranapanema (Figura 1), sendo a primeira considerada margem passiva e a segunda margem ativa (Campos Neto, 2000). Tectonicamente a faixa está estruturada em três domínios: o interno é representado pelas rochas da *Nappe* Socorro - Guaxupé, unidade de rochas de alta temperatura relacionadas à raiz de arco magmático (Campos Neto e Caby, 1999, 2000); o Terreno Andrelândia, domínio continental subductado em condições de alta pressão (Campos Neto e Caby, 1999, 2000; Trouw et al., 2000a); e, o domínio mais externo de margem continental passiva representado pelo Sistema de *Nappes* Carrancas (Trouw et al., 2000a) e *Nappe* Lima Duarte (Campos Neto et al., 2004).

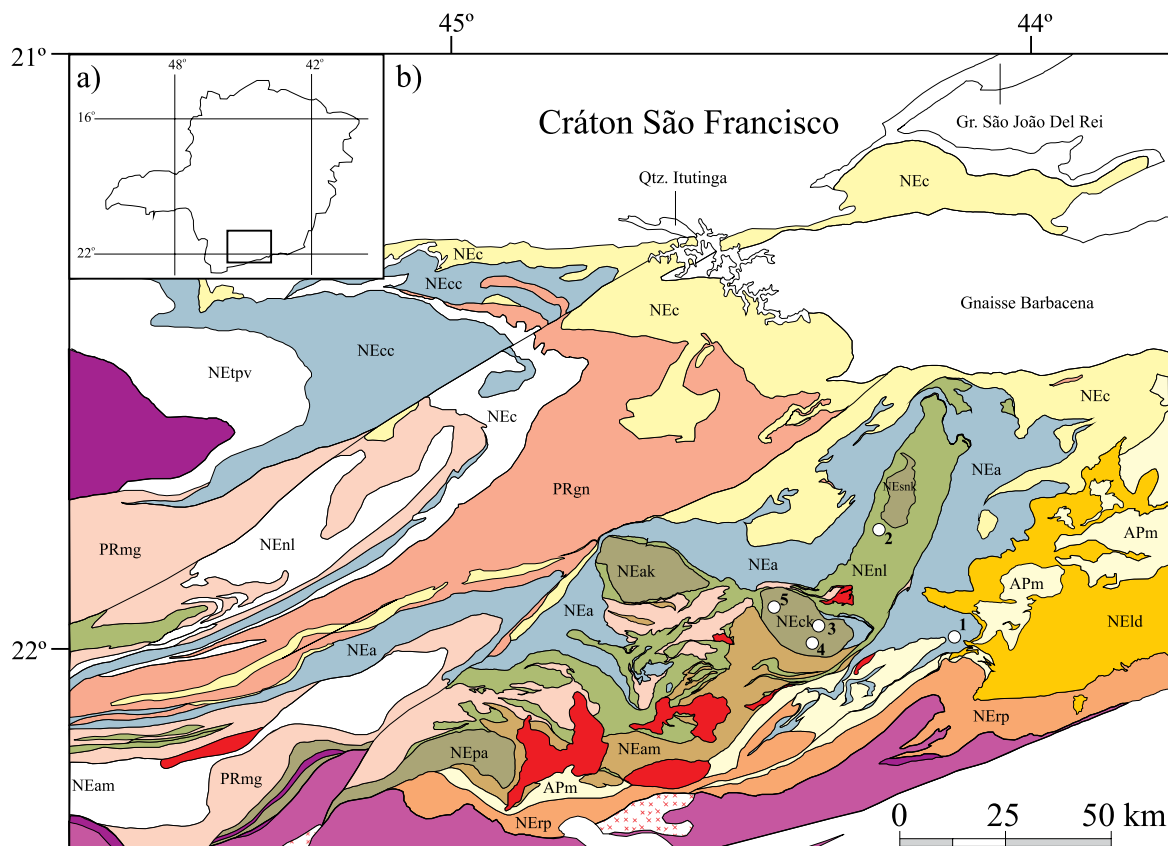
As rochas estudadas no presente trabalho concentram-se na porção ocidental do Terreno Andrelândia, o qual foi

dividido em três *nappes* principais, da base para o topo, Andrelândia, Liberdade e Três Pontas - Varginha e as *klippen* associadas Carvalhos, Serra da Natureza, Aiuruoca e Pouso Alto (Campos Neto et al., 2007). A divisão foi feita com base na direção de transporte das estruturas, as quais se articulam através da superfície S_2 , com transporte tectônico para E, infletindo para NE-N nas porções mais próximas ao Cráton do São Francisco.

O pico metamórfico na *Nappe* Socorro - Guaxupé foi atingido em ca. 625 Ma, entre 620 e 605 Ma no Terreno Andrelândia e 590 Ma para o Sistema de *Nappes* Carrancas (Campos Neto et al., 2004, 2007; Valeriano et al., 2004). Alguns autores consideram a região parte da complexa zona de interferência, resultante da colisão tardia da Faixa Ribeira (e.g., Trouw, Paciullo, Ribeiro, 1994; Trouw et al., 2000b; Peternel, Trouw, Schmitt, 2005; Trouw e Peternel, 2007). Corroboram para esta interpretação o fato de que ocorrem lineações de direção W-NW associadas a dobras D_3 de planos axiais ortogonais a esta, isógradas minerais que truncam as estruturas pré-existentes, principalmente os contatos entre as *nappes* (Peternel, Trouw, Schmitt, 2005) e dados geocronológicos que indicam abertura dos sistemas K-Ar e U-Pb em ca. 580 Ma, idade típica do primeiro pulso metamórfico da Faixa Ribeira (Heilbron et al., 1995). Em contrapartida, Campos Neto e Caby (1999, 2000) consideram que não existe evento termo-tectônico sobreposto ao da Faixa Brasília e sim um único evento colisional contínuo do tipo himalaiano.

Com base no empilhamento interno das escamas de cavalgamento das *nappes*, Campos Neto e Caby (2000), Campos Neto et al. (2005) e Campos Neto et al. (2007) dividem o sistema em três conjuntos de *nappes*: *Nappe* Andrelândia, localizada na base do sistema, que contém xistos pelíticos e *metawackes* metamorizadas em condições de fácies anfíbolito inferior a médio; *Nappe* Liberdade contendo xistos pelíticos metamorizados em fácies anfíbolito médio a superior; e *Nappe* Pouso Alto e *klippen* associadas, Aiuruoca, Carvalhos e Serra da Natureza, que estão no topo, compreendendo rochas metamorizadas em fácies granulito em alta-*P*. Todas as rochas registram paragêneses de alta pressão, por vezes com retroeglogitos e corpos de rochas metaultramáficas concentrados nos contatos entre as *nappes* (Trouw, 1992; Campos Neto e Caby, 1999, 2000; Trouw et al., 2000a).

Alternativamente, a estratigrafia da região foi estabelecida por Ribeiro et al. (1995), Paciullo (1997) e Paciullo et al. (2000) com seis associações de litofácies, da base para o topo e em direção ao centro da bacia: A1 - paragnaisse; A2 - paragnaisse, quartzito e xisto; A3 - quartzito; A4 - filito cinza e xisto; A5 - biotita xisto e gnaisse e; A6 - xisto e paragnaisse com intercalações menores de quartzito, metacherte e rochas calciossilicáticas. As associações de



Placa Sanfranciscana e Terreno Andrelândia

- Granitos
- Neoproterozoico-Ediacarano**
- Sistema de nappes Carrancas (NEc)
- Nappes Andrelândia (NEa) e Carmo da Cachoeira (NEcc)
- Nappe Liberdade (NEnl)
- Granulitos alóctones (NEtpv: Nappe Três Pontas-Varginha, NEpa: Nappe Pouso Alto, NEak: Klippe Aiuruoca, NEck: Klippe Carvalhos, NESnk: Klippe Serra da Natureza)
- Migmatito Alagoa (NEam)
- Nappe Lima Duarte (NEld)
- Migmatito Rio Preto (Nerp)

Placa Paranapanema

- Neoproterozoico-Ediacarano**
- Nappe Socorro-Guaxupé
- Granitos sin-orogênicos
- Diatexitos
- Granulitos
- Paleoproterozoico-Riacciano**
- Complexo ortognaíssico calcio-alcalinos de arco de ilha (PRmg)
- Ortognaísses migmatíticos (PRgn)
- Arqueano/Paleoproterozóico**
- Gnaiss Mantiqueira (APm)

Figura 1. A. Mapa de Minas Gerais com a área investigada em destaque. **B.** Mapa geológico do Terreno Andrelândia e unidades adjacentes. Modificado de Campos Neto et al. (2007). A localização das amostras é apontada com ponto branco: **1.** sillimanita-granada-biotita xisto (SR-JR-1c); **2.** estauroлита-cianita-granada-biotita xisto (RA-14); **3.** granulito máfico (AL-6-51B); **4.** rutilo-cianita-granada-feldspato potássico (AL-6-63A); **5.** rutilo-cianita-granada-feldspato potássico (UX-1).

litofácies representam a evolução da abertura de rifte, sedimentação plataformar incluindo turbiditos, transgressão marinha e sedimentação de águas profundas. A ampla e regular distribuição das litofácies do ciclo deposicional, denominado “Ciclo Depositional Andrelândia” (Ribeiro et al., 1995) e seus correlatos, bem como sua extensa distribuição, indicam bacia com proporções continentais, de relativa estabilidade tectônica.

GEOLOGIA LOCAL

Nappe Andrelândia

Campos Neto et al. (2005, 2007) dividem a *Nappe* Andrelândia em três unidades: unidade basal, Xisto Rio Capivari, intermediária, Xisto Santo Antônio e unidade de topo, Xisto Serra da Boa Vista. O Xisto Rio Capivari é sequência metassedimentar pelítica com intercalações centimétricas a métricas de metapsamitos e rochas metamáficas. O xisto apresenta duas micas, com maior abundância em biotita, porfiroblastos de granada e aluminossilicatos (cianita e/ou sillimanita), quartzo e plagioclásio e, como minerais acessórios, apatita, monazita, zircão, ilmenita e rutilo, às vezes como porfiroblastos centimétricos. Segundo Campos Neto et al. (2007), a unidade tem base desconhecida que corresponderia à superfície de cavalgamento da *nappe*. O Xisto Santo Antônio, unidade intermediária, corresponde à sequência de *metawackes* com intercalações esparsas de metapsamitos e anfibolitos. Ocorre como extensas lajes escuras que sobressaem à topografia. O litotipo dominante é composto por biotita, plagioclásio, granada e quartzo. Por vezes como porfiroblastos ocorrem cianita e estauroлита. Em menores proporções ocorrem clorita e muscovita e, localmente, sillimanita. Como fases acessórias, apresenta minerais opacos, zircão, monazita, apatita, turmalina e rutilo, os dois últimos podem ocorrer como porfiroblastos. Apesar da grande proporção modal de quartzo e plagioclásio, a rocha não apresenta bandamento gnáissico, sendo muito homogênea. No topo da estrutura ocorre o Xisto Serra da Boa Vista, que se caracteriza por bandamento composicional pelítico-psamítico com espessuras que variam de submilimétrica a decimétrica e camadas métricas de quartzito intercaladas. Os xistos são compostos de muscovita, biotita, quartzo, granada e cianita; em proporções menores ocorrem clorita e plagioclásio; localmente há estauroлита e, como minerais acessórios, zircão, monazita, ilmenita, rutilo e apatita. O quartzito é micáceo e grosso.

Nappe Liberdade

A *Nappe* Liberdade é composta por rochas metassedimentares, quartzito, paragnaisse, xisto pelítico, quartzo

e rochas calciossilicáticas, que se intercalam com camadas descontínuas de anfibolito, rochas metaultramáficas e retroeclogito, além de lentes de ortognaisse que ocorrem no interior da estrutura. Essa se amolda à calha sinformal sobre a *Nappe* Andrelândia, resultado de interferência regional em domos e bacias (Trouw et al., 2000b). As rochas metassedimentares, dominantes na estrutura, possuem muscovita, biotita, granada, cianita, quartzo, plagioclásio e rutilo, e caracterizam-se por textura porfiroblástica, com cristais de granada, cianita e rutilo, que comumente atingem tamanhos superiores a 4 cm; localmente ocorre sillimanita. As proporções dos minerais são muito variadas e a rocha grada entre xisto muito rico em mica, ortoquartzito e paragnaisse rico em minerais félsicos. As rochas metaultramáficas ocorrem como lentes, concordantes a estrutura e concentradas nos contatos entre as *nappes*. Predominam serpentinito e antofilita-talco xisto com relíquias de piroxênios. O anfibolito ocorre como *boudins* em toda a estrutura e é composto de anfibólio, plagioclásio, diopsídio, quartzo, epidoto e granada; em alguns anfibolitos não há plagioclásio metamórfico primário, estando ele associado às coroas formadas por intercrescimentos com hornblenda nas bordas da granada, ou em pseudomorfo de fase não identificada, que são formados por simplectito de diopsídio + plagioclásio + quartzo, o que sugere a presença de possível piroxênio sódico. Isso, associado às inclusões de piroxênio com até 20% de jadeita indica a presença de eclogito intensamente retrometamorfizado (Trouw, 1992; Trouw et al., 2000a, 2000b; Campos Neto e Caby, 1999). No sul da estrutura, em contato por falha transcorrente com a *Klippe* Carvalhos, ocorre o Migmatito Alagoa (Campos Neto et al., 2004; Junho, 1993; Junho e Mendes, 2000), conjunto de metatexito e diatexito, resultado do re-trabalhamento das rochas da infraestrutura.

Klippe Carvalhos

A *Klippe* Carvalhos é estrutura em bacia alongada de direção NW-SE (Cioffi, 2009), resultado de interferência regional e que repousa alóctone sobre a *Nappe* Liberdade e no *front* dos Migmatitos Alagoa. Predominam rochas paraderivadas metamorfisadas em fácies granulito de alta pressão que apresentam em seu resíduo rutilo, cianita, granada, feldspato alcalino peritítico, quartzo e biotita, a última em quantidades diminutas. Sillimanita pode ocorrer localmente e estauroлита ocorre apenas inclusa em granada. Veios de leucossoma com quartzo, dois feldspatos, cianita e granada desenvolvem-se paralelamente à foliação da rocha. Granulito máfico ocorre como lentes e apresenta mesossoma composto de granada, plagioclásio, quartzo, hornblenda, diopsídio e biotita e leucossoma tonalítico com diopsídio e hornblenda. A ausência de

ortopiroxênio na rocha denuncia o caráter de alta pressão, pois este tem estabilidade reduzida em rochas basálticas nestas condições (Green e Ringwood, 1967). Na base da *klippe* ocorre lente de rochas metaultramáficas serpentinizadas, com texturas reliquias que guardam a paragênese com clinopiroxênio, ortopiroxênio, hornblenda, olivina e espinélio (Almeida, 1998).

DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

Sillimanita-granada-biotita xisto (Nappe Andreilândia)

O sillimanita-granada-biotita xisto (SR-JR-1c) pertencente à unidade Xisto Capivari, apresenta textura lepidoblástica alternada com pequenos leitos granoblásticos paralelizados à foliação. A foliação (S_2) é definida pela orientação de muscovita, biotita vermelha e fibrolita, sendo levemente ondulada. Granada é restrita aos leitos micáceos e possui inclusões de minerais opacos e quartzo, e biotita em sua borda. Sillimanita pode ocorrer como nódulos fibrosos e alongados, pseudomorfo de cristais de cianita. Os leitos granoblásticos possuem apenas plagioclásio, com geminação polissintética e quartzo, com extinção ondulante e subgrãos.

Estaurolita-cianita-granada-biotita xisto (Nappe Liberdade)

A amostra do estaurolita-cianita-granada-biotita xisto (RA-14) foi coletada no topo da pilha da *Nappe Liberdade*, de textura lepidoblástica alternada a lentes com textura granoblástica. A foliação (S_2) é marcada pela orientação de muscovita, biotita vermelha, cianita e grafita. Granada forma porfiroblastos e com inclusões de quartzo, minerais opacos e rutilo, com a foliação externa amoldando-se ao seu redor. Estaurolita e cianita apresentam bordas idioblásticas, quando em contato com micas, e bordas irregulares, em contato com quartzo. A foliação encontra-se crenulada, por vezes com desenvolvimento de muscovita no plano axial das crenulações (S_3). Quartzo e plagioclásio definem domínios alongados de textura granoblástica, com grãos de bordas recristalizadas e extinção ondulante.

Rutilo-cianita-granada-feldspato potássico granulito (Klippe Carvalhos)

As amostras estudadas do rutilo-cianita-granada-feldspato potássico granulito (UX-1 e AL-6-63A) apresentam dois domínios: leucossoma e mesossoma. O mesossoma possui foliação difusa, anastomosada, definida pela orien-

tação de biotita e cianita, é porfiroblástico com paragênese rutilo-cianita-granada-feldspato pertítico-quartzo \pm biotita; biotita associada à sillimanita ocorre em bordas de granada e cianita e são secundárias. A presença de mesopertita sugere condições de alta temperatura, enquanto que a paragênese granada + cianita + rutilo + mesopertita e ausência de ortopiroxênio indicam condições de fácies granulito de alta pressão (O'Brien e Rötzler, 2003). O leucossoma ocorre paralelamente à foliação da rocha, com textura granoblástica e é composto de quartzo, feldspato pertítico e, subordinadamente, granada e cianita.

Granulito máfico (Klippe Carvalhos)

O granulito máfico (AL-6-51B) tem dois domínios distintos: mesossoma e leucossoma. O mesossoma apresenta foliação com textura nematoblástica definida por hornblenda, com inclusões de biotita, quartzo e minerais opacos, biotita vermelha, quartzo e plagioclásio; os dois últimos ocorrem intersticiais aos minerais máficos com contatos retos, porém, por vezes podem ocorrer como filmes envolvendo as outras fases. Granada é rara no mesossoma. O leucossoma quartzo-feldspático apresenta porfiroblastos de granada, hornblenda e diopsídio. As relações entre diopsídio e hornblenda no leucossoma são as seguintes: os grãos de hornblenda apresentam diopsídio nas bordas e o diopsídio apresenta inclusões de hornblenda e o mesmo mineral em suas bordas. O conjunto de texturas indica que o diopsídio foi gerado pela quebra da hornblenda, envolvendo reação de fusão por desidratação e que, durante o resfriamento, nova geração de hornblenda se forma da reação do líquido aprisionado com o diopsídio, como as reações de volta (*back reaction*) descritas por Kriegsman e Hensen (1998). Porfiroblasto de granada possui inclusões de quartzo em formas ovaladas a ameboides ou retificadas em fraturas no cristal; na borda ocorre corona composta por cristais esqueléticos finos de hornblenda, plagioclásio, biotita e quartzo, circundados por coroas de opacos, que marcam o antigo limite do grão. Feldspato alcalino pertítico ocorre no leucossoma com lamelas de exsolução em forma de barras.

QUÍMICA MINERAL

As composições químicas dos minerais foram obtidas utilizando Microsonda Eletrônica (JEOL JXA-8600 e JXA-8900, respectivamente no Instituto de Geociências da USP e no Departamento de Geologia da Universidade de Maryland), sob condições de 15 kV, 20 nA, com diâmetro do feixe variando entre 5 e 15 μm , com padrões naturais para todos os elementos. As imagens composicionais utilizaram condições de 15 kV e 120 a 200 nA e feixe de 5 μm .

Feldspatos

Nos xistos pelíticos, das *nappes* Andrelândia e Liberdade, ocorrem plagioclásio com composições homogêneas e sem variação núcleo-borda. Na amostra da *Nappe* Andrelândia a composição é An_{28} e da *Nappe* Liberdade An_{14} . Na amostra de rutilo-cianita-granada-feldspato potássico granulito (UX-1), ortoclásio é pertítico e, muitas vezes, apresenta mirmequita nas bordas, sua composição é $Or_{90}Ab_{10}$ e as exsoluções e o plagioclásio da mirmequita têm a mesma composição An_{16-18} . Na amostra AL-6-63A, o feldspato é pertítico a mesopertítico com lamelas de plagioclásio em filetes ou vênulas, a composição é homogênea $Or_{79}Ab_{19}An_2$. No granulito máfico (AL-6-51B), o plagioclásio foi analisado em três texturas e apresenta composições distintas. No leucossoma a composição é An_{31} , no mesossoma An_{25} e, na corona envolvendo granada, An_{41} . A amostra ainda possui feldspato alcalino no leucossoma de composição $Or_{86}Ab_{13}An_1$. As análises químicas são apresentadas na Tabela 1.

Muscovita

A muscovita foi analisada nos xistos pelíticos das *nappes* Andrelândia e Liberdade. Os valores de Ti são mui-

to semelhantes ($\sim 0,1$ a.p.f.u.). Os cristais do xisto da *Nappe* Andrelândia apresentam concentrações maiores de K e Fe e menores de Mg e Na, se comparados aos da *Nappe* Liberdade. As análises químicas são apresentadas na Tabela 2, sendo os cálculos de fórmula estrutural foram baseados em fórmulas unitárias contendo 11 átomos de oxigênio.

Biotita

Os cálculos de fórmula estrutural foram baseados em fórmulas unitárias contendo 11 átomos de oxigênio. O mineral é observado na matriz da amostra da *Nappe* Andrelândia e apresenta $X_{Mg} \sim 0,38$ e teores de Ti de 0,2 a.p.f.u. Na amostra da *Nappe* Liberdade os cristais de biotita da matriz apresentam $X_{Mg} \sim 0,46$ e teores de Ti de 0,12 a.p.f.u. A biotita no rutilo-cianita-granada-feldspato potássico granulito da *Klippe* Carvalhos tem composição variável entre as amostras, a amostra AL-6-63A apresenta alto X_{Mg} ($\sim 0,69$), teores altos de Ti ($\sim 0,45$ a.p.f.u.) e F (0,7 a.p.f.u.), enquanto na amostra UX-1 os valores de X_{Mg} variam entre 0,47 e 0,54, e Ti com valores entre 0,19 e 0,25 a.p.f.u. No granulito máfico da *Klippe* Carvalhos cristais de biotita foram analisados em três texturas distintas: orientados no mesossoma, inclusos em anfibólio e em coronas que en-

Tabela 1. Análises químicas representativas de feldspato: **1.** mesossoma; **2.** leucossoma; **3.** simplectito.

Amostra	Sill xisto	St-Ky xisto	Rt-Ky-Grt-Kfs granulito			Granulito máfico			
	SJ-JR-1c	RA-14	AL-6-63A	UX-1		AL-6-51B			
Estrutura	Andrelândia	Liberdade	Klippe Carvalhos						
Mineral	PI	PI	Kfs	Kfs	PI	PI1	PI2	PI3	Kfs
SiO ₂	61,23	65,44	64,07	64,92	64,75	62,21	60,53	57,46	64,07
Al ₂ O ₃	24,09	22,11	18,87	18,89	22,37	24,00	24,85	27,22	18,49
Fe ₂ O ₃	0,00	0,07	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	5,67	2,87	0,28	0,03	3,19	5,3	6,12	9,15	0,01
Na ₂ O	8,23	9,54	2,39	1,07	9,2	8,81	8,18	6,51	1,46
K ₂ O	0,25	0,03	13,41	14,72	0,08	0,14	0,18	0,13	14,96
Total	99,49	100,06	99,13	99,64	99,63	100,52	99,86	100,52	99,01
Si	2,732	2,870	2,965	2,990	2,854	2,744	2,694	2,561	2,982
Al	1,267	1,143	1,029	1,026	1,162	1,248	1,304	1,430	1,015
Fe ³⁺	0,001	0,002	0,001	0,000	0,002	0,004	0,003	0,006	0,002
Ca	0,271	0,135	0,014	0,001	0,151	0,251	0,292	0,437	0,000
Na	0,712	0,811	0,214	0,096	0,787	0,754	0,706	0,563	0,131
K	0,014	0,002	0,792	0,865	0,004	0,008	0,010	0,007	0,889
Soma	4,997	4,964	5,02	4,978	4,96	5,009	5,010	5,005	5,020
O	8	8	8	8	8	8	8	8	8
an	27,2	14,2	1,4	0,1	16,0	24,8	29,0	43,4	0,0
ab	71,4	85,5	21,0	10,0	83,5	74,4	70,0	55,9	12,8
or	1,4	0,2	77,6	89,9	0,4	0,8	1,0	0,7	87,2

volvem granada. Cristais do mesossoma e inclusos em anfíbólio têm composições semelhantes, embora os cristais do mesossoma apresentem variação maior em relação aos teores de Mg (entre 1,55 e 1,7 a.p.f.u.). Grãos nas coronas ao redor de granada são mais aluminosos (1,55 contra 1,4 a.p.f.u.) e empobrecidos em Fe (1,05 contra 1,25 a.p.f.u.) e Ti (0,115 contra 0,16 a.p.f.u.), em relação aos do mesossoma. As análises químicas são apresentadas na Tabela 2.

Estaurolita

Estaurolita é observada apenas na amostra do xisto pelítico da *Nappe* Liberdade, não possui zonamento núcleo-borda e apresenta X_{Mg} de 0,15. As análises químicas são apresentadas na Tabela 2.

Granada

Nos xistos pelíticos, das *nappes* Andrelândia e Liberdade, foram realizados mapas composicionais de Mn, Fe, Mg e Ca para cristais de granada (Figuras 2 e 3). Em ambos os casos os cristais apresentam padrões de distribuição dos elementos concêntricos, com teor menor de Fe no centro e aumento em direção às bordas; Mg aumenta do núcleo em direção às bordas, com queda repentina na periferia do grão; o Mn decai do centro em direção à borda com ligeiro aumento na periferia. Apenas a distribuição de Ca é diferente; na amostra da *Nappe* Andrelândia a tendência é de diminuição da concentração em direção à borda, enquanto na da *Nappe* Liberdade a tendência é de aumento.

Tabela 2. Análises químicas representativas das micas e estaurolita: **1.** mesossoma; **2.** incluso em hornblenda; **3.** simplectito.

Amostra	Sill-Grt-Ms-Bt-Qtz xisto		St-Ky-Grt-Bt-Qtz-Ms xisto			Rt-Ky-Grt-Kfs granulito		Granulito máfico		
	SJ-JR-1c		RA-14			AL6-63A	UX-1	AL7-51B		
Estrutura	<i>Nappe</i> Andrelândia		<i>Nappe</i> Liberdade			<i>Klippe</i> Carvalhos				
Mineral	Ms	Bt	Ms	Bt	St	Bt	Bt	Bt1	Bt2	Bt3
SiO ₂	47,43	35,24	47,78	35,68	27,78	37,92	36,86	36,91	36,52	36,3
TiO ₂	0,98	3,53	1,41	2,2	0,64	4,04	3,56	2,69	2,76	2,28
Al ₂ O ₃	36,42	20,04	35,44	20,43	53,72	16,75	18,65	14,79	14,93	17,13
Cr ₂ O ₃	0,08	0,04	0,03	0,02	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	0,71	0,71
FeO	1,41	21,83	1,12	19,96	13,62	12,21	16,27	16,87	16,99	13,67
MnO	0,02	0,09	0,04	0,05	0,06	0,00	0,01	0,25	0,15	0,41
MgO	0,59	7,51	0,77	9,41	1,39	14,96	11,40	13,89	14,5	14,42
CaO	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,07	0,02
Na ₂ O	0,44	0,11	1,18	0,30	0,00	0,10	0,05	0,08	0,11	0,08
K ₂ O	10,19	9,74	8,84	8,7	0,00	9,49	9,91	9,79	9,07	9,73
Total	98,04	98,15	96,63	96,75	97,2	95,52	96,84	96,01	95,82	94,77
Si	3,062	2,635	3,105	2,663	7,743	2,777	2,718	2,777	2,746	2,722
Ti	0,047	0,198	0,069	0,123	0,134	0,222	0,197	0,152	0,156	0,129
Al	2,772	1,766	2,714	1,797	17,653	1,446	1,622	1,312	1,323	1,514
Cr	0,004	0,003	0,001	0,001	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000
Fe ³⁺	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,040	0,040	0,040
Fe ²⁺	0,076	1,365	0,061	1,245	3,175	0,748	1,003	1,062	1,069	0,857
Mn	0,001	0,006	0,002	0,003	0,015	0,000	0,001	0,016	0,010	0,026
Mg	0,057	0,837	0,075	1,047	0,577	1,632	1,253	1,558	1,624	1,611
Ca	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,001	0,005	0,001
Na	0,055	0,016	0,149	0,044	0,000	0,014	0,007	0,012	0,016	0,012
K	0,840	0,929	0,733	0,828	0,000	0,887	0,933	0,940	0,870	0,931
Soma	6,939	7,756	6,910	7,752	29,297	7,729	7,741	7,871	7,860	7,844
O	11	11	11	11	46	11	11	11	11	11
X_{Mg}	42,9	38,0	55,1	45,7	15,4	68,6	55,5	59,5	60,3	65,3

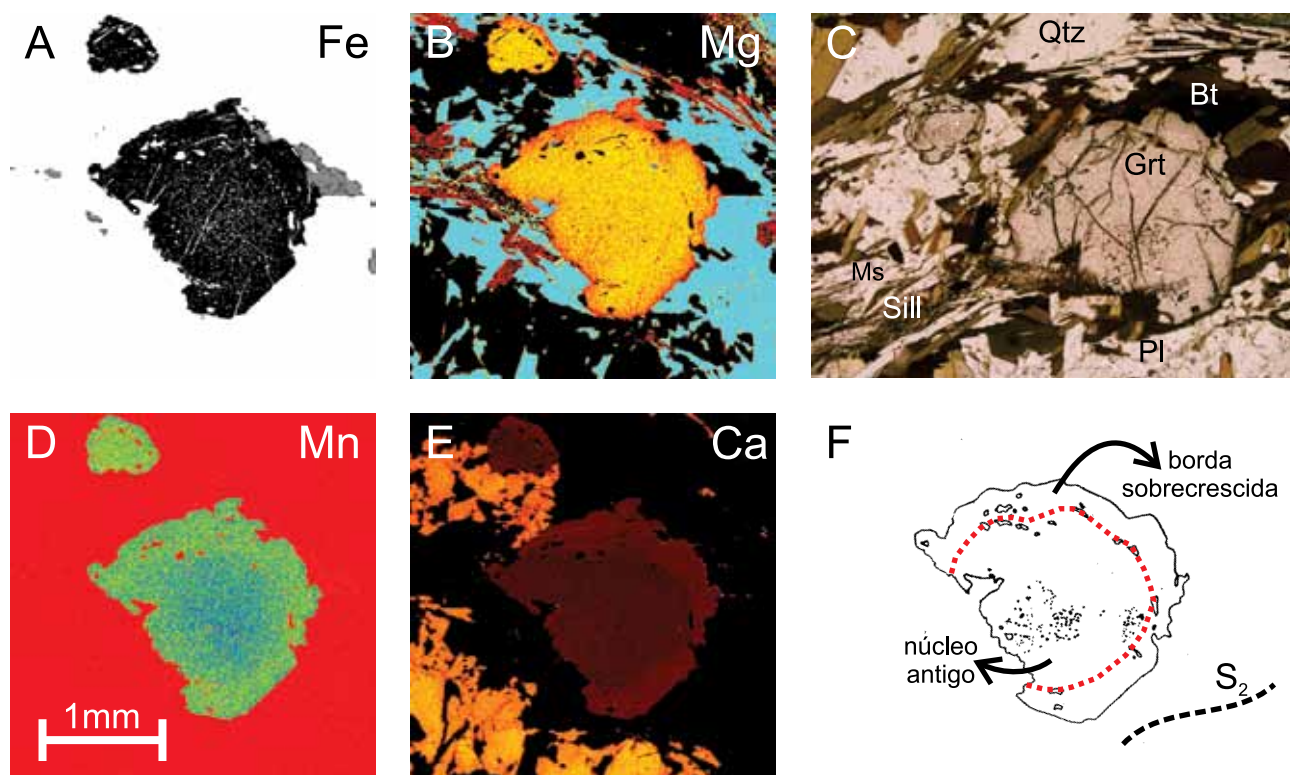


Figura 2. Mapa composicional e padrão de inclusões em porfiroblasto de granada do sillimanita-granada-biotita xisto (*Nappe Andrelândia*). **A.** Mapa composicional para Fe, distribuição homogênea com ligeiro enriquecimento na borda (tons escuros maiores concentrações). **B.** Mapa composicional para Mg, distribuição homogênea com empobrecimento nas bordas (tons claros maiores concentrações). **C.** Fotomicrografia do porfiroblasto principal contendo muscovita + biotita + sillimanita + granada. **D.** Mapa composicional para Mn, distribuições homogêneas com dois domínios marcados por linha de inclusão de quartzo, núcleo enriquecido (tons escuros) e borda empobrecida (tons claros). **E.** Mapa composicional para Ca, distribuições homogêneas com dois domínios marcados por linha de inclusão de quartzo, núcleo empobrecido (tons escuros) e borda enriquecida (tons claros). **F.** Padrão de inclusões em porfiroblasto com núcleo rico em inclusões muito finas e bordas límpidas, separados por uma trilha circular de inclusões de quartzo.

No rutilo-cianita-granada-feldspato potássico granulito da *Klippe* Carvalhos, no perfil composicional nota-se a diminuição dos teores de espessartita para a borda do grão e o comportamento inversamente proporcional dos membros finais piropo e almandina, sendo o último mais rico no centro com diminuição em direção à borda do grão (Figura 4a). Na amostra UX-1 o porfiroblasto analisado tem 2 cm de diâmetro, sendo que o núcleo composicional do grão não coincide com o núcleo geométrico; Fe domina a composição do grão analisado (Alm_{75}) e apresenta perfil plano com aumento de concentração próximo às bordas e sua distribuição é homogênea em toda a área analisada. Mg é mais pobre no núcleo do grão e sua concentração aumenta para as bordas em áreas nas quais o máximo composicional é atingido, o qual é seguido por decaimento da concentração junto às bordas externas do grão (Figura 5). A distribuição observada sugere que o grão guarda, pelo menos em parte, a distribuição composicional do seu cresci-

mento. Ca e Mn apresentam distribuição semelhante, com maiores concentrações no núcleo.

No granulito máfico, no perfil composicional da granada, Fe e Mg desenharam platôs em quase todo o grão, embora Mg apresente leve enriquecimento em direção às bordas (Figura 4b). A distribuição de Ca apresenta tendência de enriquecimento nas bordas; Mn apresenta maiores concentrações no núcleo que diminuem gradativamente para as bordas. Todos os elementos apresentam distribuição errática nas bordas, ligado à dissolução e substituição da borda do grão por plagioclásio, quartzo, biotita e anfibólio, com picos altos de Mn. Kohn e Spear (2000) verificaram o incremento de Mn próximo às bordas de grãos de granada que apresentam coronas de substituição em rochas máficas, o que ocorre devido à falta de afinidade química do Mn com as fases neoformadas, sendo reabsorvido pelo cristal de granada. As análises químicas são apresentadas na Tabela 3.

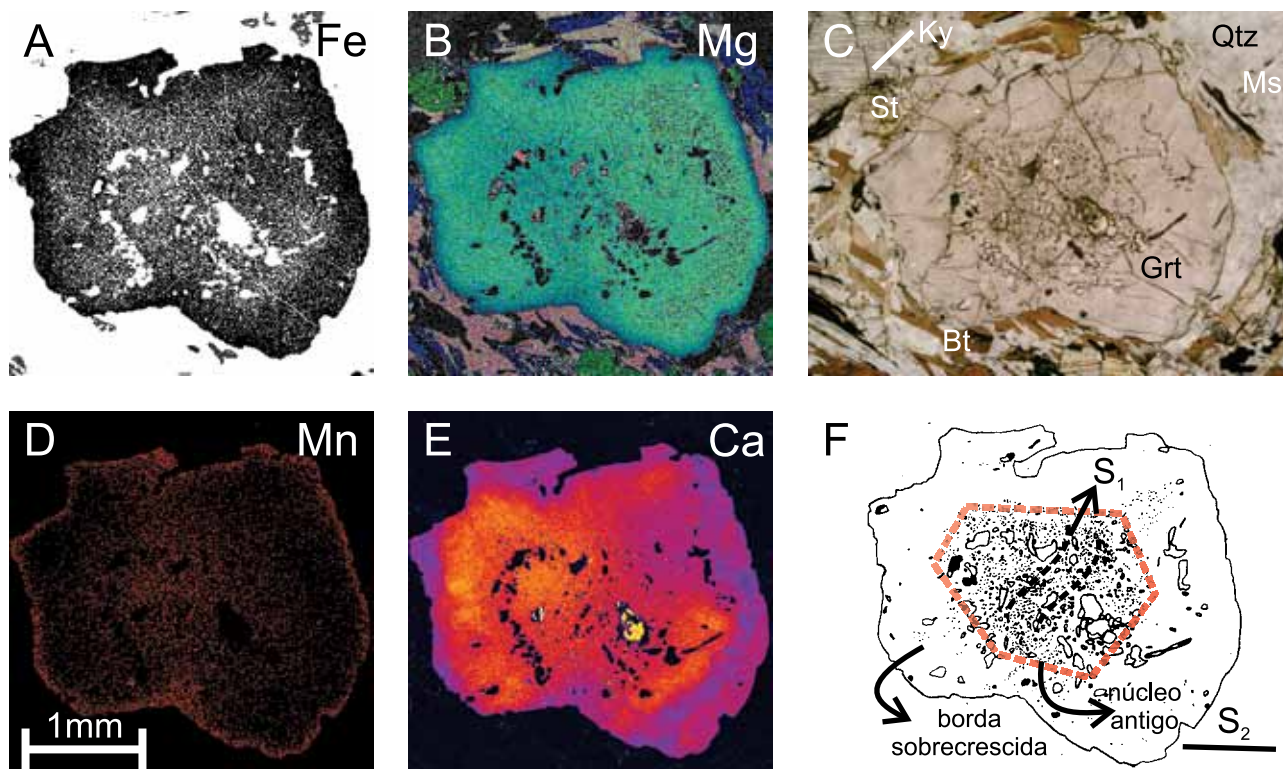


Figura 3. Mapa composicional e padrão de inclusão em porfiroblasto de granada do estaurocita-cianita-granada-biotita xisto (*Nappe Liberdade*). **A.** Mapa composicional para Fe, distribuição homogênea com ligeiro enriquecimento na borda (tons escuros maiores concentrações). **B.** Mapa composicional para Mg, o grão possui menores concentrações no núcleo e em uma fina borda ao redor do grão (tons claros maiores concentrações). **C.** Fotomicrografia do porfiroblasto na paragenese principal contendo muscovita + biotita + estaurocita + cianita. **D.** Mapa composicional para Mn, maiores concentrações no núcleo do cristal (tons claros). **E.** Mapa composicional para Ca, distribuições heterogêneas com tendência a concentrações maiores no núcleo e na camada externa do cristal (tons escuros maiores concentrações). **F.** Padrão de inclusões em porfiroblasto com núcleo rico em inclusões desenhando forma idioblástica e contendo uma foliação discordante à foliação externa da rocha e bordas límpidas.

Anfibólio

Os cálculos da fórmula estrutural foram feitos para 23 átomos de oxigênio. O anfibólio do granulito máfico da *Klippe* Carvalhos foi analisado em quatro texturas diferentes. Em todas as texturas a variação do X_{Mg} é pequena, sempre com valores próximos a 0,6. As análises realizadas em grãos orientados pertencentes ao mesossoma da rocha e no porfiroblasto contido no leucossoma da rocha apresentam composições semelhantes, com teores de Si entre 6,1 e 6,5 a.p.f.u., teores de Ti entre 0,09 e 0,1 a.p.f.u. e $Fe^{3+} > Al^{VI}$. Cristais localizados na borda de clinopiroxênio possuem as menores concentrações de Ti (< 0,05 a.p.f.u.). Por fim, os cristais analisados nas coronas em volta de granada possuem os menores teores de Si, chegando ao máximo a 6,0 a.p.f.u. As análises químicas são apresentadas na Tabela 4.

Diopsídio

O diopsídio do granulito máfico foi analisado em duas texturas: cristais no leucossoma e em borda de anfibólio. Na borda do anfibólio o grão é mais pobre em Ca, Mg e Fe^{2+} se comparado aos grãos do leucossoma. Em contrapartida os teores de Al, tanto no sítio VI, quanto no sítio IV, são maiores nos cristais do leucossoma. As análises químicas são apresentadas na Tabela 4.

METAMORFISMO - TEXTURAS E TERMOBAROMETRIA

Nappe Andrelândia

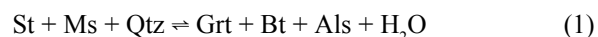
Não há registros texturais que permitam inferir as reações cruzadas durante o metamorfismo progressivo na

Tabela 3. Análises químicas representativas de granada: 1. núcleo; 2. borda; 3. simplectito.

Amostra	Sill-Grt-Ms-Bt-Qtz xisto		St-Ky-Grt-Bt-Qtz-Ms xisto		Rt-Ky-Grt-Kfs granulito				Granulito máfico		
	SJ-JR-1c		RA-14		AL6-63A		UX-1		AL7-51B		
Estrutura	Nappe Andrelândia		Nappe Liberdade		Klippe Carvalhos						
Mineral	Grt1	Grt2	Grt1	Grt2	Grt1	Grt2	Grt1	Grt2	Grt1	Grt2	Grt3
SiO ₂	36,54	36,79	36,67	36,65	38,06	38,37	36,76	36,69	37,39	38,85	37,79
TiO ₂	0,01	0	0	0	0,00	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,13
Al ₂ O ₃	20,93	20,99	20,82	20,83	22,25	22,54	20,8	21,05	23,39	22,27	21,35
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0	0	0,00	0,00	0,04	0,03	-	-	-
Fe ₂ O ₃	1,94	1,21	1,84	1,82	0,31	1,01	1,68	1,03	2,17	0,98	0,73
FeO	32	32,76	33,08	34,46	28,62	28,18	32,39	34,92	20,45	21,59	18,86
MnO	4,7	3,91	1,32	0,56	1,26	0,43	1,53	0,4	3,39	2,26	8,26
MgO	2,96	3,01	3,8	4,12	5,39	7,67	3,96	4,2	4,5	5,17	2,94
CaO	1,3	1,47	2,06	1,14	4,69	2,83	2,33	0,84	10	10,43	10,02
Total	100,2	100,05	99,42	99,41	100,55	100,94	99,51	99,17	101,08	101,48	100,02
Si	2,946	2,965	2,955	2,955	2,968	2,949	2,96	2,964	2,876	2,968	2,979
Ti	0	0	0	0	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,008
Al	1,989	1,995	1,978	1,980	2,046	2,042	1,974	2,005	2,122	2,006	1,984
Cr	0,001	0,001	0	0	0,000	0,000	0,003	0,002	-	-	-
Fe ³⁺	0,118	0,074	0,111	0,110	0,018	0,058	0,102	0,062	0,125	0,056	0,042
Fe ²⁺	2,158	2,209	2,229	2,323	1,867	1,811	2,18	2,36	1,316	1,381	1,244
Mn	0,321	0,267	0,090	0,038	0,083	0,028	0,104	0,028	0,221	0,146	0,552
Mg	0,355	0,362	0,457	0,495	0,626	0,878	0,475	0,505	0,515	0,589	0,345
Ca	0,112	0,127	0,178	0,098	0,392	0,233	0,201	0,072	0,824	0,854	0,846
Soma	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
O	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
alm	73,3	74,5	75,5	78,6	62,9	61,4	73,6	79,6	45,8	46,5	41,6
prp	12,1	12,2	15,5	16,8	21,1	29,8	16,0	17,0	17,9	19,8	11,6
grs	3,8	4,3	6,0	3,3	13,2	7,9	6,8	2,4	28,7	28,8	28,3
esp	10,9	9,0	3,0	1,3	2,8	0,9	3,5	0,9	7,7	4,9	18,5

amostra da *Nappe* Andrelândia. Contudo, aspectos texturais e químicos sugerem sobrecrecimento em porfiroblastos de granada, sugerindo dois pulsos de crescimento. Seu núcleo rico em inclusões muito pequenas é separado da borda límpida por trilha circular de inclusões de quartzo (Figura 2). A feição é refletida por variações de Mn, mais rico no centro e de Ca, mais rico nas bordas (Figura 2). A ausência de estauroлита e a presença do par biotita-aluminossilicato associadas à granada sugerem que a rocha supera temperaturas de quebra de estauroлита acima dos 650 - 720°C, dependendo da pressão (Spear e Cheney, 1989) conforme a reação 1. As condições *P-T* calculadas com o THERMOCALC usando a paragênese formadora da foliação principal da rocha, apontam temperaturas de 688 ± 35°C e pressões de 5,63 ± 0,9 kbar. Os resultados podem representar as condições de

temperatura pós-descompressão, uma vez que a sillimanita pseudomorfa grãos de cianita (Figura 6A). Se isso é correto, o pico do metamorfismo ocorreu acima dos 7 kbar. As relações texturais indicam trajetória *P-T* horária, com descompressão isothermal ou até com aumento de temperatura durante a ascensão da estrutura (Figura 7).

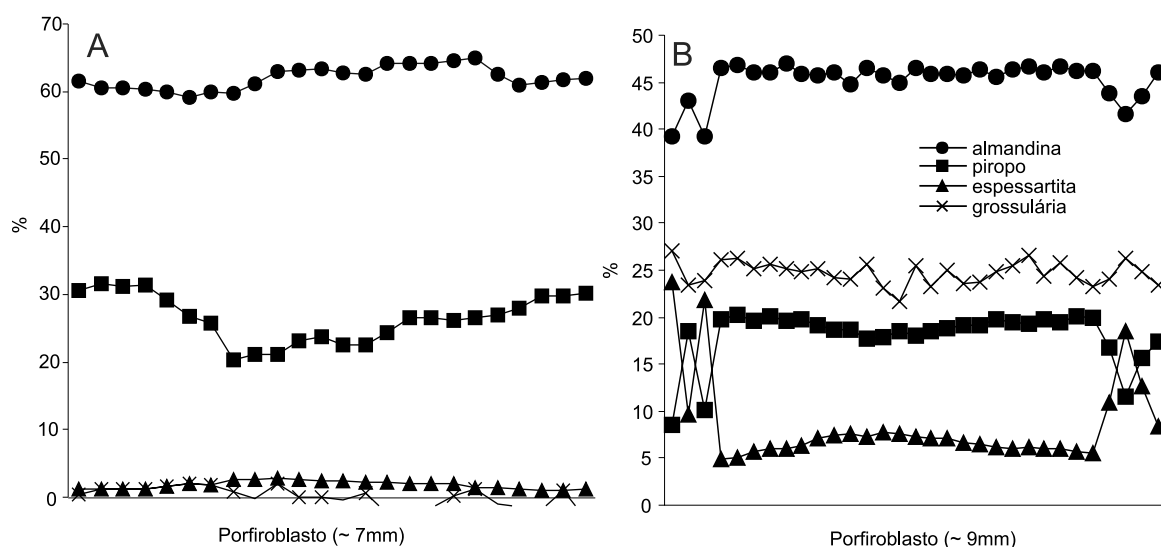


Nappe Liberdade

Na amostra da *Nappe* Liberdade, as inclusões em porfiroblastos não dão pistas da trajetória progressiva seguida pela rocha. Todavia as feições texturais e químicas em porfiroblasto de granada denunciam dois estágios de cres-

Tabela 4. Análises químicas representativas de anfibólio e piroxênio: 1. mesossoma; 2. simplectito; 3. leucossoma; 4. borda de clinopiroxênio; 5. borda de hornblenda.

Granulito máfico AL7-51B						
Amostra	Klippe Carvalhos					
Estrutura	Klippe Carvalhos					
Mineral	Hbl1	Hbl2	Hbl3	Hbl4	Cpx3	Cpx5
SiO ₂	40,61	39,82	42,47	41,94	51,84	48,9
TiO ₂	0,87	0,53	1,04	1,07	0,17	0,59
Al ₂ O ₃	13,08	14,95	11,46	11,64	2,51	5,08
Fe ₂ O ₃	4,4	4,37	2,92	3,63	3,63	6,85
FeO	12,98	13,15	14,16	13,73	6,27	5,96
MnO	0,52	0,44	0,25	0,38	0,38	0,36
MgO	10,08	9,36	10,61	10,57	11,96	12,19
CaO	11,89	12,05	12,29	12,33	23,09	19,1
Na ₂ O	1,55	1,63	1,49	1,54	0,98	1,1
K ₂ O	1,74	1,63	1,45	1,48	0,01	0,46
Total	97,28	97,5	97,84	97,94	100,47	99,89
Si	6,133	5,999	6,365	6,289	1,925	1,826
Ti	0,099	0,060	0,117	0,120	0,005	0,017
Al	2,329	2,656	2,024	2,058	0,110	0,224
Fe ³⁺	0,500	0,496	0,330	0,410	0,101	0,192
Fe ²⁺	1,639	1,656	1,775	1,721	0,195	0,186
Mn	0,067	0,056	0,031	0,048	0,012	0,011
Mg	2,269	2,102	2,370	2,362	0,662	0,679
Ca	1,924	1,945	1,973	1,981	0,919	0,764
Na	0,454	0,476	0,432	0,449	0,071	0,079
K	0,335	0,313	0,277	0,284	0,000	0,022
Soma	15,921	15,932	15,809	15,864	4	4
O	23	23	23	23	6	6
X _{Mg}	58,1	55,9	57,2	57,8	77,2	78,5

**Figura 4.** Perfil composicional em porfiroblasto de granada do granulito máfico (Klippe Carvalhos).

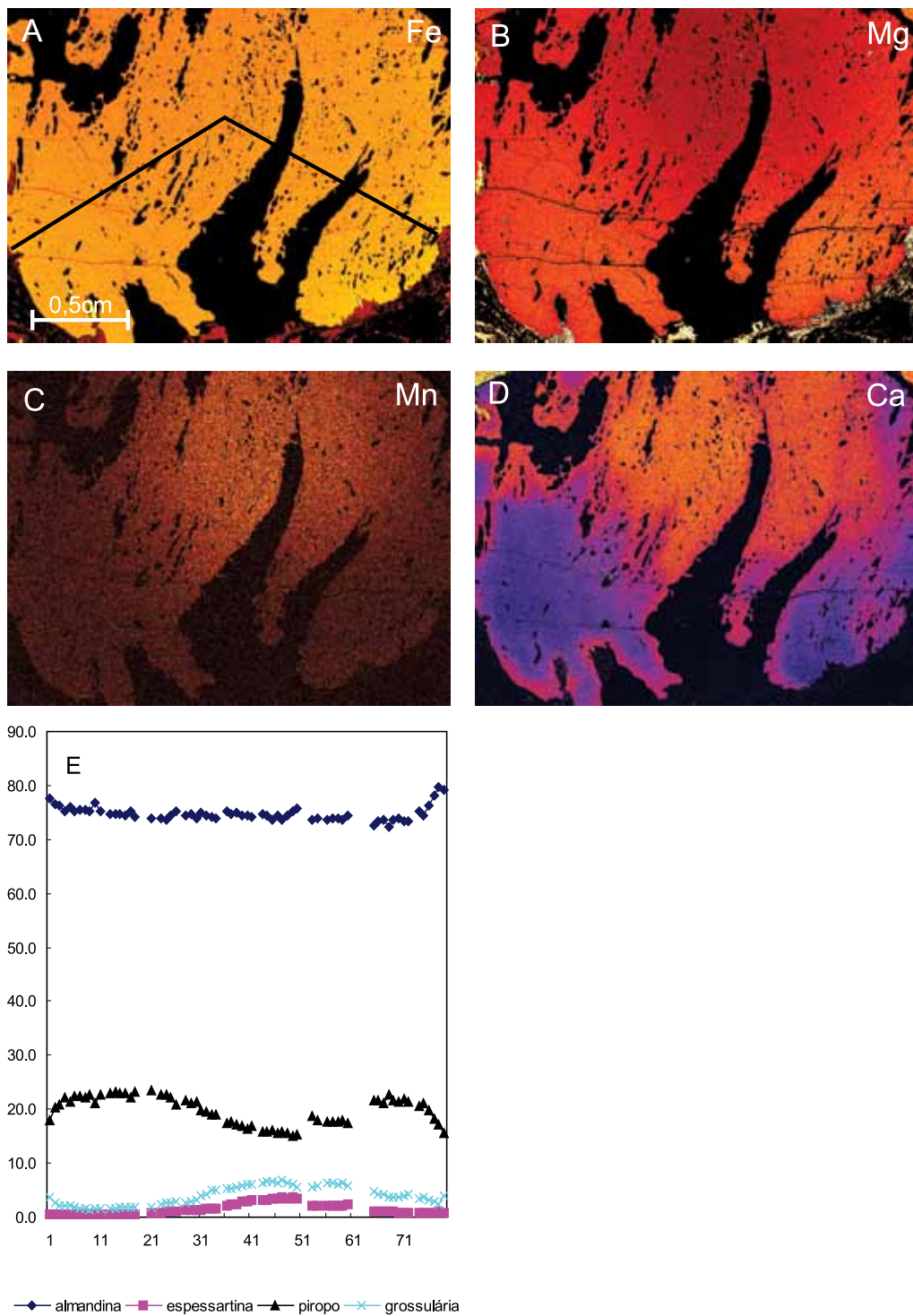


Figura 5. Mapas composicionais de grão de granada da amostra UX-1, coletada na cachoeira da entrada da cidade de Carvalhos. Estão representadas as distribuições dos elementos (A) FE, (B) Mg, (C) Mn e (D) Ca. Notar que o núcleo químico do grão não coincide com o núcleo geográfico do mesmo. Imagens feitas com microsonda eletrônica, usando os detectores WDS. Em (A) está marcado o perfil composicional (E), feito ao longo do grão, de modo a mostrar as maiores variações composicionais do grão.

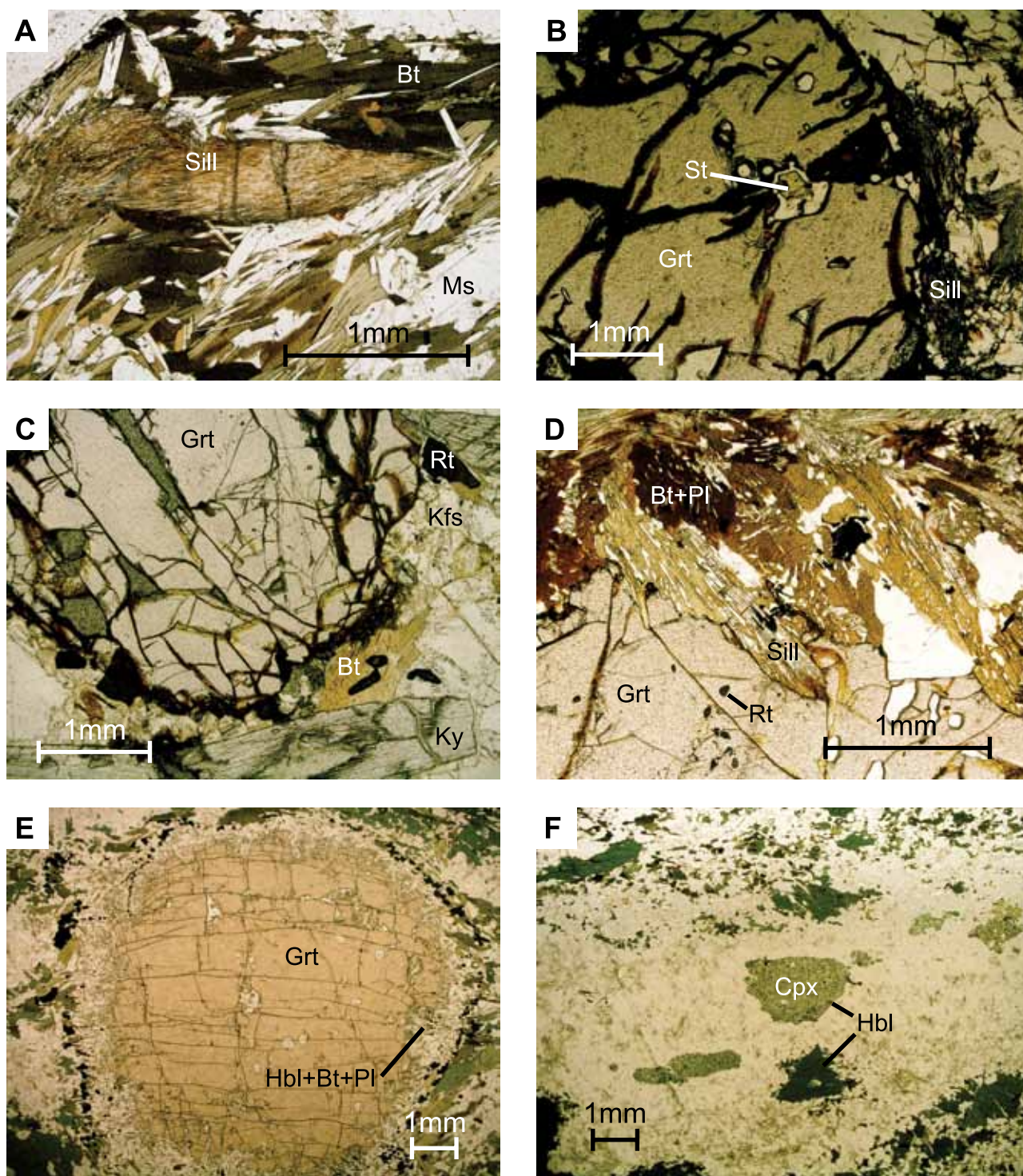


Figura 6. Fotomicrografias. **A.** Pseudomorfo de cianita que foi substituído por fibrolita - *Nappe Andrelândia*. **B.** Inclusão de estauroлита em granada de granulito pelítico da *Klippe Carvalhos*. **C.** Paragênese de auge metamórfico contendo biotita + rutilo + cianita + granada + ortoclásio em granulito paraderivado da *Klippe Carvalhos*. **D.** Coronas simplectíticas ao redor de granada contendo biotita + plagioclásio + sillimanita em granulito paraderivado da *Klippe Carvalhos*. **E.** Coronas simplectíticas ao redor de granada contendo biotita + plagioclásio + hornblenda + magnetita em granulito máfico da *Klippe Carvalhos*. **F.** Diopsídio com hornblenda na borda no leucossoma de granulito máfico da *Klippe Carvalhos*.

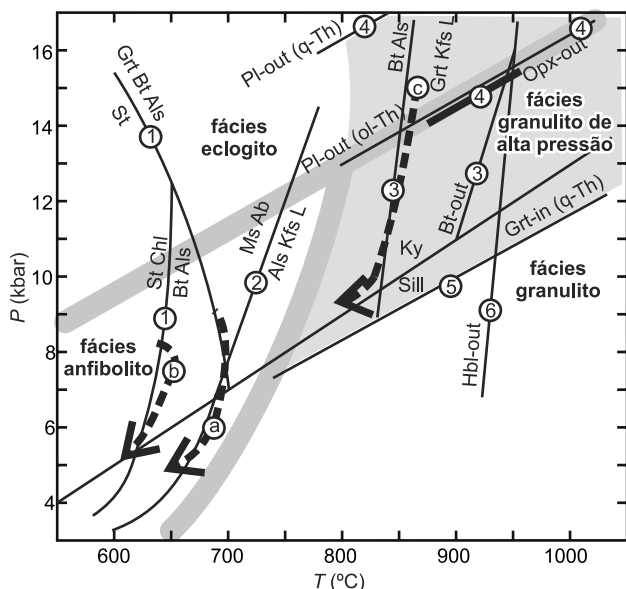
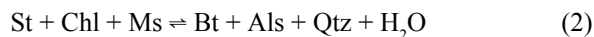


Figura 7. Trajetórias metamórficas inferidas para as rochas das três estruturas: **a.** sillimanita-granada-biotita xisto da Nappe Andrelândia; **b.** estauroлита-cianita-granada-biotita xisto da Nappe Liberdade; **c.** granulito máfico da Klippe Carvalhos. As curvas das reações ou campos são retirados dos seguintes trabalhos: **1.** Spear e Cheney (1989); **2.** Spear, Kohn e Cheney (1999); **3.** Vielzeuf e Holloway (1988); **4.** Green e Ringwood (1967); **5.** Ito e Kennedy (1971); **6.** Patiño-Douce e Beard (1995).

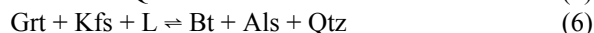
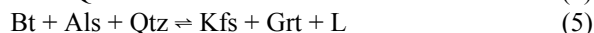
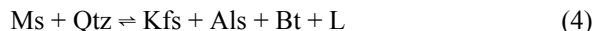
cimento. O núcleo do grão apresenta trilha de inclusões que delineiam foliação interna ondulada, discordante da foliação externa (S_2) da rocha. A relação indica que o cristal inicia a cristalização tardi-pós a geração de S_1 , com feições idioblásticas (Figura 3). A borda mais límpida, aliada à foliação externa se amoldando ao grão, sugere crescimento sin-tardi S_2 . Os mapas composicionais (Figura 3) também refletem esses estágios de crescimento.

O auge metamórfico se dá na foliação principal pela paragênese muscovita + biotita + cianita + granada + estauroлита. A estabilidade entre cianita e estauroлита sugere temperaturas acima de 600°C (Spear e Cheney, 1989), ultrapassando reações de quebra de clorita (reação 2) e com temperaturas inferiores a 650 - 720°C, dependendo da pressão (Spear e Cheney, 1989), limite superior da estauroлита (reação 1). As condições P - T calculadas com THERMOCALC indicam temperatura de $648 \pm 23^\circ\text{C}$ e pressões de $7,41 \pm 1$ kbar e são compatíveis com as observações realizadas em petrografia (Figura 7). Coroas de muscovita muito fina envolvendo cianita sugerem reações de re-hidratação retrometamórfica (reação 3).



Klippe Carvalhos

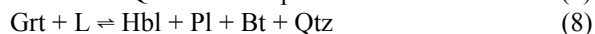
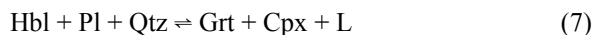
O rutilo-cianita-granada-feldspato potássico granulito da *klippe* registra a trajetória progressiva a partir do campo da estauroлита (início com $T > 500^\circ\text{C}$, Spear e Cheney, 1989), evidenciado pela inclusão do mineral em granada (Figura 6B). A ausência de muscovita e entrada de feldspato potássico evidenciam quebra total de muscovita (reação 4), superando temperaturas na ordem de 720°C (Spear, Kohn, Cheney, 1999). A escassez de biotita e a presença de cianita e granada no leucossoma da rocha sugerem início das primeiras reações de quebra de biotita (reação 5), em torno de 850°C (Vielzeuf e Holloway, 1988). A associação mineral do pico metamórfico é formada por rutilo + cianita + granada + ortoclásio + quartzo \pm biotita \pm plagioclásio (Figura 6C). As condições de pico metamórfico calculadas com o THERMOCALC apontam $845 \pm 53^\circ\text{C}$ a $15,7 \pm 5,2$ kbar. O caminho retrogressivo se deu com descompressão isotermal, evidenciado pela presença de coronas simplectíticas em torno da granada contendo biotita, quartzo e sillimanita (reação 6 - Figura 6D). A desestabilização de cianita para sillimanita também ocorre devido à queda de pressão e não por aumento de temperatura. Para a amostra UX-1 as condições P - T calculadas com o THERMOCALC são $847 \pm 45^\circ\text{C}$ e $13,6 \pm 5,8$ kbar. Não é possível saber se as condições calculadas refletem as condições do pico metamórfico, pois os cálculos dependem da escolha da atividade de H_2O na rocha, o que não pode ser calculado ou estimado de uma maneira simples e direta. Quando os cálculos são feitos com valores de $a_{\text{H}_2\text{O}}$ menores que 1, as condições calculadas diminuem drasticamente, chegando a valores irrealistas, muito abaixo daqueles necessários para a quebra da biotita e formação de granada + cianita + líquido, chegando a cair dentro do campo de estabilidade da sillimanita. As condições mínimas experimentais da reação são de 850°C e 11 kbar (Vielzeuf e Holloway, 1988), o que coincide com os cálculos feitos.



No granulito máfico, cristais poiquiloblásticos de hornblenda sugerem reações progressivas contínuas de substituição de anfíbolio, através de trocas do tipo *tschermack* ($\text{Mg}^{\text{VI}}\text{Si}^{\text{IV}}_{-1}\text{Al}^{\text{VI}}\text{Al}^{\text{IV}}$) e edenítica ($\square^{\text{A}}\text{Si}^{\text{IV}}_{-1}\text{Na}^{\text{A}}\text{Al}^{\text{IV}}$, \square representa vacância). A paragênese clinopiroxênio + granada + plagioclásio + quartzo é considerada de pico metamórfico (reação 7) e sugere condições superiores a 840°C e

11,5 kbar (Pattison, 2003). A presença de feldspato alcalino apenas no leucossoma evidencia quebra de biotita. As condições calculadas com o THERMOCALC para os minerais do mesossoma fornecem condições *P-T* de $854 \pm 71^\circ\text{C}$ e $15 \pm 1,4$ kbar, do campo de granada granulito (alta pressão) definido por Green e Ringwood (1967), para granulito máfico formado acima das pressões de entrada de granada para rocha de composição quartzo-toleítica.

Coronas simplectíticas em torno de granada (Figura 6E) com intercrescimento de plagioclásio + biotita + hornblenda (reação 8) sugerem caminho descompressivo isothermal. Com os dados químicos obtidos nas coronas, o geotermômetro anfibólio-plagioclásio (Blundy e Holland, 1990) aponta temperatura de 835°C a 10 kbar, dado obtido pelo geobarômetro Al em anfibólio (Hollister et al., 1987). Além disso, a presença de hornblenda na borda de clinopiroxênio do leucossoma sugere reações de re-hidratação (Figura 6F, reação 9). A trajetória *P-T* (Figura 7) é compatível à estabelecida para o rutilo-cianita-granada-feldspato-potássico-granulito.



CONCLUSÕES

Com base nos dados coletados, existem diferenças no registro metamórfico das diferentes *nappes*. A amostra da *Nappe* Andrelândia foi coletada na base da estrutura, apresenta como associação mineral quartzo + muscovita + biotita + granada + sillimanita + plagioclásio, e as condições *P-T* calculadas com THERMOCALC apontam temperaturas de 690°C e pressões de 5,6 kbar. Pelas informações obtidas na petrografia, a condição calculada não reflete o pico bórico e talvez nem o pico metamórfico, já que a sillimanita ocorre como pseudomorfos de cianita, indicando origem por descompressão, sendo as condições *P-T* consideradas como as da passagem pelo campo da sillimanita e não como as do pico metamórfico. Na *Nappe* Liberdade as condições calculadas por termobarometria devem significar o pico metamórfico atingido em torno de 650°C e 7,4 kbar, através da associação estauroilita + muscovita + biotita + granada + cianita + quartzo + plagioclásio. As rochas da *Klippe* Carvalhos apresentam um salto no metamorfismo em relação às rochas sotopostas da *Nappe* Liberdade, com temperaturas altas, acima dos 850°C e pressões da ordem de 15 kbar. Feições petrográficas em granulitos paraderivados sugerem reações de quebra de biotita com reação de fusão por desidratação, com geração de granada no leucossoma e melanossoma com biotita ausente. Elas corroboram as observações realizadas em rochas metamáficas que possuem

leucossoma com clinopiroxênio. As condições *P-T* calculadas para rochas máficas apontam temperaturas na ordem de 850°C e pressões de 15 kbar. As feições simplectíticas desenvolvidas em torno de porfiroblastos de granada, tanto dos granulitos paraderivados quanto do máfico, indicam caminho descompressivo isothermal a 835°C e 10 kbar, com taxa de resfriamento de $3^\circ\text{C}/\text{kbar}$.

As rochas das três *nappes* possuem características químicas e texturais sugerindo duas fases de crescimento em porfiroblastos de granadas. Não foi possível determinar se isso está relacionado a novo pulso metamórfico como, por exemplo, a interferência da Faixa Ribeira (Peternel, Trouw, Schmitt, 2005) ou a mudanças de reações metamórficas. Os dados obtidos não são conclusivos para confirmar uma ou outra destas hipóteses. Portanto, com os estudos petrográficos e termobarométricos realizados pode-se concluir que:

1. as *nappes* Andrelândia e Liberdade encontram-se metamorfizadas em fácies anfibolito, com pico bórico no campo da cianita;

2. a *Klippe* Carvalhos enquadra-se no contexto de granulitos de alta pressão, caracterizados por rochas pelíticas com paragênese cianita + granada + ortoclásio + rutilo, livre de ortopiroxênio e em rochas máficas pela paragênese granada + clinopiroxênio + plagioclásio;

3. o campo dos granulitos de alta pressão sobrepõe-se ao campo dos eclogitos, assim a presença de plagioclásio em rochas máficas indica que a composição do protólito é quartzo-toleítico, na qual o plagioclásio é capaz de suportar pressões mais elevadas antes de sua quebra (Green e Ringwood, 1967; O'Brien e Rötzler, 2003);

4. apesar das diferenças metamórficas registradas, as três estruturas apresentam assinaturas semelhantes de suas trajetórias *P-T*, em sentido horário e com importante estágio de descompressão isothermal.

AGRADECIMENTOS

Pesquisa financiada pela FAPESP (projeto regular de pesquisa de R Moraes, 04/09682-8). Parte das análises minerais foi obtida no Laboratório de Microsonda da Universidade de Maryland; agradecemos a Michael Brown e Philip Piccoli pela ajuda. As análises feitas no Instituto de Geociências da USP contaram com a ajuda de Marcos Mansueto. Os autores agradecem as críticas e sugestões de dois revisores anônimos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. Origem e evolução da plataforma brasileira. *Boletim Divisão Geologia Mineralogia*, Rio de Janeiro, n. 241, p. 1-36, 1967.

- ALMEIDA, S. *Petrologia de rochas ultramáficas associadas ao Grupo Andrelândia e seu embasamento, na região de Liberdade, Arantina, Andrelândia, São Vicente de Minas e Carrancas, MG.* 1998. 194 f. Tese (Doutoramento) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- BLUNDY, J. D.; HOLLAND, T. J. B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 104, p. 208-224, 1990.
- CAMPOS NETO, M. C. Orogenic Systems from Southwestern Gondwana: an approach to Brasiliano – Pan African cycle and orogenic collage in southeastern Brazil. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Ed.). *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro. 2000. p. 335-365.
- CAMPOS NETO, M. C.; CABY, R. Neoproterozoic high-pressure metamorphism and tectonic constraint from the nappe system south of the São Francisco Craton, southeast Brazil. *Precambrian Research*, v. 97, p. 3-26, 1999.
- CAMPOS NETO, M. C.; CABY, R. Terrane accretion and upward extrusion of high-pressure granulites in the Neoproterozoic nappes of southeast Brazil: Petrologic and structural constraints. *Tectonics*. v. 19, p. 669-687, 2000.
- CAMPOS NETO, M. C.; BASEI, M. A. S.; VLACH, S. R. F.; CABY, R.; SZABÓ, G. A. J.; VASCONCELOS, P. Migração de orógenos e superposição de orogêneses: Um esboço da colagem Brasileira no sul do Cráton do São Francisco, SE – Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, v. 4, p. 13-40, 2004.
- CAMPOS NETO, M. C.; BASEI, M. A. S.; JANASI, V. A.; SIGA JR., O.; CORDANI, U. G. O Grupo Andrelândia no sistema de *nappes* Andrelândia Orienta. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 3., 2005, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG, 2005. p. 143-146.
- CAMPOS NETO, M. C.; JANASI, V. A.; BASEI, M. A. S.; SIGA JR., O. Sistema de *Nappes* Andrelândia, setor oriental: litoestratigrafia e posição estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, p. 47-60, 2007.
- CIOFFI, C. R. Geologia dos granulitos de alta pressão da *Klippe* Carvalhos, extensão sul da Faixa Brasília. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M.; SILVA, L. J. H. D. Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Balneário Camboriú. *Anais...* Balneário Camboriú,: SBG, 1994. v. 1, p. 215-216.
- GREEN, D. H.; RINGWOOD, A. E. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 31, p. 767-833, 1967.
- HASUI, Y. The Mantiqueira Province: Archean structure and Proterozoic evolution. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 12, p. 167-172, 1982.
- HEILBRON, M.; VALERIANO, C. M.; VALLADARES, C. S.; MACHADO, N. A. Orogêneses Brasileira no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 25, p. 249-266, 1995.
- HOLLAND, T. J. B.; POWELL, R. An internally-consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 16, p. 309-343, 1998.
- HOLLISTER, L. S.; GRISSOM, G. C.; PETERS, E. K.; STOWELL, H. H.; SISSON, V. B. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, v. 72, p. 231-239, 1987.
- ITO, K.; KENNEDY, G. C. An experimental study of the basalt-garnet granulite-eclogite transition. In: HEACOCK, J. G. (Ed.). *The structure and Physical Properties of the Earth's Crust*, 14. Washington DC: American Geophysical Union, 1971. p. 302-314. (Geophysical monograph, 14).
- JUNHO, M. C. B. Leucogranitos e migmatitos entre Liberdade e Alagoa, sul de MG. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 3., 1993, Rio de Janeiro. *Atas...* Rio de Janeiro: UERJ-SBG, 1993. p. 138-143.
- JUNHO, M. C. B.; MENDES, J. C. Diatexite gneisses of the Andrelândia Group, southern Minas Gerais, Brazil: geological and geochemical constraints. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, p. 353-357, 2000.
- KRIEGSMAN, L. M.; HENSEN, B. J. Back reaction between restite and melt: implications for geothermobarometry and pressure-temperature paths. *Geology*, v. 26, p. 1111-1114, 1998.

- KOHN, M. J.; SPEAR, F. S. Retrograde net transfer reaction insurance for pressure-temperature estimates. *Geology*, v. 28, p. 1127-1130, 2000.
- MARINI, O. J.; FUCK, R. A.; DANNI, J. C. M.; DARDENNE, M. A.; LOUGUERCIO, S. O. C.; RAMALHO, R. As faixas de dobramentos Brasília, Uruçu e Paraguai-Araguaia e o Maciço de Goiás. In: SCHOBENHAUS, C.; ALMEIDA CAMPOS, D.; DERZE, G. R.; AMUS, H. E. *Geologia do Brasil*. Brasília: DNPM, 1983. p. 251-299.
- PACIULLO, F. V. P. A Sequência Depositional Andrelândia. 1997. 191 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.
- PACIULLO, F. V. P.; RIBEIRO, A.; ANDREIS, R. R.; TROUW, R. A. J. The Andrelândia Basin, a neoproterozoic intraplate continental margin, southern Brasília, Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, p. 200-202, 2000.
- PATIÑO DOUCE, A. E.; BEARD, J. S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, v. 36, p. 707-738, 1995.
- PATTISON, D. R. M. Petrogenetic significance of orthopyroxene-free garnet + clinopyroxene + plagioclase ± quartz bearing metabasites with respect to the amphibolites and granulite facies. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 21, p. 21-34, 2003.
- PETERNEL, R.; TROUW, R. A. J.; SCHMITT, R. S. Interferência entre duas faixas móveis Neoproterozóicas: o caso das Faixas Brasília e Ribeira no sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, p. 297-310, 2005.
- O'BRIEN, P. J.; RÖTZLER, J. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 21, p. 3-20, 2003.
- RIBEIRO, A.; TROUW, R. A. J.; ANDREIS, R. R.; PACIULLO, F. V. P.; VALENÇA, J. G. Evolução das bacias neoproterozóicas e termo-tectonismo Brasileiro na margem sul do Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 25, p. 235-248, 1995.
- SANTOS, E.; BRITONEVES, B. B. Província Borborema. In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (Coord.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blucher, 1984. p. 153-186.
- SPEAR, F. S.; CHENEY, J. T. A petrogenetic grid for pelites schists in the system $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 101, p. 149-164, 1989.
- SPEAR, F. S.; KOHN, M. J.; CHENEY, J. T. P-T paths from anatetic pelites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 134, p. 17-32, 1999.
- THERMOCALC (3.32): banco de dados. Disponível em <<http://www.metamorph.geo.uni-mainz.de/thermocalc/>>. Acesso em : 09 de mar. de 2010.
- TROUW, R. A. J. Evolução tectônica ao sul do Cráton do São Francisco, baseado em análise metamórfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBG, 1992. p. 327.
- TROUW, R. A. J.; PACIULLO, F. V. P.; RIBEIRO, A. A Faixa Alto Rio Grande reinterpretada como zona de interferência entre a Faixa Brasília e a Faixa Ribeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Camboriú. *Resumos...* Camboriú: SBG, 1994. v. 3, p. 234-235.
- TROUW, R. A. J.; HEILBRON, M.; RIBEIRO, A.; VALERIANO, C. M.; ALMEIDA, J. C. H.; TUPINAMBÁ, M.; ANDREIS, R. R. The central segment of the Ribeira Belt. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (Ed.). *Tectonic Evolution of South America*, Rio de Janeiro, 2000a, p. 287-310.
- TROUW, R. A. J.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F. V. P.; HEILBRON, M. Interference between the Neoproterozoic Brasília and Ribeira Belts, with special emphasis on high-pressure granulites. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. *Field Trip Guide...* Rio de Janeiro, 2000b. 45 p.
- TROUW, R. A. J.; PETERNEL, R. A zona de interferência entre as faixas Brasília e Ribeira. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 10., 2007, Ouro Preto. *Livro de Resumos...* Ouro Preto: SBG, 2007. p. 18.
- VALERIANO, C. M.; DARDENNE, M. A.; FONSECA, M. A.; SIMÕES, L. S. A.; SEER, H. J. A evolução tectônica da Faixa Brasília. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Org.) *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 575-592.

VIELZEUF, D.; HOLLOWAY, J. R. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system: Consequences for crustal differentiation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 98, p. 257-276, 1988.