

**PETROGRAFIA, QUÍMICA MINERAL E GEOTERMOBARMETRIA DE  
RETROECLOGITO NO GRUPO ARAXÁ NA REGIÃO DA ZONA DE  
CISALHAMENTO VARGINHA, SUDOESTE DE MINAS GERAIS**

*PETROGRAPHY, MINERAL CHEMISTRY AND GEOTERMOBARMETRY OF  
RETROECLOGITE OF ARAXÁ GROUP FROM VARGINHA SHEAR ZONE REGION,  
SOUTHWEST OF MINAS GERAIS STATE*

**Thaís Güitzlaf LEME<sup>1</sup>, Guillermo Rafael Beltran NAVARRO<sup>2</sup>, Antenor ZANARDO<sup>2</sup>,  
Cibele Carolina MONTIBELLER<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Email: thais.guitzlaf@hotmail.com, cibelemcm@outlook.com.

<sup>2</sup>Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Emails: guillermo.navarro@unesp.br, antenor.zanardo@unesp.br

Introdução  
Métodos Analíticos  
Geologia Regional  
Geologia Local e Petrografia  
Química Mineral  
Granada  
Clinopiroxênio  
Anfibólio  
Plagioclásio  
Geotermobarometria  
Average P-T  
Zr-em-rutilo  
Ti-em-quartzo  
Isopletas  
Discussões  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências

**RESUMO** - A área de estudo está situada no sudoeste do estado de Minas Gerais, a norte da cidade de Guaxupé e nas proximidades do distrito de Santa Cruz do Prata (município de Guaranésia), região afetada pela Zona de Cisalhamento Varginha. É constituída por litotipos atribuídos ao Grupo Araxá, posicionados em zona de sutura de blocos crustais, amalgamados durante a orogênese brasileira no Neoproterozoico (Zona de Sutura de Alterosa). Nessa região, o Grupo Araxá é composto por metassedimentos pelíticos a psamo-pelíticos com intercalações de ortognaisses e de rochas metamáficas e metaultramáficas. Intercaladas nestes litotipos, foram descritas ocorrências de rochas metamáficas de alta pressão, com texturas symplectíticas e coroníticas, interpretadas como retroeclogitos. Neste trabalho são apresentados dados petrográficos, de química mineral e geotermobarométricos obtidos em retroeclogito. Os resultados de geotermobarometria por elementos traço (Zr-em-rutilo e Ti-em-quartzo) indicam condições de reequilíbrio metamórfico mais antigas em fácies eclogito, com temperatura de 763°C e pressão de 14,4 kbar. As condições de reequilíbrio em fácies anfibolito superior, calculadas pelo software THERMOCALC, são de 12,5 ±0,8 kbar e 799 ±37°C. Os dados texturais e mineralógicos, associados aos dados de geotermobarometria, sugerem trajetória P-T-t horária associada a decompressão quase isotérmica. Os resultados são compatíveis com zonas de colisão continental com espessamento crustal.

**Palavras-Chave:** Fácies eclogito, Zona de Cisalhamento Varginha, Zona de Sutura de Alterosa, Faixa Brasília Meridional.

**ABSTRACT** - The study area is located in the southwest of Minas Gerais state, north of the Guaxupé city and in the vicinity of the Santa Cruz do Prata district (Guaranésia municipality), a region affected by the Varginha Shear Zone. It is constituted of lithotypes attributed to the Araxá Group, placed in a suture zone of crustal blocks, and amalgamated during the Brazilian orogenesis in Neoproterozoic (Alterosa Suture Zone). In this region, the Araxá Group is composed of pelitic to psamo-pelitic metasediments with orthogneisses, metamafic and metaultramafic rocks intercalations. Interleaved with these lithotypes, it was described high pressure metamafic rocks occurrences with symplectitic and coronitic textures which were interpreted as retroeclogites. In this paper are presented petrographic, mineral chemistry and geotermobarometric data obtained in retroeclogite. The geotermobarometry results by trace elements (Zr-in-rutile and Ti-in-quartz) indicate older metamorphic rebalancing conditions in eclogite facies, with temperature of 763°C and pressure of 14.4 kbar. The rebalancing conditions in upper amphibolite facies, calculated by the THERMOCALC software, are 12.5 ±0.8 kbar and 799 ±37 °C. The textural and mineralogical data, combined with geotermobarometric data, suggest a clockwise P-T-t path associated to near isothermal decompression. The results are compatible with continental collision zones with crustal thickening.

**Keywords:** Eclogite Facies, Varginha Shear Zone, Alterosa Suture Zone, Southern Brasília Belt.

## INTRODUÇÃO

A porção sul/sudoeste do estado de Minas Gerais compreende terrenos pré-cambrianos, neoproterozoica (complexos Barbacena e Guaxupé), circundadas por sequências constituídos por rochas de idade arqueana a metassedimentares alóctones, como os grupos

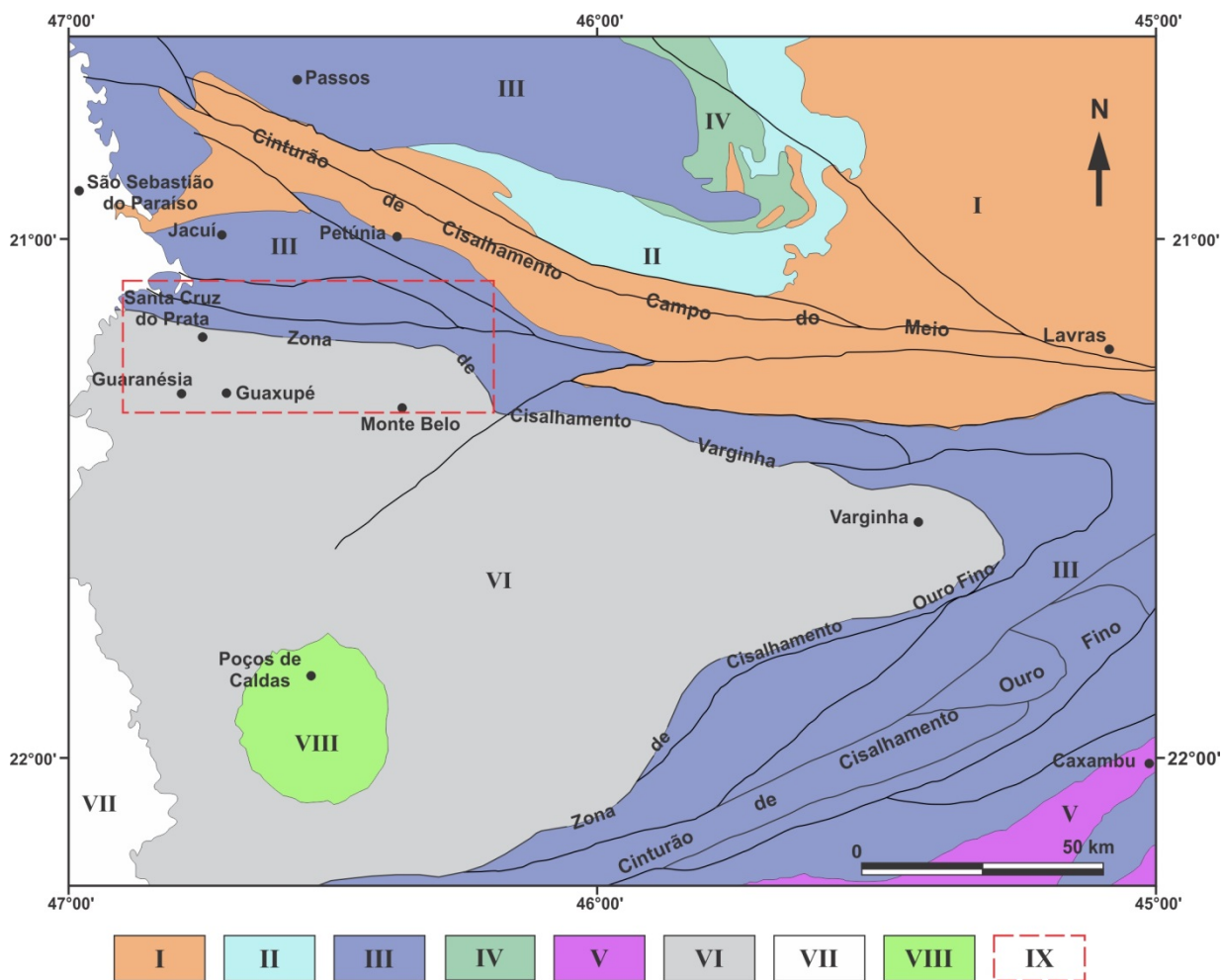
Araxá, Andrelândia e São João Del Rei, autóctones e/ou para-autóctones, como os grupos Canastra e Bambuí, e zonas de cisalhamento neoproterozoicas, que evidenciam uma história tectono-metamórfica complexa.

A estruturação regional, reconhecida pela gravimetria, mostra blocos crustais justapostos, reconhecidos a norte, o Cráton do São Francisco e, a sul, o Bloco ou Placa Paranapanema. Os limites dos blocos são definidos por grandes descontinuidades gravimétricas (anomalias tipo *Boulger*) e correspondem a uma faixa de deformação intensa, marcada pela atuação do Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio, e definindo a Zona de Sutura de Alterosa (Almeida et al., 1980; Hasui, 1982; Haralyi & Hasui, 1982a, b; Haralyi et al., 1985; Hasui et

al., 1990; Zanardo et al., 2006).

Esta faixa aflora a sul do Complexo Barbacena, na região de Jacuí – Bom Jesus da Penha – Petúnia, e a norte do Complexo Guaxupé, na região de Guaranésia – Guaxupé – Monte Belo, e suas litologias são atribuídas ao Grupo Araxá (Zanardo, 1992, 2003; Zanardo et al., 1996, 2006) (Figura 1).

As zonas de sutura são cinturões intensamente deformados que representam antigos orógenos colisionais e bacias oceânicas, e são reconhecidas pela ocorrência de complexos de subducção, complexos acrescionários, arcos magmáticos continentais e oceânicos, cinturões de empurrão e terrenos de alta a ultra alta pressão e são definidas, principalmente, por meio de estudos geofísicos (Chetty et al., 2011).



**Figura 1** - Mapa geológico da região sudoeste do estado de Minas Gerais (Modificado de Zanardo, 2003). I - Complexo Barbacena. II - Grupo Bambuí. III - Grupos Araxá, Andrelândia e São João Del Rei; Complexos Itapira e Amparo. IV - Grupo Canastra. V - Complexo Socorro. VI - Complexo Guaxupé. VII - Bacia do Paraná. VIII - Maciço Alcalino de Poços de Caldas. IX – Localização da figura 2.

A ocorrência de rochas metamáficas (eclogitos e/ou retroeclogitos) nas zonas de sutura são fundamentais para a investigação e compreensão das condições metamórficas às quais as rochas foram submetidas.

Intercalado nas litologias metassedimentares atribuídas ao Grupo Araxá nesta região (logo a norte da Zona de Cisalhamento Varginha), foram descritas ocorrências de rochas metamáficas com texturas simplectíticas e com

dados de química mineral característicos de rochas de zonas de alta pressão (Zanardo, 1992; Del Lama et al., 1994).

As ocorrências de rochas de alta pressão associadas ao Grupo Araxá são poucas, e foram descritas na região de São Sebastião do Paraíso (Hoppe et al., 1985, 1989; Luvizotto, 2003) e na região do distrito de Santa Cruz do Prata, município de Guaranésia (Zanardo, 1992; Del Lama et al., 1994), e são representadas por granada anfíbolitos com plagioclásio e clinopiroxênio, com texturas simplectíticas e coroníticas, sendo denomi-

nadas de “retroeclogitos”.

Apesar de sua importância, as ocorrências de rochas de alta pressão registradas no Grupo Araxá ainda carecem de estudos mais aprofundados que envolvam detalhamento petrográfico, estudos de química mineral e de geotermobarometria.

Assim, o presente trabalho apresenta a caracterização petrográfica, de química mineral e geotermobarométrica de uma destas ocorrências denominadas de retroeclogitos, no Grupo Araxá, logo a norte da Zona de Cisalhamento Varginha.

## MÉTODOS ANALÍTICOS

Amostras de retroeclogito foram selecionadas para estudos petrográficos detalhados, análises de química mineral e cálculos geotermobarométricos.

As análises de química mineral foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, Campus de Rio Claro, por microsonda eletrônica da marca JEOL modelo JXA-8230 *superprobe*. As condições analíticas foram de aceleração de 15 kV, corrente de 20 nA e diâmetro do feixe de 10 µm, para análise de cristais de anfíbólio, clinopiroxênio, granada e plagioclásio, e condições de 20 kV de

aceleração, corrente de 80 nA e diâmetro do feixe de 5 µm para análise de elementos traço em cristais de rutilo e quartzo.

Os resultados representativos das análises dos elementos maiores são apresentados nas tabelas 1, 2, 3 e 4.

Os cálculos geotermobarométricos foram realizados utilizando o *software THERMOCALC 3.26*, modo *Average-PT* (Powell & Holland, 1994), e os geotermômetros Zr-em-rutilo, calibração de Tomkins et al. (2007) e Ti-em-quartzo, calibração de Thomas et al. (2010). As abreviaturas minerais utilizadas neste trabalho são as propostas por Kretz (1983).

## GEOLOGIA REGIONAL

Na região da área de estudo, ocorrem unidades litoestratigráficas que compõem dois blocos continentais associados a colisão neoproterozoica, separados pela Zona de Sutura de Alterosa, que representa o limite entre os dois domínios litológicos (Almeida et al., 1980; Haralyi & Hasui, 1982a, b; Haralyi et al., 1985; Zanardo et al., 2006).

O Complexo Barbacena, localizado a norte, é constituído por uma complexa associação litológica que inclui terrenos migmatíticos e granito-gnaiss-*greenstone*, além de intercalações tectônicas de rochas supracrustais alóctones e autóctones dos grupos Araxá, Canastra e Bambuí (Figura 1).

O Complexo Guaxupé (Oliveira et al., 1986; Del Lama, 1998; Del Lama et al. 2000; Zanardo, 2003; Zanardo et al. 2006), domínio norte da *Nappe* Socorro-Guaxupé (Campos Neto et al., 1984; Campos Neto & Caby, 1999), ocorre a sul (Figura 1), e é composto por litologias ortoderivadas de natureza

intermediária a ácida (granulitos félsicos a máficos), com intercalações de metassedimentos (pelíticos, psamíticos e carbonáticos), de rochas metamáficas (granulitos básicos) e, mais raramente, de rochas metaultramáficas (Del Lama et al., 2000; Zanardo et al., 2006).

Encaixado entre essas unidades, a norte do Complexo Guaxupé e a sul da exposição do Complexo Barbacena, ocorre uma faixa estruturada segundo a direção E-W a WNW-ESE (Figura 1), atribuída por Cavalcante et al. (1979) ao Complexo Campos Gerais, por Trouw et al. (1984) ao Grupo Andrelândia e São João Del Rei e por Zanardo (1992, 2003) e Zanardo et al. (1996, 2006) ao Grupo Araxá.

O Grupo Araxá, nessa porção, é constituído por metassedimentos pelíticos a psamopelíticos, com intercalações de ortognaisses e granitoides sin- a tardi tectônicos e intercalações tectônicas de rochas metamáficas e metaultramáficas, afetadas pelo Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio. Os litotipos são

representados por gnaisses paraderivados e ortoderivados com composição granítica a tonalítica, xistos e quartzitos com ou sem granada e/ou cianita, anfibolitos, anfibólio gnaisses,

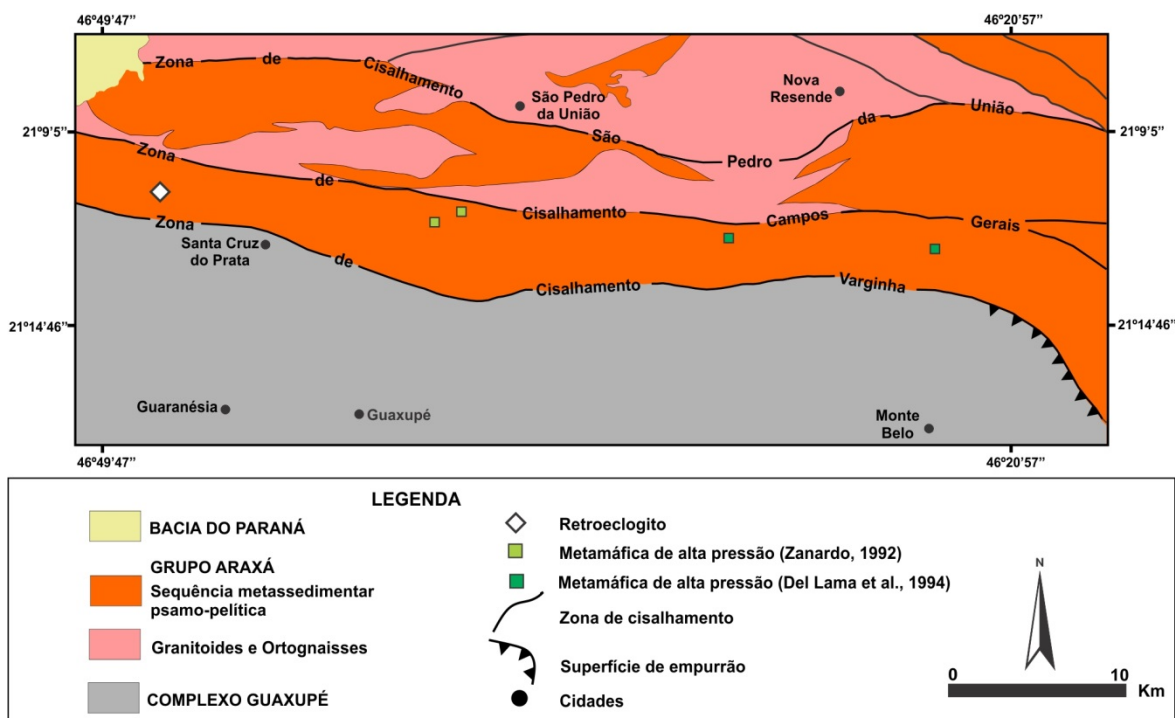
rochas metaultramáficas e subordinadamente rochas calciossilicáticas e gnditos (Zanardo, 1992, 2003; Del Lama, 1993, 1998; Del Lama et al., 1994; Zanardo et al., 1996, 2006).

## GEOLOGIA LOCAL E PETROGRAFIA

Na região entre as Zonas de Cisalhamento Varginha e Campos Gerais (Figura 2), o Grupo Araxá é constituído por cianita-granada gnaisses, cianita-granada gnaisses quartzosos, cianita-granada xistos, cianita-granada quartzitos, granada quartzitos e granada gnaisses (com anfibólio, biotita e clinopiroxênio), além de intercalações subordinadas de rochas metamáficas como anfibolitos com granada e clinopiroxênio, e rochas metaultramáficas. A estrutura dessas rochas é marcada por forte anisotropia, com foliação orientada segundo a direção E-W a WNW, milonítica a comumente blastomilonítica (Leme, 2019).

Nessa porção, logo a noroeste do distrito de Santa Cruz do Prata (extremo sudeste da folha topográfica de Monte Santo de Minas) (Figura 2), intercalada em rochas metassedimentares, foi descrita uma ocorrência de rocha metamáfica com granada, clinopiroxênio, plagioclásio e anfibólio, interpretada como retroeclogito (Leme, 2019), anteriormente descrita como granulito tonalito máfico por Nascimento (2010).

O retroeclogito constitui uma lente métrica intercalada tectonicamente em metassedimentos pelíticos com granada e cianita, concordante com a direção das rochas encaixantes, e apresenta contato brusco com estas.



**Figura 2** - Mapa geológico simplificado mostrando a localização da ocorrência de retroeclogito deste trabalho (Modificado de Zanardo et al., 2006; Leme, 2019). O mapa mostra a ocorrência de rochas metamáficas de alta pressão estudadas por Zanardo (1992) e Del Lama et al. (1994).

É uma rocha de coloração verde escuro com cristais de granada milimétricos de coloração marrom avermelhada (Figura 3A), apresenta estrutura anisotrópica, com textura granoblástica inequigranular e domínios porfiroblásticos (Figura 3B, C). É constituída por granada (30-35%), clinopiroxênio (30-35%), anfibólio ( $\pm 10\%$ ), plagioclásio ( $\pm 10\%$ ), quartzo (5-10%), com mineralogia acessória composta por

ilmenita (2-3%), rutilo ( $< 1-2\%$ ), titanita ( $< 1\%$ ), apatita ( $< 1\%$ ), além de traços de zircão.

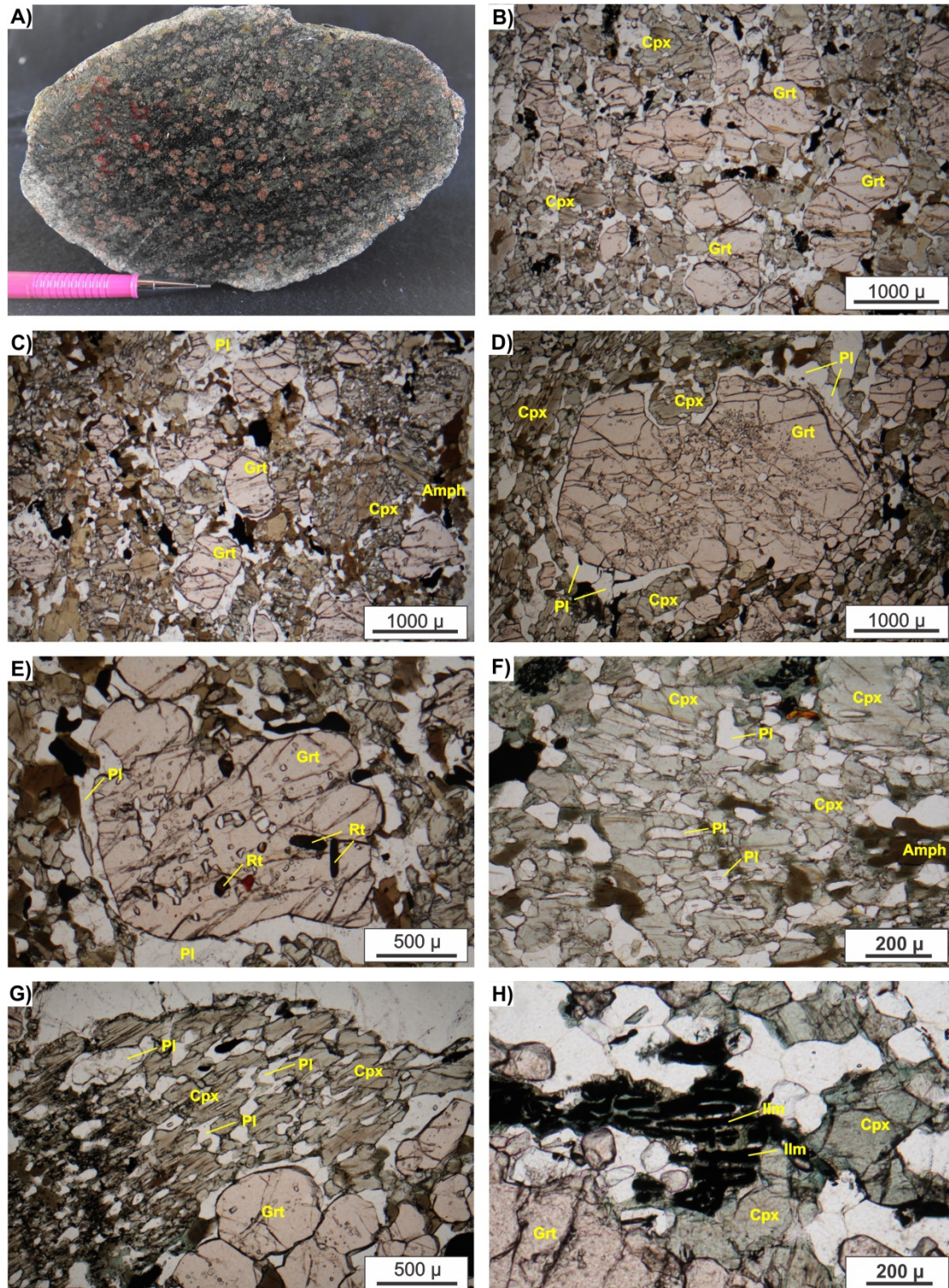
A granada ocorre como cristais subédricos, anédricos a arredondados, com bordas irregulares e lobuladas e dimensões que variam de 500  $\mu\text{m}$  a 5.000  $\mu\text{m}$ . Os cristais são poiquilíticos, com inclusões de quartzo, plagioclásio, clinopiroxênio, rutilo, anfibólio, ilmenita e zircão. Frequentemente ocorrem



circundados por coroas de plagioclásio e quartzo (Figura 3D, E). A granada em contato com o clinopiroxênio é menos frequente.

Os cristais de clinopiroxênio são anédricos a subédricos, com dimensões médias da ordem de 500  $\mu\text{m}$  e podem alcançar dimensões de até

2.500  $\mu\text{m}$ . Comumente são simplectíticos, marcados pelo intercrescimento de plagioclásio lamelar e vermiforme, além de quartzo (Figura 3F, G). Podem ocorrer parcialmente uralitizados e/ou com bordas substituídas por clinioanfíbólio.



**Figura 3** – A): Amostra de retroclogito; B-C): Textura granoblástica constituída dominantemente por cristais de clinopiroxênio com domínios porfiroblásticos compostos por granada (Polarizadores paralelos); D-E): Cristais de granada poiquilíticos com coroas de plagioclásio (Polarizadores paralelos); F-G): Cristais de clinopiroxênio com intercrescimento lamelar e venular de plagioclásio (Polarizadores paralelos); H): Cristal de clinopiroxênio com intercrescimento de ilmenita e plagioclásio (Polarizadores paralelos). Amph: anfibólio, Cpx: clinopiroxênio, Grt: granada, Ilm: ilmenita, Pl: plagioclásio, Rt: rutilo.



O clinofibólio ocorre sob a forma de cristais anédricos a subédricos, com dimensões que podem alcançar até 3.000  $\mu\text{m}$ . Os cristais apresentam forte pleocroísmo em tons de marrom esverdeado a marrom pálido, e mostram-se associados principalmente aos cristais de clinopiroxênio, corroendo estes e também intercrescidos nos cristais simplectíticos. Localmente formam coroas em torno de cristais de clinopiroxênio e ilmenita.

Os cristais de plagioclásio são anédricos a subédricos, com contatos retos a predominantemente lobulados e dimensões da ordem de 200  $\mu\text{m}$ . Possuem extinção ondulante leve e raramente apresentam geminação polissintética nítida. Constituem coroas em torno de cristais de granada com contatos retos entre si (textura de equilíbrio) e ocorrem com formas lamelares a vermiformes no interior de cristais de clinopiroxênio, desenvolvendo textura simplectítica.

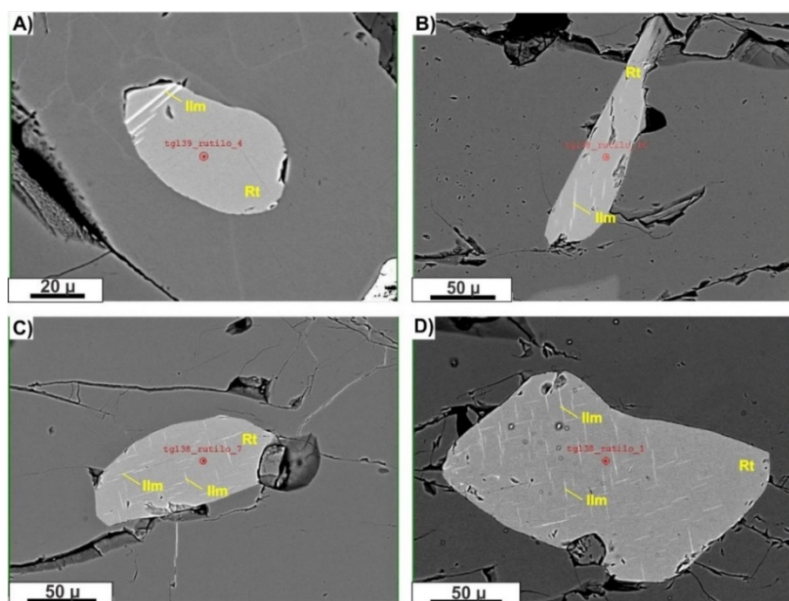
Os cristais de quartzo são anédricos, com dimensões geralmente inferiores a 500  $\mu\text{m}$  e

mostram extinção ondulante leve a moderada.

A ilmenita ocorre sob formas subédricas a anédricas, com dimensões que variam de inferiores a 400  $\mu\text{m}$  a 1.500  $\mu\text{m}$ , associada aos minerais máficos, principalmente ao anfibólio e também ocorre inclusa em cristais de granada. Localmente apresenta coroas de anfibólio e textura vermiforme com o clinopiroxênio (Figura 3H).

Os cristais de rutilo são subédricos ou anédricos e arredondados, com dimensões inferiores a 300  $\mu\text{m}$  e ocorrem inclusos em cristais de granada (Figura 3E). Frequentemente apresentam lamelas de exsolução de ilmenita (Figura 4A, B, C, D).

A titanita ocorre como cristais arredondados, associada aos minerais máficos, e pode ocorrer substituindo cristais de rutilo e ilmenita ou formando coroas em torno destes. A apatita é arredondada, com dimensões da ordem 100  $\mu\text{m}$  e ocorre dispersa pela rocha. O zircão é arredondado, com tamanho inferior a 100  $\mu\text{m}$  e pode estar disperso ou incluso em cristais de granada.



**Figura 4** - Imagens retroespalhadas de cristais de rutilo inclusos em granada analisados nas amostras de retroeclogito. A-D): Cristal de rutilo com finas lamelas de exsolução de ilmenita. Ilm: ilmenita, Rt: rutilo.

## QUÍMICA MINERAL

### Granada

A composição dos cristais de granada analisados é dominada pelas moléculas de almandina ( $\text{Alm}_{49,72-60,03}$ ) e grossulária ( $\text{Grs}_{16,68-30,40}$ ), seguida por proporções intermediárias de piropo ( $\text{Prp}_{12,39-20,97}$ ) e menores proporções de andradita ( $\text{Adr}_{1,21-9,00}$ ) e espessartita ( $\text{Sps}_{1,40-2,90}$ ). Os perfis composicionais apresentam-se geralmente

planos (quase retos), com pequenas variações nas bordas, definidas por leve aumento de  $\text{Fe}^{2+}$  e leve diminuição de Ca. As concentrações de piropo e espessartita são homogêneas ao longo de todos os cristais e as concentrações de andradita mostram fraca diminuição em direção às bordas (Figura 5A, B, C). Raros cristais apresentam zoneamento, definido do núcleo para a borda, pelo

enriquecimento em Ca (seguido por uma diminuição na borda) e diminuição dos teores

de Mg e  $Fe^{2+}$  (seguido por um aumento na borda) (Figura 5D).

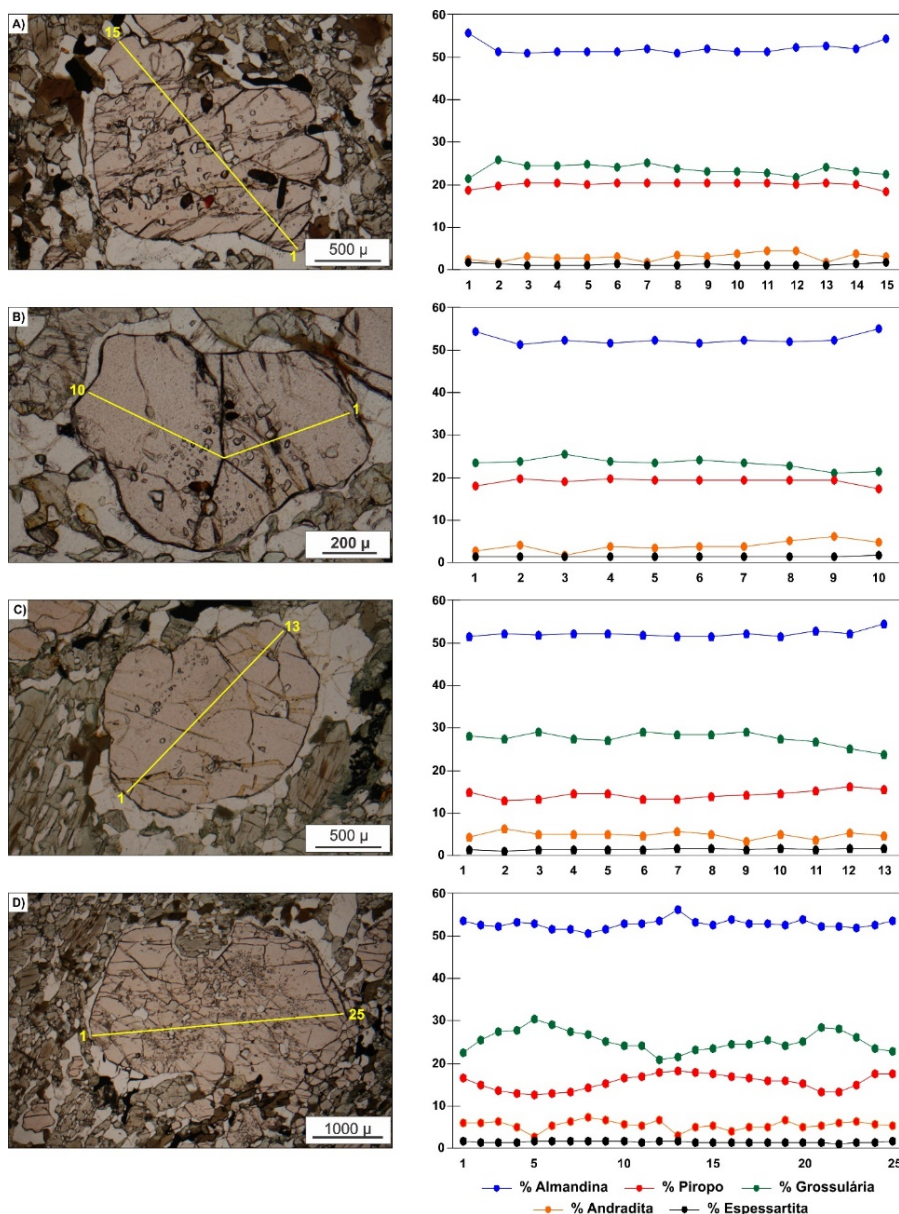


Figura 5 – A-D): Perfis composicionais de cristais de granada em amostra de retroeclogito do Grupo Araxá.

### Clinopiroxênio

Os cristais de clinopiroxênio analisados são classificados como sahlita ( $Wo_{43,63-48,30}En_{29,99-34,61}Fs_{17,67-23,79}$ ) (Figura 6A), com teores de Ca variando de 0,786 a 0,892 átomos por unidade de fórmula (*a.p.u.f.*), de Mg entre 0,544 e 0,633 *a.p.u.f.*, de  $Fe^{2+}$  variando entre 0,320 e 0,425 *a.p.u.f.* e conteúdo de  $X_{Mg}$  entre 0,580 e 0,663. Apresentam conteúdos de Al variando de 0,097 a 0,232 *a.p.u.f.* e de Na variando entre 0,042 e 0,075 *a.p.u.f.* ( $Jd_{4,104-6,658}$ ), mostrando correlação positiva entre esses teores (Figura 6B). Os cristais com textura simplectítica mostram os menores teores de Al e Na.

### Anfibólio

Os cristais de anfibólio analisados apresen-

tam composição cálcica ( $Ca_B \geq 1,5$ ,  $Na_A + K_A \geq 0,5$ ,  $Ti \leq 0,5$  e  $Si < 6,5$ ) e são classificados como magnésio-hastingsita no diagrama de Leake et al. (1997) (Figura 6C). Mostram conteúdos de Ti variando entre 0,192 e 0,262 *a.p.u.f.*, de  $Al^{IV}$  entre 1,401 e 1,627 *a.p.u.f.* e de  $Al^{VI}$  entre 0,536 e 0,621 *a.p.u.f.* O conteúdo de Si varia de 6,373 a 6,599 *a.p.u.f.*, o de Ca de 1,782 a 1,885 *a.p.u.f.*, o de Mg de 1,817 a 2,517 *a.p.u.f.*, de  $Fe^{2+}$  de 2,045 a 2,448 *a.p.u.f.* e o de  $Na_B$  de 0,063 a 0,116 *a.p.u.f.* Os teores de  $Na_A$  são relativamente altos, de 0,399 a 0,559 *a.p.u.f.* e os de K são relativamente baixos, de 0,091 a 0,118 *a.p.u.f.* Os cristais mostram leve enriquecimento de Al em direção às bordas.

## Plagioclásio

Os cristais de plagioclásio analisados apresentam composição variando entre oligoclásio e andesina ( $An_{20,72-33,81}$ ) (Figura 6D), predominando cristais com composi-

ção de oligoclásio. Mostram teores de Na variando de 0,637 a 0,783 *a.p.u.f.*, de Ca entre 0,206 e 0,328 *a.p.u.f.*, de K de 0,002 a 0,007 *a.p.u.f.* e de  $Fe^{3+}$  entre 0,001 e 0,008 *a.p.u.f.*

**Tabela 1** – Análises químicas por microsonda eletrônica em cristais de granada e proporção molecular dos cristais analisados. Os átomos por unidade de fórmula (*a.p.u.f.*) foram calculados na base para 12 oxigênios.

Amostra	TGL-38						TGL-39							
	1_1	1_3	1_4	1_5	1_6	1_8	2_1	2_3	2_4	2_5	2_6	2_7	2_8	2_10
<b>Cristal</b>	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>Local</b>	b	n	n	n	n	b	b	n	n	n	n	n	n	b
<b>SiO<sub>2</sub></b>	38,304	38,883	38,332	38,610	38,307	38,134	38,465	38,340	38,396	38,135	38,273	38,032	38,061	37,935
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,039	0,056	0,041	0,043	0,038	0,037	0,033	0,107	0,049	0,038	0,045	0,039	0,048	0,058
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	21,132	21,146	21,515	21,451	21,213	21,473	21,159	21,527	21,448	21,334	21,342	21,527	21,163	21,311
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,012	0,000	0,001	0,000	0,000	0,037	0,005	0,012	0,009	0,000	-0,006	0,000	0,002	0,006
<b>FeO</b>	27,292	24,693	24,550	24,393	24,061	25,032	25,879	24,530	24,964	24,978	24,796	24,954	25,153	26,346
<b>MnO</b>	0,966	0,580	0,577	0,527	0,566	0,682	0,643	0,612	0,588	0,590	0,575	0,599	0,599	0,745
<b>MgO</b>	4,350	5,205	5,144	5,190	5,279	4,696	4,644	4,943	5,063	4,947	4,961	4,976	4,919	4,393
<b>CaO</b>	8,014	9,945	9,921	9,906	10,232	9,717	9,471	9,823	9,860	9,675	9,988	9,614	9,873	9,273
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,009	0,002	0,000	0,006	0,016	0,000	0,003	0,029
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,000	0,000	0,014	0,000	0,009	0,000	0,000	0,002	0,006	0,014	0,000	0,000	0,005	0,000
<b>Total</b>	00,096	00,477	00,093	00,097	99,688	99,812	00,304	99,898	100,381	99,703	99,989	99,721	99,824	00,087
<b>Si</b>	3,006	3,009	2,977	2,996	2,983	2,979	2,997	2,986	2,977	2,979	2,979	2,968	2,971	2,967
<b>Al<sup>IV</sup></b>	0,000	0,000	0,023	0,004	0,017	0,021	0,003	0,014	0,023	0,021	0,021	0,032	0,029	0,033
<b>Soma</b>	3,006	3,009	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
<b>Al<sup>VI</sup></b>	1,953	1,927	1,944	1,956	1,928	1,954	1,938	1,961	1,935	1,941	1,935	1,947	1,917	1,930
<b>Ti</b>	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,006	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003
<b>Fe<sup>3+</sup></b>	0,024	0,043	0,068	0,037	0,080	0,056	0,057	0,034	0,076	0,071	0,078	0,075	0,101	0,094
<b>Cr</b>	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Soma</b>	1,980	1,973	2,015	1,996	2,009	2,014	1,997	2,002	2,014	2,014	2,015	2,024	2,021	2,028
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	1,767	1,555	1,526	1,546	1,487	1,579	1,629	1,564	1,543	1,560	1,536	1,554	1,541	1,629
<b>Mn</b>	0,064	0,038	0,038	0,035	0,037	0,045	0,042	0,040	0,039	0,039	0,038	0,040	0,040	0,049
<b>Mg</b>	0,509	0,600	0,595	0,600	0,613	0,547	0,539	0,574	0,585	0,576	0,576	0,579	0,572	0,512
<b>Ca</b>	0,674	0,825	0,825	0,824	0,854	0,813	0,791	0,820	0,819	0,810	0,833	0,804	0,826	0,777
<b>Na</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,002	0,000	0,000	0,004
<b>Soma</b>	3,014	3,018	2,985	3,004	2,991	2,986	3,003	2,998	2,986	2,986	2,985	2,976	2,979	2,972
<b>Σ Cátions</b>	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
<b>Alm</b>	58,63	51,52	51,13	51,45	49,72	52,89	54,26	52,16	51,68	52,26	51,46	52,21	51,73	54,81
<b>Pyp</b>	16,89	19,90	19,95	19,98	20,49	18,32	17,96	19,14	19,60	19,29	19,29	19,45	19,21	17,24
<b>Grs</b>	21,11	25,14	24,26	25,55	24,58	24,34	23,47	25,60	23,64	23,58	24,05	23,31	22,72	21,47
<b>And</b>	1,21	2,19	3,39	1,86	3,97	2,78	2,84	1,70	3,76	3,54	3,87	3,70	4,99	4,66
<b>Sps</b>	2,13	1,26	1,27	1,15	1,25	1,51	1,41	1,35	1,29	1,31	1,27	1,33	1,33	1,66
<b>Uvr</b>	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,02	0,04	0,03	0,00	0,02	0,00	0,01	0,02

## GEOTERMOBAROMETRIA

### Average P-T

Os cálculos de *Average P-T* (Powell & Holland, 1994) foram realizados com o software *THERMOCALC 3.26*.

Para os cálculos, utilizou-se a associação

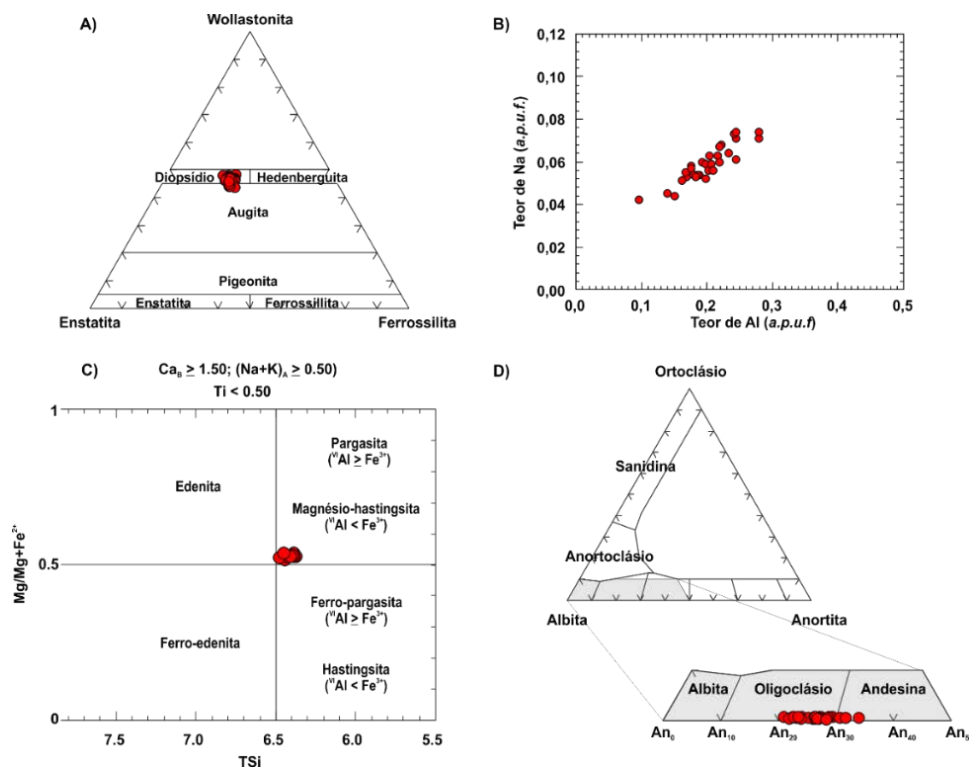
mineral sahlita + almandina + Mg-hastingsita + andesina/oligoclásio + quartzo, com atividade de  $CO_2$  ( $\alpha_{CO_2}$ ) igual a 0,7.

Os resultados calculados são apresentados na tabela 5.



**Tabela 2** – Análises químicas por microsonda eletrônica em cristais de piroxênio. Os átomos por unidade de fórmula (*a.p.u.f.*) foram calculados na base para 6 oxigênios.

Amostra	TGL-38							TGL-39							
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
SiO <sub>2</sub>	49,020	49,713	49,088	49,450	49,630	48,917	49,644	50,483	50,266	50,069	50,440	50,119	50,429	50,009	50,232
TiO <sub>2</sub>	0,661	0,482	0,681	0,567	0,577	0,544	0,642	0,468	0,555	0,554	0,478	0,515	0,455	0,542	0,518
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,395	4,957	5,464	5,474	4,875	6,253	4,833	3,927	4,624	4,900	4,156	4,638	4,721	5,213	4,537
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,049	0,000	0,028	0,035	0,019	0,022	0,005	0,030	0,028	0,012	0,019	0,019	0,016	0,022	0,025
FeO	12,092	12,189	13,311	10,945	12,203	11,833	12,132	11,270	12,328	12,226	12,624	12,153	10,978	12,626	12,022
MnO	0,109	0,085	0,103	0,102	0,108	0,116	0,101	0,098	0,106	0,099	0,123	0,097	0,110	0,091	0,085
MgO	10,853	10,456	10,307	10,695	10,867	10,700	10,283	10,559	9,635	9,863	10,191	9,992	10,537	9,970	10,177
CaO	19,472	20,257	19,202	21,070	19,545	19,609	20,682	21,642	21,593	20,779	21,021	20,860	21,444	20,344	21,271
Na <sub>2</sub> O	0,984	0,927	1,009	0,837	0,910	0,971	0,850	0,777	0,800	0,810	0,729	0,763	0,768	0,872	0,759
K <sub>2</sub> O	0,134	0,032	0,041	0,067	0,086	0,053	0,030	0,005	0,000	0,021	0,028	0,027	0,039	0,033	0,016
Total	98,769	99,096	99,233	99,241	98,819	99,018	99,200	99,257	99,931	99,333	99,807	99,183	99,497	99,721	99,642
Si	1,874	1,895	1,875	1,877	1,895	1,862	1,893	1,919	1,906	1,905	1,915	1,909	1,907	1,896	1,906
Al <sup>IV</sup>	0,126	0,105	0,125	0,123	0,105	0,138	0,107	0,081	0,094	0,095	0,085	0,091	0,093	0,104	0,094
Soma	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al <sup>VI</sup>	0,118	0,118	0,121	0,122	0,114	0,142	0,110	0,095	0,113	0,124	0,101	0,118	0,118	0,129	0,109
Ti	0,019	0,014	0,020	0,016	0,017	0,016	0,018	0,013	0,016	0,016	0,014	0,015	0,013	0,015	0,015
Cr	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001
Mg	0,618	0,594	0,587	0,605	0,618	0,607	0,584	0,598	0,544	0,559	0,577	0,567	0,594	0,563	0,576
Fe <sup>2+</sup>	0,387	0,389	0,425	0,347	0,390	0,377	0,387	0,358	0,391	0,389	0,401	0,387	0,347	0,400	0,381
Mn	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,004	0,003	0,003
Ca	0,798	0,827	0,786	0,857	0,800	0,800	0,845	0,882	0,877	0,847	0,855	0,852	0,869	0,827	0,865
Na	0,073	0,069	0,075	0,062	0,067	0,072	0,063	0,057	0,059	0,060	0,054	0,056	0,056	0,064	0,056
Soma	2,018	2,013	2,018	2,013	2,010	2,017	2,011	2,008	2,004	1,999	2,005	1,999	2,001	2,003	2,005
Σ Cátions	4,018	4,013	4,018	4,013	4,010	4,017	4,011	4,008	4,004	3,999	4,005	3,999	4,001	4,003	4,005



**Figura 6** – (A): Diagrama ternário Ca-Mg-Fe para classificação de piroxênios (Morimoto, 1988); (B): Diagrama binário Al (em *a.p.u.f.*) x Na (em *a.p.u.f.*) para cristais de piroxênio em amostras de retroeclogito; (C): Diagrama de classificação de anfibólios cálcicos (Modificado de Leake et al., 1997) para cristais de anfibólio de amostras de retroeclogito; (D): Diagrama ternário de classificação de feldspatos.

**Tabela 3** - Análises químicas por microsonda eletrônica em cristais de anfibólio. Os átomos por unidade de fórmula (*a.p.u.f.*) foram calculados na base de 23 oxigênios.

Amostra	TGL-38							TGL-39			
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
SiO <sub>2</sub>	42,512	42,415	42,461	42,642	42,658	42,460	42,563	42,366	43,572	42,886	42,632
TiO <sub>2</sub>	2,207	2,207	2,166	2,315	2,262	2,140	2,221	2,036	1,685	1,805	1,898
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,859	12,291	12,442	11,976	12,552	12,075	12,143	11,788	11,039	11,633	12,080
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,070	0,048	0,061	0,043	0,044	0,027	0,074	0,035	0,025	0,017	0,021
FeO	16,346	16,331	16,779	16,233	16,363	16,390	16,529	18,564	19,328	17,238	16,549
MnO	0,089	0,106	0,100	0,095	0,049	0,089	0,082	0,141	0,165	0,085	0,089
MgO	9,547	9,795	9,617	9,684	9,712	9,817	9,670	8,427	8,049	9,540	9,638
CaO	11,527	11,153	11,243	11,393	11,416	11,553	11,365	11,140	11,617	11,164	10,971
Na <sub>2</sub> O	2,105	2,257	2,204	2,189	2,233	2,177	2,150	1,829	1,573	1,953	1,904
K <sub>2</sub> O	0,542	0,479	0,544	0,486	0,554	0,531	0,499	0,609	0,559	0,473	0,534
<b>Total</b>	96,802	97,081	97,618	97,056	97,842	97,259	97,295	96,935	97,612	96,793	96,314
Si	6,428	6,387	6,373	6,422	6,374	6,393	6,402	6,454	6,599	6,492	6,463
Al <sup>IV</sup>	1,572	1,613	1,627	1,578	1,626	1,607	1,598	1,546	1,401	1,508	1,537
<b>Soma</b>	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al <sup>VI</sup>	0,542	0,569	0,575	0,548	0,586	0,536	0,555	0,571	0,570	0,568	0,621
Ti	0,251	0,250	0,244	0,262	0,254	0,242	0,251	0,233	0,192	0,205	0,216
Cr	0,008	0,006	0,007	0,005	0,005	0,003	0,009	0,004	0,003	0,002	0,003
Mg	2,151	2,198	2,151	2,174	2,163	2,203	2,168	1,913	1,817	2,152	2,177
Fe <sup>2+</sup>	2,047	1,977	2,022	2,011	1,992	2,016	2,017	2,279	2,418	2,073	1,982
<b>Soma</b>	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Fe <sup>2+</sup>	0,020	0,080	0,084	0,033	0,053	0,048	0,062	0,086	0,030	0,110	0,116
Mn	0,011	0,013	0,013	0,012	0,006	0,011	0,010	0,018	0,021	0,011	0,011
Ca	1,868	1,800	1,808	1,838	1,828	1,864	1,832	1,818	1,885	1,811	1,782
Na	0,101	0,107	0,095	0,116	0,113	0,077	0,096	0,077	0,063	0,069	0,091
<b>Soma 6</b>	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Na	0,516	0,552	0,546	0,523	0,534	0,559	0,531	0,463	0,399	0,504	0,469
K	0,105	0,092	0,104	0,093	0,106	0,102	0,096	0,118	0,108	0,091	0,103
<b>Soma 1</b>	0,620	0,644	0,651	0,617	0,639	0,661	0,627	0,582	0,507	0,596	0,572
<b>Σ Cátions</b>	15,620	15,644	15,651	15,617	15,639	15,661	15,627	15,582	15,507	15,596	15,572

Os valores de condições *P-T*, para as variáveis calculadas simultaneamente, resultam em pressões que variam de 11,7±1,10 kbar a 12,5±1,10 kbar e temperaturas que variam de 724±48°C a 799±37°C, com valores de correlação baixos, variando de 0,20 a 0,30 (Figura 7A, Tabela 5).

Os resultados de pressão calculados separadamente são menos homogêneos quando comparado aos valores de pressão calculados junto da temperatura, e variam de 10,58±0,60 kbar a 12,9 ±0,48 (Tabela 5).

Já os valores de temperatura calculados separadamente são correspondentes aos calculados em conjunto com a pressão, variando de 735 ±33°C a 808 ±50°C (Tabela 5).

Não foi possível calcular valores de pressão e temperatura quando o anfibólio é excluído da

associação mineral, sugerindo que este está em equilíbrio.

#### Zr-em-Rutilo

A concentração de Zr em rutilo é fortemente dependente da temperatura e da atividade de Si, e tem sido utilizada como um geotermômetro em rochas com associação mineral contendo rutilo, zircão e quartzo em equilíbrio (Zack et al., 2004; Watson et al., 2006; Tomkins et al., 2007).

Neste trabalho, foi utilizada a calibração de Tomkins et al. (2007), que assume um efeito secundário da pressão que acompanha a dependência primária da temperatura no conteúdo de Zr em rutilo.

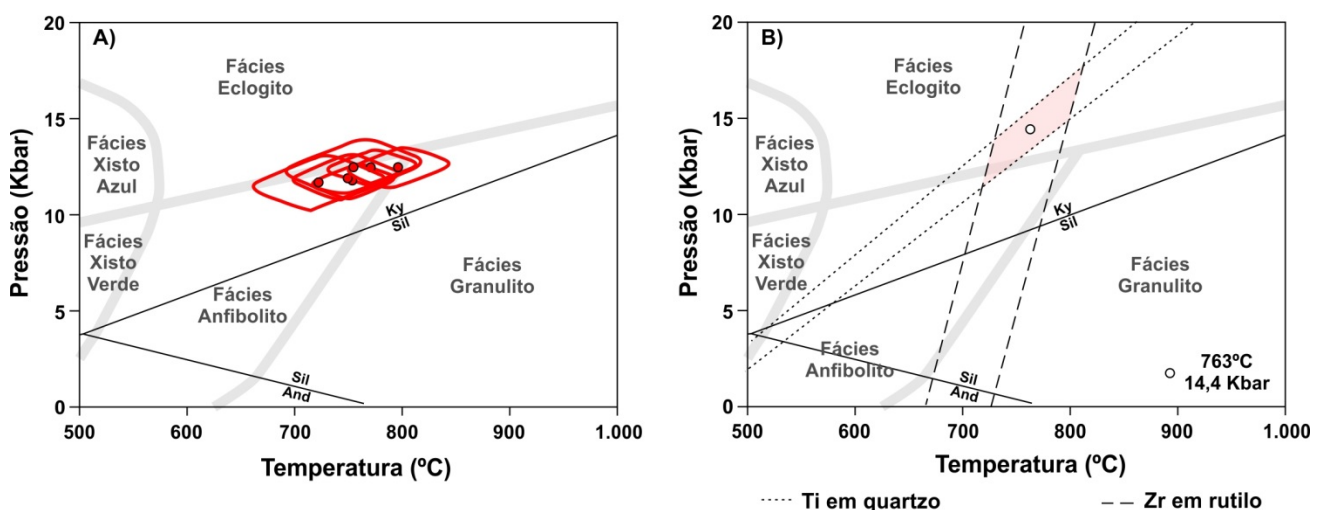
As concentrações de Zr em cristais de rutilo analisados e as respectivas temperaturas calculadas pelo geotermômetro são apresentados na tabela 6.

**Tabela 4** - Análises químicas por microsonda eletrônica em cristais de plagioclásio. Os átomos por unidade de fórmula (*a.p.u.f.*) foram calculados na base de 8 oxigênios.

Amostra	TGL-38							TGL-39						
	n	n	n	n	n	n	n	n	n	b	n	b	n	n
SiO <sub>2</sub>	59,623	60,689	60,012	62,117	62,048	60,809	60,361	61,361	62,167	60,942	61,874	61,115	60,345	62,814
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,813	24,949	24,991	23,861	24,156	25,158	25,452	24,566	23,924	24,787	24,014	24,817	25,158	23,741
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,184	0,115	0,104	0,059	0,059	0,134	0,052	0,167	0,036	0,093	0,048	0,107	0,252	0,056
BaO	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,013	0,000	0,006	0,000	0,000
CaO	6,881	5,654	6,118	4,522	4,920	5,900	6,224	5,495	4,579	5,492	4,979	5,785	5,912	4,357
Na <sub>2</sub> O	7,382	8,275	8,129	8,815	8,809	8,130	7,800	8,517	9,030	8,348	8,775	8,120	8,213	9,145
K <sub>2</sub> O	0,094	0,099	0,101	0,089	0,087	0,100	0,083	0,061	0,077	0,057	0,070	0,041	0,082	0,106
Total	99,966	99,784	99,422	99,427	100,067	100,193	99,972	100,153	99,814	99,731	99,707	99,992	99,945	100,214
Si	2,654	2,701	2,685	2,762	2,746	2,695	2,682	2,719	2,757	2,711	2,748	2,711	2,685	2,772
Al <sup>IV</sup>	1,355	1,309	1,318	1,251	1,260	1,314	1,333	1,283	1,251	1,300	1,257	1,298	1,320	1,235
Soma	4,009	4,010	4,003	4,012	4,007	4,009	4,015	4,002	4,008	4,011	4,005	4,009	4,004	4,007
Fe <sup>3+</sup>	0,006	0,004	0,004	0,002	0,002	0,004	0,002	0,006	0,001	0,003	0,002	0,004	0,008	0,002
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,328	0,270	0,293	0,215	0,233	0,280	0,296	0,261	0,218	0,262	0,237	0,275	0,282	0,206
Na	0,637	0,714	0,705	0,760	0,756	0,699	0,672	0,732	0,776	0,720	0,755	0,698	0,708	0,783
K	0,005	0,006	0,006	0,005	0,005	0,006	0,005	0,003	0,004	0,003	0,004	0,002	0,005	0,006
Soma	0,977	0,993	1,008	0,982	0,996	0,989	0,975	1,002	1,000	0,988	0,998	0,979	1,003	0,996
Σ Cátions	4,986	5,003	5,010	4,995	5,003	4,998	4,989	5,004	5,007	4,999	5,003	4,988	5,008	5,004
Ab	65,64	72,18	70,22	77,51	76,04	70,96	69,06	73,46	77,77	73,10	75,82	71,58	71,21	78,68
An	33,81	27,25	29,20	21,97	23,47	28,46	30,45	26,19	21,79	26,58	23,78	28,18	28,33	20,72
Or	0,55	0,57	0,58	0,52	0,49	0,58	0,48	0,35	0,44	0,33	0,40	0,24	0,47	0,60
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

**Tabela 5** - Condições *P-T* calculadas pelo software *THERMOCALC* para amostras de retroeclogito.

Associação	Average <i>P-T</i> (Kbar e °C)	Cor.	P (Kbar)	T (°C)
cpx + grt + amph + pl + qtz	11,8 ±0,70 / 756 ±30	0,220	11,35 ±0,85	754 ±35
cpx + grt + amph + pl + qtz	12,0 ±0,90 / 749 ±39	0,217	11,76 ±0,82	748 ±43
cpx + grt + amph + pl + qtz	12,5 ±0,70 / 772 ±33	0,222	12,33 ±0,49	808 ±50
cpx + grt + amph + pl + qtz	12,5 ±1,10 / 757 ±49	0,298	12,30 ±0,48	735 ±33
cpx + grt + amph + pl + qtz	11,7 ±1,10 / 724 ±48	0,236	12,90 ±0,48	766 ±54
cpx + grt + amph + pl + qtz	12,5 ±0,80 / 799 ±37	0,308	10,58 ±0,60	796 ±29



**Figura 7** – (A): Diagrama *P-T* mostrando as condições de pressão e temperatura calculadas com o software *THERMOCALC* (*Average P-T*) para as amostras de retroeclogito; (B): Diagramas *P-T* mostrando o cálculo pareado dos geotermômetros Zr-em-rutilo (Tomkins et al., 2007) e Ti-em-quartzo (Thomas et al., 2010) para as amostras de retroeclogito. (Diagrama de fácies metamórficas modificado de Spear, 1993).



**Tabela 6** – Teores de Zr (em ppm) em cristais de rutilo em amostra de retroeclogito e temperaturas calculadas utilizando o termômetro Zr-em-rutilo de Tomkins et al. (2007) para o campo do quartzo- $\beta$  para pressões fixadas em 13, 14 e 15 kbar.

<b>Cristal</b>	<b>Textura</b>	<b>Zr</b>	<b>T (°C) - 13 kbar</b>	<b>T (°C) - 14 kbar</b>	<b>T (°C) - 15 kbar</b>
rt_1	Inclusão	944	767	772	777
rt_2	Inclusão	828	754	759	765
rt_3	Inclusão	947	767	772	778
rt_4	Inclusão	950	767	773	778
rt_5	Inclusão	961	768	774	779
rt_6	Inclusão	1.109	783	788	794
rt_8	Inclusão	1.171	788	794	799
rt_9	Inclusão	812	752	757	763
rt_10	Inclusão	720	741	746	751
rt_11	Inclusão	939	766	771	777
rt_12	Inclusão	640	730	735	740
rt_13	Inclusão	734	743	748	753
rt_14	Inclusão	752	745	750	755
rt_15	Inclusão	1.142	786	791	796
rt_16	Inclusão	942	766	772	777
rt_17	Inclusão	930	765	771	776

Na amostra de retroeclogito, foram analisados cristais de rutilo inclusos em cristais de granada, e o conteúdo de Zr varia de 640 a 1.171 ppm. Os cálculos para o geotermômetro de Zr-em-rutilo, para pressões de 13, 14 e 15 kbar, para o campo de estabilidade do quartzo- $\beta$ , resultam em temperaturas que variam de 730 a 788°C, de 735 a 794°C e de 740 a 799°C, respectivamente. Não foram observadas diferenças nas temperaturas calculadas em relação à posição do cristal de rutilo (borda e núcleo) inclusos em granada.

#### **Ti-em-Quartzo**

Diversos estudos experimentais quantificaram a dependência da temperatura e da pressão na solubilidade do Ti em quartzo (Wark & Watson, 2006; Ostapenko et al., 2007; Thomas et al., 2010; Huang & Audétat, 2012; Thomas et al., 2015). Quando em presença de minerais de titânio, especialmente rutilo, o Ti pode substituir o Si na estrutura do quartzo devido à natureza tetravalente desses cátions, sem que seja necessário o balanço de cargas. O potencial químico do Ti e a extensão da substituição do Ti pelo Si no quartzo, variam sistematicamente com a temperatura e a pressão, sendo utilizados como um geotermômetro. Neste trabalho, foi utilizada a calibração de Thomas et al. (2010), que assume forte dependência da temperatura e pressão no conteúdo de Ti no quartzo. Os resultados das

concentrações de elementos traço em quartzo e das respectivas temperaturas calculadas pelo geotermômetro são apresentados na tabela 7.

Foram analisados cristais de quartzo da matriz da rocha e cristais inclusos em granada. O teor de Ti em quartzo nos cristais da matriz varia de 28 a 66 ppm e o conteúdo de Ti dos cristais inclusos em granada varia de 38 a 58 ppm. Os cálculos para o geotermômetro Ti-em-quartzo, para pressões de 13, 14 e 15 kbar, resultam em temperaturas que variam de 689 a 776°C, de 709 a 798°C e de 729 a 820°C, respectivamente. Não foram observadas diferenças significativas nas temperaturas calculadas em relação aos cristais inclusos em granada e dos cristais na matriz.

#### **Isopletas**

A dependência da temperatura e da pressão na solubilidade de Ti no quartzo pode ser utilizada como geotermobarômetro quando combinada com geotermômetros de fases minerais coexistentes, como Zr-em-rutilo ou Zr-em-titanita, ou ainda com outros métodos termométricos e barométricos baseados em equilíbrio de fases metamórficas para estimar condições  $P$ - $T$  (Thomas et al., 2010). Para os mesmos autores, o uso do método Ti-em-quartzo é mais eficiente em rochas que contêm rutilo, com atividade de  $\text{TiO}_2$  ( $a_{\text{TiO}_2}$ ) igual a 1,0, combinando assim os métodos de Ti-em-quartzo e Zr-em-rutilo de Tomkins et al. (2007)

para obter estimativas de pressão e temperatura. Os cálculos das isopleias foram realizados para os cristais de rutilo e quartzo inclusos em

granada e mostram condições de 763°C e 14,4 kbar (campo de estabilidade variando de 718°C e 11,4 kbar a 812°C e 17,7 kbar) (Figura 7B).

**Tabela 7** - Teores de Ti (em ppm) analisados em cristais de quartzo em amostra de retroeclogito e temperaturas calculadas utilizando o termômetro Ti-em-quartzo de Thomas et al. (2010) para pressões fixadas em 13, 14 e 15 kbar.

Cristal	Textura	Ti	T (°C) – 13 kbar	T (°C) - 14 kbar	T (°C) - 15 kbar
qtz_1	Inclusão	40	724	745	766
qtz_3	Inclusão	38	718	739	760
qtz_4	Inclusão	55	756	777	799
qtz_5	Inclusão	53	752	774	795
qtz_6	Inclusão	52	751	772	794
qtz_7	Matriz	39	721	742	763
qtz_8	Matriz	52	751	772	794
qtz_9	Inclusão	56	758	779	801
qtz_10	Inclusão	44	733	754	775
qtz_11	Matriz	31	700	720	740
qtz_12	Matriz	40	723	744	764
qtz_13	Matriz	66	776	798	820
qtz_14	Matriz	37	715	736	756
qtz_15	Matriz	40	724	745	766
qtz_16	Inclusão	55	757	778	800
qtz_17	Inclusão	47	740	761	782
qtz_18	Matriz	47	740	761	782
qtz_19	Matriz	28	689	709	729
qtz_20	Matriz	49	745	766	787
qtz_21	Matriz	41	726	747	768
qtz_22	Matriz	38	718	739	760
qtz_24	Matriz	47	740	761	782
qtz_55	Matriz	44	734	755	776
qtz_26	Matriz	40	724	745	766
qtz_27	Matriz	33	705	726	746
qtz_28	Matriz	45	736	757	778
qtz_29	Matriz	46	738	759	781
qtz_30	Matriz	50	746	767	789
qtz_31	Inclusão	50	746	767	789
qtz_32	Inclusão	41	726	747	768
qtz_33	Inclusão	46	738	759	781
qtz_34	Inclusão	44	734	755	776
qtz_35	Inclusão	43	730	751	772
qtz_36	Inclusão	52	750	771	792
qtz_37	Inclusão	58	762	784	806
qtz_38	Inclusão	51	749	770	791
qtz_39	Inclusão	44	733	754	775
qtz_40	Inclusão	44	733	754	775

## DISCUSSÕES

O retroeclogito apresenta textura simplectítica, marcada pelo intercrescimento lamelar de Ca-piroxênio + Na-plagioclásio (An<sub>20-33</sub>), típica de eclogitos máficos retrometamorfisados (O'Brien, 1989; Harley,

1998; Oh & Liou, 1998; O'Brien & Rötzler, 2003; Waters, 2003; Lanari et al., 2013), originada a partir da reação sólido-sólido durante queda de pressão, em consequência da desestabilização da onfacita: onfacita + quartzo

→ Na-plagioclásio + Ca-clinopiroxênio (Ni et al., 2006; Zhang et al., 2006; Martin, 2018).

As análises químicas em cristais de clinopiroxênio mostram conteúdos de Al e Na (em *a.p.u.f.*) relativamente mais elevados, que sugerem condições de pressão mais elevadas. Os menores teores Al e Na ocorrem associados aos cristais com textura simplectítica.

A forma geral dos cristais de granada, mostrando bordas lobuladas, indica corrosão desta fase mineral, que ocorreu no estágio de reequilíbrio da assembleia mineral, durante a formação dos simplectitos e das coronas.

A composição dos cristais de granada é definida pela composição química global da rocha, dominando moléculas de almandina ( $\text{Alm}_{49,72-60,03}$ ) e grossulária ( $\text{Grs}_{16,68-30,40}$ ), com perfis composicionais quase retos e sutis variações composicionais em direção às bordas dos cristais. Essas características químicas são comuns para rochas de alto grau metamórfico, visto que, sob condições de altas temperaturas, a difusão intra-cristalina aumenta e leva à redução do zoneamento composicional, representando a homogeneização da composição seguida de pouca modificação durante o reequilíbrio (Tracy et al., 1976; Woodsworth, 1977; Yardley, 1977; Spear, 1993; Carlson & Schwarze, 1997; Cooke et al., 2000).

A composição química dos anfibólios analisados mostra elevados conteúdos de  $\text{Al}^{\text{IV}}$ , de  $\text{Al}^{\text{VI}}$ , de Ti e de álcalis (Na + K) e indica condições metamórficas de alta temperatura e de pressão alta a intermediária (Zakrutkin & Grigorenko, 1967; Kostyuk & Sobolev, 1969; Robinson et al., 1982; Deer et al., 1997), sugerindo que mesmo que o anfibólio tenha se formado durante o processo de uralitização do piroxênio, está em equilíbrio com a associação mineral de fácies anfibolito superior.

As condições *P-T* do auge metamórfico não podem ser quantificadas devido à ausência de minerais índices anteriores ao reequilíbrio (como onfacita, coesita e piropo). O reequilíbrio mais próximo do auge, ainda em

fácies eclogito, é representado pelas inclusões de rutilo e quartzo em porfiroblastos de granada, que, por meio do cálculo da intersecção das isopletras de Zr-em-rutilo e Ti-em-quartzo, indicam condições de 763°C e 14,4 kbar.

A temperatura determinada a partir do geotermômetro de Zr-em-rutilo, utilizando a calibração de Tomkins et al. (2007) no campo de estabilidade do quartzo- $\beta$ , em cristais de rutilo inclusos em granada, para pressão de 15 kbar, é de 799°C. A temperatura determinada pelo geotermômetro Ti-em-quartzo, segundo a calibração de Thomas et al. (2010), em cristais de quartzo incluso em granada, para pressão de 15 kbar, é de 806°C.

O reequilíbrio retrógrado em fácies eclogito/anfibolito superior é marcado pelo aparecimento de simplectitos de Na-plagioclásio + Ca-clinopiroxênio, como resultado da quebra do clinopiroxênio rico em sódio devido à queda das condições de pressão. A formação de coronas de plagioclásio em cristais de granada, o intercrescimento de anfibólio nos simplectitos e o início do processo de uralitização do clinopiroxênio, além da substituição de rutilo e ilmenita por titanita, marcam a transição para fácies anfibolito superior. Os cálculos geotermobarométricos para este reequilíbrio resultam em condições de 12,5  $\pm$  0,8 kbar e 799  $\pm$  37°C.

As feições mineralógicas e texturais indicam que esta rocha, inicialmente, era constituída por associação mineral anidra e sem plagioclásio, estável em condições de mais alta pressão, e com a queda das condições metamórficas, principalmente de pressão, gerou texturas típicas de retroeclogito, como cristais simplectíticos de Ca-piroxênio e Na-plagioclásio e coronas de plagioclásio e anfibólio em cristais de granada, associadas ao reequilíbrio metamórfico regional. Os dados texturais, mineralógicos e de geotermobarometria sugerem trajetória *P-T-t* horária com decompressão isotérmica (Figura 8).

## CONCLUSÕES

As condições de equilíbrio interpretadas como as mais próximas do auge metamórfico, nas amostras em estudo, indicam condições de fácies eclogito, com temperatura e pressão de 763°C e 14,4 kbar. As condições de 12,5  $\pm$  0,8

kbar e 799  $\pm$  37°C, obtidas pela associação mineral granada + clinopiroxênio + plagioclásio + anfibólio, representam o reequilíbrio retrometamórfico em transição de fácies eclogito a anfibolito superior. As condições de pressão

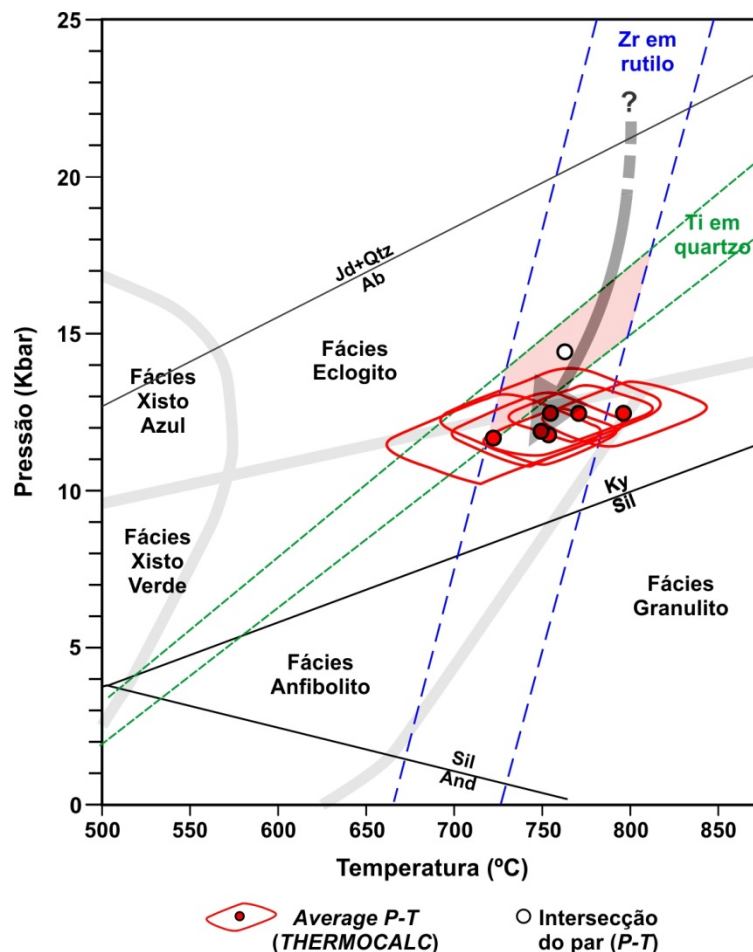


calculadas para esta ocorrência de retroeclogito no Grupo Araxá, a norte da Zona de Cisalhamento Varginha, ainda que próximas, são mais elevadas que as condições calculadas por Hoppe et al. (1989) e Luvizotto (2003) para os retroeclogitos do Grupo Araxá na *Nappe* de Passos e na região de São Sebastião do Paraíso, que mostram condições *P-T* de 650-700°C e 12,0-14,0 kbar e de 711-799°C e 12,5-13,5 kbar, respectivamente.

A reconstrução da trajetória *P-T-t* é

compatível com rochas de alta pressão típicas de zonas de colisão continental, caracterizadas por espessamento crustal inicial, seguido por decompressão quase isotérmica durante a exumação tectônica.

Assim, a origem do retroeclogito está associada a colisão do Bloco ou placa Paranapanema e do Cráton do São Francisco no Neoproterozoico, indicando que as rochas atribuídas ao Grupo Araxá na região atingiram condições de fácies eclogito.



**Figura 8** – Diagrama *P-T* mostrando as condições de pressão e temperatura calculadas pelo *software THERMOCALC* e pelo cálculo pareado Zr-em-rutilo e Ti-em-quartzo. A seta indica o caminhamento metamórfico horário. (Diagrama de fácies metamórficas modificado de Spear, 1993; linha de estabilidade da jadeíta retirada de Spear, 1993).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa (Código de Financiamento 001).

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; DAVINO, A.; HARALY, N.L.E. Informações geofísicas sobre o oeste mineiro e seu significado geotectônico. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 52, n. 1, p. 49-60, 1980.
- 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*, n. 97, p. 3-26, 1999.
- CAMPOS NETO, M.C.; BASEI, M.A.S.; ALVES, F.R.; VASCONCELOS, A.C.B. A *Nappe* de Cavalgamento Socorro (SP-MG). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1984, v. 4, p. 1809-1822.
- CARLSON, W. & SCHWARZE, E. Petrological significance of prograde homogenization of growth zoning in garnet: an example from the Llano Uplift. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 15, n. 5, p. 631-644, 1997.
- CAVALCANTE, J.C.; CUNHA, H.C.; CHIEREGATI, L.A.; KAEFER, L.Q.; ROCHA, J.M.; DAITX, E.C.; COUTINHO, M.G.N.; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; ROSA,

- D.B.; RAMALHO, R. **Projeto Sapucaí - Estados de São Paulo e Minas Gerais (Relatório Final)**. DNP/CPRM, Brasília, 1979, 299p.
- CHETTY, T.R.K.; SANTOSH, M.; TSUNOGAE, T. Suture zones and geodynamic processes. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 42, p. 155-157, 2011.
- COOKE, R.A.; O'BRIEN, P.J.; CARSWELL, D.A. Garnet zoning and the identification of equilibrium mineral compositions in high-pressure-temperature granulites from the Moldanubian Zone, Austria. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 18, n. 5, p. 551-569, 2000.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. **Rock-forming minerals. Double-chain silicates** – v. 2A. 2 ed. London: The Geological Society Publishing House, 764p., 1997.
- DEL LAMA, E.A. **Petrologia das rochas metamórficas de alto grau do Complexo Campos Gerais e correlação com as do Complexo Varginha-Guaxupé: Estudos termobarométricos**. Rio Claro, 1993. 132p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- DEL LAMA, E.A. **Terrenos granulíticos de Guaxupé: Evolução petrológica de um segmento da crosta inferior**. Rio Claro, 1998. 188p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- DEL LAMA, E.A.; OLIVEIRA, M.A.F.; ZANARDO, A. Geotermobarometria em rochas do Complexo Campos Gerais ao norte da Zona de Cisalhamento Varginha. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 4, p. 1-7, 1994.
- DEL LAMA, E.A.; ZANARDO, A.; OLIVEIRA, M.A.F.; MORALES, N. Exhumation of high-pressure granulites of the Guaxupé Complex, southeastern Brazil. **Geological Journal**, Reino Unido, v. 35, n. 3-4, p. 231-249, 2000.
- HARALYI, N.L.E. & HASUI, Y. The gravimetric information and the archean-proterozoic structural framework of eastern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 12, n. 1-2-3, 1982a, p. 160-166.
- HARALYI, N.L.E. & HASUI, Y. Compartimentação geotectônica do Brasil Oriental com base na informação geofísica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 1, 1982b, p. 374-385.
- HARALYI, N.L.E.; HASUI, Y.; MIOTO, J.A.; HANZA, V.M.; RODRIGUES, C.R.V. Ensaio sobre a estruturação crustal do Estado de Minas Gerais com base na informação geofísica e geológica. **Contribuições à Geologia e a Petrologia**. Boletim Especial. SBG-MG, 1985, p. 71-93.
- HARLEY, S.L. On the occurrence and characterization of ultrahigh-temperature (UHT) crustal metamorphism. In: TRELOAR, P.J. & O'BRIEN, P.J. (Eds). **What Controls Metamorphism and Metamorphic Reactions?**. Special Publication Geological Society of London, v. 138, p. 75-101, 1998.
- HASUI, Y. The Mantiquiera Province: Archean structure and Proterozoic evolution. **Brazilian Journal of Geology**, v. 12, n. 1/2/3, p. 167-171, 1982.
- HASUI, Y.; EBERT, H.D.; COSTA, J.B.S. Estruturação da extremidade oriental da chamada cunha de Guaxupé: Dados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990, Natal, RN. **Anais...** Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1990, p. 2296-2308.
- HOPPE, A.; KLEIN, H.; CHOUDHRURI, A.; SCHMIDT, W. Eclogites pré-cambrianos no sudoeste de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 3, 1985, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte. Sociedade Brasileira de Geologia, p. 180-192.
- HOPPE, A.; CHOUDHURI, A.; KLEIN, H.; SCHMIDT, W. Precambrian Eclogites from Minas Gerais, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, XXVIII, 1989, Washington. **Abstracts...**Washington, v. 2, 1989, p. 68-69.
- HUANG, R. & AUDÉTAT, A. The titanium-in-quartz (TitaniQ) thermobarometer: A critical examination and re-calibration. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 84, p. 75-89, 2012.
- KOSTYUK, E.A. & SOBOLEV, V.S. Paragenetic types of calciferous amphiboles of metamorphic rocks. **Lithos**, v. 2, p. 67-81, 1969.
- KRETZ, R. Symbols for rock-forming minerals. **American mineralogist**, v. 68, p. 277-279, 1983.
- LANARI, P.; RIEL, N.; GUILLOT, S.; VIDAL, O.; SCHWARTZ, S.; PÉCHER, A.; HATTORI, K.H. Deciphering high-pressure metamorphism in collisional context using microprobe mapping methods: Application to the Stak eclogitic massif (northwest Himalaya). **Geology**, v. 41, n. 2, p. 111-114, 2013.
- LEAKE, B.E.; WOOLLEY, A.R.; ARPS, C.E.S.; BIRCH, W.; GILBERT, M.C.; HAWTHORNE, F.C.; GRICE, J.D.; KATO, A.; KISCH, H.; KRIVOVICHEV, V.; LINTHOUT, K.; LAIRD, J.; MANDARINO, J.A.; MARESCHE, W.; NICKEL, E.; ROCK, N.M.S.; SCHUMACHER, J.C.; SMITH, D.C.; STEPHENSON, N.C.N.; UNGARETTI, E.J.W.; YOUZHI, G. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. **The Canadian Mineralogist**, v. 35, p. 219-246, 1997.
- LEME, T.G. **Geotermobarometria das rochas do Grupo Araxá e do Complexo Guaxupé na região de Guaxupé – Nova Resende, MG**. Rio Claro, 2019, 175p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- LUVIZOTTO, G.L. **Caracterização metamórfica das rochas do grupo Araxá na região de São Sebastião do Paraíso, Sudoeste de Minas Gerais**. Rio Claro, 2003. 187p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- MARTIN, C. *P-T* conditions of symplectite formation in the eclogites from the Western Gneiss Region (Norway). In: FERRERO, S.; LANARI, P.; GONCALVES, P.; GROSCH, E.G. (Eds) **Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts**. Geological Society, London, Special Publications, v. 478, 2018. First published online July 10, 2018.
- MORIMOTO, N. Nomenclature of pyroxenes. **Mineralogy and Petrology**, v. 39, n. 1, p. 55-76, 1988.
- NASCIMENTO, M.B. **Evolução metamórfica PTt da porção norte do Complexo Guaxupé na região de Arceburgo-Santa Cruz da Prata, MG**. Rio Claro, 2010. 141p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- NI, Z.; ZHAI, M.; WANG, R.; TONG, Y. Late Paleozoic retrograded eclogites from within the northern margin of the North China Craton: evidence for subduction of the Paleozoic Asian ocean. **Gondwana Research**, v. 9, n. 1-2, p. 209-224, 2006.
- O'BRIEN, P.J. The petrology of retrograded eclogites of the Oberpfalz Forest, northeastern Bavaria, West Germany. **Tectonophysics**, v. 157, n. 1-3, p. 195-212, 1989.
- O'BRIEN, P.J. & RÖTZLER, J. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 21, n. 1, p. 3-20, 2003.
- OH, C.W. & LIOU, J.G. A petrogenetic grid for eclogite and related facies under high-pressure metamorphism. **Island Arc**, v. 7, n. 1-2, p. 36-51, 1998.
- OLIVEIRA, M.A.F. de; KAWASHITA, K.; KIHARA, Y.; DELHAL, J. Novos dados geocronológicos para rochas charnockíticas da Associação Guaxupé, Complexo Varginha. **Revista Brasileira de Geociências**, v.16, n.3, p.301-305, 1986.
- OSTAPENKO, G.T.; TARASHCHAN, A.N.; MITSYUK, B.M. Rutile-quartz geothermobarometer. **Geochemistry International**, v. 45, n. 5, p. 506-508, 2007.
- POWELL, R. & HOLLAND, T.J.B. Optimal geothermometry

- and geobarometry. **American Mineralogist**, v. 79, p. 120-133, 1994.
- ROBINSON, P.; SPEAR, F.S.; SCHUMACHER, J.C.; LAIRD, J.; KLEIN, C.; EVANS, B.W.; DOOLAN, B.L. Phase relations of metamorphic amphiboles: Natural occurrences and theory. In: VEBLEN, D.R.; RIBBE, P.H. (Eds), **Reviews in Mineralogy**, v. 9B, p. 1-227, 1982.
- SPEAR, F.S. **Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths**. Mineralogical Society of America, Washington, 789p., 1993.
- THOMAS, J.B.; WATSON, E.B.; SPEAR, F.S.; SHEMELLA, P.T.; NAYAK, S.K.; LANZIROTTI, A. Titanite under pressure: the effect of pressure and temperature on the solubility of Ti in quartz. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 160, n. 5, p. 743-759, 2010.
- THOMAS, J.B.; WATSON, E.B.; SPEAR, F.S.; WARK, D.A. Titanite recrystallized: experimental confirmation of the original Ti-in-quartz calibrations. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 169, n. 3, p. 27, 2015.
- TOMKINS, H.S.; POWELL, R.; ELLIS, D.J. The pressure dependence of the zirconium  
**Journal of Metamorphic Geology**, v. 25, n. 6, p. 703-713, 2007.
- TRACY, R.J.; ROBINSON, P.; THOMPSON, A.B. Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism, central Massachusetts. **American Mineralogist**, v. 61, p. 762-775, 1976.
- TROUW, R.A.J.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F.V.P.; HEILBRON, M. Os Grupos São João del Rei, Carrancas e Andrelândia, interpretados como a continuação dos Grupos Araxá e Canastra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 3227-3240.
- WARK, D.A. & WATSON, E.B. Titanite: a titanium-in-quartz geothermometer. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 152, n. 6, p. 743-754, 2006.
- WATERS, D.J. *P-T* path from Cpx – Hbl - Pl symplectites. 2003. Disp. :  
<https://www.earth.ox.ac.uk/~davewa/research/eclogites/symplectites.html>
- WATSON, E.B.; WARK, D.A.; THOMAS, J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 151, n. 4, p. 413, 2006.
- WOODSWORTH, G.J. Homogenization of zoned garnets from pelitic schists. **The Canadian Mineralogist**, v. 15, n. 2, p. 230-242, 1977.
- YARDLEY, B.W.D. An empirical study of diffusion in garnet. **American Mineralogist**, v. 62, p. 793-800, 1977.
- ZACK, T.; MORAES, R.; KRONZ, A. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 148, n. 4, p. 471-488, 2004.
- ZAKRUTKIN, V.V. & GRIGORENKO, M.W. Titanium and alkalis in amphiboles in metamorphism. **Doklady of the Academy of Sciences of the USSR, Earth Science Section**, v. 173, p. 917-918, 1967.
- ZANARDO, A. **Análise petrográfica, estratigráfica e microestrutural da região de Guaxupé-Passos-Delfinópolis (MG)**. Rio Claro, 1992. 288p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP).
- ZANARDO, A. **Pesquisa Geológica e de matérias primas cerâmicas do centro nordeste do Estado de São Paulo e sistematização crítica da produção Técnico-Científica**. Rio Claro, 2003. 304p. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- ZANARDO, A.; DEL LAMA, E.A.; MORALES, N.; OLIVEIRA, M.A.F. Geologia da porção limítrofe entre os blocos São Paulo e Brasília. **Revista Brasileira de Geociências**, v.15, n. esp., p. 143-168, 1996.
- ZANARDO, A.; MORALES, N.; OLIVEIRA, M.A.F.; DEL LAMA, E.A. Tectono-Lithologic associations of the Alterosa Pale Suture Zone – Southeastern Brazil. **Revista UnG - Geociências**, v. 5, n. 1, p. 103-117, 2006.
- ZHANG, J.; ZHAO, G.; SUN, M.; WILDE, S.A.; LI, S.; LIU, S. High-pressure mafic granulites in the Trans-North China Orogen: tectonic significance and age. **Gondwana Research**, v. 9, n. 3, p. 349-362, 2006.

Submetido em 10 de março de 2017  
Aceito em 4 de setembro 2018