

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**TERMOBARÔMETRIA DAS ROCHAS DA NAPPE
SOCORRO-GUAXUPÉ, NA REGIÃO DE VARGINHA, MG**

Beatriz Yuri Benetti Silva

Orientador: Prof. Dr. Renato de Moraes

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2013/08)**

**SÃO PAULO
2013**

**TF
S586
BYB.t**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900031902



**TERMOBARÔMETRIA DAS ROCHAS DA NAPPE
SOCORRO-GUAXUPÉ, NA REGIÃO DE VARGINHA, MG**

Beatriz Yuri Benetti Silva

Renato de Moraes

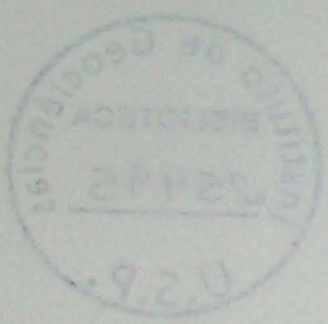
Orientador: Prof. Dr. Renato de Moraes

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2013/08)

SÃO PAULO
2013

TF
5586
B/B.t

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



TERMOBAROMETRIA DAS ROCHAS DA MARE
SOCORRO-QUAXUPÉ, NA REGIÃO DE VARGINHA, MG

Boletim de Geociências

Vol. 14, No. 1

Quaxupé, 1974

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-50130)

SÃO PAULO
1974

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	2
3.	Localização e acessos	2
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	3
5.	GEOLOGIA REGIONAL.....	4
6.	DESCRIÇÃO DAS UNIDADES LITOLÓGICAS: ASPECTOS DE CAMPO E PETROGRAFIA	8
6.1	Granada granulito félsico	8
6.2	Granulito félsico	11
6.3	Granulito máfico.....	11
6.4	Granulito migmatítico aluminoso	12
6.5	Lentes leucocráticas aluminosas	14
6.6	Rutilo cianita granada feldspato potássico granulito migmatítico com sillimanita - rocha da <i>Nappe</i> Três Pontas-Varginha.....	17
7.	Química mineral	20
7.1	Granada	20
7.2	Plagioclásio	21
7.3	Clinopiroxênio	21
7.4	Ortopiroxênio	22
8.	Geotermobarometria	23
8.1	Geotermobarometria clássica	23
8.2	Geotermobarometria otimizada	27
8.3	THERMOCALC e pseudosseções.....	27
8.4	Resultados obtidos com o Thermocalc	28
9.	Modelagem metamórfica – Pseudosseção para as rochas da <i>Nappe</i> Socorro-Guaxupé	28
10.	Conclusão	31
11.	BIBLIOGRAFIA	32
12.	Anexos.....	36

Resumo

A *Nappe* Socorro-Guaxupé é uma lasca com cerca de 15 km de espessura, na porção meridional do Orógeno Brasília, a sul da borda do Cráton São Francisco. Na região de Varginha as rochas aflorantes correspondem à porção granulítica basal da *Nappe* Socorro-Guaxupé, sendo granada granulito félsico a rocha predominante, a qual é composta por porfiroblastos de granada e ortopiroxênio, com matriz de clinopiroxênio, plagioclásio, feldspato alcalino, quartzo, hornblenda, ilmenita e biotita. O ortopiroxênio encontra-se na matriz com coroas descontínuas de clinopiroxênio, o qual também ocorre como corona na granada, junto com hornblenda. A hornblenda presente é resultado da substituição dos piroxênios. Intercalações de granulito máfico e de granulito migmatítico aluminoso são comuns, além de quantidades variáveis de leucossoma. Através do uso de geotermobarometria otimizada efetuada com o programa THERMOCALC, obteve-se os valores de 938°C e 11,37 kbar e 927 °C a 11.64 kbar para duas amostras coletadas na porção mais basal da unidade. A influência da composição química da rocha no desenvolvimento das paragêneses foi avaliada em modelagem termodinâmica com confecção de uma pseudosseção no sistema químico modelo NCKFMASHTO. Os valores obtidos através da geotermobarometria encontram-se dentro do campo da pseudosseção em que a paragênese do pico metamórfico da rocha estudada é estável. A mesma é constituída de quartzo, plagioclásio, ortoclásio perítico, granada, ortopiroxênio, clinopiroxênio e ilmenita.

Abstract

The Socorro-Guaxupé *Nappe* is a 15 km thick sliver in the southern portion of the Brasília Orogen, located in the southern edge of the San Francisco Craton. In the region of Varginha, rocks of the basal granulite unit of the Socorro-Guaxupé *Nappe* crop out. A felsic garnet granulite is the predominant rock, which is composed by porphyroblasts of garnet and orthopyroxene, with a matrix made of clinopyroxene, plagioclase feldspar, alkali feldspar, quartz, hornblende, ilmenite and biotite. The orthopyroxene on the matrix has discontinuous edges of clinopyroxene that also forms rims surrounding garnet. Hornblende is result of replacement of pyroxenes. Intercalations of mafic granulite, and aluminous migmatitic granulite occur as well as extensive leucosome layers. With the use of optimal thermobarometry using the software THERMOCALC the following P-T results were calculated 938 °C and 11.37 kbar and 927 °C to 11.64kbar. Thermodynamic modelling was done by calculation of a pseudosection in the NCKFMASHTO model chemical system, a P-T grid calculated for the rock bulk composition. The values obtained are in accordance with the geothermobarometry results, which plot inside the field defined by rock paragenesis, quartz, plagioclase, perthitic orthoclase, orthopyroxene, clinopyroxene, garnet and ilmenite.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha mãe, Eliana pelo apoio, amor, por sempre acreditar em mim, sem seu amor e dedicação este trabalho nunca poderia ter sido realizado. Às minhas queridas irmãs, Débora e Letícia, que sempre foram pra mim mais do que irmãs, foram amigas e companheiras. À minha avó Anita que pelo amor e força.

Ao meu orientador Professor Renato, por todo o conhecimento transmitido, pela atenção e ajuda e principalmente pela paciência.

À todos os professores que tive aula durante estes cinco anos de graduação pelo conhecimento transmitido.

Aos funcionários do instituto, Marcos (microsondra), Leandro(microsondra), Angélica (óptica), Henrique (gráfica), por serem tão prestativos.

Aos meus queridos amigos de turma, Manuel, Dispaxo, Prostata, Lara, Traveka, Motoboy, Mussum, Chassi, Nekão, Átila, Pubiano, Xupança e Punha. Com certeza vocês fizeram a diferença na minha graduação, todas as conversas, todos os campos, todas as risadas, festas e todas as aulas só valeram apenas porque compartilhar estes momentos com vocês.

E por fim aos meus companheiros de luta, por me mostrarem que um novo mundo livre da opressão e exploração é possível, por me apoiarem, me ouvirem e me darem força para seguir em frente neste mundo de barbárie.

1. INTRODUÇÃO

Os granulitos são rochas metamórficas formadas em condições de altas temperaturas, acima de 800 °C, em intervalo significativo de pressão, entre 3 a 16 kbar (Pattison *et al.*, 2003) e estão relacionados com a formação da crosta continental inferior. O ortopiroxênio é o mineral índice e associações anidras com orto- ou clinopiroxênio e feldspatos são características; a presença de minerais aluminosos é comum em rochas félsicas ou aluminosas, tais como granada, cordierita e sillimanita; óxidos de Ti, ilmenita ou rutilo também ocorrem e quartzo pode estar presente ou não (Behr *et al.*, 1971). A relação entre a gênese de granulitos e à fusão já havia sido sugerida no início da década de 1970 (Fyfe, 1973). Como a maior parte dos granulitos apresenta associações de minerais anidros e pobres em componentes graníticos, os granulitos foram interpretados como o resíduo da fusão, ideia bastante explorada na última década por vários autores (White & Powell, 2002, 2010; Moraes *et al.*, 2002).

O estudo de rochas provenientes da crosta profunda, onde a deformação dúctil é a principal geradora de estruturas, é de importância fundamental para o entendimento da evolução estrutural e metamórfica da crosta terrestre. Através da observação das estruturas, microestruturas e análises químicas dessas rochas é possível se chegar a um quadro das condições reológicas, metamórficas e dos processos deformacionais nessas condições geodinâmicas extremas.

Os granulitos e migmatitos gerados na crosta inferior podem ter sofrido exumação rápida ou não, e guardam em suas texturas o registro do metamorfismo de alto grau (Harley, 1989; Sandiford, 1989), daí a importância do estudo da geotermobarometria de granulitos, que permite inferir as condições *P-T* da crosta inferior, além de auxiliar nos estudos de taxas e processos de aquecimento crosta, razão de soterramento e exumação, entre outras coisas.

Boa exposição da base da crosta continental ocorre a sul da borda meridional do cráton do São Francisco, na *Nappe* Socorro-Guaxupé a qual é constituída por granulitos, migmatitos e granitóides (Campos Neto & Caby, 1999, 2000). Na região de Varginha, MG, afloram rochas da porção basal da *Nappe*, em que ocorrem intimamente associados, granulito félsico e máfico, charnockito, granito e migmatito, alvos do presente estudo.

2. OBJETIVOS

O presente projeto tem como objetivo caracterizar as condições de formação dos granulitos da *Nappe Socorro-Guaxupé* na região de Varginha. A caracterização será feita a partir de relações no campo, petrográfica dos principais litotipos e geotermobarometria das rochas.

3. LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área de estudo situa-se no sudeste de Estado de Minas Gerais, no município de Varginha, encontra-se entre as coordenadas 448200/7617000 e 463400/7607000, e esta localizada dentro da folha topográfica de Varginha 1: 50.000 (SF-23-I-I-4).

A principal via de acesso é a Rodovia Fernão Dias (BR-381) de São Paulo.

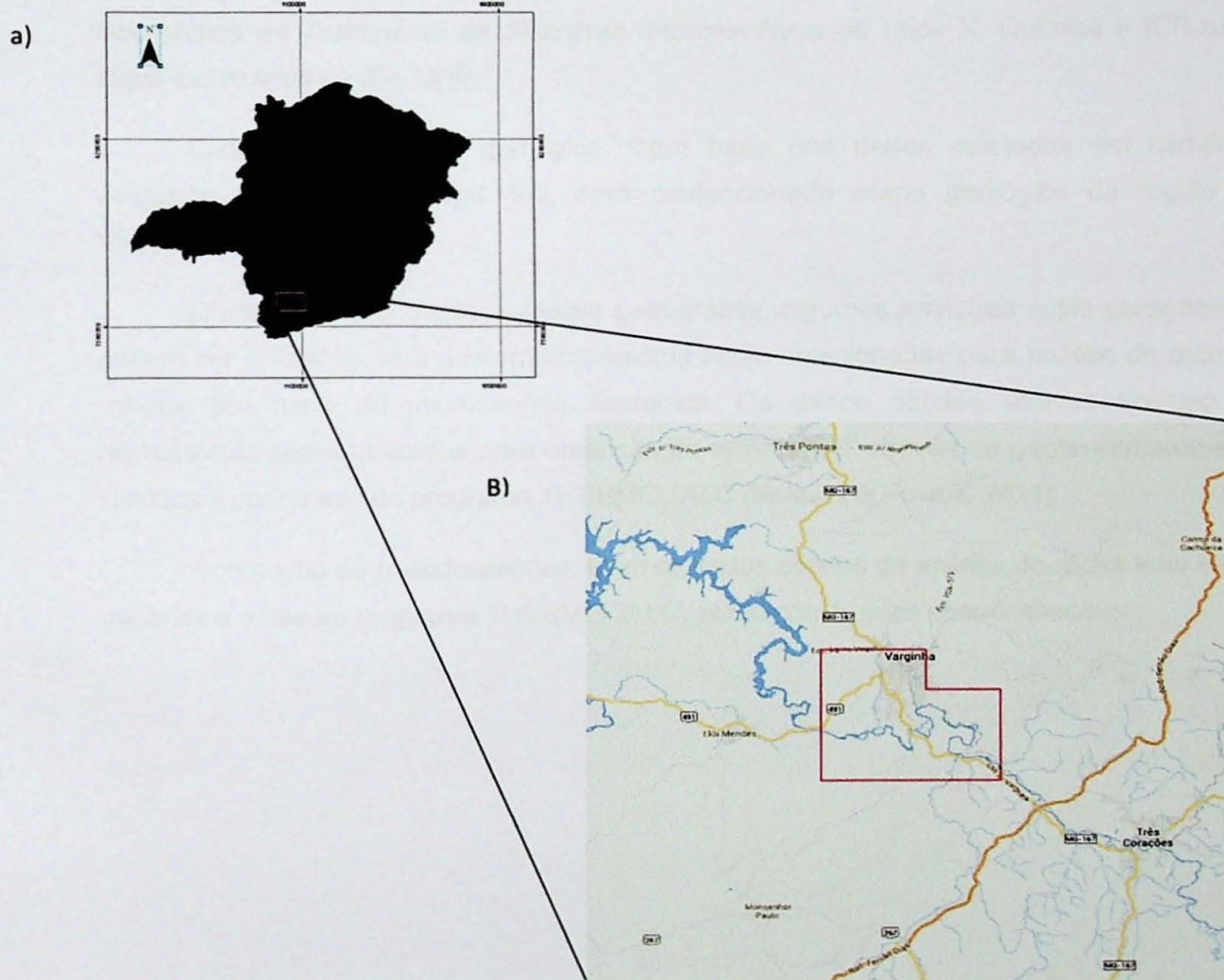


Figura 1 – Localização da área de estudo: a) Mapa de Minas Gerais, b) Localização da área de estudo (Fonte: Google Maps)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida seguindo as seguintes etapas:

Levantamento bibliográfico: o levantamento da bibliografia pertinente à geologia regional e local, fusão, gênese de migmatitos e granulitos.

Levantamentos de campo: para tomada de dados estruturais, observações de relações de campo entre as rochas e coleta de amostras.

Descrição petrográfica: Após a coleta das amostras em campo ser ao confeccionadas lâminas delgadas, que serão descritas, com o objetivo de observar as variações de textura, as paragênese mineral nos granulitos da base da *Nappe Socorro – Guaxupé*, utilizando o microscópio OLYMPUS (BXP-40).

Análise química de rocha total: Esta análise que determina a concentração dos elementos maiores é utilizada para o cálculo de pseudosseções com o auxílio do programa THERMOCALC. A preparação das amostras e análises químicas serão realizadas nos laboratórios de Tratamento de Amostras, Fluorescência de raios X, Química e ICP-AES, todos localizados no IGc-USP.

Confecção do mapa geológico: Com base nos dados coletados em campo e utilizando o programa Arcgis 9.3, será confeccionado mapa geológico da região de Varginha.

Química mineral: Após a análise petrográfica, algumas amostras cujas paragêneses podem ser utilizadas para geotermobarometria serão selecionadas para análise de química mineral por meio da microsonda eletrônica. Os dados obtidos através do uso da microsonda serão utilizados para obtenção de valores $P-T$ através da geotermobarometria clássica e com o uso do programa THERMOCALC (Holland & Powell, 2011).

Confecção de pseudosseções: Com os dados obtidos da análise de rocha total e dos minerais e o uso do programa THERMOCALC, serão construídas pseudosseções.

5. GEOLOGIA REGIONAL

Na porção sul da Faixa Brasília ocorre pilha metamórfica resultante da Orogenia neoproterozóica Brasileira resultado da colisão das placas Sanfranciscana e Paranapanema (Figura 2), sendo a primeira considerada margem passiva e a segunda margem ativa da amalgamação do Gondwana Ocidental (Campos Neto, 2000). A evolução da orogenia iniciou-se com o desaparecimento diacrônico dos oceanos Goianides e Adamastor, situados a oeste e a leste do paleocontinente São Francisco. O processo deu origem a complexo sistema de *nappes* vergentes para NE-E que se sobrepõe à borda sul-sudoeste do Cráton do São Francisco. 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 & Caby, 1999, 2000); o Terreno Andrelândia, domínio continental subductado em condições de alta pressão (Campos Neto & Caby, 1999, 2000; Trouw *et al.*, 2000); e, o domínio mais externo de margem continental passiva representado pelo Sistema de *Nappes* Carrancas (Trouw *et al.*, 2000) e *Nappe* Lima Duarte (Campos Neto *et al.*, 2004).

A *Nappe* Socorro-Guaxupé é uma lasca com cerca de 15 km de espessura, composta por granulitos, charnockitos e granitóides. A estrutura se encontra segmentada em dois lobos, Guaxupé, a norte, e Socorro, a sul, separada por rampas laterais de alto ângulo (Campos Neto, 2000). A *Nappe* Socorro-Guaxupé é delimitada na porção N-NE pela zona de cisalhamento sinistral Campo do Meio (Morales, 1993) e na porção SE pela zona de cisalhamento dextral de Ouro Fino (Ebert *et al.*, 1991). As características geoquímicas dos granulitos enderbíticos indicam origem em arco magmático, equivalente ao arco magmático de Goiás (Pimentel & Fuck, 1992, 1996), como sugerido por Campos Neto & Caby (1999). O auge do metamorfismo ocorreu entre 640 e 650 Ma (Campos Neto, 2000).

As rochas da *Nappe* Socorro-Guaxupé apresentam mergulho suave para SW e do topo para a base ocorrem: i) migmatito pelítico e semipelítico, com quartzito, mármore, rochas calciossilicáticas e lentes de rocha máfica; ii) diatexito, migmatito estromático e nebulítico com biotita e hornblenda, com intercalações de granada-sillimanita-cordierita gnaiss; iii) na base predomina granulito enderbítico bandado com granulito máfico subordinados; corpos intrusivos de charnockito ocorrem na porção inferior e média, as quais são substituídas por granitos peraluminosos no topo (Campos Neto & Caby, 1999; 2000).

Na *Nappe* Socorro-Guaxupé, o metamorfismo é de alta temperatura e está associado à geração de rochas granitóides. A distribuição das paragêneses no interior da *Nappe* indica variação de temperatura e pressão da base para o topo, com granulito de baixa pressão com cordierita na porção de topo, que aflora a sul, sem cordierita na porção intermediária e com granada granulito de alta pressão abundante na porção basal (Del Lama, 1998; Oliveira *et al.*, 1998). No topo da *Nappe* a termobarometria em rocha com granada, cordierita, sillimanita, biotita, plagioclásio e feldspato potássico indicam valores de 4,5 kbar e 820°C (Vasconcellos *et al.*, 1991). Na porção intermediária, determinações em granulito com granada, cordierita, sillimanita, biotita, plagioclásio, espinélio e feldspato potássico resultaram em 7,5 kbar e 850 °C (dados recalculados de Oliveira & Ruberti, 1979, por Campos Neto & Caby, 2000), enquanto valores de 8,5 kbar e 850 °C foram calculados com a paragênese granada, clinopiroxênio, plagioclásio e quartzo (Iyer *et al.*, 1996).

Na base da *Nappe* as rochas são de alta pressão, sendo que cálculos com granada, clinopiroxênio, hornblenda, biotita, plagioclásio e quartzo resultam em 12,5 kbar e 900 °C (Del Lama *et al.*, 1994) ou ainda mais elevados, da ordem de 14,4 kbar e 1040 °C (Del Lama *et al.*, 2000). Na região de Varginha, termobarometria em granulito com granada, clinopiroxênio, ortopiroxênio, plagioclásio e quartzo representam pressões entre 11,5 e 14,0 kbar e temperatura de 890 °C (Campos Neto & Caby, 2000), dados de isótopo de oxigênio chegaram a temperaturas de 664°C, entretanto este valor encontra-se muito abaixo dos valores obtidos por termometria (Garcia *et al.* 2003).

O Terreno Andrelândia representa um sistema de *Nappes* com rochas de alta pressão, estiradas e transportadas para ENE e NE, sotopostas à *Nappe* Socorro-Guaxupé. Consiste da pilha metassedimentar do Grupo Andrelândia, como redefinido por Trouw *et al.*, 1983.

As *nappes* superiores são denominadas de Três Pontas-Varginha e Pouso Alto e têm as *Klippen* Carvalhos e Serra da Natureza como rochas correspondentes, com rochas de alta pressão e alta temperatura, ocorrem a WSW. Consistem de rutilo-sillimanita-cianita-granada granulito, com bandamento composicional herdado de estratificação sedimentar e delineado por distintas proporções entre cianita e granada e entre plagioclásio e feldspato potássico. Intercalações de cianita-granada-biotita quartzito, gnaiss calciossilicático e granulito máfico são frequentes. Leucossoma de composição cianita-granada granito branco e filões de cianita-granada leucogranito estão presentes (Campos Neto *et al.*, 2004).

As *Nappes* inferiores de alta pressão (Carmo da Cachoeira e Aiuruoca-Andrelândia), estão representadas, na base, por quartzito com intercalações de micaxisto e, subordinadamente, de gnaiss calciossilicático. Regionalmente, rutilo-granada-biotita-plagioclásio-quartzo xisto/gnaiss, homogêneo e espesso de até 750m, denominado de Xisto Santo Antônio (Trouw *et al.*, 1983), ocorre no interior de rutilo-aluminossilicato-granada-biotita-muscovita xisto, com cerca de 2000 m de espessura aparente. Quartzito impuro e/ou sequência rítmica xisto-quartzítica ocorrem no topo da unidade. Rochas máficas e gnaiss calciossilicático ocorrem como corpos lenticulares, pouco espessos e boudinados e estão presentes intercalados aos metapelitos (Campos Neto *et al.*, 2004).

Duas trajetórias metamórficas distintas são reconhecidas na pilha metassedimentar (Trouw, 1992; Del Lama *et al.*, 1994; Trouw *et al.*, 1998; Campos Neto & Caby, 1999 e 2000; Campos Neto *et al.*, 1999). O primeiro caminhamento metamórfico é de decompressão isotérmica e está registrado tanto nos cianita granulitos basais da *Nappe* superior, como nas rochas metabásicas retro-eclogíticas da *Nappe* inferior.

Os cianita granulitos basais, equilibrados a 700°C, registram decompressão equivalente à perda de 15 km de carga litostática (de 55 a 40 km de profundidade na crosta). Os retro-eclogitos, soterrados a > 60 km (17 kbar), apresentam equilíbrio metamórfico na foliação a 25 - 30 km de profundidade, entre 680 - 645°C. O segundo caminhamento metamórfico, de aquecimento quase isobárico, ocorre no topo e na retaguarda das *Nappes*. Os granulitos reequilibram-se na zona da sillimanita a 900°C. Núcleo antiformal de migmatitos a cianita-granada, sob condições de quebra de muscovita, ocorrem nos micaxistos e admitem temperaturas mínimas de 780°C (Campos *et al.*, 2004).

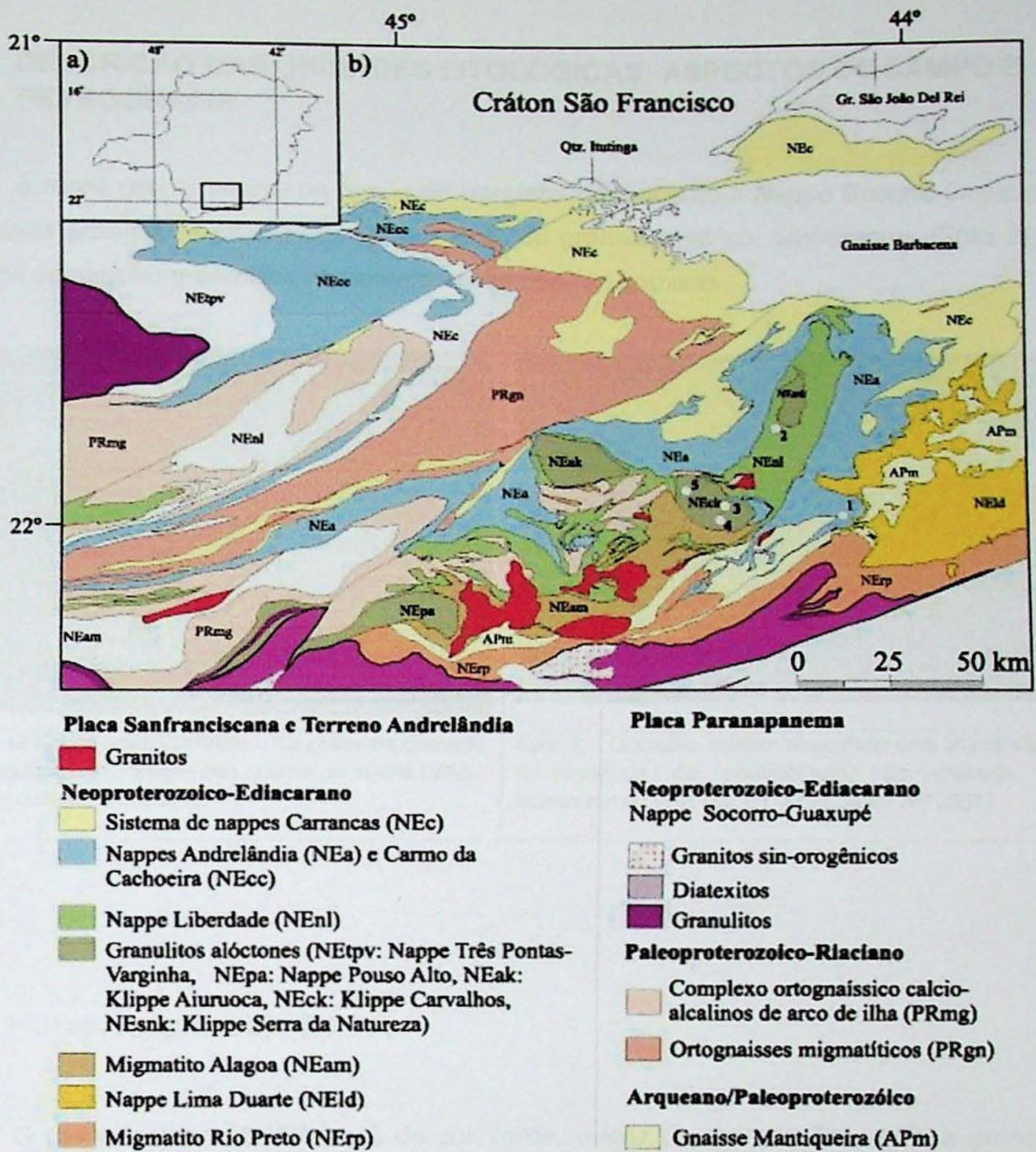


Figura 2- Mapa geológico da porção sul do Orógeno Brasília na região de Minas Gerais. (Campos Neto, 2007).

6. DESCRIÇÃO DAS UNIDADES LITOLÓGICAS: ASPECTOS DE CAMPO E PETROGRAFIA

A rocha predominante na região de Varginha pertencente à *Nappe Socorro-Guaxupé* é granada granulito félsico (Foto 1) com lente de granulito máfico, leucossoma (Foto 2) e *boudins* de resíduo granulítico aluminoso, muito rico em granada.



Foto 1 - Granada granulito félsico. Os grãos de granada porfiroblásticos em relação aos cristais da matriz (VAB-01, UTM 045468/ 7610021).



Foto 2 – Granulito máfico intercalado com leucossoma e presença de porfiroblastos de granada no leucossoma (VAB-03, UTM 0455420/ 7610031).

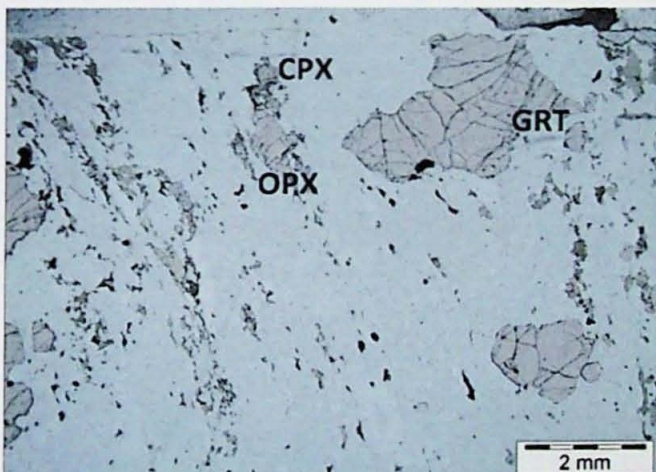
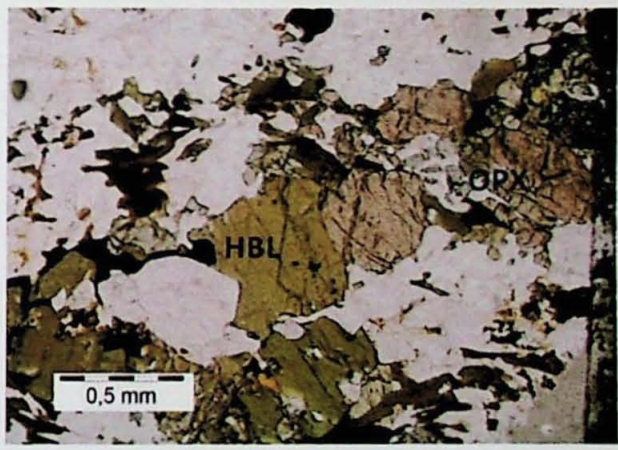
6.1 Granada granulito félsico

O granada granulito félsico é de cor verde, matriz de granulação média a grossa, com porfiroblastos de ortopiroxênio, hornblenda e granada, de 1~4mm, embora granada chegue até 3 cm, e esporadicamente são observados cristais com mais de 5 cm. A textura varia entre *flaser*, com lentes de quartzo grosso com extinção ondulante e formada por grãos recristalizados, textura granoblástica definida pelos grãos de quartzo e feldspato com contatos interlobados entre si e a textura porfiroblástica definida pelos grãos de granada e piroxênio.

A rocha apresenta granada (20%), hornblenda (5%), ortopiroxênio (5%), quartzo (30%), plagioclásio (20%), feldspato potássico (13%), biotita (1%), minerais opacos (1%), clinopiroxênio (5%), zircão e apatita, com escapolita ocorrendo localizadamente.

O ortopiroxênio é o hyperstênio, com pleocroísmo variando de marrom rosado a verde pálido, ocorre como porfiroblastos ou como agregados recristalizados na matriz, com diopsídio formando coroas descontínuas nas suas bordas (Foto 3) que por vezes pode ser completada por coroa externa de hornblenda (Foto 4). O diopsídio ainda ocorre na borda da granada (Foto 5), intercrescido ou não com o ortopiroxênio. A granada encontra-se com textura poiquiloblástica com inclusões de biotita, plagioclásio e quartzo; próxima e dentro dos grãos estão preservadas as principais texturas de cristalização de fundido, que possuem formato amebóide e são compostas principalmente por quartzo. Fora dos cristais de granada as texturas de cristalização de fundido são observadas com maior dificuldade, estando presente em alguns contatos tripliques de quartzo e feldspato (Foto 6), como pequenas gotas de quartzo (foto 7) ou formando canalículos de contato em cúspide com os demais cristais. Entre os cristais da matriz foram observadas porfiroblastos de escapolita (Foto 8).

A hornblenda é resultado do retrometamorfismo da rocha, encontra-se nas bordas dos piroxênios e foi gerada pela sua substituição, ocorrendo com textura simplectítica com a biotita. A escapolita aparenta estar em estabilidade com a granada, clinopiroxênio e ortopiroxênio por causa dos contatos retos e junções tripliques. O ortoclásio é mesoperítico e quando em contato com o plagioclásio ocorre desenvolvimento de mirmequita, que substitui as bordas e partes do primeiro. A paragênese da rocha é ortopiroxênio, plagioclásio, granada, feldspato potássico, quartzo e óxido, provavelmente ilmenita.

	
<p>Foto 3- Porfiroblasto de opx com diopsídio na sua sua borda .</p>	<p>Foto 4 – Ortopiroxênio porfiroblástico, com hornblenda retrometamórfica no seu entorno.</p>

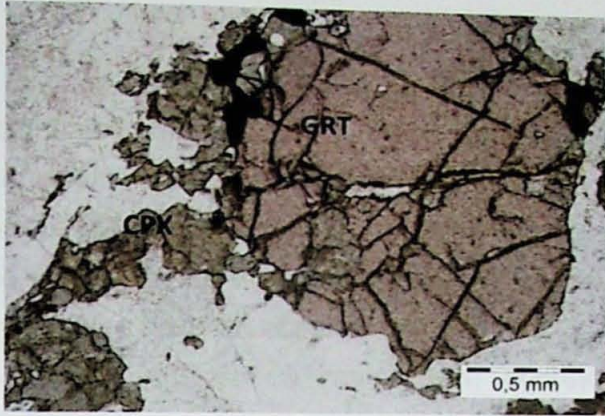


Foto 5 – Porfiroblasto de granada com coroa de clinopiroxênio e opaco.

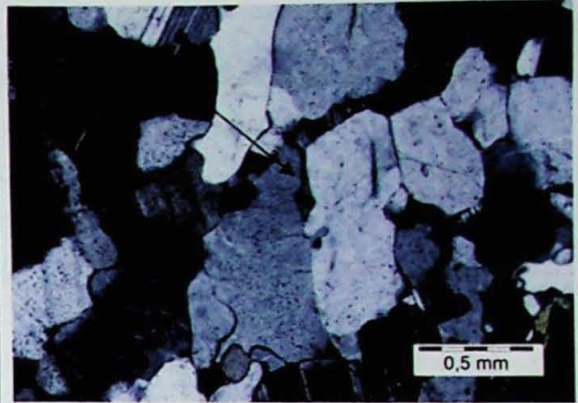


Foto 6 - Filme de feldspato, entre os grãos feldspato e quartzo, esta textura indica que a rocha sofreu fusão parcial.

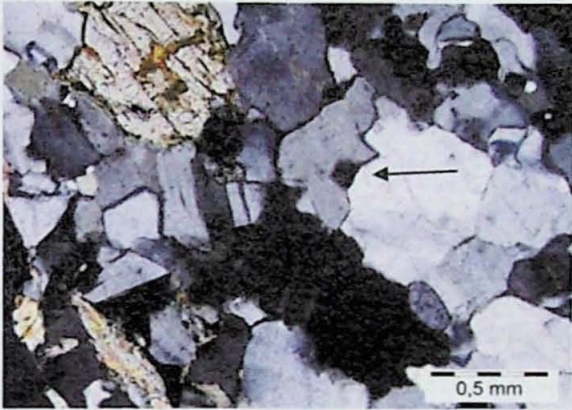


Foto 7 – Textura de fusão: filmes e gotas de quartzo entre os grãos de quartzo e feldspato.

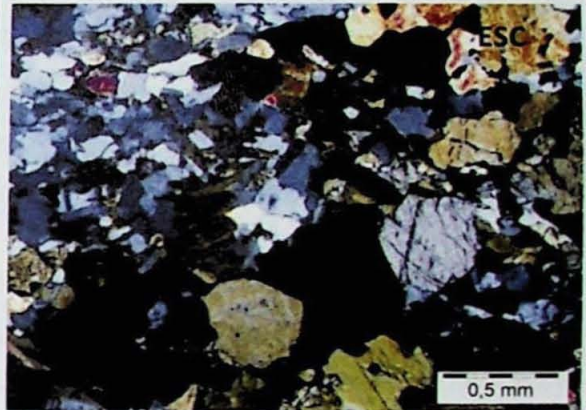


Foto 8- Cristais de escapolita em contato com os demais grãos da matriz. Sua relação de contato com os demais indica que este encontra-se estável no sistema.

6.2 Granulito félsico

O granulito félsico é de textura granoblástica, definida pelos cristais de quartzo e feldspatos com contatos interlobados entre si e a granulação é média (Foto 9). Os mineirais constituintes da rocha são: quartzo (35%), feldspato potássico (20%), plagioclásio (40%), ortopiroxênio (5%), biotita e minerais opacos em quantidades de traço. O quartzo encontra-se recristalizado formando *ribbons*, com extinção ondulante e, em algumas porções isoladas, é possível observar mirmequita.

Os cristais da matriz têm contatos interlobados entre si e com feições de recristalização dinâmica com migração das bordas dos cristais. O ortopiroxênio está orientado segundo a foliação, ocorrendo como grãos menores na matriz recristalizada. Nas bordas ocorrem cristais de biotita que o substituíram. A foliação principal é definida por aglomerados orientados de minerais como ortopiroxênio e *ribbons* de quartzo. A paragênese da rocha é ortopiroxênio, quartzo, feldspato potássico e plagioclásio.

6.3 Granulito máfico

O granulito máfico apresenta textura granonematoblástica, com matriz formada por plagioclásio, ortopiroxênio, clinopiroxênio e quartzo, com contatos interlobados, grãos subidioblásticos, e granulação fina. A foliação principal é definida por grãos orientados de hornblenda, orto- e clinopiroxênio, que definem a textura nematoblástica; estes cristais são de granulação média. A proporção modal é de 35% de hornblenda, 5% de quartzo, 25% de plagioclásio, 10% de biotita, 27% ortopiroxênio e 2% de clinopiroxênio; escapolita e minerais opacos ocorrem em quantidades menores que 1%.

O ortopiroxênio foi substituído nas bordas por hornblenda e biotita (Foto 10). A biotita e a hornblenda ocorrem em textura simplectítica, e o clinopiroxênio em algumas porções está presente com textura porfiroblástica e com biotita em suas bordas e clivagens, sugerindo sua substituição.

A atuação de processos retrógrados na rocha foi intensa, pois os minerais da fácies granulito, orto- e clinopiroxênio, foram parcialmente substituídos por minerais da fácies anfibolito, hornblenda e biotita. Isso se deve ao fato de que, em campo, as camadas de granulito máfico não ultrapassam 20 cm de espessura e estão desmembradas e cortadas por leucossoma quartzo-feldspático (Foto 11).

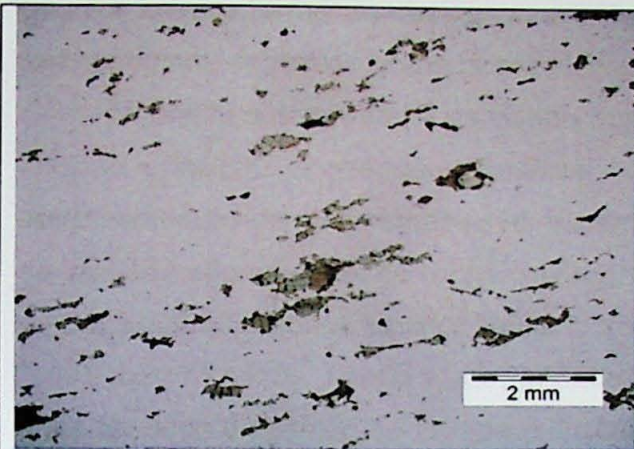


Foto 9- Granulito félsico. Cristais de hornblenda e ortopiroxênio estirados e cristais de biotita substituindo a hornblenda. //Lado maior da foto 10,4 mm.

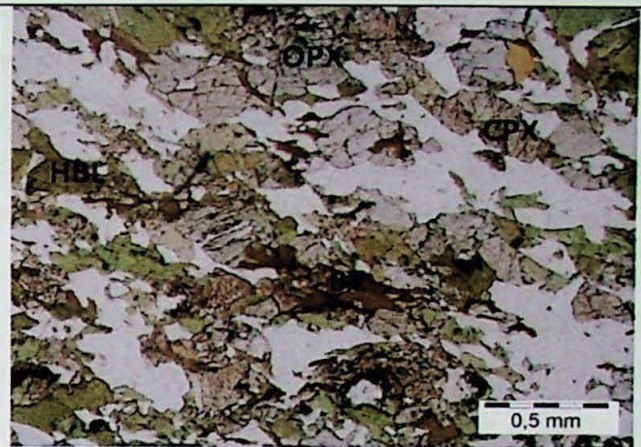


Foto 10- Orto- e clinopiroxênio com coroas de biotita e hornblenda no granulito máfico, indicando que estes minerais são retrometamórficos.



Foto 11- Intercalação do granulito máfico e veios de leucossoma, presença de granada apenas nos veios do leucossoma. (VAB-03)



Foto 12- Boudin de resíduo granulítico aluminoso (melanossoma), cortado por veios leucocráticos e acima granada granulito félsico intercalado com granulito máfico (VAB-03)

6.4 Granulito migmatítico aluminoso

Dentro do granada granulito félsico, ocorrem lentes e *boudins* constituídos por porfiroblastos de granada, ortopiroxênio e biotita, com as bordas definidas por leitões de granulito hololeucocrático e cortadas por veios leucocráticos (Foto 12). A porção rica em minerais máficos representa o resíduo da fusão. O resíduo apresenta matriz formada por quartzo e feldspatos, de granulação fina, com contatos interlobados entre si, e desenvolvimento de mirmequita entre os feldspatos.

O quartzo encontra-se fitado e com extinção ondulante. A granada presente é porfiroblástica, de granulação grossa (5mm~2 cm), e contém inclusões de quartzo, feldspatos, biotita, escapolita, zircão, hercinita e sillimanita (Foto 13); as inclusões de quartzo são de forma amebóide ou arredondada, e podem representar grãos residuais da rocha original, dentro de grãos peritéticos de granada (Foto 14).

A biotita esta presente na banda rica em granada, e encontra-se orientada segundo a foliação principal, ocorrendo na matriz e nas bordas da granada, quando é interpretada como resultado da sua substituição. Entretanto, cristais de biotita arredondados e inclusos na granada são relíquias da rocha original, que resistiram à reação de fusão da biotita com a formação da granada e líquido. Nesta porção da rocha os processos de retrometamorfismo foram mais intensos, sendo a paragênese principal substituída pelos cristais de biotita. Isto pode ter ocorrido devido ao fato de o líquido granítico não ter sido separado após a fusão da rocha.

O leucossoma é constituído por quartzo, plagioclásio, feldspato potássico, e porfiroblastos de granada, entretanto não foi possível observar texturas ígneas nesta porção da rocha, devida a deformação intensa a qual a rocha foi submetida e todas as texturas ígneas foram destruídas. Localmente o leucossoma corta o granulito félsico e o máfico, mas a textura é milonítica, granulação grossa, é constituído apenas por cristais de quartzo e feldspato potássico. Esta porção representa o fundido que estava presente na rocha, cujas relações de contato indicam que não se encontra *in situ*, mas não longe de sua fonte.



Foto 13- Porfiroblasto de granada com inclusões de fibrolita (espículas de sillimanita).

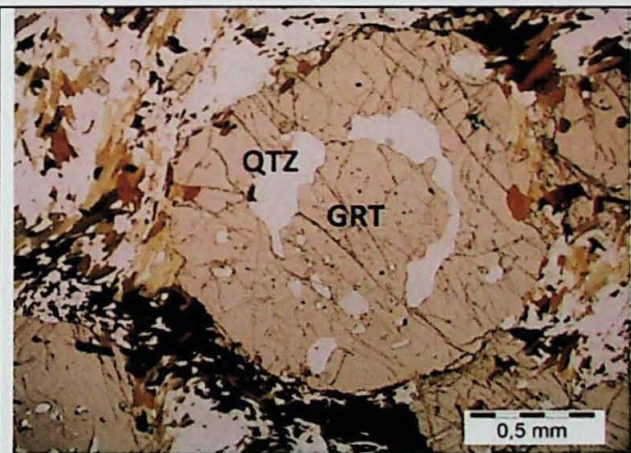


Foto 14 - Quartzo amebóide dentro da granada.

6.5 Lentes leucocráticas aluminosas

Ao longo da maior parte do Rio Verde, na região de Varginha, aflora granada granulitos félsico, localmente este encontra-se intercalado com lentes leucocráticas aluminosas, de espessura de aproximadamente 1-2 cm e comprimento de 30m, estas lentes possuem sua matriz composta por quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino, e em quase todas as porções desta lente é possível observar aglomerados de formato arredondado ou lenticular, que atingem o tamanho de 5-10 cm de diâmetro (Fotos 15 e 16), constituídos de granada ± sillimanita (Foto 17). Dentro desses aglomerados foi observado a presença de cristais subidioblástico de sillimanita de aproximadamente 3 mm (Foto 17). Em algumas porções da lente leucocrática foi observado porções ricas em biotita, formando "biotitito" (Foto 16).

As lentes leucocráticas apresentam foliação bem marcada pelos cristais de quartzo e feldspatos, os quais estão estirados, com estrutura *flaser*, e textura granoblástica. Os cristais de quartzo e feldspatos são inequigranulares, com contatos interlobados com os demais cristais que constituem a rocha. A granada possui inclusões de diversos minerais: sillimanita, rutilo, quartzo, biotita, espinélio, plagioclásio e minerais opacos (Foto 18).

A matriz das lentes é composta por quartzo, plagioclásio e feldspato potássico com granulação fina com cristais com tamanho inferiores a 1 mm, formando subgrãos com contatos interlobados na rocha com aparente orientação e textura *bulging* de migração das bordas dos grãos, entretanto também presente na matriz e muito abundante são os *ribbons* de quartzo com extinção ondulante presentes em todas as porções da rocha orientados segundo a foliação principal, estas fitas de quartzo variam de tamanho chegando até a 1,5cm. A mirmequita é comum entre os dois feldspatos, feldspato potássico é o microclínio, com lamelas de exsolução formando pertitas.

A biotita ocorre em quantidades reduzidas, está orientada segundo a foliação principal, e pode estar associada à granada. Cristais de monazita e zircão estão dispersos na rocha em pequenas quantidades (<1%).

A granada responsável pela textura porfiroblástica tem granulação média a grossa e, em campo, foram observados aglomerados de granada de tamanho variando entre 5 e 10 cm, com inclusões de sillimanita de tamanho de 1 a 3 mm, com formato subidioblástico. Ao microscópio, observa-se que a granada está fraturada, com inclusões de sillimanita, rutilo, quartzo, biotita, espinélio, plagioclásio e minerais opacos (Foto 18, 19, 20 e 21).

As inclusões de quartzo e feldspato dentro da granada são de formato amebóide, o quartzo costuma estar englobado pelo plagioclásio, formando textura coronítica, esta feição, denota o aprisionamento de porções de fundido dentro dos cristais de granada peritética (Foto 20).

Existem duas gerações de biotita, as inclusas na granada com formato arredondado que são anteriores a presença deste mineral e as presentes nas bordas da granada de formato placóide, que são resultado da sua substituição.

A sillimanita está associada à granada, inclusa ou em suas bordas (Foto 21) ou entre os espaços de fraturamento, estes cristais variam enquanto a sua forma, quando encontrada inclusa na granada na grande maioria apresenta-se como fibrolita, com cristais aciculares, entretanto também são observados cristais de granulação média com formato idioblástico, contudo com menor frequência inclusos, estes são mais comuns em suas bordas e entre o fraturamento. As inclusões de sillimanita aparentam estar orientadas segundo a foliação principal. A presença de sillimanita e biotita inclusas dentro da granada sugerem a ocorrência da reação entre estes dois minerais para a geração de granada, fundido e algum outro mineral como rutilo ou mineral opaco, entretanto não existem evidências para em lâmina para precisar qual seria o terceiro mineral resultado desta reação. O espinélio verde ocorre incluso na granada e na sillimanita (Foto 18 e 19).

A matriz da rocha de composição leucocrática deve representar o leucossoma resultado da fusão de rocha pelítica, muito rica em alumínio, que possibilitou além da formação da granada, a geração da sillimanita, estes dois minerais são o produto da reação de fusão e representam o resíduo da rocha fundida.

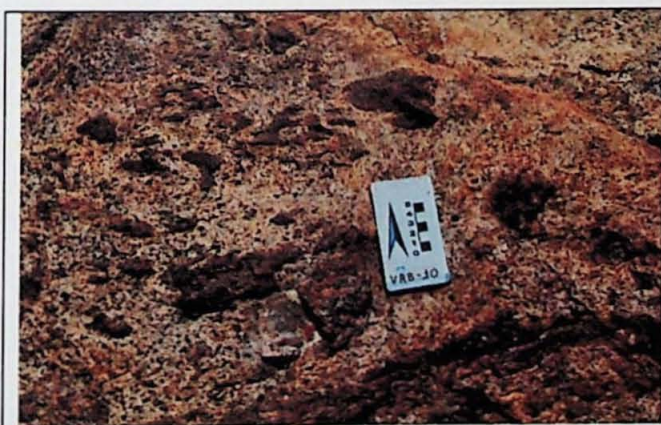


Foto 15 - Aglomerados de granada dentro do leucossoma com formatos variados de lenticulares a arredondados. (VAB- 11).

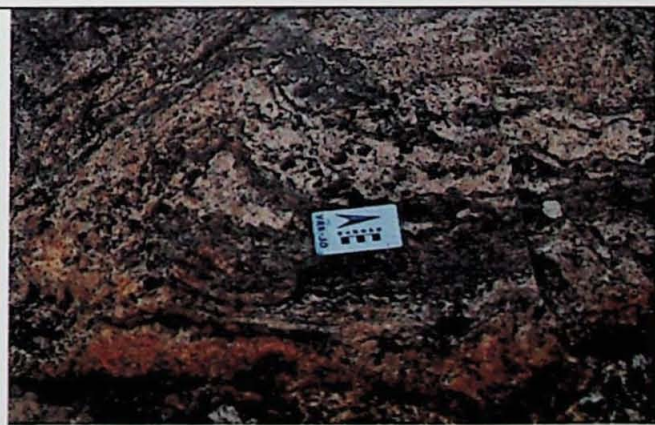


Foto 16 – Lentes de biotita entre o leucossoma com porfiroblastos de granada. (VAB- 11).



Foto 17 – Aglomerados com mais de 7cm e espessura de poucos milímetros, dentro do leucossoma. Constituído de grãos de granada e sillimanita (VAB- 11).

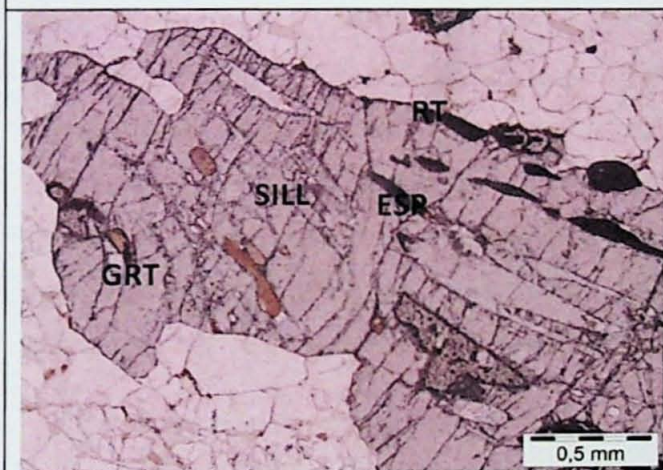


Foto 18 – Porfiroblasto de granada com inclusões de sillimanita espicular, rutilo e espinélio.

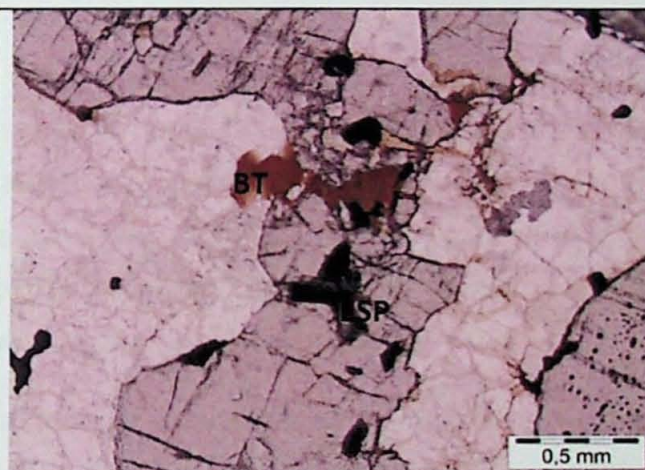
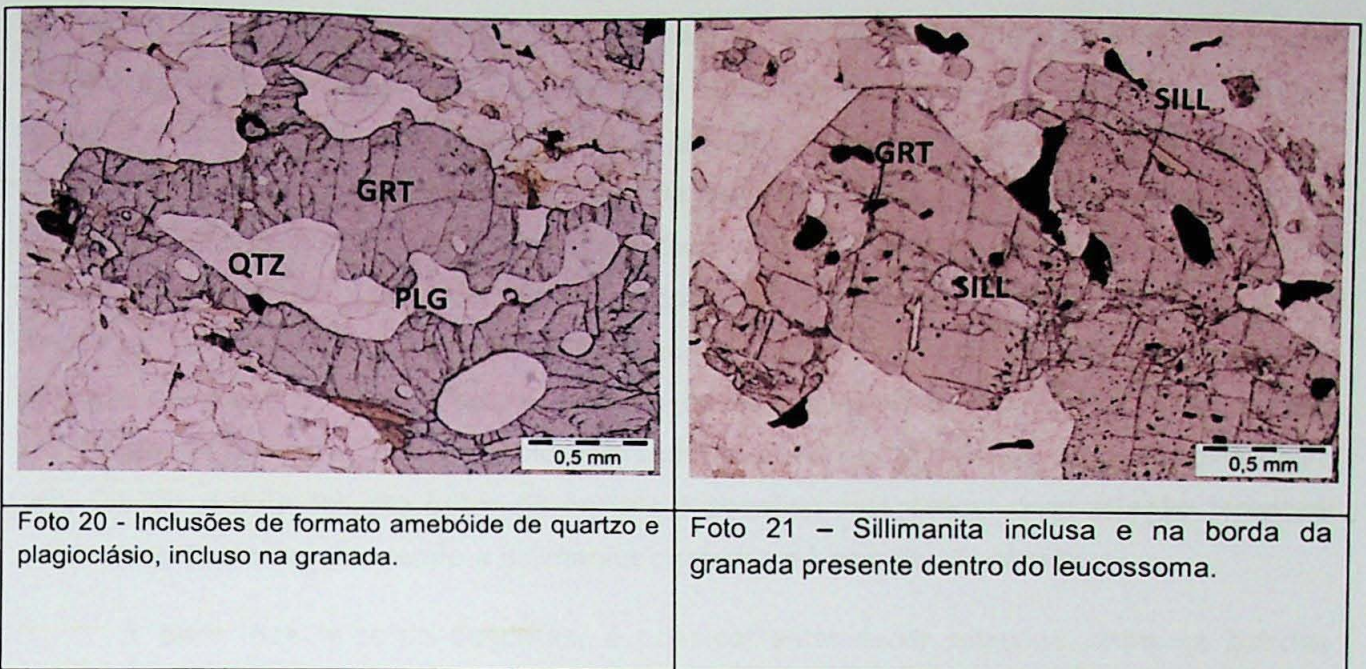


Foto 19 – Inclusão de espinélio na granada e de biotita na granada.



6.6 Rutilo cianita granada feldspato potássico granulito migmatítico com sillimanita - rocha da Nappe Três Pontas-Varginha

A rocha aflorante da *Nappe* Três Pontas-Varginha tem cor cinza, estrutura migmatítica variando de *schillieren* a estromática, composta por quartzo, feldspato potássico, granada, biotita, rutilo, cianita e sillimanita em quantidades variáveis e granulação grossa. O bandamento composicional é definido por bandas máficas com biotita e porfiroclastos de feldspato com formato sigmoidal, e bandas félsicas com quase ausência deste mineral, mas granada porfiroblástica ocorre em ambas (Fotos 22 e 23).

A porção leucocrática da rocha é formada por quartzo e feldspatos e apresenta textura granoblástica. O quartzo forma *ribbons* até 2 mm de espessura e apresenta extinção ondulante (Foto 24). O feldspato presente tem subgrãos, os cristais possuem contato interlobado com os demais grãos da matriz e apresentam bordas de migração com textura *bulging*. O feldspato mais abundante é o potássico, com geminação de microclínica ou com pertita (Foto 25), mas plagioclásio também ocorre com textura mirmequítica desenvolvido entre seus contatos (Foto 24).

A porção máfica da rocha possui textura porfirolepidoblástica, é formada por granada, biotita, rutilo, cianita, sillimanita, quartzo, plagioclásio e feldspato potássico. Os porfiroblastos de granada variam de 1 mm até 1,5 cm de diâmetro, ocorrem fraturados, com inclusões de quartzo, feldspato, estas costumam apresentar formato amebóide. Também são observados outros minerais inclusos na granada como: rutilo, biotita, sillimanita e cianita

(Fotos 26 e 27). A biotita ocorre em sua maioria orientada segundo a foliação principal, juntamente com os *ribbons* de quartzo e os subgrãos de feldspato e quartzo na matriz, contudo está presente também inclusa na granada e nas suas bordas juntamente com feldspato e quartzo, quando na borda aparenta ser resultado da substituição da granada. Os cristais de cianita e sillimanita ocorrem de duas formas diferentes, na matriz da rocha ou inclusas na granada. Quando estes cristais são observados na matriz geralmente encontram-se orientados segundo a foliação da rocha. No caso de estarem presentes inclusos na granada, no núcleo da inclusão estão presentes os cristais de cianita e nas bordas encontra-se a sillimanita tanto com formato euédrico com na forma de fibrolita (Foto 26). Devido a esta relação entre os cristais é possível estabelecer uma relação temporal entre o seu crescimento, sendo a sillimanita posterior a formação da cianita.

A partir das texturas descritas, é possível estabelecer relações entre as bandas constituintes da rocha. A banda leucocrática representa o leucossoma e a porção máfica o resíduo da fusão, a grande presença de textura mirmequíticas, granofírica, inclusões de quartzo com formato amebóide dentro da granada, e com contato em cúspide ou entre os encontros tríplexes dos grãos indica que esta rocha sofreu alta taxa de fusão, não é possível observar nenhuma porção da rocha que seja possível inferir que represente o paleossoma, entretanto devido a sua composição e os minerais presentes na rocha é possível dizer que o protólito é uma rocha pelítica. A paragênese feldspato potássico + cianita + granada + rutilo indica que metamorfismo atingiu a fácies granulito de alta pressão.

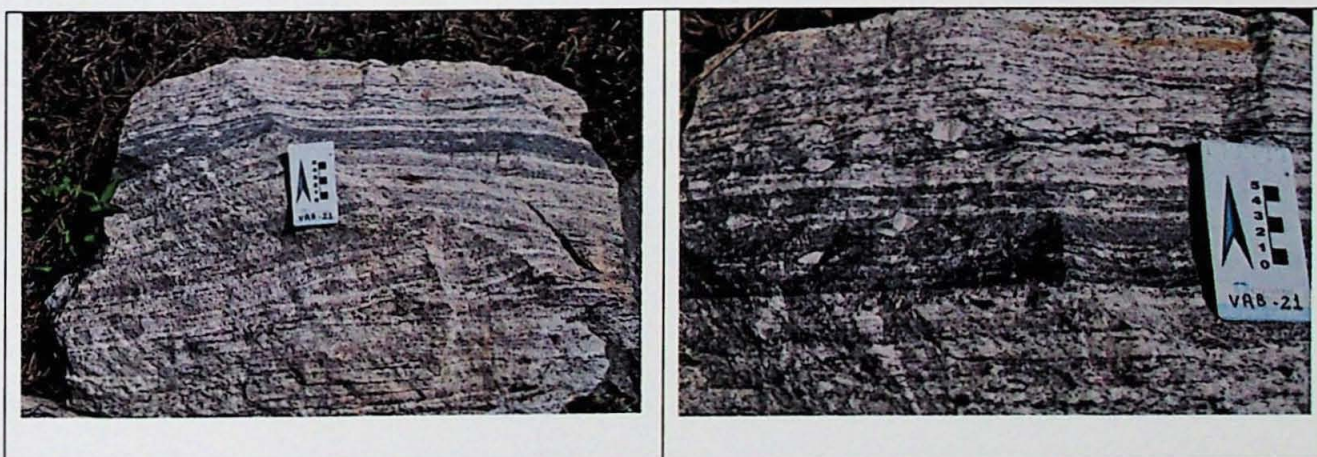


Foto 22 - Rocha da Nappe Três pontas-Varginha encontrada na área, rocha de com cinza com bandamento composicional, alternando bandas félsicas, om bandas máficas ricas em biotita e porfiriblastos de plagioclásio.

Foto 23 - Banda máfica composta por porfiriblasto de plagioclásio, biotita, granada. Os porfiriblastos de plagioclásio atingem até 2,5 cm. Intercalado com as bandas félsicas com quatzo, feldspato e granada porfiriblastica.

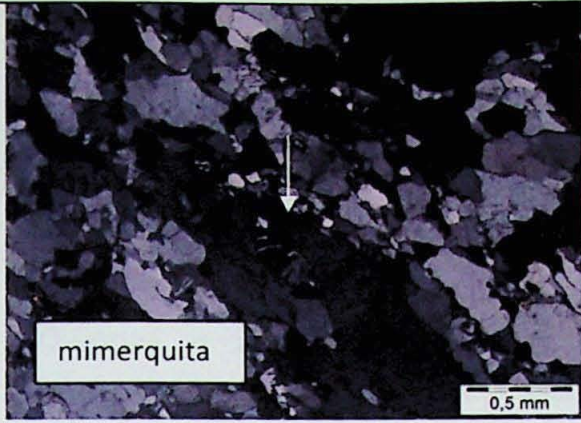


Foto 24- Grãos de quartzo estirados formando ribbons e mirmequita na matriz do leucossoma. Cristais de quartzo entre encontros tríplices da rocha.

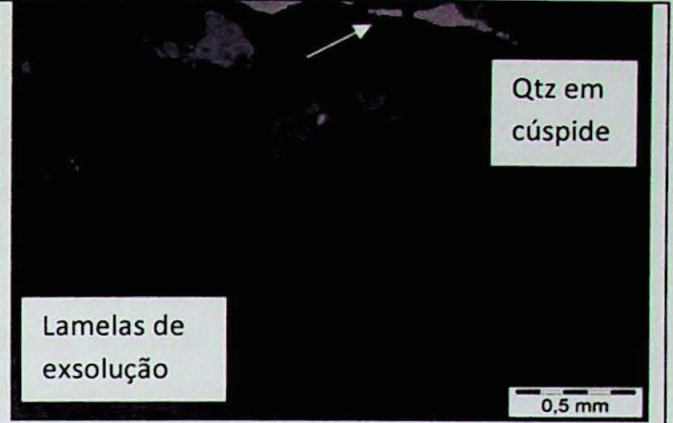


Foto 25- Lamelas de exsolução no feldspato alcalino, formando pertitas, acima quartzo com contato em cúspide e formando canalículos com os demais grãos.

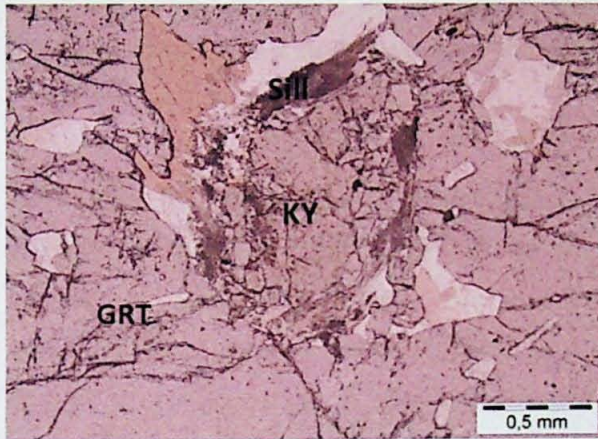


Foto 26 – Porfiroblasto de granada com inclusões de biotita, cianita e sillimanita. A cianita encontra-se envolta por uma coroa de sillimanita.

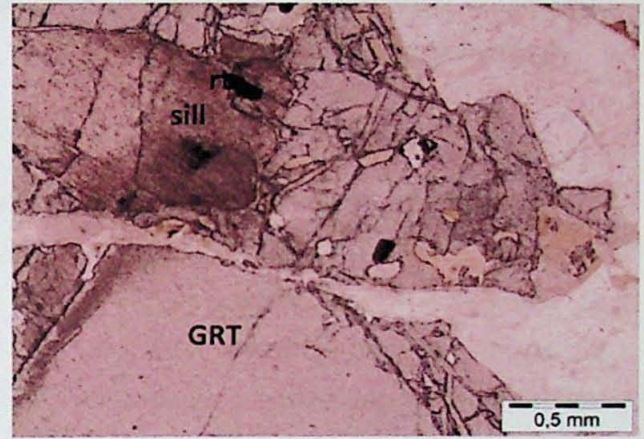


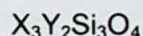
Foto 27 - Porfiriblasto de granada com inclusão de sillimanita, biotita e rutilo.

7. QUIMICA MINERAL

Para as análises químicas pontuais realizadas na microsonda JEOL modelo JXA-8530F do Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, foram selecionadas duas amostras (VAB-01 e VAB-19) da rocha predominante na região de Varginha da *Nappe* Socorro-Guaxupé, o granada granulito félsico. As fases minerais analisadas foram: granada, plagioclásio, ortopiroxênio e clinopiroxênio. Foi utilizada uma voltagem de 15 kV e corrente de 20 nA, com diâmetro do feixe de 10 µm.

7.1 Granada

Os minerais do grupo da granada pertencem à classe dos ortossilicatos, são característicos de rochas metamórficas, mas também são encontrados em algumas rochas ígneas e como grãos detríticos em sedimentos. A fórmula química do grupo da granada é:



Os tetraedros de SiO_4 são ligados a octaedros de íons trivalentes de composição variável, o sítio X é ocupado por íons de metais divalentes (Fe, Al, Ti e Cr) e localiza-se nos interstícios dentro de redes Si-Al, cada íon divalente é rodeado por 8 oxigênios. O preenchimento desses sítios condiciona a formação de sete membros finais no grupo da granada, dos quais quatro são definidos pelos cátions divalentes: almandina – $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$, piropo - $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$, espessartita - $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$ e grossulária - $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$.

Os cristais de granada na amostra VAB-01 apresentam pouca variação composicional de núcleo para as bordas e as seguintes proporções entre os membros finais ocorrem (figura 3): Alm₅₀₋₅₃, Prp₂₉₋₃₀, Grs_{17,3-17,9} e Esp_{2,0-2,3}. A granada da amostra VAB-19 também apresentara composição homogênea do núcleo para borda, tendo pequeno aumento no conteúdo de almandina e diminuição de piropo em relação a amostra da VAB-01, sendo a relação dos seus membros finais (figura 4): Alm₅₂₋₅₃, Prp_{26,0-26,6}, Grs_{16,9-17,2} e Esp_{3,4-3,6}.

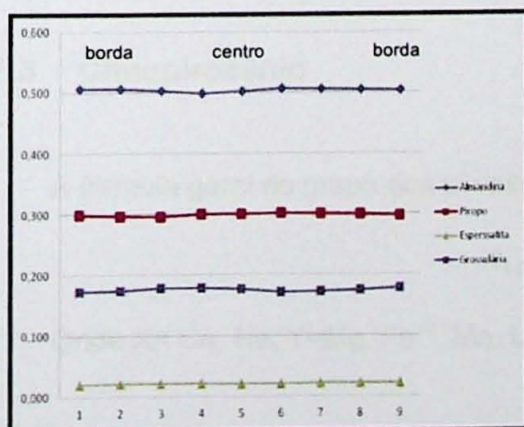


Figura 3- Seção química da granada da VAB-01.

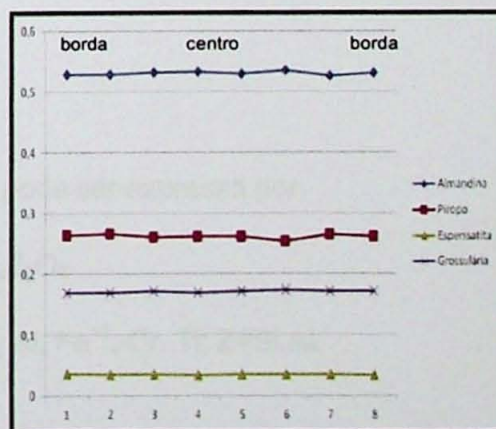


Figura 4- Seção química da granada da VAB-19.

7.2 Plagioclásio

A série do plagioclásio inclui seis minerais albita, oligoclásio, andesina, labradorita, bytownita e anortita. O plagioclásio possui simetria triclinica, com um tetraedro de (Si,Al)-O, com largos interstícios preenchidos por íons de Ca e Na.

Na amostra VAB-01 foram analisados quatro grãos de plagioclásio, e não houve grande mudança na composição da borda para o centro e entre os plagioclásios analisados, apresentando a composição de An_{37-41} (figura 6). Na amostra VAB-19 foram analisados três grãos de plagioclásio, que também apresentam composição similar e constante da borda para o núcleo dos grãos, entretanto a proporção de anortita é menor do que da amostra VAB-01, variando entre An_{29-34} (figura 7). Sendo assim, a amostra VAB-01 teve incremento um pouco maior de cálcio em relação à amostra VAB-19, contudo a composição química do plagioclásio de ambas as amostras é andesina.

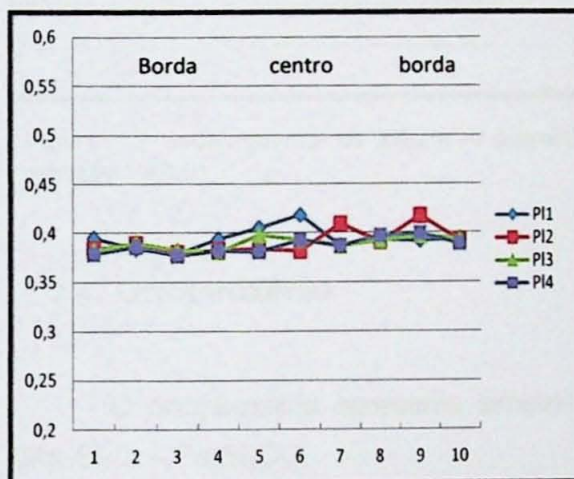


Figura 5 – Seção química de , teor de anortita do feldspato plagioclásio, amostra VAB-01.

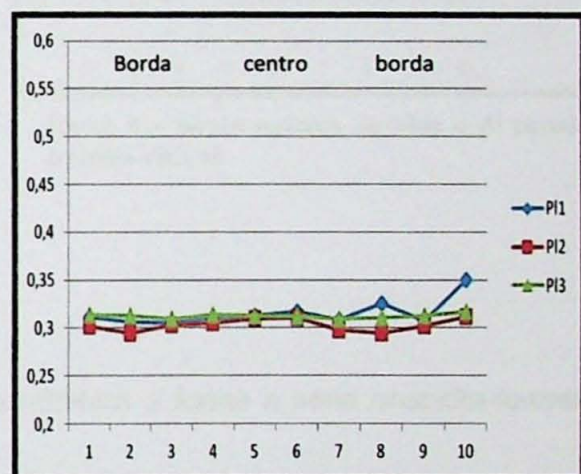
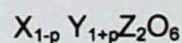


Figura 6 – Seção química de teor de anortita do feldspato plagioclásio, amostra VAB-19.

7.3 Clinopiroxênio

A fórmula geral do grupo dos piroxênios pode ser expressa por:



Onde X= Ca, Na; Y=Mg, Fe⁺², Mn, Li, Ni, Al, Fe⁺³, Cr, Ti; Z=Si,Al.

Os clinopiroxênios possuem simetria monoclinica e o seu sítio X é preenchido por Ca e o sítio Y por Mg e Fe^{+2} , formando a série diopsídio-hedenbergita ($CaMgSi_2O_6$ - $CaFeSi_2O_6$). O clinopiroxênio analisado nas amostras VAB-01 e VAB-19 apresenta respectivamente X_{Mg} 0,66-0,71 e X_{Mg} 0,63-0,69, sendo portanto ambos de composição mais diopsídica.

Observa-se que o alumínio apresenta comportamento invertido em relação ao X_{Mg} , na amostra VAB-01 e na VAB-19, com bordas mais ricas em magnésio do que o núcleo do cristal, que é mais rico em alumínio.

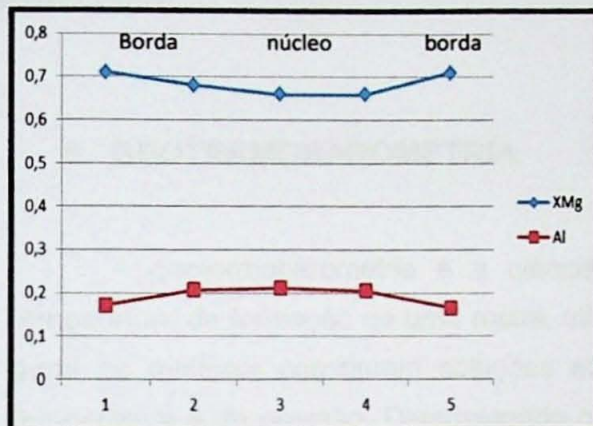


Figura 7 – Seção química de XMg e Al piroxênio, amostra VAB-01.

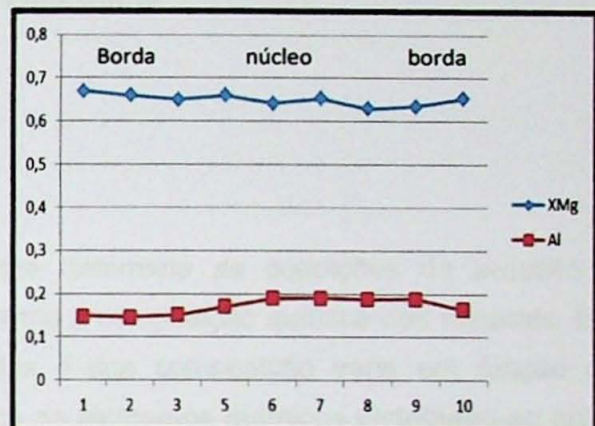


Figura 8 – Seção química de XMg e Al piroxênio, amostra VAB-19.

7.4 Ortopiroxênio

O ortopiroxênio apresenta simetria ortorrômbica e forma a série enstatita-ferrosilita ($Mg_2Si_2O_6$ - $Fe_2Si_2O_6$).

Nas amostras VAB-01 e VAB-19, o X_{Mg} é quase constante variando entre 0,59 e 0,60, tendo assim predominância da composição enstatítica no mineral. Os valores de alumínio foram enriquecidos no núcleo em relação às bordas nas análises da VAB-01 e VAB-19.

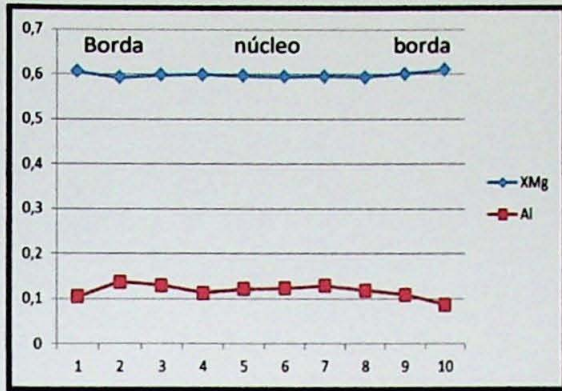


Figura 09 – Seção química de XMg e Al piroxênio, amostra VAB-01.

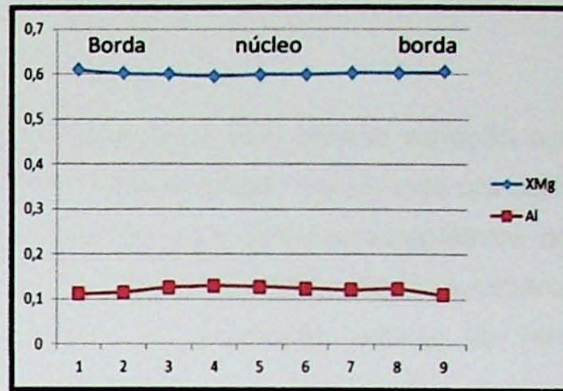


Figura 10 – Seção química de XMg e Al piroxênio, amostra VAB-19.

8. GEOTERMOBAROMETRIA

A geotermobarometria é a ciência que determina as condições de pressão e temperatura de formação de uma rocha, utilizando a composição química dos minerais. Em geral os minerais constituem soluções sólidas e sua composição varia em função da temperatura e da pressão. Determinando como os elementos químicos distribuem-se entre os minerais que coexistem em função das variações de pressão e temperatura, então é possível determinar os valores dessas variáveis intensivas a partir da análise da composição química dos minerais com a microsonda eletrônica (Spear, 1993).

A geotermobarometria de rochas em fácies granulito deveria ser simples, pois muitas calibrações são feitas e dentro da janela de temperatura e pressão das condições da fácies granulito, no entanto a geotermobarometria dessas rochas apresenta complexidades adicionais, pois o processo de fusão parcial e a difusão química entre Fe e Mg é facilitada em altas temperaturas e ambos dificultam a preservação de composições minerais no pico metamórfico (Powell & Holland, 2008).

8.1 Geotermobarometria clássica

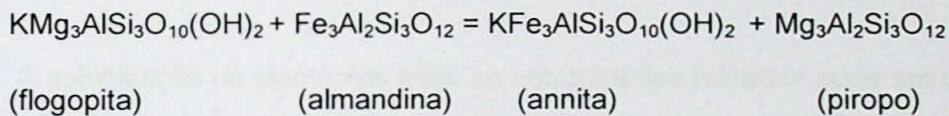
A geotermobarometria clássica baseia-se no equilíbrio termodinâmico de reações específicas usando as composições químicas de alguns minerais presentes nas rochas (Powell & Holland, 2008).

Geotermômetros

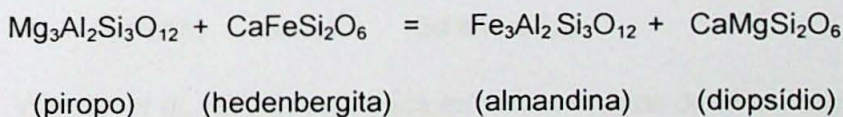
São considerados bons geotermômetros reações com grande variação nos valores de entropia ou entalpia e pequena mudança no volume molar, ocasionado por substituições catiônicas entre elementos de raio iônico similar e entre sítios cristalográficos de mesma coordenação. Estas reações são pouco dependentes de pressão, sendo representadas, em diagrama P - T , por curvas de alta inclinação e fornecendo valores de temperatura praticamente independentes da pressão (Spear, 1993).

A maioria dos geotermômetros usados em granulitos é baseada nas trocas de Fe-Mg entre fases coexistentes como granada, biotita, ortopiroxênio e clinopiroxênio.

A troca de Fe-Mg entre cristais de biotita e granada é um dos geotermômetros mais comuns e um dos primeiros a ser calibrado (Thompson, 1976; Ferry & Spear, 1978; Hodges & Spear, 1982), baseia na seguinte expressão abaixo e é comumente chamada de "GARB":



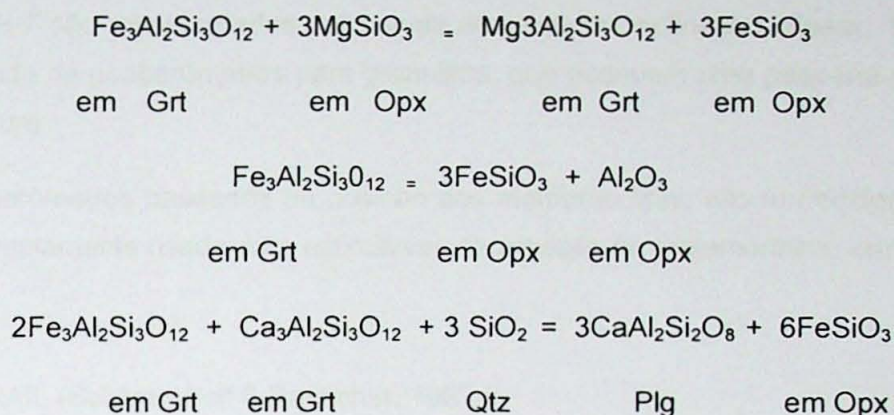
As trocas entre granada e clinopiroxênio tem sido calibradas em uma série de estudos (Ellis & Green, 1979; Pattinson & Newton, 1989) e diferente da reação acima que é usada tanto associações de baixo e alto grau metamórfico, a reação abaixo costuma ser usada em rochas da facies granulito e eclogito:



Muitos estudos demonstram evidências que as temperaturas das trocas de Fe-Mg entre estas fases esta abaixo do pico de temperatura da facies granulito, sugerindo que os minerais de Fe-Mg continuam a trocar Fe e Mg localmente, após o pico metamórfico, durante o retrometamorfismo (Harley, 1989; Pattison & Bégin, 1994a, b). Isto pode levar a erros de estimativas de temperatura altos ou baixos dependendo que parte do mineral é analisada, sendo que as bordas costumam apresentar maiores modificações composicionais. Para a correção dessas temperaturas é utilizado o esquema baseado na

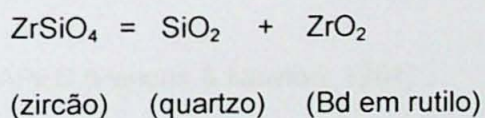
solubilidade do Al no ortopiroxênio em equilíbrio com a granada, corrigindo as trocas tardias de Fe e Mg. Isto porque as concentrações de Al no ortopiroxênio são preservadas nas condições de pico metamórfico em fácies granulito devido a difusão do Al ser extremamente lenta (Pattison *et al*, 2003).

Três reações de equilíbrio linearmente independentes representam estas trocas:



A substituição de elementos traço na estrutura dos minerais pode ser dependente da pressão e temperatura, e o geotermômetro calibrado para a solubilidade de Zr em rutilo (Zack *et al*, 2004; Watson *et al.*, 2007) baseia-se no aumento do conteúdo de zircônio no rutilo com o aumento da temperatura e na mudança de volume necessária para a substituição catiônica de Zr^{4+} por Ti^{4+} , sugerindo dependência da pressão do termômetro, e com diminuição do zircônio com o aumento da pressão.

A reação balanceada de zircônio em rutilo coexistindo com zircão e quartzo é:



Watson *et al.* (2006), baseados em experimentos de laboratório e amostras naturais, descreveu a seguinte reação de calibração:

$$\text{Log}(\text{Zr}[\text{ ppm}]) = 7.36 \pm 0.10 - \frac{4470 \pm 120}{T(\text{K})}$$

O rutilo pode ser parcialmente substituído por ilmenita ou titanita, durante o retromorfismo, diminuindo ou aumentando as concentrações originais de zircônio do pico metamórfico, para evitar este problema são utilizados grãos de rutilo inclusos em

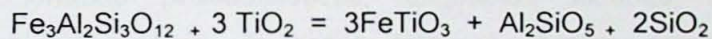
porfiroblastos de granada, onde a composição do pico metamórfico é preservada (Zack *et al.*, 2004).

Geobarômetros

Geobarômetros são reações com grande variação no volume molar, ocasionada por substituições catiônicas acopladas entre sítios cristalográficos de coordenação distintas. Nos diagramas *P-T* são representadas por curvas de pequena inclinação (Spear, 1993). Existe uma variedade de geobarômetros para granulitos, que possuem uma pequena dependência da temperatura.

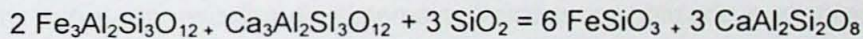
Os barômetros baseados na posição dos membros finais, são fornecidos seguindo o equilíbrio, amplamente usado para estimativas de pressão no metamorfismo em granulitos:

i) GRAIL (Bohlen, Wall & Boettcher, 1983a)



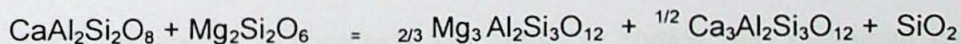
almandina rutilo ilmenita sillimanita quartzo

ii a) FAGS (Bohlen, Wall & Boettcher, 1983 b)



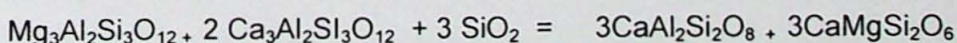
almandina grossularia quartzo ferrosilita anortita

ii b) GAPES (Perkins & Newton, 1981)



Anortita enstatita piropo grossulária quartzo

iii) GADS (Newton & Perkins, 1982)



piropo grossularia quartzo anortita diopsídio

8.2 Geotermobarometria otimizada

A geotermobarometria otimizada utiliza a associação mineral completa da rocha para fornecer resultados P - T , utilizando a informação de várias reações e suas correlações estatísticas (Powell & Holland, 1994). O cálculo de temperatura ou pressão envolve a combinação simultânea do método dos mínimos quadrados para um conjunto de reações linearmente independentes, que contem todos os membros finais das soluções sólidas dos minerais constituintes da rocha dentro de determinado sistema químico.

8.3 THERMOCALC e pseudosseções

O programa THERMOCALC (Powell & Holland, 1998; Holland & Powell, 2011) usando um banco de dados termodinâmicos internamente consistentes faz os cálculos de equilíbrio mineral envolvendo soluções sólidas em sistemas químicos complexos.

Através dos cálculos do equilíbrio químico mineral no THERMOCALC são confeccionadas pseudosseções, diagramas binários calculados para determinada composição química de rocha total. A técnica permite a construção de grades petrogenéticas, usando a composição química da rocha estudada, obtendo diagramas que possuem apenas associações minerais que a composição química da rocha permite ocorrer dentro de uma janela de pressão e temperatura.

Para o cálculo da pseudosseção é necessário a descrição petrográfica detalhada da amostra estudada, escolha do sistema químico a ser utilizado e a obtenção da composição química total da rocha. A existência de porfiroblastos quimicamente zonados é um fator importante a ser considerado, pois estes isolam parte da composição química da rocha que para de fazer parte do volume de equilíbrio. Estas etapas são necessárias para identificar as fases minerais que estão em equilíbrio, a construção dos diagramas é feita através do estudo das associações minerais e dos seus graus de liberdade.

A pseudosseção é composta por linhas e pontos que delimitam os campos de estabilidade de associações minerais. As linhas representam curvas que uma determinada moda mineral chega à zero (curva univariante). A construção parte de uma curva univariante, ou dos limites de um campo de menor variância possível, representa a principal reação da rocha estudada, passando gradualmente para as demais associações com variância superior (Powell, *et al.*, 1998).

A vantagem do método em relação à termobarometria convencional esta no fato de que não é necessário escolher as composições que possivelmente estavam em equilíbrio químico, a pseudosseção indica isso. Utilizando os valores de pelo menos duas razões

catiônicas do mineral escolhido, se obtém o intercepto que corresponde às condições *P-T* vigentes ao momento que o mineral se desenvolveu.

8.4 Resultados obtidos com o Thermocalc

Para o cálculo dos valores de pressão e temperatura das amostras VAB-01 e VAB-19 foi utilizado a versão do software THERMOCALC 3.26, utilizando o banco de dados termodinâmicos internamente consistentes de 22 novembro de 2003. Os valores de pressão e temperatura obtidos estão apresentados na tabela 1:

Tabela 1 – Dados de temperatura e pressão médios do granada granulito félsico obtidos através do THERMOCALC.

	Av(T) °C	sd(T)	Av(P) kbar	sd (P)
VAB-01	938	47	11,37	0,62
VAB-19	927	87	11,64	0,36

9. MODELAGEM METAMÓRFICA – PSEUDOSSEÇÃO PARA AS ROCHAS DA NAPPE SOCORRO-GUAXUPÉ

Para o estudo do metamorfismo das rochas da *Nappe* Socorro-Guaxupé, foi construída uma pseudosseção utilizando o resultado da química de rocha total da rocha mais abundante na região de Varginha, o granada granulito félsico, no intervalo de 700 a 1000 °C e 9 a 14 kbar, janela *P-T* que engloba as reações metamórficas e campos de estabilidade referentes às paragêneses observadas. O sistema químico adotado foi NCKFMASHTO ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-FeO-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-TiO}_2\text{-O}_2$), este sistema foi selecionado por ser o sistema mais complexo que representa as rochas da região e, portanto, o mais confiável para termobarometria.

Na pseudosseção construída, quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e água são consideradas fases em excesso. A condição é admitida dado que o quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio são observadas em todas as amostras estudadas. Apesar da rocha ser composta por mineralogia praticamente anidra, optou-se por colocar H_2O em excesso para a simplificação dos cálculos da pseudosseção e permitir a estabilidade da hornblenda. A biotita foi excluída do sistema por estar presente em pouca quantidade (1% da rocha).

A amostra modelada com pseudosseção foi a VAB-01, granada granulito félsico. A pseudosseção traçada no sistema NCKFMASHTO é apresentada na figura 11, a qual é constituída por campos trivariantes, tetravariantes e pentavariantes. Nenhuma reação univariante foi calculada, nem campos divariantes.

A pseudosseção construída pode ser dividida em 3 campos: o primeiro deles é de alta pressão, ocupa metade da janela P - T escolhida, entre 10,3 e 13 kbar, em que ocorrem as associações com rutilo estável. O domínio é constituído por campos pentavariantes rutilo-diopsídio-granada e rutilo-hornblenda-granada, tetravariantes rutilo-ilmenita-diopsídio-granada e rutilo-ilmenita-granada-hornblenda e trivariantes rutilo-ilmenita-hornblenda-diopsídio. A quebra do rutilo para a formação da ilmenita é um bom marcador de pressão, devido a sua ocorrência em um intervalo limitado de pressão, mas com ampla variação de temperatura.

O segundo campo que pode ser delimitado é o de baixas temperaturas, onde as paragêneses não são estáveis com ortopiroxênio e diopsídio, o limite superior do campo é marcado pela linha de aparecimento do diopsídio, entre 750 e 800 °C, que é um bom marcador de temperatura. Este campo é composto por campos pentavariantes ilmenita-granada-hornblenda e granada-rutilo-hornblenda e tetravariantes rutilo-ilmenita-granada-hornblenda.

O terceiro campo é o delimitado pelas associações com ortopiroxênio estável. Este é limitado por campo pentavariante diopsídio-ilmenita-ortopiroxênio, dois campos tetravariantes ortopiroxênio-hornblenda-ilmenita-diopsídio e ortopiroxênio-granada-ilmenita-diopsídio e um campo trivariante diopsídio-ilmenita-ortopiroxênio. A curva de estabilidade do ortopiroxênio entre 800 e 900°C é dependente principalmente do valor de temperatura, a partir da curva de consumo da hornblenda, a curva de estabilidade do ortopiroxênio muda sua direção tornando-se dependente da pressão, sendo este mineral ausente a pressões superiores a 13 kbar no diagrama. Através do diagrama podemos dizer que a reação de consumo da hornblenda para a formação do ortopiroxênio ocorre em intervalo pequeno de temperatura de 850 °C a 900 °C, é dependente dos valores de temperatura, sendo portanto a reação de consumo da hornblenda para a formação do ortopiroxênio um bom marcador de temperatura nas rochas.

A partir das descrições petrográficas das texturas da granada granulito félsico, observou-se que os minerais presentes no pico metamórfico da rocha são diopsídio, granada, ortopiroxênio, quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino e ilmenita. Este campo tetravariante no diagrama confeccionado está delimitado por 9,5 kbar e 880 °C e 13 kbar e 1000 °C. Os valores obtidos através da termobarometria otimizada (938 °C e 11,37 kbar e 927 °C e 11,64 kbar) encontra-se dentro deste intervalo.

A hornblenda presente na rocha possui textura de substituição dos piroxênios, indicando que este mineral foi resultado do resfriamento da rocha durante o retrometamorfismo que alcançou o campo trivariante, em que a hornblenda e ortopiroxênio são estáveis, delimitado pelos valores de 12,2 kbar e 918 °C e 9,3 kbar e 817 °C.

Não é possível traçar a trajetória metamórfica da rocha anterior ao seu pico de pressão e temperatura, pois as texturas observadas e a sua mineralogia demonstram que esta rocha foi submetida a processos de fusão parcial, por isso a mineralogia descrita representa a porção residual da rocha, sendo boa parte da sua composição original fundida e perdida no fluido, tornando inviável a estimativa de qual mineralogia encontrava-se estável antes da rocha atingir o pico metamórfico.

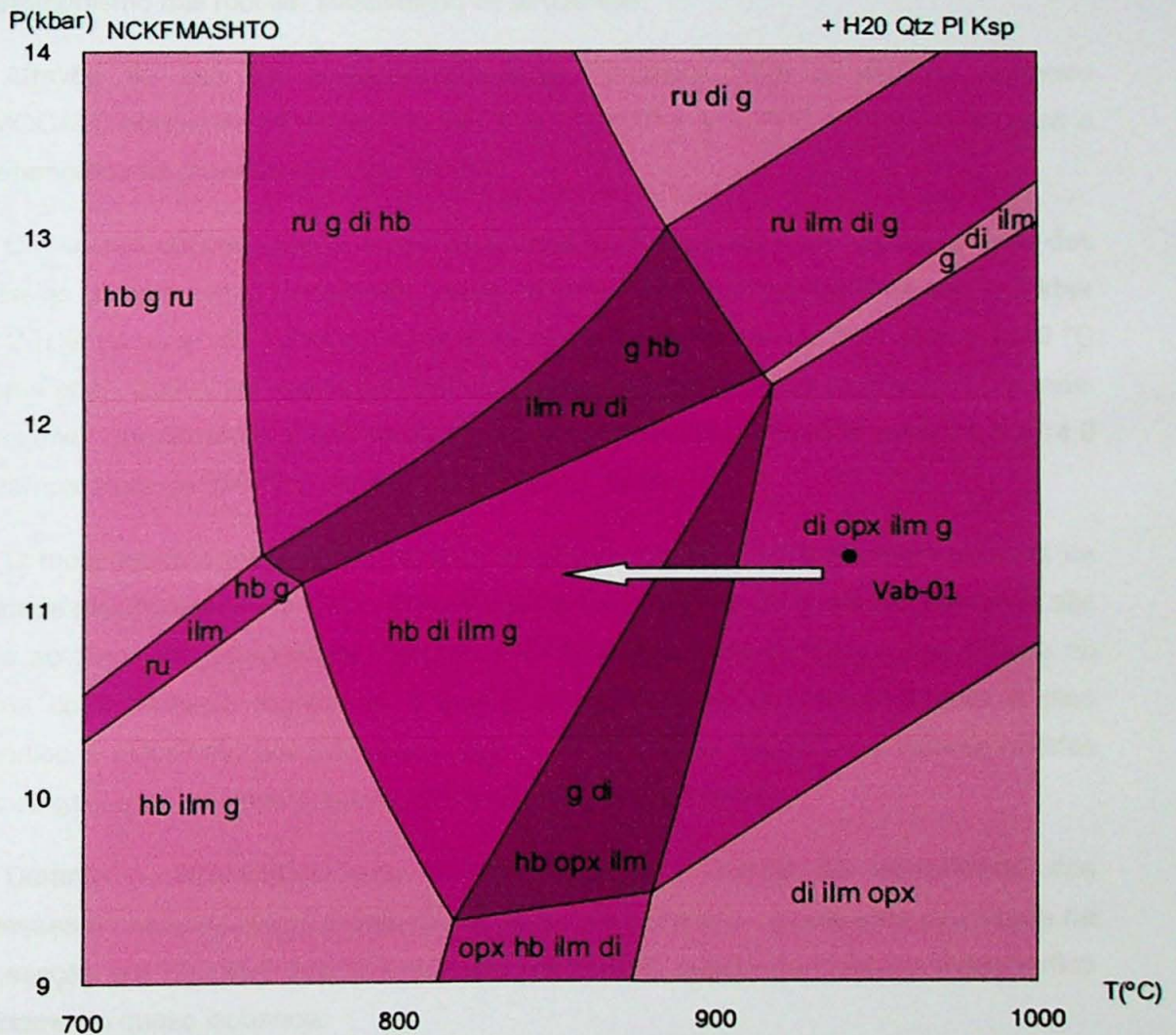


Figura 11- Pseudosseção *P-T* para a amostra VAB-01 no sistema química NCKFMASHTO, com quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino e água em excesso. A seta na foto indica a trajetória metamórfica da rocha durante o resfriamento. Composição química calculada a partir da proporção molar normalizada.

25495
 INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - USP
 = BIBLIOTECA =

10. CONCLUSÃO

As rochas da *Nappe* Socorro-Guaxupé na região de Varginha, MG, foram metamorfasadas em condições de fácies granulito. As texturas descritas através de observações de campo e petrográficas, denotam que esta rocha possui paragênese mineral anidra (ilmenita, ortopiroxênio, diopsídio, quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino) e a presença de minerais hidratados (hornblenda e biotita) são de formação anterior ao pico metamórfico, quando aprisionados com iopsídio, quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino) e a presença de minerais hidratados (hornblenda e biotita) são de formação anterior ao pico metamórfico, quando aprisionados como inclusões na granada ou resultado do retrometamorfismo das rochas, substituindo os piroxênios.

Através do uso da geotermobarometria otimizada, com o uso do software THERMOCALC obteve-se os valores de 927°C e 11.64 kbar e 930°C e 11.37 kbar, para o pico metamórfico da granada granulito félsico.

Os valores obtidos anteriormente para os granulitos da base da *Nappe* através das assembleias clinopiroxênio, hornblenda, biotita, plagioclásio e quartzo resultam em 12,5 kbar e 900 °C (Del Lama *et al.*, 1994) ou ainda mais elevados, da ordem de 14,4 kbar e 1040 °C (Del Lama *et al.*, 2000). Na região de Varginha, termobarometria em granulito com granada, clinopiroxênio, ortopiroxênio, plagioclásio e quartzo representam pressões entre 11,5 e 14,0 kbar e temperatura de 890 °C (Campos Neto & Caby, 2000).

O modelamento metamórfico através de pseudosseções determinou os campos de estabilidade das paragêneses metamórficas e permitiu a previsão de quais paragêneses são estáveis ao longo de determinado intervalo *P-T*. O campo tetra-variante grt-opx-di-ilm no diagrama confeccionado representa a janela de estabilidade da rocha durante o pico metamórfico é delimitado por 9,5 kbar e 880 °C e 13 kbar e 1000°C, os valores obtidos através da geotermobarometria encontram-se dentro deste intervalo.

Durante o retrometamorfismo da rocha atingiu o campo de estabilidade das paragêneses hornblenda-ortopiroxênio-diopsídio-granada-ilmenita, janela esta delimitada na pseudosseção por 12,2 kbar 918 °C e 9,3 kbar e 817,4 °C, sugerindo trajetória metamórfica de resfriamento quase isobárico.

11. BIBLIOGRAFIA

- Behr, H., Den Tex, E., De Waard, D., Mehnert, K., Scharbert, H.G., Sobolev, V.S. 1971. Granulites Results of a discussion. *N. Jb. Mineral.* 97-123.
- Bohlen, S.R., Wall, V.J. & Boettcher, A.L. 1983. Experimental investigations and geological applications of equilibria in the system FeO-TiO₂-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. **68**: 1049-1058.
- Campos Neto, M.C. 2000. Orogenic Systems from SW-Gondwana: An approach to Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage in SE-Brazil. *Tectonic Evolution of South America*. **1** : 335-365.
- Campos Neto, M.C. & Caby, R. 1999. Neoproterozoic high-pressure metamorphism and tectonic constraint from the *Nappe* system south of the Sao Francisco Craton, Southeast Brazil. *Precambrian Research*, **97**: 3-26.
- Campos Neto, M.C. & Caby, R. 2000. Terrane accretion and upward extrusion of high-pressure granulites in the Neoproterozoic *Nappes* of Southeast Brazil; petrologic and structural constraints. *Tectonics*, **19**: 669-687.
- Campos Neto, M. C.; Basei, M. A. S.; Vlach, S.R.F.; Caby, R. ; Szabo, G.A.J.; Vasconcelos, P. 2004. 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*, 4(1): 13-40.
- Campos Neto, M. C.; Janasi, V. A. ; Basei, M. A. S. ; Siga JR, O. 2007. Sistema de Nappes Andrelândia, setor oriental: Litoestratigrafia e posição estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**: 47-60.
- Del Lama, E. A.; Oliveira, M. A. F. ; Zanardo, A. 1994 . Geotermobarometria em rochas do Complexo Campos Gerais ao norte da Zona de Cisalhamento Varginha. *Revista Brasileira de Geociências*, **2**(3): 233-239.
- Del Lama, E. A. ; Oliveira, M. A. F. ; Zanardo, A. 1998 . Geochemistry of the Guaxupé Granulites, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research*, **1**(3), 357-365.
- Del Lama, E. A. ; Zanardo, A. ; Oliveira, M. A. F. ; Morales, N. 2000 . Exhumation of high-pressure granulites of the Guaxupé Complex, Southeastern Brazil. *Geological Journal*, **35**: 231-249.
- Ebert, H.D.; Hasui, Y.; Costa, J.B.S. 1991. O caráter transpressivo do Cinturão de Cisalhamento Rio Paraíba do Sul. *In*: III Simpósio Nacional de estudos tectônicos. B0L...IGCE/UNESP-SBG/SP, Rio Claro-SP.139-141.

- Ellis, D.J., AND Green, D.H. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **71**:13-22.
- Ferry, J. M., Spear, F. S. 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **66**, 113-117.
- Fyfe, W.S. 1973. The granulite facies, partial melting and the Archaean crust. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **273 A**, 457-461.
- Garcia, M. G. M. ; Campos Neto, M. C. ; Fallick, A. E. 2003. Oxygen isotope composition and geothermometry of granulite to greenschist facies metamorphic rocks: a study from Neoproterozoic collision-related nappe system, south of São Francisco Craton, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **15**: 871-883.
- Harley, S.L.1989. The origins of granulites: a metamorphic perspective. *Geological magazine*, **126(3)**: 216-247.
- Hodges, K.V., AND Spear, F.S. 1982. Geothermometry, geobarometry and the AlSiO₃ triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *American Mineralogist*, **67**: 1118-1134.
- Holland, T. J. B. and Powell, R. 2011, An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. *Journal of Metamorphic Geology*, **29**: 333–383.
- Iyer, S.S.; Choudhuri, A.; Pattison, D.R.M.; De Paoli, G.R. 1996. Petrology and geochemistry of the Neoproterozoic Guaxupé granulite facies terrain, southeastern Brazil. *Precambrian Research*, **77** : 23-40.
- Moraes, R., Brown, M., Fuck, R. A., Camargo, M. A., Lima, T. M. 2002 . Characterization and P-T evolution of melt-bearing ultrahigh-temperature granulites: an example from the Anápolis-Itaçu Complex of the Brasília Fold Belt, Brazil. *Journal of Petrology*, **39**: 1673-1705.
- Morales N. 1993. *Evolução tectônica do Cinturão de Cisalhamento de Campo do Meio na Porção Ocidental*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, 270p.
- Neves, B. B. B. ; Campos Neto, M. C. ; Fuck, R. A. 1999 . From Rodinia to Western Gondwana; An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes*, **22 (3)**:155-166.
- Newton, R. C. , Perkins, D. 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. *American Mineralogist*, **67**: 203-222.

- Oliveira, M.A.F., Ruberti, E. 1979. Granada-cordierita gnaisses do complexo migmatítico de São José do Rio Pardo - Caconde, SP. *Boletim de Mineralogia*, **6**: 15-29.
- Pattison, D.R.M., Newton, R.C. 1989. Reversed experimental calibration of the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **101**:87-103.
- Pattison, D. R. M., Bégin, N. J. 1994. Zoning patterns in orthopyroxene and garnet in granulites: implications for geothermometry. *Journal of Metamorphic Geology*, **12**: 387–410.
- Pattison, D.R.M., Spear, F.S., Debuhr, C.L., Cheney, J.T., Guidotti, C.V. 2002. Thermodynamic modelling of the reaction Muscovite + Cordierite \rightarrow Al₂SiO₅ + Biotite + Quartz + H₂O: constraints from natural assemblages and implication for the metapelitic petrogenetic grid. *Journal of Metamorphic Geology*
- Pattison, D.R.M., Chacko, T., Farquhar, J., Mcfarlane, C.R.M. 2003. Temperatures of granulite-facies metamorphism; constraints from experimental phase equilibria and thermobarometry corrected for retrograde exchange. *Journal of Petrology*, **44**: 867-900.
- Pimentel, M.M. & Fuck, R.A. 1992. *Características geoquímicas e isotópicas de unidades metavulcânicas e ortognáissicas Neoproterozóicas do Oeste de Goiás*. SBG-Núcleo Centro-Oeste, Boletim 15, 1-22.
- Pimentel, M.M.; Fuck, R.A.; Alvarenga, C.J.S. 1996. Post-Brasiliano (Pan-African) high-K granitic magmatism in Central Brazil: the role of Late Precambrian-early Palaeozoic extension. *Precambrian Res.*, **80**: 217-238.
- Perkins, D., III., Newton, R.C. 1981. Chanoekite geobarometers based on coexisting garnet-pyroxene-plagioclase-quartz. *Nature*, 292:144-146.
- Powell, R., Holland, T. 1994. Optimal geothermometry and geobarometry. *American Mineralogist*, **79** :120-133.
- Powell, R., Holland, T., Worley, B. 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**: 577-588
- Powell, R. & Holland, T. J. B., 2008. On thermobarometry.; Processes in granulite metamorphism. *Journal of metamorphic geology* ,**6**(2), 173-204.
- Sandiford, M. A. 1989. Horizontal structures in granulite terrains: a record of mountain building or mountain collapse? *Geology* **17**, 449–452.

- Spear, F.S. 1993. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineralogical Society of America, Washington, D. C. 799 p.
- Thompson, A. B. 1976. Mineral Reactions in Pelitic Rocks: II. Calculation of some P-T-X (Fe-Mg) phase relations. *American Journal of Science*, **276**: 425-454.
- Trouw, R. A. J.; Ribeiro, A.; Paciullo, F. V. P. 1983. Geologia estrutural dos Grupos São João dei Rei, Carrancas e Andrelândia, Minas Gerais. *Acad. Bras. Ciênc.*, 55 (1), 71-85.
- Trouw R.A.J. 1992. Evolução tectônica ao sul do Cráton do São Francisco, baseada em análise metamórfica. *In: Cong. Brasileiro Geologia*, 37, S. Paulo, Anais, p. 327.
- Trouw R.A.J., Paciullo F.V.P. & Ribeiro A. 1998. Tectonic significance of Neoproterozoic high pressure granulites in southern Minas Gerais. *In: International Conference on Basement Tectonics*, 14, Ouro Preto, Anais, p. 69-71.
- Trouw, R. A. J. *et al.* 2000. The central segment of the Ribeira Belt. *Tectonic Evolution of South America*. 287-310.
- Vasconcellos, A.C.B.; Harris, N.B.W.; Tindle, A.G. 1991. The relationship between metamorphism and tectonics: evidence from the Socorro-Guaxupé Thrust Nappe, southeastern Brazil. *In: TUISKU, P.; LAAJAKI, K. (Eds.) Metamorphism, deformation and structure of the crust*. Oulu, The University of Oulu, p.86.
- Watson, E.B., Wark, D.A & Thomas, J.B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to mineralogy and petrology*, **151**(4), 413-433.
- White, R.W. & Powell, R. 2002. Melt loss and the preservation of granulite facies mineral assemblages. *Journal of Metamorphic Geology*, **20**, 621-632.
- White, R. W. and Powell, R. 2010, Retrograde melt–residue interaction and the formation of near-anhydrous leucosomes in migmatites. *Journal of Metamorphic Geology*, **28**: 579–597.
- Zanardo, A., Morales, N., Del Lama, E.A., Oliveira, M.A.F. 1998. Evolução Geológica das rochas granulíticas da região de Guaxupé, sudeste do Brasil. *In: Anais do 40º Congresso Brasileiro de Geologia*, Belo Horizonte – MG., 1 p. 25.
- Zack T, Moraes R, Kronz A. 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **148**: 471-488.

12.ANEXOS

Tabela de análises químicas de granada na VAB-19:

Sample	vab19g1		vab19g1		vab19g1		vab19g1		vab19g1		vab19g2		vab19g2		vab19g2		vab19g2		
	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	
SiO2	38,71	38,75	38,75	38,53	39,06	38,63	38,78	38,83	38,67	38,75	38,75	38,8	38,69	38,62	38,89				
TiO2	0,03	0,06	0,08	0,08	0,05	0,1	0,05	0,13	0,09	0,12	0,08	0,11	0,08	0,11					
Al2O3	21,95	21,88	21,73	21,94	21,89	21,64	21,9	22,01	21,75	21,95	21,78	22,08	21,85	21,87					
Cr2O3	0,01	0,04	0,04	0,01	0,04	0,04	0,01	0,06	0,01	0,05	0	0,05	0,03	0,01					
Fe2O3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
FeO	23,95	24,43	24,24	24,65	24,16	24,42	24,01	24,4	25,09	24,36	24,86	24,14	24,23	24,61					
MnO	1,63	1,63	1,56	1,57	1,6	1,61	1,59	1,58	1,75	1,68	1,7	1,57	1,64	1,62					
MgO	6,72	6,9	6,67	6,8	6,7	6,49	6,79	6,76	6,16	6,62	6,29	6,8	6,97	5,89					
CaO	6,01	6,1	6,09	6,09	6,13	6,18	6,12	6,13	6,28	6,13	5,71	6,11	6,03	5,98					
Na2O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
K2O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Totals	99,01	99,79	99,16	99,66	99,63	99,11	99,24	99,89	99,8	99,65	99,23	99,54	99,44	99,98					
Oxygens	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12					
Si	3,013	3,001	3,016	2,991	3,023	3,014	3,013	3,002	3,007	3,005	3,024	2,998	2,999	3,006					
Ti	0,002	0,004	0,004	0,005	0,003	0,006	0,003	0,007	0,005	0,007	0,005	0,006	0,005	0,006					
Al	2,015	1,997	1,995	2,008	1,997	1,991	2,006	2,006	1,994	2,006	2,001	2,018	2,006	1,993					
Cr	0	0,002	0,003	0	0,002	0,002	0,001	0,004	0,001	0,003	0	0,003	0,002	0					
Fe3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Fe2	1,559	1,582	1,578	1,599	1,564	1,593	1,56	1,577	1,631	1,58	1,62	1,564	1,573	1,591					
Mn	0,103	0,107	0,103	0,103	0,105	0,106	0,104	0,103	0,115	0,11	0,112	0,103	0,108	0,106					
Mg	0,78	0,797	0,774	0,786	0,773	0,755	0,786	0,778	0,714	0,764	0,731	0,785	0,806	0,794					
Ca	0,501	0,506	0,508	0,507	0,508	0,517	0,509	0,508	0,523	0,509	0,477	0,507	0,502	0,495					
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Sum	7,978	7,996	7,981	8	7,975	7,984	7,981	7,986	7,991	7,984	7,971	7,985	7,995	7,991					
alm	0,52863311	0,52874332	0,53256834	0,53388982	0,53016949	0,5361831	0,52720514	0,53169252	0,546765	0,53324333	0,55102041	0,52855694	0,52626296	0,53281983					
pr	0,26458615	0,26637701	0,26122173	0,2624374	0,26220339	0,25412319	0,26563028	0,26230614	0,23935635	0,25784678	0,248663946	0,26529233	0,2696354	0,25590757					
sps	0,03663501	0,03576203	0,03476207	0,03439065	0,03559322	0,03567822	0,03514701	0,0347269	0,03855179	0,03712454	0,03809524	0,03480906	0,03613249	0,035499					
grs	0,16994573	0,16911765	0,17144786	0,16928214	0,17220339	0,17401548	0,17201757	0,17127444	0,17532685	0,17178535	0,1622449	0,17134167	0,16794915	0,15577361					

Tabela de análises químicas de granada na VAB-19:

Sample	vab19g3		vab19g3		vab19g3		vab19g3		vab19g3		vab19g3		vab19g3		vab19g3	
	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
SiO2	38,03	38,51	38,67	38,43	38,97	38,29	38,94	38,31	38,55	38,36	38,31	38,94	38,31	38,55	38,36	38,36
TiO2	0,06	0,00	0,00	0,05	0,06	0,06	0,1	0,07	0,07	0,00	0,07	0,1	0,07	0,07	0,00	0,00
Al2O3	21,41	22,08	21,89	21,95	21,99	22,06	21,98	21,96	21,62	21,86	21,96	21,98	21,96	21,62	21,86	21,86
Cr2O3	0	0	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,01	0,01
Fe2O3	0	0	0	0	0	0	0	0,21	0	0	0,21	0	0	0	0	0
FeO	25,26	24,93	24,64	24,94	23,92	24,09	24,12	24,43	24,88	25,04	24,43	24,12	24,43	24,88	25,04	25,04
MnO	1,78	1,69	1,61	1,63	1,59	1,51	1,52	1,6	1,65	1,64	1,52	1,52	1,6	1,65	1,64	1,64
MgO	5,87	6,33	6,59	6,2	6,83	7	6,75	6,76	6,18	6,14	6,76	6,75	6,76	6,18	6,14	6,14
CaO	6,01	6,07	6	6,23	5,99	5,8	6,22	6,07	6,11	6,18	6,22	6,22	6,07	6,11	6,18	6,18
Na2O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K2O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totals	98,41	99,68	99,5	99,41	99,35	98,84	99,65	99,39	99,1	99,31	99,39	99,65	99,39	99,1	99,31	99,31
Oxygens	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Si	3,006	2,993	3,005	2,996	3,019	2,988	3,013	2,983	3,015	2,997	2,983	3,013	2,983	3,015	2,997	2,997
Ti	0,003	0,004	0,005	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004	0,006	0,004	0,004	0,005	0,005
Al	1,995	2,073	2,006	2,018	2,009	2,073	2,005	2,015	1,994	2,014	2,015	2,005	2,015	1,994	2,014	2,014
Cr	0	0	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0	0,003	0,001	0	0,001	0	0,003	0,001	0,001
Fe3	0	0	0	0	0	0	0	0,012	0	0	0,012	0	0	0	0	0
Fe2	1,67	1,62	1,601	1,626	1,55	1,572	1,561	1,591	1,627	1,636	1,591	1,561	1,591	1,627	1,636	1,636
Mn	0,119	0,111	0,106	0,108	0,104	0,1	0,099	0,105	0,109	0,108	0,105	0,099	0,105	0,109	0,108	0,108
Mg	0,691	0,733	0,763	0,72	0,788	0,814	0,778	0,784	0,72	0,714	0,784	0,778	0,784	0,72	0,714	0,714
Ca	0,509	0,505	0,499	0,52	0,497	0,485	0,516	0,506	0,512	0,517	0,506	0,516	0,506	0,512	0,517	0,517
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	7,994	7,991	7,907	7,992	7,972	7,993	7,979	7,979	7,903	7,992	7,979	7,979	7,979	7,903	7,992	7,992
alm	0,61506773	0,59750094	0,58709444	0,60309376	0,57193073	0,56956897	0,57785458	0,58011577	0,60790798	0,60637509	0,58011577	0,57785458	0,58011577	0,60790798	0,60637509	0,60637509
pl	0,23181	0,24688447	0,25698889	0,24209818	0,26811841	0,27398182	0,2633717	0,26255861	0,2425876	0,24	0,26255861	0,2633717	0,26255861	0,2425876	0,24	0,24
eps	0,03081265	0,03738633	0,03570226	0,03631473	0,03538610	0,0336587	0,03351388	0,0351641	0,03672507	0,03630252	0,0351641	0,03351388	0,0351641	0,03672507	0,03630252	0,03630252
grs	0,17029107	0,17009094	0,16807006	0,17484869	0,16910514	0,16332447	0,1746784	0,16945747	0,17250674	0,17378151	0,16945747	0,1746784	0,16945747	0,17250674	0,17378151	0,17378151

Script para a construção da pseudosseção da *Nappe* Socorro-Guaxupé no sistema NCKFMASHTO:

```
axfile nckfmashtorp4
infolevel 1
ignore
printguessform yes
printbulkinfo yes
incax no
setexcess q H2O
calctatp ask
setdefTwindow yes 200.001 1000.001
setdefPwindow yes 0.2 12
project no
seta no
setiso no
pseudosection yes
% -----
%      SiO2  Al2O3  CaO  MgO  FeO  K2O  Na2O  TiO2  O
setbulk yes  69.67  9.86  5.74  3.96  5.48  1.45  3.18  0.59  0.25
% -----
setmodeiso yes
zeromodeiso yes
guessxyz yes
calcsdnle no
dogmin no
smath no
drawpd yes
xinsmath no
tabsmath no
*
% H2O 0.07
```

CÁLCULO DE PRESSÃO E TEMPERATURA PARA VAB-19 NO THERMOCALC:

CÁLCULO DE TEMPERATURA

an independent set of reactions has been calculated

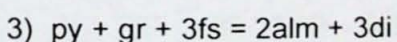
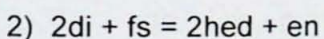
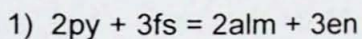
CÁLCULO DE TEMPERATURA

Activities and their uncertainties

	an	py	gr	alm	di	hed		
a	0.400	0.0310	0.00910	0.130	0.550	0.270		
sd(a)/a	0.05400	0.21290	0.28022	0.15000	0.05091	0.10000		

	en	fs	q		
a	0.280	0.170	1.00		
sd(a)/a	0.06786	0.10294	0		

independent set of reactions



Calculations for the independent set of reactions

at P = 15.0 kbar

	T(P)	sd(T)	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)
1	978	387	-54.50	1.42	0.01653	-0.771	4.364	0.639
2	838	325	18.26	1.19	-0.00851	-0.017	-0.924	0.256
3	940	263	-38.13	1.58	-0.02222	-0.782	7.615	0.577

corresponding average T

	avT	sd	fit
lsq	927	87	0.47

diagnostics on this average T

for 95% confidence, fit (= sd(fit) = sqrt(MSWD)) < 1.73 (but larger may be OK)

column:

1-3: result of doubling the uncertainty on ln a.

4: e^* = ln a residuals normalised to sd(ln a) : $|e^*| > 2.5$ suspect?

5: hat = diagonal elements of the hat matrix : hat > 0.43 influential.

6-7: observed and calculated activities of endmembers.

8-9: regression-through-origin x,y values

	T	sd	fit	e^*	hat	a(obs)	a(calc)	x	y
py	900	112	0.38	-0.3	0.33	0.0310	0.0306	0.01	8.22
gr	927	87	0.44	0.2	0.00	0.00910	0.00951	0.00	0.01
alm	920	103	0.46	0.1	0.17	0.130	0.133	-0.00	-5.80
di	938	93	0.39	-0.3	0.07	0.550	0.530	-0.00	-3.44
hed	947	103	0.39	0.3	0.26	0.270	0.274	0.01	6.74
en	922	88	0.37	0.3	0.01	0.280	0.288	-0.00	-1.64
fs	922	89	0.42	-0.2	0.03	0.170	0.166	0.00	2.50

P 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 8.5 9.0 9.5 10.0 10.5 11.0 11.5 12.0 12.5
 13.0 13.5 14.0 14.5 15.0 15.5 16.0 16.5 17.0 17.5 18.0 18.5 19.0 19.5 20.0 20.5
 21.0 21.5 22.0 22.5 23.0 23.5 24.0 \square

av T 842 846 850 855 859 863 867 871 875 880 884 888 892 897 901
 905 910 914 918 923 927 931 936 940 944 949 953 958 962 967 971
 976 980 985 989 994 998 1003 1008 \square

sd 85 85 85 85 85 85 85 85 85 85 86 86 86 86 86 86 86 86
 87 87 87 87 87 87 87 87 87 87 88 88 88 88 88 88 88 88
 88 89 89 \square

sigfit 0.7 0.6 0.6 0.6 0.6 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.4 0.4 0.4 0.4 0.4
 0.4 0.4 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.6 0.6 0.6 0.6 0.7 0.7 0.7 0.7 0.8
 0.8 0.8 0.8 0.9 \square

CÁLCULO DE PRESSÃO

an independent set of reactions has been calculated

Activities and their uncertainties

	an	py	gr	alm	di	hed
a	0.400	0.0310	0.00910	0.130	0.550	0.270
sd(a)/a	0.05400	0.21290	0.28022	0.15000	0.05091	0.10000

	en	fs	q
a	0.280	0.170	1.00
sd(a)/a	0.06786	0.10294	0

Independent set of reactions

- 1) $py + 2gr + 3q = 3an + 3di$
- 2) $2py + gr + 3q = 3an + 3en$
- 3) $2gr + alm + 3q = 3an + 3hed$
- 4) $gr + 2alm + 3q = 3an + 3fs$

Calculations for the independent set of reactions

at $T = 900_jC$

	P(T)	sd(P)	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)
1	11.3	0.95	0.51	0.83	-0.13347	6.592	8.330	0.640
2	11.7	0.85	-15.87	0.66	-0.09472	6.604	5.079	0.572
3	11.5	0.99	55.15	2.05	-0.15449	6.951	4.762	0.673
4	11.5	0.74	38.64	1.52	-0.11125	7.374	0.715	0.539

corresponding average P

	avP	sd	fit
lsq	11.64	0.64	0.36

diagnostics on this average P

for 95% confidence, $fit (= sd(fit) = \sqrt{MSWD}) < 1.61$ (but larger may be OK)

column:

1-3: result of doubling the uncertainty on ln a.

4: e^* = ln a residuals normalised to $sd(\ln a)$: $|e^*| > 2.5$ suspect?

5: hat = diagonal elements of the hat matrix : hat > 0.44 influential.

6-7: observed and calculated activities of endmembers.

8-9: regression-through-origin x,y values

	P	sd	fit	e^*	hat	a(obs)	a(calc)	x	y
an	11.65	0.74	0.36	-0.0	0.12	0.400	0.400	0.400	-0.55 -6.39
py	11.58	0.69	0.33	-0.2	0.16	0.0310	0.0296	0.62	7.50
gr	11.78	0.73	0.28	0.4	0.28	0.00910	0.0101	0.83	9.31
alm	11.63	0.72	0.36	-0.0	0.17	0.130	0.129	0.64	7.48
di	11.62	0.64	0.29	-0.3	0.01	0.550	0.542	0.11	1.57
hed	11.64	0.64	0.34	0.2	0.00	0.270	0.274	-0.09	-1.24
en	11.57	0.67	0.28	0.3	0.06	0.280	0.289	-0.37	-4.63
fs	11.66	0.70	0.36	-0.0	0.15	0.170	0.169	-0.61	-7.06
q	11.64	0.64	0.36	0	0	1.00	1.00	0	0

Average pressures

T_j C	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700	710	720	730	740		
750	760	770	780	790	800	810	820	830	840	850	860	870	880	890	900		
910	920	930	940	950	960	970	980										
av P	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.9	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.7	9.8	9.9	10.0
	10.1	10.2	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.8	11.9	
	12.0	12.1	12.2	12.4	12.5	12.6											
sd	1.15	1.11	1.08	1.04	1.01	0.97	0.93	0.90	0.86	0.83	0.79	0.76	0.72	0.68	0.65	0.65	0.65
	0.61	0.58	0.56	0.57	0.58	0.58	0.59	0.59	0.60	0.60	0.61	0.62	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64
	0.64	0.65	0.65	0.66	0.66	0.67	0.67	0.68									
sigfit	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
	1.0	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	0.5	0.5	0.5	0.6													

CÁLCULO DE PRESSÃO E TEMPERATURA PARA VAB-01 NO THERMOCALC:

CÁLCULO DE PRESSÃO

an independent set of reactions has been calculated

Activities and their uncertainties

	an	py	gr	alm	di	hed
a	0.500	0.0430	0.0104	0.110	0.590	0.240
sd(a)/a	0.05000	0.19070	0.27596	0.15000	0.05085	0.10000

	en	fs	q
a	0.310	0.140	1.00
sd(a)/a	0.05806	0.11857	0

Independent set of reactions

- 1) $py + 2gr + 3q = 3an + 3di$
- 2) $2py + gr + 3q = 3an + 3en$
- 3) $2gr + alm + 3q = 3an + 3hed$
- 4) $gr + 2alm + 3q = 3an + 3fs$

Calculations for the independent set of reactions

at T = 900°C

	P(T)	sd(P)	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)
1	10.9	0.93	-1.65	0.83	-0.13127	6.562	8.616	0.622
2	11.4	0.78	-18.31	0.66	-0.09232	6.577	5.266	0.524
3	11.1	0.98	53.05	2.05	-0.15236	6.922	4.978	0.663
4	11.1	0.77	36.59	1.52	-0.10922	7.350	1.003	0.561

corresponding average P

	avP	sd	fit
lsq	11.37	0.62	0.56

diagnostics on this average P

for 95% confidence, fit (= sd(fit) = sqrt(MSWD)) < 1.61 (but larger may be OK)

column: **3 DE TEMPERATURE**

1-3: result of doubling the uncertainty on ln a.

4: e^* = ln a residuals normalised to $sd(\ln a)$: $|e^*| > 2.5$ suspect?

5: hat = diagonal elements of the hat matrix : hat > 0.44 influential.

6-7: observed and calculated activities of endmembers.

8-9: regression-through-origin x,y values

	P	sd	fit	e^*	hat	a(obs)	a(calc)	x	y
an	11.38	0.72	0.56	-0.0	0.11	0.500	0.500	-0.54	-6.10
py	11.27	0.69	0.52	-0.3	0.20	0.0430	0.0405	0.72	8.53
gr	11.57	0.72	0.45	0.5	0.29	0.0104	0.0120	0.86	9.23
alm	11.36	0.69	0.56	-0.0	0.13	0.110	0.109	0.58	6.58
di	11.34	0.63	0.44	-0.5	0.01	0.590	0.577	0.13	1.98
hed	11.36	0.62	0.52	0.3	0.01	0.240	0.248	-0.12	-1.72
en	11.26	0.66	0.46	0.4	0.06	0.310	0.325	-0.41	-5.02
fs	11.42	0.68	0.55	-0.2	0.14	0.140	0.139	-0.61	-6.78
q	11.37	0.62	0.56	0	0	1.00	1.00	0	0

Average pressures

T_jC	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780	800	820	840	860	880	
900	920	940	960	980	1000	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200	
av P	8.2	8.4	8.6	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8	10.1	10.3	10.5	10.7	10.9	11.2	11.4
	11.6	11.8	12.1	12.3	12.5	12.7	13.0	13.2	13.5	13.7	13.9	14.2	14.4	14.7	14.9	
sd	1.19	1.12	1.05	0.97	0.90	0.83	0.76	0.69	0.63	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	
	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66	0.67	0.68	0.70	0.77	0.85	0.92	1.00	1.08	1.16	1.24	1.32
sigfit	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6
	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7		

CÁLCULO DE TEMPERATURA:

an independent set of reactions has been calculated

Activities and their uncertainties

	an	py	gr	alm	di	hed
a	0.500	0.0430	0.0104	0.110	0.590	0.240
sd(a)/a	0.05000	0.19070	0.27596	0.15000	0.05085	0.10000

	en	fs	q
a	0.310	0.140	1.00
sd(a)/a	0.05806	0.11857	0

Independent set of reactions

- 1) $2\text{gr} + \text{alm} + 3\text{q} = 3\text{an} + 3\text{hed}$
- 2) $\text{gr} + \text{fs} + \text{q} = \text{an} + 2\text{hed}$
- 3) $2\text{py} + 3\text{fs} = 2\text{alm} + 3\text{en}$
- 4) $\text{py} + 3\text{hed} = \text{alm} + 3\text{di}$

Calculations for the independent set of reactions

at P = 12.0 kbar

	T(P)	sd(T)	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)
1	953	44	53.10	2.05	-0.15273	6.953	4.978	0.663
2	945	58	23.16	1.28	-0.06525	2.173	2.985	0.364
3	953	363	-55.31	1.42	0.01727	-0.775	4.263	0.626
4	877	211	-54.77	1.89	0.02115	-0.361	3.638	0.415

Average temperatures

av T at 8.0 kbar,

av T at 8.5 kbar,

av T at 9.0 kbar,

av T at 9.5 kbar,

av T at 10.0 kbar,
 av T at 10.5 kbar,
 av T at 11.0 kbar,
 av T at 11.5 kbar,
 av T at 12.0 kbar,

corresponding average T

	avT	sd	fit
lsq	938	47	0.65

diagnostics on this average T

for 95% confidence, fit (= sd(fit) = sqrt(MSWD)) < 1.61 (but larger may be OK)

column:

1-3: result of doubling the uncertainty on ln a.

4: e^* = ln a residuals normalised to sd(ln a) : $|e^*| > 2.5$ suspect?

5: hat = diagonal elements of the hat matrix : hat > 0.44 influential.

6-7: observed and calculated activities of endmembers.

8-9: regression-through-origin x,y values

	T	sd	fit	e^*	hat	a(obs)	a(calc)	x	y
an	934	52	0.64	-0.1	0.08	0.500	0.497	0.01	7.22
py	938	47	0.65	0.1	0.01	0.0430	0.0436	-0.00	-2.48
gr	922	52	0.52	0.7	0.22	0.0104	0.0125	-0.01	-12.87
alm	942	58	0.65	-0.1	0.25	0.110	0.109	-0.01	-12.72
di	947	49	0.51	-0.5	0.04	0.590	0.574	-0.00	-4.61
hed	950	51	0.55	0.5	0.13	0.240	0.253	0.01	8.61
en	942	48	0.62	0.3	0.02	0.310	0.320	0.00	3.76
fs	933	51	0.64	-0.2	0.14	0.140	0.138	0.01	9.98
q	938	47	0.65	0	0	1.00	1.00	0	0

av T at 12.5 kbar,
av T at 13.0 kbar,
av T at 13.5 kbar,
av T at 14.0 kbar,
av T at 14.5 kbar,
av T at 15.0 kbar,
av T at 15.5 kbar,
av T at 16.0 kbar,

P 8.0 8.5 9.0 9.5 10.0 10.5 11.0 11.5 12.0 12.5 13.0 13.5 14.0 14.5 15.0
15.5 16.0

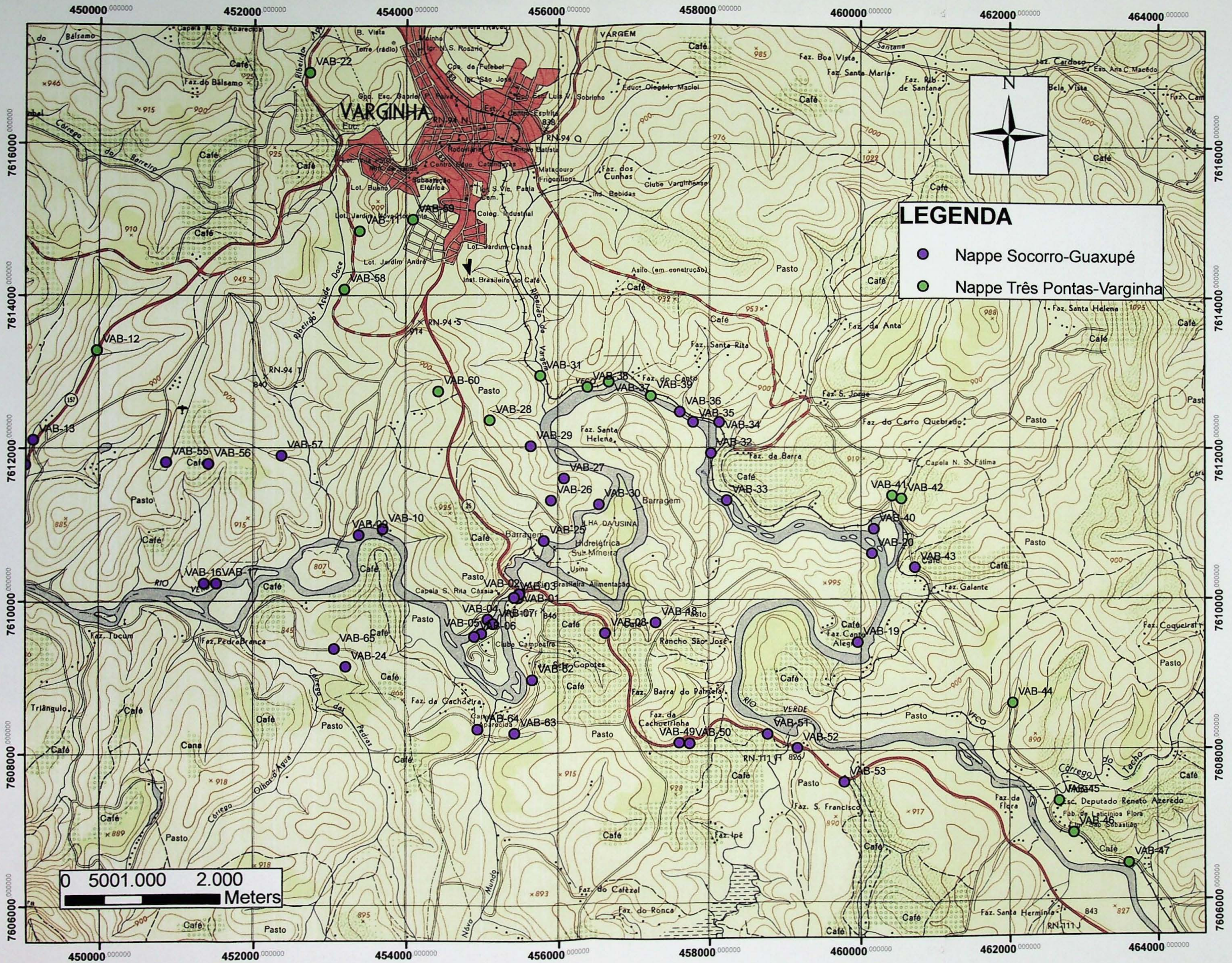
av T 676 709 742 775 808 841 873 906 938 971 1003 1035 1068 1100
1132 1164 1196

sd 82 71 60 50 48 48 48 47 47 47 46 55 64 74 83 92 101

sigfit 1.7 1.5 1.3 1.0 0.8 0.7 0.6 0.6 0.7 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.1 2.3

DOAÇÃO
IGC-USP
Data: 09/04/54

MAPA DE PONTOS



MAPA GEOLÓGICO - VARGINHA 1:50.000

