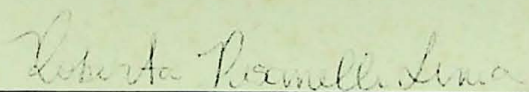
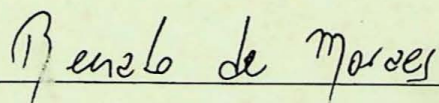


São Paulo, novembro de 2007

Em referência a monografia de trabalho de formatura (TF – 2007/36) **O PAPEL DO QUARTZO NO METAMORFISMO E FUSÃO DE ROCHAS MÁFICAS EM FÁCIES GRANULITO: EXEMPLO DO ANFIBOLITO CAFELÂNDIA, COMPLEXO BARRO ALTO, GOIÁS** estão de acordo:



**Aluna:** Roberta Pisanelli Lima  
Instituto de Geociências - USP



**Orientador:** Prof. Dr. Renato de Moraes  
Instituto de Geociências - USP

São Paulo, novembro de 2007

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024331

Em referência a monografia de trabalho de formatura (TF – 2007/36) **O PAPEL DO QUARTZO NO METAMORFISMO E FUSÃO DE ROCHAS MÁFICAS EM FÁCIES GRANULITO: EXEMPLO DO ANFIBOLITO CAFELÂNDIA, COMPLEXO BARRO ALTO, GOIÁS** estão de acordo:



*Roberta Pisanelli Lima*

**Aluna:** Roberta Pisanelli Lima  
Instituto de Geociências - USP

*Renato de Moraes*

**Orientador:** Prof. Dr. Renato de Moraes  
Instituto de Geociências - USP



## **Agradecimentos**

Agradeço todos os dias a Deus por tudo o que acontece em minha vida. Momentos alegres, tristes e difíceis de superar. De tudo o que acontece em nossas vidas, podemos tirar boas experiências, desde que tenhamos fé e acreditemos em nós e nas pessoas ao nosso lado. Desejo agradecer a todas as pessoas que me ajudaram de alguma forma a alcançar todas as minhas conquistas.

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família. Sem ela eu não conseguiria viver e muito menos superar os momentos difíceis. Agradeço aos meus pais, Antonio Carlos (Cacá) e Francesca (Mamy), pelo apoio em todas as minhas escolhas, por terem me acompanhado em todos os momentos de minha vida, desde o maternal até agora, na graduação. Obrigada pelas broncas, pelos abraços, pelos beijos, pelos carinhos, pelos presentes, pelas viagens e passeios, por terem me ajudado a chegar aonde cheguei e a me tornar a pessoa que sou hoje. Sem vocês eu não seria nada. E obrigada também, por terem suportado viver longos dias de trabalho de campo sem a filhinha querida. Quem diria....geóloga!

Em especial, gostaria de agradecer aos meus avós, Laura (Nonna), Antônia (Vó) e Achille (se pronuncia Aquille, Nonno). Eles são exemplos a se seguir, pela força, coragem e determinação. Agradeço à vó Antônia pelos almoços de domingo e chá da tarde, por orar por mim e também por estar presente em minha vida desde sempre. Agradeço à minha nonna Laura por tudo. Pelas conversas e histórias da Itália, por me ensinar a aprender a tabuada cantando e me ajudar nas lições de casa, por ir às minhas reuniões do inglês e da escola, por me buscar na natação, por ensinar a cozinhar, e que junto ao meu nonno Achille, me ensinou a falar italiano. Agradeço ao meu nonno Achille pelos consertos no computador, pelas histórias do mundo, pelas longas e gostosas conversas científicas e religiosas de que tanto ele gostava de falar. É muito difícil viver sem você, mas você estará sempre em nossos corações e em nossas mentes. Sei que você está muito orgulhoso. Obrigada por tudo, e por terem e estarem participando deste momento especial e de muitos outros que virão.

Quero agradecer também aos meus tios e tias, primos e primas, mas principalmente a minha tia Maria pelas horas de lazer e passeios por São Paulo, que junto às minhas primas Bia e Carol, pudemos passar momentos muito divertidos. Minha tia Marika, pelos passeios, convites de cinema, e por ter sempre lembrado de mim com carinho. Minha irmã-prima Ananda, que veio da Itália e me incentivou a falar italiano. Agradeço por todos os momentos que passamos juntas, sei que muitos foram difíceis, mas conseguimos superá-los. E nas horas de lazer, um abraço apertado para os meus cachorros queridos: Bigolu, Frodo e Sorella.

Vocês são muito importantes para mim, amo muito vocês!

Nestes últimos tempos, a geologia foi minha segunda casa. Gostaria de agradecer aos professores que foram importantes para minha formação, em especial, Paulo César Boggiani, pelo apoio e ajuda nas horas difíceis, Paulo César Fonseca Giannini, Cláudio Riccomini e Valdecir Janasi, pelas brilhantes aulas e Mario da Costa Campos Neto, pelos conselhos no mapeamento geológico. Desejo agradecer à Lucelene Martins pelos incentivos e ajuda nas aulas de mineralogia. Um obrigado especial ao professor Gergely Andres Julio Szabó, que me ajudou nas aulas de metamórfica e com quem pude

contar na realização do projeto de bolsa PIBIC/CNPq, e na elaboração do presente trabalho. Desejo agradecer à Fapesp pelo apoio financeiro do projeto 04/09682-8.

Em especial, devo meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador Renato de Moraes. Obrigada por ter sido um ótimo orientador e, principalmente, pela paciência. Tudo o que fiz nesse ano e meio de trabalho aprendi com você. Muito obrigada!

Na elaboração desse trabalho, agradeço aos: Issac Sayeg, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Marcos Mansuetto do Laboratório de Microsonda Eletrônica, pela ajuda e orientação.

E o que seria de nossa vida sem os amigos?

Agradeço primeiro de tudo, à turma 2003 e a todos que fazem parte dela. Um grande abraço em cada um de vocês. Muitas pessoas sabem a quantidade de vezes que eu falo obrigado, às vezes dá até raiva, né! Mas já que a situação me permite, desejo agradecer:

Maíra (Sica) e Talita (Xoca) por agüentarem essa baixinha por todos esses anos e no mapeamento geológico que havíamos prometido fazer juntas. Em horas alegres e tristes pude contar com vocês, tanto nos momentos de bronca do nosso "P" preferido quanto das choradeiras e desabafos. Além disso, se não fosse pela "Xoca" eu nem teria me matriculado em um desses semestres. Vocês me ajudaram e me ensinaram muitas coisas. Obrigada por tudo mais uma vez!

À Geo Júnior, em especial ao Reginaldo (Rodado) e a Lélia (Kostela), pelo aprendizado e pelos bons conselhos.

Sonia (Meladinha), pelas longas conversas no pátio, nos bancos, ou em qualquer lugar que nos encontrávamos. Um abraço forte e "uma arrumada de óculos" clássica.

Juliana (Buraco), pelas boas gargalhadas, conversas e pela oportunidade de conhecer "Pira" e sua família.

Ana (Chupeta), Cyntia (ProFunda) e Júlia (Dorival) por todos os dias de mapeamento sedimentar, não só do campo, mas durante a elaboração do relatório. Foram muitos dias estressantes, mas tudo era compensado pelas boas e engraçadas conversas. E quem disse que passar horas com mulher estressa? Eu passei muitas horas e dias com elas, e adorei. Adoro e me divirto com vocês! Espero que tenhamos oportunidades para que possamos trazer novamente "As crenuladinhas" de volta!

Às meninas do futsal: Vivian (Cachorra) e suas piadinhas cachorrísticas, Brenda (Brenda), Thais (Tchitcholina), Ana Paula (Treme-treme), Viviane (Jeba), Carolina (Michelan), Cláudia (Tsunami) e Marília (Atoladinha), pelos momentos de pelada e dos jogos sérios, muitos tristes, mas outros maravilhosos.

Às meninas do basquete: Ana Paula (Treme-treme), Daina (Arrombada), Talita (Xoca) e Natália (Bujãozinho). Foi muito bom jogar com vocês! Espero que joguemos mais vezes.

Daina (Arrombada), pelas dicas de basquete, conversas de "Geo Samba" e "Quinta e Breja". Obrigada!

Grace, que nos últimos tempos ficou muito Crazy.....

Thais (Tchitcholina), minha companheira de quarto de mapeamento geológico. Valeu pelos bate-papos e conselhos. Nos momentos mais complicados, conversar com você foi muito bom, e em outros momentos, nem se fale, muito engraçado. E MAC, então. Valeu, Tchitcho!

Ana Paula (Treme-treme), amiga de longas conversas, sobre qualquer assunto. O tempo não passa e podemos conversar por horas. Shake-shake, valeu por todos esses anos de futebol, de basquete, de enegeio, de Bifes, de trabalhos de campo, por tudo. Obrigadu!

Brenda, pelas super defesas nos jogos de futsal, mas principalmente, nestes últimos anos, pela companhia nos estudos e por termos ultrapassado, junto com o pessoal de MAC, uma difícil "Barrera". Mas conseguimos! E conseguiremos muito mais.

Talita (Pokotó), Thiago (Trena), Michelle (Dana) e André (Camarão), acima de tudo, pelos momentos de estudo mais engraçados do mundo, mas que deram bons resultados. Encaramos de tudo, mas juntos conseguimos ir muito longe. Obrigada pela companhia. "Konto" com vocês, e podem contar comigo sempre!

Aos amigos: André (Kodorna), Bruno (Rapunzel), Fábio (Bidê), Igor (CP), Jorge (Bizarro), Leonardo (Gyrafales), Marcus (Xabi), Maurício (Borboleta), Paulo (Rasga mãe), e Ralph (Rasga tanga), pelas conversas de banco, mas acima de tudo pelos momentos divertidos, que muitas vezes renovam nossa energia e nos dão animo para prosseguirmos melhor dia após dia.

Estas duas pessoas as quais irei agradecer são muito importantes na minha vida.

Anna Laura (Nanni), fonte de vida da minha família. Estou aprendendo um pouquinho da experiência de como é ser mãe, muitas vezes é cansativo, mas seu sorriso é maior que tudo.

E por fim, ao Rogério (Lacraia), meu amiguinho. Obrigada pela paciência de espera dos meus atrasos. Você passou por momentos de minha vida que sem você e sem minha família seria muito mais difícil de superar. Valeu pelos conselhos, ensinamentos e principalmente por todas as nossas conversas, discussões e desabafos. Obrigada, Lac!

Espero poder reviver muitos momentos com todos vocês.

Sem mais!

Roberta (Pisanela).

## Resumo

O anfibolito Cafelândia faz parte do Complexo Barro Alto, o qual integra cinturão granulítico de idade neoproterozóica e delimita a porção leste do Maciço de Goiás. O anfibolito Cafelândia apresenta bandamento composicional definido pela variação modal de seus minerais. Leucossoma, de composição tonalítica, é concordante ao bandamento da rocha, mas pode ocorrer discordante do mesmo. Além de quartzo e plagioclásio, apresenta hornblenda, granada, clinopiroxênio ou ortopiroxênio. A presença de leucossoma indica que a rocha passou pelo campo de fusão e embora a quantidade de hornblenda seja elevada, a presença de ortopiroxênio indica condições da fácies granulito. O presente trabalho tem por objetivo investigar as condições do metamorfismo e fusão a que a rocha foi submetida.

A paragênese do pico metamórfico é constituída de clinopiroxênio + granada + plagioclásio + hornblenda  $\pm$  ortopiroxênio. Como a proporção da hornblenda é maior do que a de quartzo, quando a rocha entra em fusão o último é consumido antes que a hornblenda. Ao microscópio óptico e ao microscópio eletrônico de varredura, o quartzo, quando ocorre, é observado na forma de filmes ou grãos intersticiais em relação aos grãos de hornblenda. Isso implica que o quartzo presente na rocha foi formado posteriormente, durante o resfriamento, pela cristalização do líquido silicático remanescente na rocha e, portanto, não faz parte da associação do pico metamórfico.

Os cálculos termobarométricos foram feitos com a associação clinopiroxênio-granada-plagioclásio-hornblenda. Para a realização dos cálculos, foram feitas análises de química mineral e o cálculo da fórmula estrutural. Os valores de temperatura e pressão calculados para as amostras estudadas estão em torno de 870<sup>o</sup> C e 10,9 kbar. As condições calculadas são compatíveis com os resultados experimentais de fusão de rochas máficas contendo hornblenda, produção de líquido granítico e resíduo contendo clinopiroxênio + granada, como observado nos afloramentos do anfibolito Cafelândia.

## Abstract

The Cafelândia amphibolite belongs to the Barro Alto Complex, and underwent metamorphism around 766 Ma. The complex is part of a neoproterozoic granulite belt and defines the east portion of the Goiás Massive. The aim of this work is to investigate the metamorphism and melting processes during the formation of this rock.

The Cafelândia amphibolite presents compositional layers defined by modal variation of hornblende, plagioclase, clinopyroxene, garnet, titanite e quartz. Leucosome veins are common, parallel to this compositional layering, present tonalitic composition, containing hornblende, garnet, clinopyroxene or orthopyroxene crystals. Leucosome presence indicates Cafelândia amphibolite crossed melting field along its *P-T* evolution. Although the high hornblende amount in the rock, the presence of the orthopyroxene + clinopyroxene + plagioclase ± hornblende indicates that metamorphism reached the granulite facies conditions. Pressure and temperature calculations depend on the determination of metamorphic peak mineral assemblage. As hornblende modal proportion is higher than quartz, if rock melted, it is possible that the last will be consumed first by melting reactions and was not present as a solid phase during metamorphic peak. Through optic and the eletron microscopes, quartz textures were examined and this mineral is observed as films around hornblende, mainly, and as intergrowths with plagioclase; no straight or granoblastic contacts were observed. The quartz presence in the rock implies it was crystallized later, after metamorphic peak, from the remnant silicatic liquid.

Thermobarometric calculations were made with the clinopyroxene-garnet-plagioclase-hornblende assemblage. The calculated values of pressure and temperature of the studied samples are around 870° C and 10.9 kbar, which are compatible with that of experimental results of melting of mafic rocks with hornblende and quartz, production of granitic liquid and clinopyroxene + garnet, as residue, as observed at Cafelândia amphibolite.



## ÍNDICE

1. APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS.....	3
1.1 . Introdução.....	3
1.2 . Objetivos .....	3
1.3 . Materiais e métodos .....	4
1.4 . Cronograma.....	5
1.5 . Relevância do trabalho.....	5
2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO.....	6
3. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	6
3.1 . Geologia Regional .....	6
3.2 . O anfibolito Cafelândia e rochas associadas na região de Goianésia.....	9
4. PETROGRAFIA.....	14
4.1 . Anfibolito Cafelândia.....	14
4.2 .MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	27
5. QUÍMICA MINERAL.....	33
5.1 . Introdução.....	33
5.2 . Química mineral do anfibolito Cafelândia.....	34
5.2.1. Anfibólio.....	34
5.2.2. Granada.....	36
5.2.3. Piroxênio.....	38
5.2.4. Feldspato.....	42
6. GEOTERMOBAROMETRIA.....	43
6.1 . Introdução.....	43
6.2 . Resultados.....	44
7. METAMORFISMO.....	51
7.1 . Metamorfismo e fusão de rochas máficas.....	51

8. DISCUSSÕES.....	54
9. CONCLUSÕES .....	55
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

O projeto tem por objetivo a investigação de tipos de quartzo no contexto de furos em rochas máficas com homblenda. A identificação de protomorfismos de quartzo com a grande importância para esta investigação e para estabelecer critérios no campo de temperatura e pressão. A realização do projeto é decorrente de um projeto de pesquisa em andamento sobre quartzo e sua relação com a homblenda em rochas máficas com homblenda, tendo como base teórica o exemplo e vive de estudo a artigos Coltrane, Campbell & Smith (2003) que é um trabalho pioneiro que aborda as condições de suas granulitas.

Os granulitos são rochas metamórficas, geralmente formadas no fundo de bacia com subsequente separação e ascensão do material fundido (Fyfe, 1970). As granulitas são caracterizadas principalmente por minerais antraxita, cordierita e oligoclina. No entanto, em condições de pressão elevada, as rochas máficas apresentam a granulite caracterizada por quartzo + granada, que indica a presença de altas temperaturas e pressão (Green & Ringwood, 1967). Rochas máficas com homblenda são sempre em formação metamórfica, desde a formação até a ascensão até o topo da crosta terrestre. Entretanto a granulite é caracterizada por minerais oligoclina, quartzo, cordierita e plagioclase em rochas máficas com homblenda (Folmer, 2003), pois a quartzo ocorre em alta proporção modal e deve ser considerado um indicador de desidratação ou de fundo de bacia de fundição. Em alguns casos, uma associação de oligoclina + granada + quartzo é formada pela desidratação da cordierita + quartzo + granada. A ocorrência de homblenda em granulitas é comum e o reconhecimento da presença de minerais cordierita ou não quartzo, e do grande importância para a determinação dos condições de metamorfismo e entendimento do regime de temperatura e pressão durante a formação de granulitas. Portanto, a identificação de tipos de quartzo em rochas máficas com homblenda é importante para a determinação das condições de metamorfismo e para estabelecer critérios no campo de temperatura e pressão. Neste caso será usado como exemplo a granulite Coltrane,

## 1.2. Objetivos

O projeto tem por objetivo a investigação de tipos de quartzo no contexto de furos em rochas máficas com homblenda. A identificação de protomorfismos de quartzo com a grande importância para esta investigação e para estabelecer critérios no campo de temperatura e pressão. Neste caso será usado como exemplo a granulite Coltrane,

# **1. Apresentação e objetivos**

## **1.1 . Introdução**

O projeto tem por objetivo a investigação do papel do quartzo no processo de fusão em rochas máficas com hornblenda. A identificação de microestruturas do quartzo será de grande importância para essa investigação e para estabelecer critérios no cálculo de temperatura e pressão. A relevância do projeto é descobrir se há presença de quartzo em estado sólido durante o pico metamórfico de rochas máficas com hornblenda. Neste caso será usado como exemplo e alvo de estudo o anfibolito Cafelândia, Complexo Barro Alto, GO, que é um anfibolito bandado que atingiu as condições de fácies granulito.

Os granulitos são rochas residuais, geradas através da fusão de protolito com subsequente separação e extração do material fundido (Fyfe, 1973). As paragêneses dos granulitos são constituídas principalmente por minerais anidros, sendo o ortopiroxênio diagnóstico. No entanto, em condições de pressão elevada, as rochas máficas apresentam a paragênese clinopiroxênio + quartzo + granada, que marca a transição entre os fácies granulito e eclogito (Green & Ringwood, 1967). Rochas máficas com hornblenda são comuns em terrenos metamórficos, desde a fácies xisto verde alto até fácies anfibolito alto e granulito. Entretanto é questionada a coexistência das fases clinopiroxênio, quartzo, granada e plagioclásio em rochas máficas com hornblenda (Pattison, 2003), pois o quartzo ocorre em baixa proporção modal e deve ser consumido em reações de desidratação ou de fusão antes da hornblenda. Em alguns casos, essa coexistência de clinopiroxênio + granada + quartzo é justificada pela cristalização tardia do quartzo a partir do fundido. A ocorrência da hornblenda em granulitos é comum e o entendimento da presença do mineral, coexistindo ou não com quartzo, é de grande importância para a determinação das condições do metamorfismo e compreensão da fusão nessas rochas, principalmente porque o barômetro clinopiroxênio-granada-plagioclásio-quartzo depende da presença deste último na rocha para ser aplicado.

## **1.2 . Objetivos**

O projeto tem por objetivo a investigação do papel do quartzo no processo de fusão em rochas máficas com hornblenda. A identificação de microestruturas do quartzo será de grande importância para a investigação e para estabelecer critérios no cálculo de temperatura e pressão. Neste caso será usado como exemplo o anfibolito Cafelândia,

pertencente ao Complexo Barro Alto, GO; que atingiu condições de fácies granulito (Moraes, 1997).

Os objetivos são: 1) determinar as paragêneses do pico do metamorfismo do anfibolito Cafelândia; 2) determinar o papel do quartzo na fusão de rochas, 3) determinar as condições do pico do metamorfismo através do método mais apropriado.

### **1.3. Materiais e métodos**

Para a investigação do papel do quartzo no processo de fusão em rochas máficas com hornblenda é necessário a identificação de estruturas e texturas que indiquem fusão, a caracterização da composição modal e determinação das reações que a rocha cruzou ter durante a fusão.

Para isso as seguintes etapas foram seguidas no desenvolvimento do trabalho:

- Revisão bibliográfica – revisão bibliográfica sobre a geologia regional, conceitos básicos de termobarometria, geotermobarômetros aplicáveis às rochas em questão e microestruturas em migmatitos.
- Trabalho de campo – o trabalho de campo foi realizado em etapa de três dias. Foram feitos mapas de afloramentos para detalhamento das relações de contato e mineralogia das diversas bandas do anfibolito e do leucossoma.
- Petrografia – a maior parte do trabalho é baseado na petrografia, feita com microscópio petrográfico e eletrônico de varredura, a fim de serem reconhecidas as paragêneses e microestruturas pertinentes à cristalização de minerais direto de líquido silicático.
- Química mineral e termobarometria – após a petrografia foram selecionadas lâminas para coleta de dados de química dos principais minerais. As composições dos minerais foram obtidas usando microssonda eletrônica JEOL, modelo JXA 8600 no Laboratório de Microssonda Eletrônica da Universidade de São Paulo. Após o tratamento dos dados foram calculados  $P$  e  $T$  do metamorfismo usando termobarometria convencional e o THERMOCALC (Powell & Holland, 1988). Serão usados os seguintes termômetros Grt-Cpx (Ellis & Green, 1979; Powell, 1985; Krogh, 1988), granada-ortopiroxênio (Harley, 1984), granada-clinopiroxênio-plagioclásio-quartzo (Newton & Perkins, 1981; Eckert *et al.*, 1991, Powell & Holland, 1988; Pattison & Newton, 1989; Aranovich & Pattison, 1995; Berman *et al.*, 1995) e granada-ortopiroxênio-plagioclásio-quartzo (Newton & Perkins, 1982; Perkins & Chipera, 1985; Powell & Holland, 1988; Eckert *et al.*, 1991).

#### 1.4. Cronograma

Atividades	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
Revisão Bibliográfica	x	x	x	x						
Trabalho de Campo			x		x					
Petrografia	x	x	x	x	x					
Química Mineral				x	x	x	x	x		
Termobarometria						x	x	x	x	
Relatório										x

#### 1.5. Relevância do trabalho

O anfibolito Cafelândia é um anfibolito bandado com hornblenda, plagioclásio, clinopiroxênio, granada, quartzo, titanita, ilmenita e raro ortopiroxênio. Apresenta bandamento composicional e leucossoma em veios concordantes e discordantes ao bandamento. As condições do metamorfismo calculadas para esta rocha estão em torno de 770 °C e 8,5 kbar (Moraes, 1997). As condições do pico metamórfico foram questionadas pelo próprio autor, pois elas são incompatíveis com os dados experimentais disponíveis para fusão de quartzo anfibolito, com geração de líquido granítico e de granada e clinopiroxênio peritéticos, já que para isso são necessários 880 °C a 8,5 kbar (Patiño Douce & Beard, 1995).

Destaca-se então a importância da coexistência ou não da hornblenda com o quartzo, fato este que será determinante para estabelecer as condições do pico metamórfico e entender o processo de fusão. Assim, o reconhecimento e mapeamento das microestruturas de quartzo fornecem subsídios para a determinação do caráter dos grãos de quartzo em rochas máficas com hornblenda e da sua presença ou não no auge do metamorfismo.

A relevância do trabalho, então, é descobrir se há presença de quartzo em estado sólido durante o pico metamórfico de rochas máficas com hornblenda. Deste modo será possível estabelecer o pico metamórfico, aplicando o método mais conveniente.

## 2. Localização e acesso

A rocha estudada situa-se na porção central de Goiás, a norte da cidade de Goianésia, entre Juscelândia e Santa Rita do Novo Destino. Para o acesso à área mapeada, a partir do Distrito Federal, toma-se a rodovia BR 070 até Pirenópolis. Através da rodovia GO 338, não pavimentada, pode-se chegar à Goianésia. Outra alternativa, de Pirenópolis, pode-se chegar a Jaraguá pela rodovia Belém – Brasília (BR 153), seguindo-se a GO 080 até Goianésia (Fig. 1). Estradas vicinais partem de Goianésia e permitem acesso às localidades da área de trabalho.



Figura 1: Mapa de localização e acesso a Goianésia, cidade próxima à área estudada (extraído de [www.maps.google.com.br](http://www.maps.google.com.br))

## 3. Contexto Geológico

### 3.1. Geologia Regional

O protólito do anfibólito Cafelândia apresenta idade de cristalização de  $1.280 \pm 14$  Ma (U-Pb em zircão, Suita *et al.*, 1994) e de metamorfismo de 766 Ma (Sm-Nd, Grt – Cpx – rocha total, Moraes *et al.*, 2006), ocorre na Seqüência Serra da Malacacheta e pertence ao Complexo Barro Alto (Moraes, 1997). O complexo faz parte de cinturão granulítico de idade neoproterozóica (Ferreira Filho *et al.*, 1994; Suita, 1996) que delimita a porção leste do Maciço de Goiás (Fig. 2, Fuck *et al.*, 1994). O Cinturão Granulítico é composto pelos complexos Barro Alto (Fuck, *et al.*, 1981; Girardi *et al.*, 1981) Niquelândia (Girardi *et al.*, 1986) e Cana Brava

(Correia, 1994; Girardi *et al.*, 1978) e cada um deles é formado por duas intrusões acamadadas que sofreram deformação e metamorfismo de fácies granulito (Danni *et al.*, 1982).

O Complexo Barro Alto apresenta, além dos granulitos máficos, granulitos félsicos e rochas metassedimentares (Fuck, *et al.*, 1981; Danni *et al.*, 1984). O Complexo Barro Alto é composto por três unidades principais (Fuck, *et al.*, 1981): a Seqüência granulítica Serra de Santa Bárbara, a Seqüência gabro-anortosítica Serra da Malacacheta e a Seqüência vulcanossedimentar Juscelândia (Fig. 3). A seqüência Serra de Santa Bárbara é composta por granulito máfico, félsico e por sillimanita-granada quartzito. A seqüência Serra da Malacacheta apresenta anortosito, gabro-anortosito e granada anfíbolito bandado, o anfíbolito Cafelândia (Fuck, *et al.*, 1981; Moraes, 1997). O anfíbolito Cafelândia é rocha com bandas ricas em hornblenda e pouco plagioclásio, bandas com clinopiroxênio e granada e leitos intermediários com variações modais entre esses dois tipos (Moraes, 1997). Ocorre leucossoma de composição tonalítica com hornblenda, granada, clinopiroxênio ou ortopiroxênio. Esta rocha passou por processo de fusão por desidratação que é acompanhada pela formação de minerais anidros (granada e clinopiroxênio) e líquido quartzo-feldspático, em semelhança às rochas descritas por Hartel & Pattison (1996). As condições de metamorfismo foram calculadas em 770 °C e 8,5 kbar (Moraes, 1997).

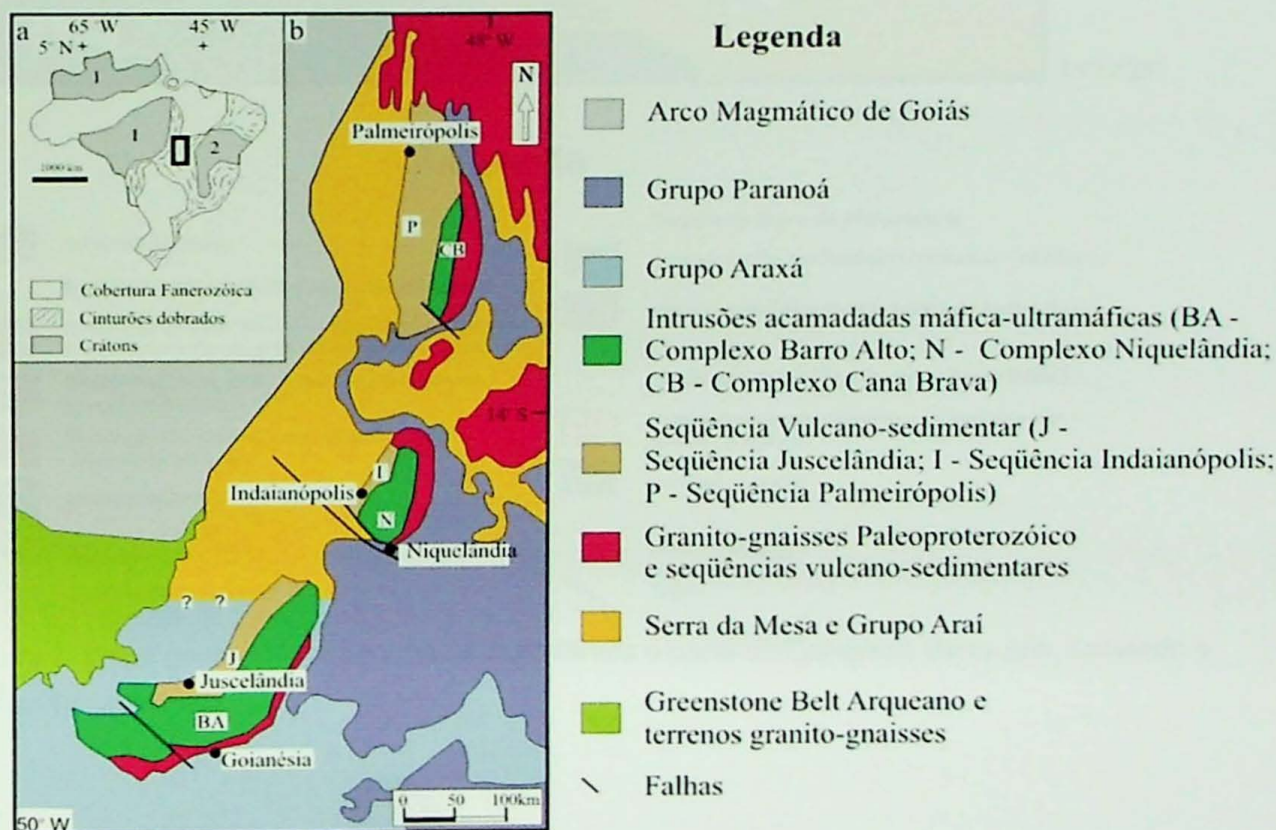
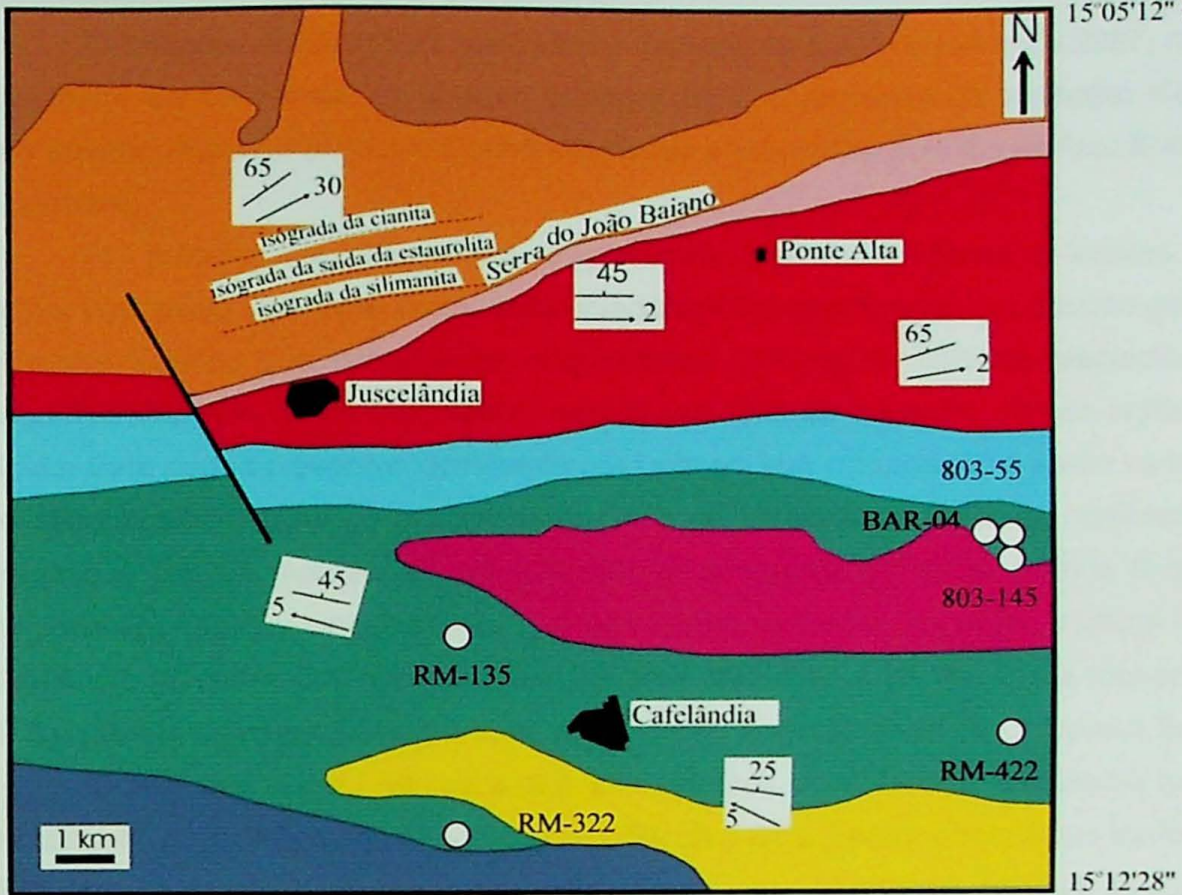


Figura 2: Mapa geológico do cinturão granulítico de idade neoproterozóica (Ferreira Filho *et al.*, 1994, Suita, 1996) composto pelos complexos Barro Alto, Niquelândia e Cana Brava. O cinturão delimita a porção leste do Maciço de Goiás.

49°17'59"

49°09'31"W  
15°05'12" S



### Legenda
















- |   |  |   |  |
|---|--|---|--|
|  | cobertura laterítica   |  | Seqüência Serra da Malacacheta                                       |
| <b>Seqüência vulcanossedimentar Juscelândia</b>                                     |  |  | granada anfibolito bandado (Anfibolito Cafelândia)                   |
|  | estauroлита-granada micaxisto com cianita/silimanita, com intercalações de granada anfibolito e metacherte |  | gnaisse granulítico com xenólitos de rochas básicas                  |
|  | biotita-muscovita gnaisse com intercalações de granada anfibolito  |  | Seqüência granulítica Serra de Santa Bárbara                         |
|  | biotita gnaisse granítico cortado por diques de granada anfibolito   |  | silimanita-granada quartzito e granada granulitos fêlsicos e máficos |
|  | granada anfibolito com metacherte  |  | metagabro-norito   |
|  | foliação   |  | contato geológico  |
|  | lineação de estiramento mineral  |  | falha  |

Figura 3: Mapa geológico da Seqüência Juscelândia e parte do Complexo Barro Alto, incluindo o anfibolito Cafelândia.



### **3. 2 . O anfibolito Cafelândia e rochas associadas na região de Goianésia**

O trabalho de campo foi realizado no período de 2 a 4 de junho de 2007, nos arredores da cidade de Goianésia. O objetivo principal foi a observação do anfibolito Cafelândia em afloramento. Além do anfibolito Cafelândia, foram observados granulito máfico, félsico, gnaisses e quartzito.

No primeiro dia observaram-se quartzitos, granulitos máficos e félsicos. O granulito máfico apresenta coloração preta, acinzentada, granulação fina, textura nemato-granoblástica e estrutura foliada. Sua composição mineralógica consiste de 35% de plagioclásio, 35% de ortopiroxênio, 20% de clinopiroxênio, marcando a foliação da rocha, 5% de anfibólio e 5% de biotita. Este pode apresentar localmente granada em sua composição e assim variando de 30% de clinopiroxênio, 20% de ortopiroxênio, 20% de plagioclásio, 15% de hornblenda, 10% de granada e 5% de quartzo. O granulito félsico apresenta cor cinza claro e é composto por plagioclásio, quartzo, ortopiroxênio, granada biotita. Entre os granulitos máficos e o anfibolito Cafelândia foi observado quartzito com sillimanita e cianita. Estas rochas fazem parte da Sequência Serra de Santa Bárbara, pertencente a porção basal do Complexo Barro Alto.

O segundo dia foi dedicado aos afloramentos do Anfibolito Cafelândia localizados no cruzamento do Córrego dos Mineiros com o Rio dos Bois. Foram observados também lentes de anfibolito associado a gnaiss, em outro afloramento, localizado no leito do Córrego Barra Bonita, na estrada para Juscelândia. O anfibolito Cafelândia foi descrito minuciosamente, destacando feições de textura e estrutura. No geral, a rocha apresenta coloração preta, acinzentada, granulação que varia de média a grossa, textura nematoblástica, estrutura foliada, com a presença de feições de fusão e deformação. A composição mineralógica predominante consiste de 40% de hornblenda, 35% de plagioclásio, 15% de piroxênio, 8% de granada e 2% de quartzo. O quartzo e o plagioclásio preenchem espaços entre os cristais de hornblenda e estes, por sua vez, definem a foliação, onde predominam cristais finos e, localmente, médios a grossos. Os cristais de granada e clinopiroxênio variam de finos a grossos e estão associados a presença de quartzo e plagioclásio. A foliação da rocha é marcada tanto pelos cristais de hornblenda quanto pelos veios concordantes de leucossoma.

Por se tratar de rocha heterogênea, em único afloramento foram observadas diversas feições texturais e estruturais. O leucossoma, feição que indica fusão, apresenta-se deformado e varia quanto forma, continuidade e quantidade. O leucossoma concordante com a foliação, apresenta diferentes espessuras e granulação. Os veios de leucossoma mais finos são envolvidos por cristais de granulação média de hornblenda e podem formar estruturas do tipo *pintch and swell* (Fig. 4). Os veios mais espessos e de granulação média a grossa apresentam cristais milimétricos de hornblenda e, no contato com a borda, cristais de granulação grossa.

Nas pontas podem ocorrer adelgaçamentos e até descontinuidades. Os veios discordantes apresentam-se em forma de vênulas com ramificações e adelgaçamentos e, muitas vezes, quando ramificados, tendem a seguir a foliação (Fig. 5). Nestes veios há cristais euédricos de hornblenda de granulação média a grossa a muito grossa e no contato com a borda observam-se cristais de hornblenda de granulação fina (Fig. 6 e 7). A composição mineralógica do leucossoma pode variar de 90% a 65% de plagioclásio + quartzo e de 10% a 35% de hornblenda. Ocorrem leitos ricos em granada e clinopiroxênio com 30% de plagioclásio, 35% de hornblenda, 20% de granada, 15 % de clinopiroxênio traço de quartzo. A variação composicional, com porções ricas em hornblenda, localmente boudinadas e outras ricas em granada e piroxênio com intercalações de veios de leucossoma paralelos ou difusos é a maneira mais comum de ocorrência do anfibolito Cafelândia (Fig. 8)

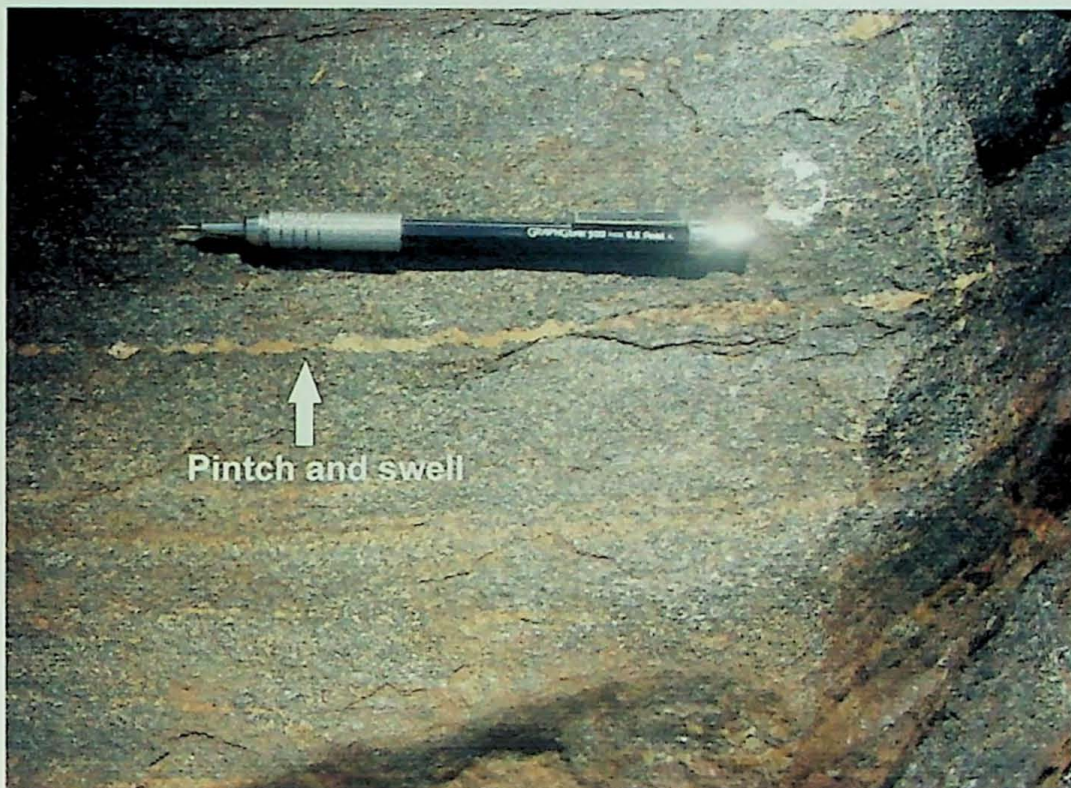


Figura 4: Leucossoma de granulação fina, seguindo paralelamente a orientação da rocha, não possui Hbl inclusa. Apresentam adelgaçamento e também formam estruturas pinch and swell. BAR-04.



Figura 5: O leucossoma apresenta-se em forma de bolsões e veios descontínuos, com lentes ramificadas paralelas à foliação. BAR-04.

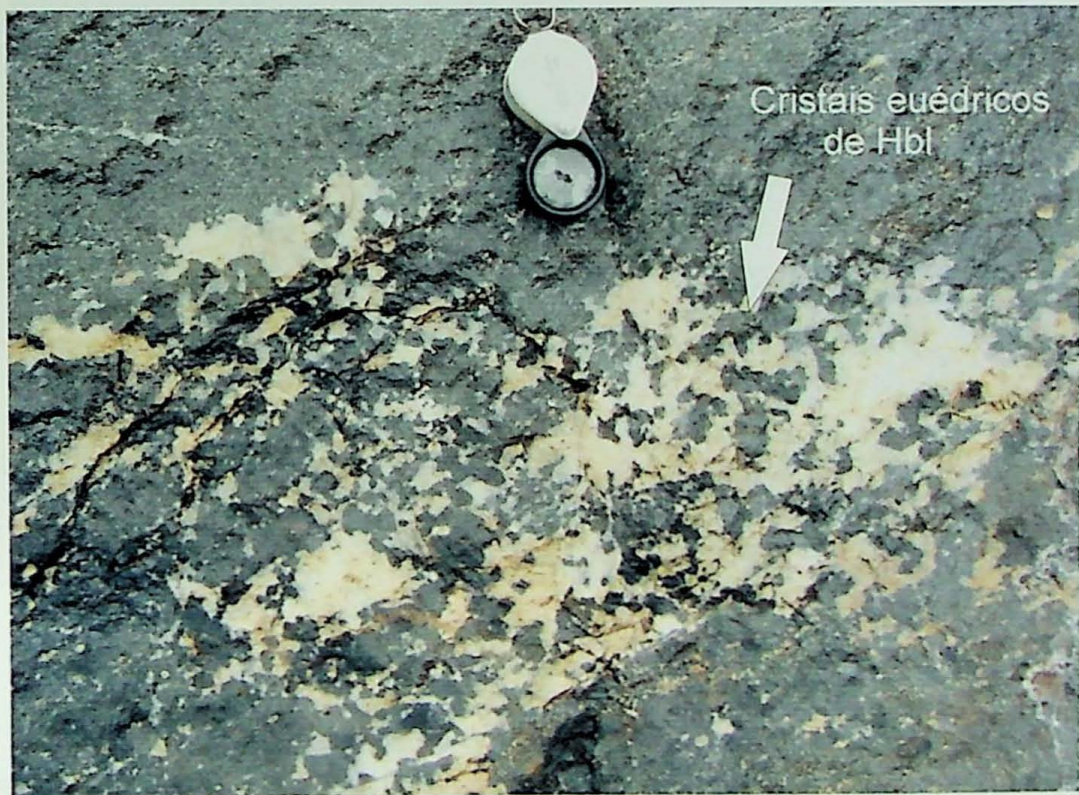


Figura 6: Detalhe da porção direita da figura 5. Nos bolsões nota-se concentração de cristais euédricos de hornblenda de granulação grossa. BAR-04.

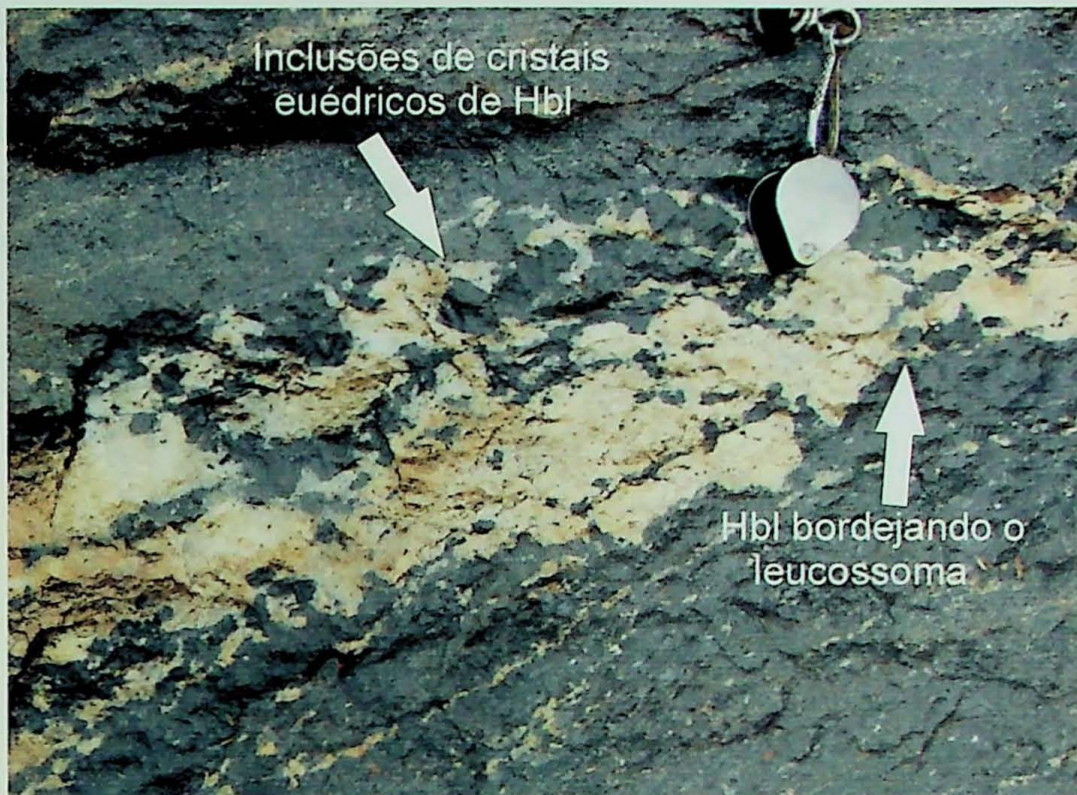


Figura 7: Cristais euédricos de hornblenda de granulação média a grossa, até muito grossa no leucossoma. BAR-04.



Figura 8: Banda do anfibolito Cafelândia. Detalhe para a variação composicional, com intercalações de lentes mais escuras, ricas em hornblenda e plagioclásio e lentes mais acinzentadas ricas em piroxênio, granada e quartzo (leucossomas). BAR-04.

Algumas feições indicam que durante a deformação a rocha encontrava-se parcialmente fundida, por exemplo a ocorrência de leucossoma em estruturas do tipo Riedel e nos *necks* de *boudins* (Fig. 9). Em alguns locais, observa-se que a rocha apresenta falhas sub-paralelas ao bandamento, granulação mais fina e coloração acinzentada. Esta porção da rocha é considerada como milonito do anfibolito.

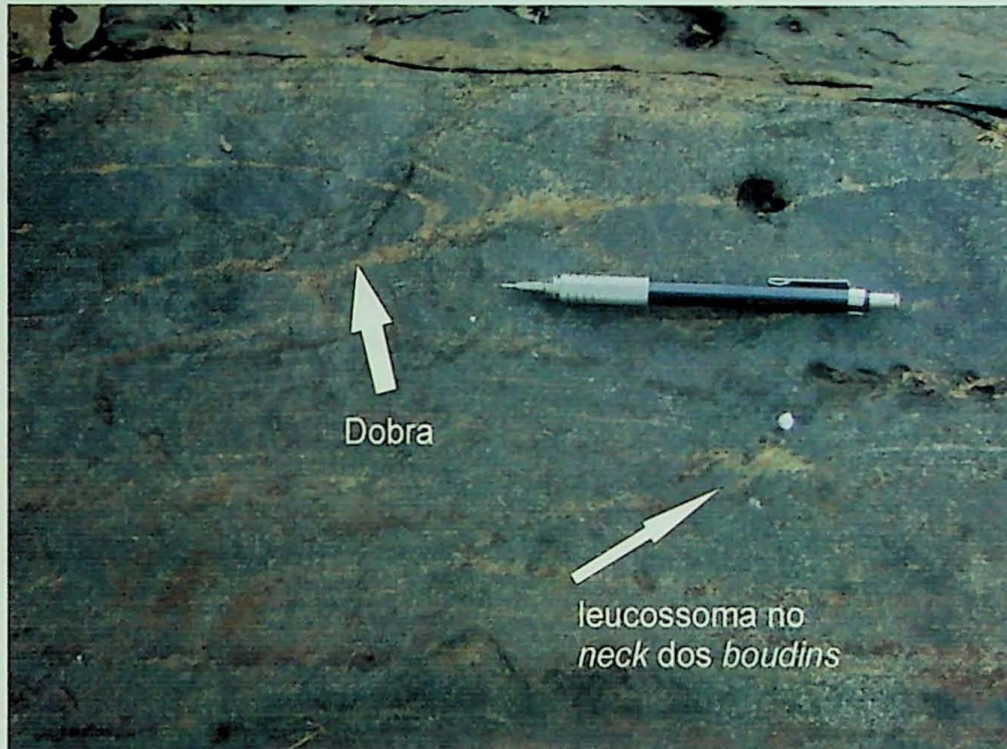


Figura 9: Leucossoma ocupando neck de boudin e zonas de cisalhamento sub-paralelas á foliação. BAR-04.

O gnaiss observado no afloramento sob a ponte do Córrego Barra Bonita apresenta coloração preto-acinzentada, granulação muito fina a fina, textura lepidogranoblástica, estrutura foliada, milonitizada e veios de quartzo milimétricos a centimétricos. Apresenta composição mineralógica de 40% de quartzo, 25% de muscovita, 15% de biotita, 10% de granada e 10% de plagioclásio. Detalhe para os cristais de quartzo, azulados, escuros, bipiramidais que podem indicar protólito de rocha vulcânica. Associado ao gnaiss ocorre lente métrica de anfibolito de coloração preta, levemente esverdeada, de granulação muito fina, textura nematoblástica, estrutura foliada e composição mineralógica de 65% de hornblenda e 35% de plagioclásio.

No terceiro dia foram observados outros afloramentos do Anfibolito Cafelândia e um afloramento de granulitos máfico e félsico associados. No afloramento localizado no afluente do Córrego da Anta, a feição a ser destacada é a relação de contato existente entre os veios de leucossoma concordantes e discordantes. A rocha apresenta veios de leucossoma milimétricos a centimétricos, concordantes ao bandamento e outros discordantes. Os veios discordantes

apresentam borda retilínea e brusca, tendendo ao adelgaçamento. Estes podem ser tardios, cortando muitos leucossomas concordantes, ou contemporâneos, como veio alimentador. Além disso, são observados bolsões de granulação grossa, semelhante às venulações vistas no dia anterior. Estes bolsões apresentam cor branca, granulação grossa, textura granonematoblástica, estrutura fortemente foliada, recristalizada e estirada, e estão encaixados sub-paralelos ao bandamento, pois os cristais inclusos nos bolsões estão estirados e seguem a foliação.

No outro afloramento, dois tipos de granulitos ocorrem, máfico e félsico. O granulito félsico predomina na maior parte do afloramento e está geralmente em contato sinuoso e irregular com o granulito máfico. O granulito félsico apresenta cor branca a cinza, granulação fina a média, textura granolepidoblástica, e forte foliação; a composição consiste de 25% de granada, 20% de quartzo, 20% de biotita, 25% de feldspato, 10% de ortopiroxênio. O granulito máfico, que ocorre como xenólitos no granulito félsico, apresenta coloração preta, granulação fina, textura nemato-granoblástica, estrutura foliada a maciça e lentes quartzo-feldspáticas. Apresenta composição mineralógica de 40% de piroxênios, 25% de granada, 25% de plagioclásio e 10% de hornblenda.

## **4. Petrografia**

### **4.1 . Anfibolito Cafelândia**

Foram descritas 17 lâminas petrográficas, destacando as bandas mais representativas e as feições mais importantes da rocha. Dentre estas feições estão as associações minerais que caracterizam as paragêneses e as microestruturas metamórficas e as que são pertinentes à cristalização de minerais direto de líquido silicático. Posteriormente, estas descrições serão abordadas na definição e na interpretação das condições metamórficas de temperatura e pressão às quais esta rocha foi submetida.

A rocha estudada é anfibolito bandado com granada e clinopiroxênio, apresentando bandamento composicional bastante variado. O bandamento é centimétrico e apresenta variação modal entre minerais máficos (hornblenda, granada, clinopiroxênio e raramente ortopiroxênio) e félsicos (plagioclásio e quartzo).

O bandamento composicional é marcado pelas variações nas proporções dos minerais máficos e félsicos. No geral a rocha pode ser chamada de anfibolito, pois o anfibólio é o mineral mais abundante em quase todas as bandas. O contato entre as bandas é geralmente brusco,

principalmente com os leitos félsicos. O contato torna-se gradacional entre bandas ricas em anfibólio e as ricas em clinopiroxênio e granada. Para melhor análise e descrição da rocha, definiram-se cinco bandas principais:

- a) rica em hornblenda, plagioclásio e titanita;
- b) rica em clinopiroxênio;
- c) rica em granada;
- d) rica em porfiroblastos de clinopiroxênio, granada e hornblenda;
- e) rica em plagioclásio e quartzo;

a) Banda rica em hornblenda, plagioclásio e titanita:

O leito máfico mais comum é rico em hornblenda, titanita e plagioclásio; apresenta textura nematoblástica intercalada com porções granoblásticas de quartzo e plagioclásio (Fig. 10). A composição modal é dada por 75% de hornblenda, 10% de plagioclásio (andesina  $Ab_{42} - An_{58}$ ), 10% de titanita e 5% de quartzo.

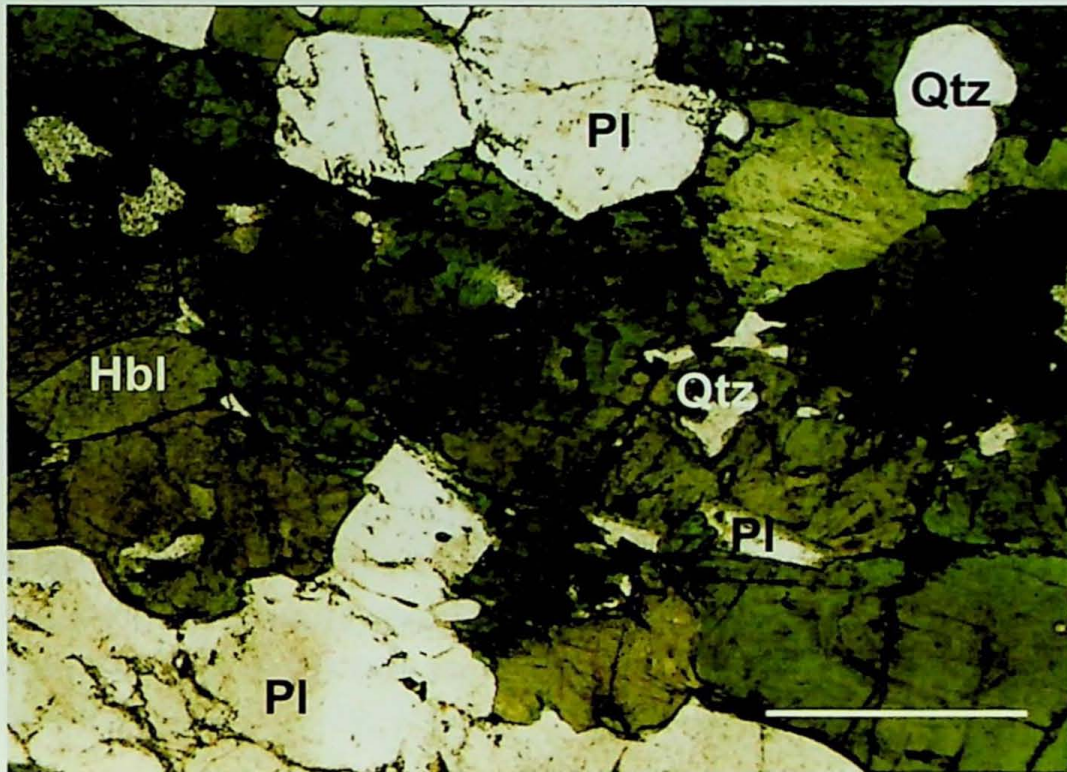


Figura 10: Banda rica em hornblenda intercalada entre bandas félsicas de quartzo e plagioclásio. Detalhe para o quartzo e plagioclásio intersticial. A barra mede 0,37 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-05.

Os cristais de hornblenda variam de granulação muito fina a média, com forma alongada, definindo a orientação principal da rocha. Apresentam-se desde xenoblásticos até idioblásticos, estes raros. Além de estarem orientados, apresentam forte pleocroísmo, clivagem, alteração, fraturamento e podem conter inclusões de quartzo, plagioclásio e titanita. O contato que prevalece entre os minerais é irregular e curvilíneo, mas podem-se observar alguns

contatos retilíneos. A titanita presente ocorre esparsa, mas também está presente nos contatos entre cristais de hornblenda. Em algumas porções da rocha ocorrem palhetas de biotita nas bordas dos cristais de hornblenda ou até inclusas preenchendo as clivagens. Nestas rochas, a composição mineralógica é de 65% de hornblenda, 15% de plagioclásio (andesina  $Ab_{43} - An_{57}$ ), 10% de quartzo, 4% de opacos, 3% de biotita e 3% de titanita. Uma feição muito importante presente em todas as bandas ricas em hornblenda é a associação do quartzo e plagioclásio no contato entre cristais de hornblenda. Nestes contatos observam-se porções alongadas e filetes de quartzo e plagioclásio intersticiais e ao longo dos contatos (figuras 11 e 12).

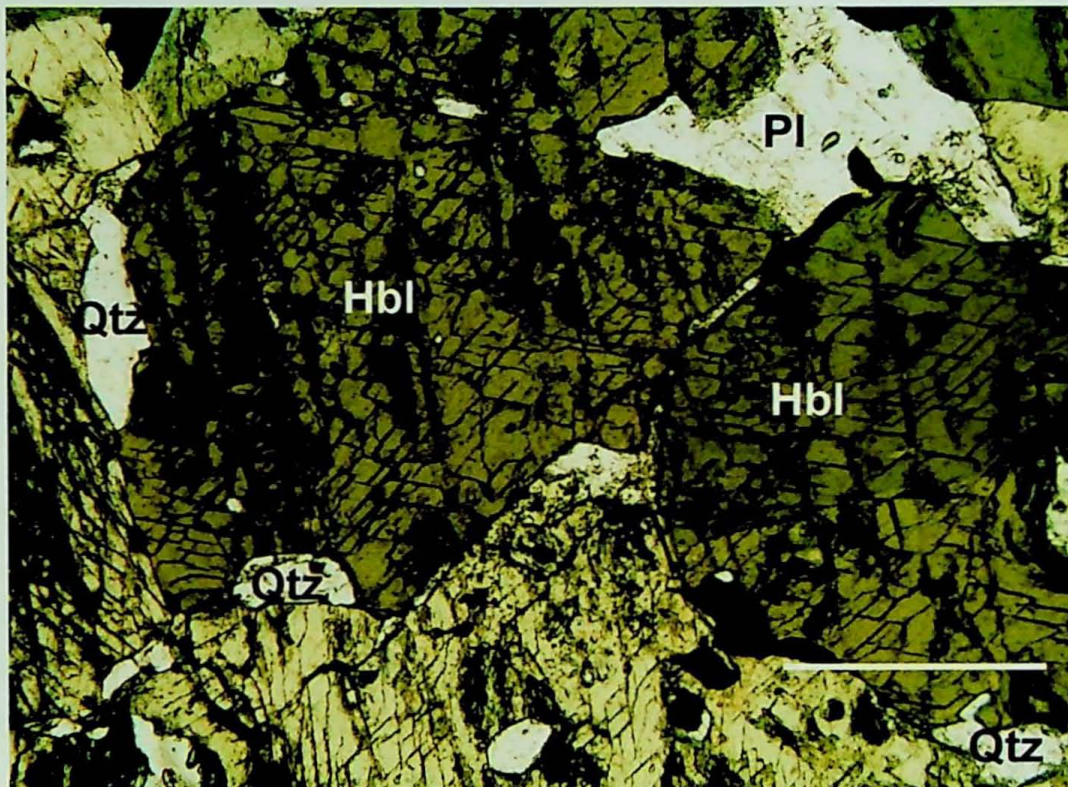


Figura 11: Banda rica em hornblenda destacando feições de quartzo e plagioclásio intersticial entre os grãos de hornblenda. A barra mede 0,6 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-129.



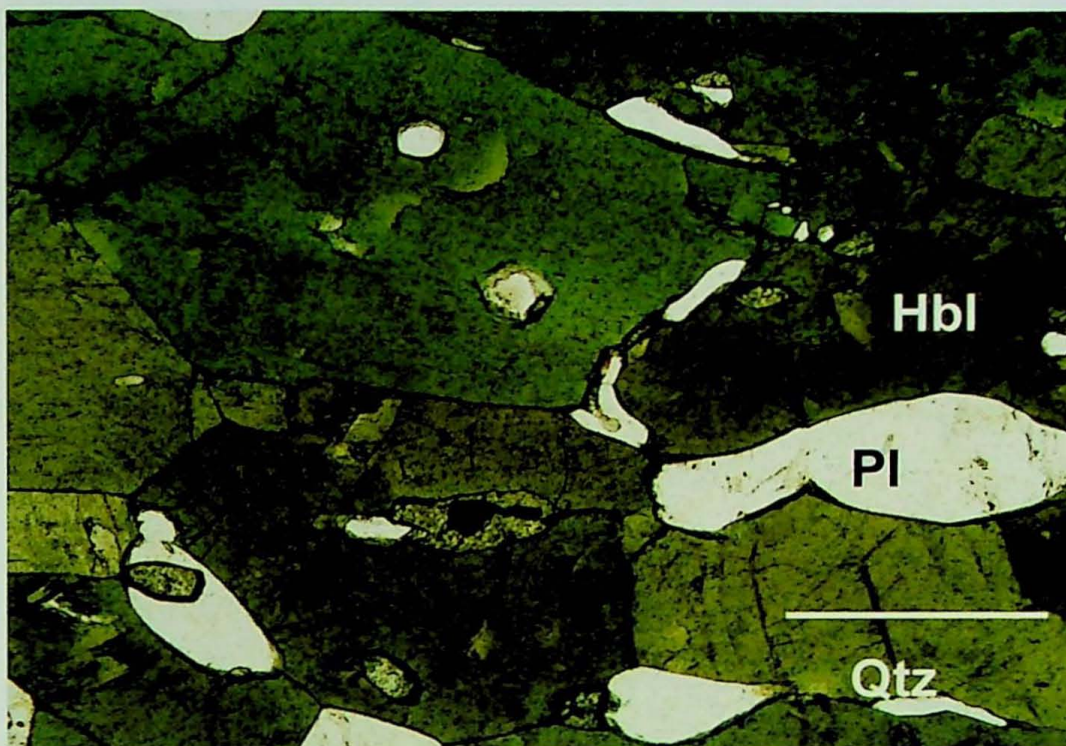


Figura 12: Banda rica em hornblenda com quartzo e plagioclásio intersticial. A barra mede 0,6 mm. Nicóis descruzados. Lâmina BAR-4B.

b) Banda rica em clinopiroxênio:

O segundo leito máfico diferencia-se do anterior pelo surgimento de clinopiroxênio, coexistente com os cristais de hornblenda, plagioclásio e titanita; quartzo também ocorre. Apresenta textura nematoblástica com intercalações de porções granoblásticas irregulares. O contato entre essa banda e a enriquecida em hornblenda, plagioclásio e titanita é gradacional e evidenciada por faixa transicional entre elas, que é caracterizada pela diminuição em hornblenda e aumento em clinopiroxênio (Fig. 13). A composição mineralógica consiste de 25% de clinopiroxênio, 40% de plagioclásio, 30 % de hornblenda e 5% de quartzo, titanita e minerais opacos. Os cristais de hornblenda estão alongados, subédricos a anédricos, com bordas lobadas a retas; faz contato, geralmente curvilíneo, com os cristais de clinopiroxênio, e ambos passam a definir a orientação principal da banda. Em porções em que o retrometamorfismo foi mais intenso são observados cristais de epidoto e actinolita retrometamórficos (Fig. 14).

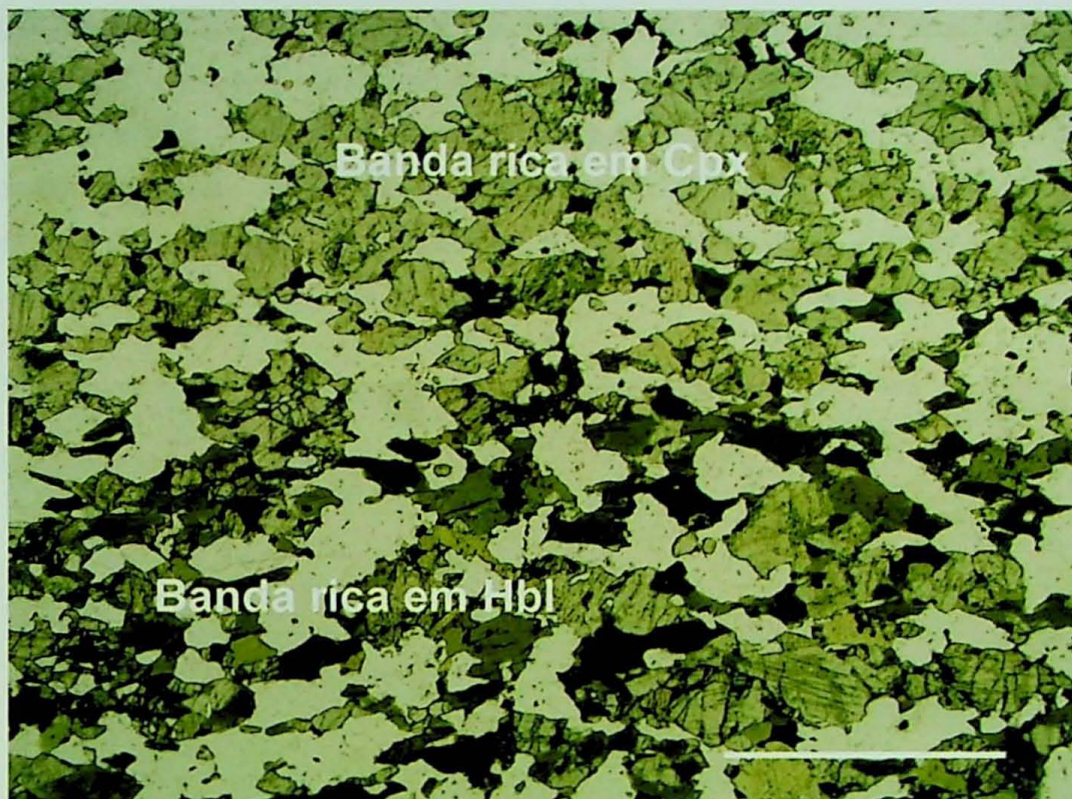


Figura 13: Visão geral destaca um bandamento rico em hornblenda e outro rico em piroxênio (clinopiroxênio>>ortopiroxênio) e hornblenda. Ambos minerais coexistem com quartzo e plagioclásio. A barra mede 0,12 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-44.

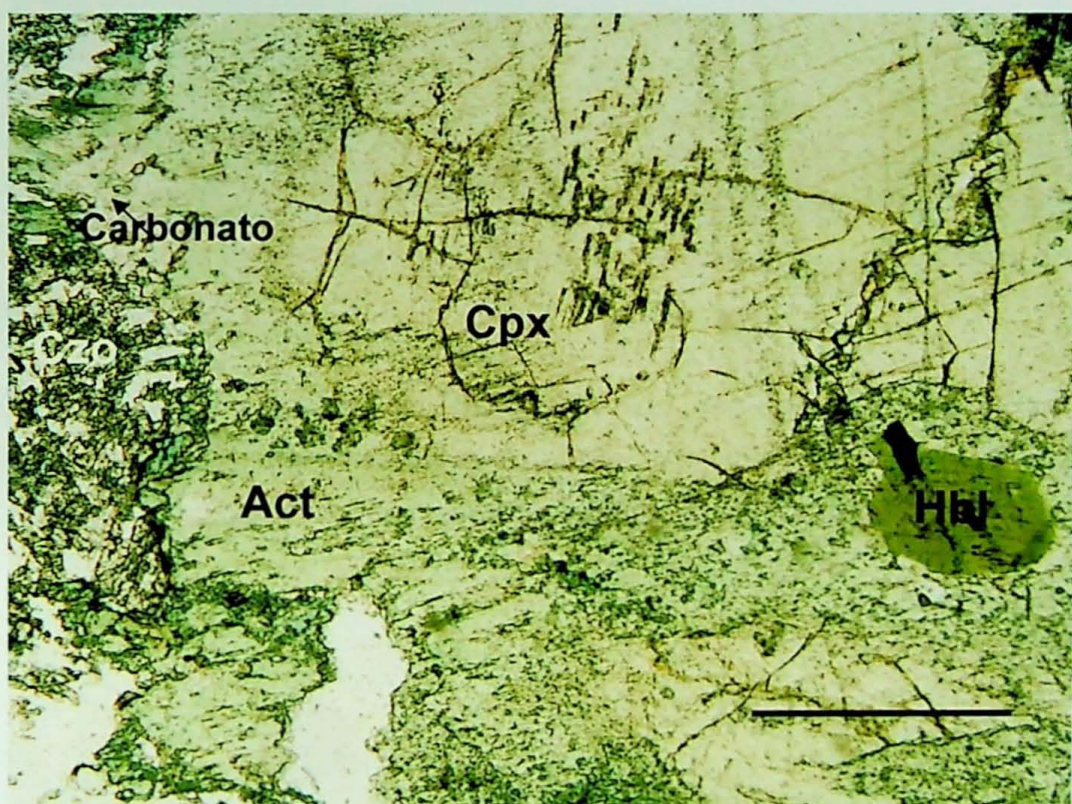


Figura 14: Banda rica em hornblenda, com piroxênio (clinopiroxênio>>ortopiroxênio), clinozoisita, quartzo e plagioclásio. Nota-se feição de retrometamorfismo em clinopiroxênio envolto por tremolita, e clinozoisita e carbonato associados. A barra mede 0,6 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-46B.

Ultrapassando a faixa transicional, a banda enriquece-se em clinopiroxênio e plagioclásio, com variações na proporção de hornblenda. A composição mineralógica é composta por 35% de hornblenda, 35% de clinopiroxênio, 20% de plagioclásio, 5% de quartzo e 5% de titanita e opacos. Os cristais de clinopiroxênio são mais abundantes, com grãos de formas irregulares, anédricos a subédricos e muito fraturados. Contudo, ocorrem grãos euédricos em contato estável com a hornblenda, formando arranjo granoblástico (Fig. 15).

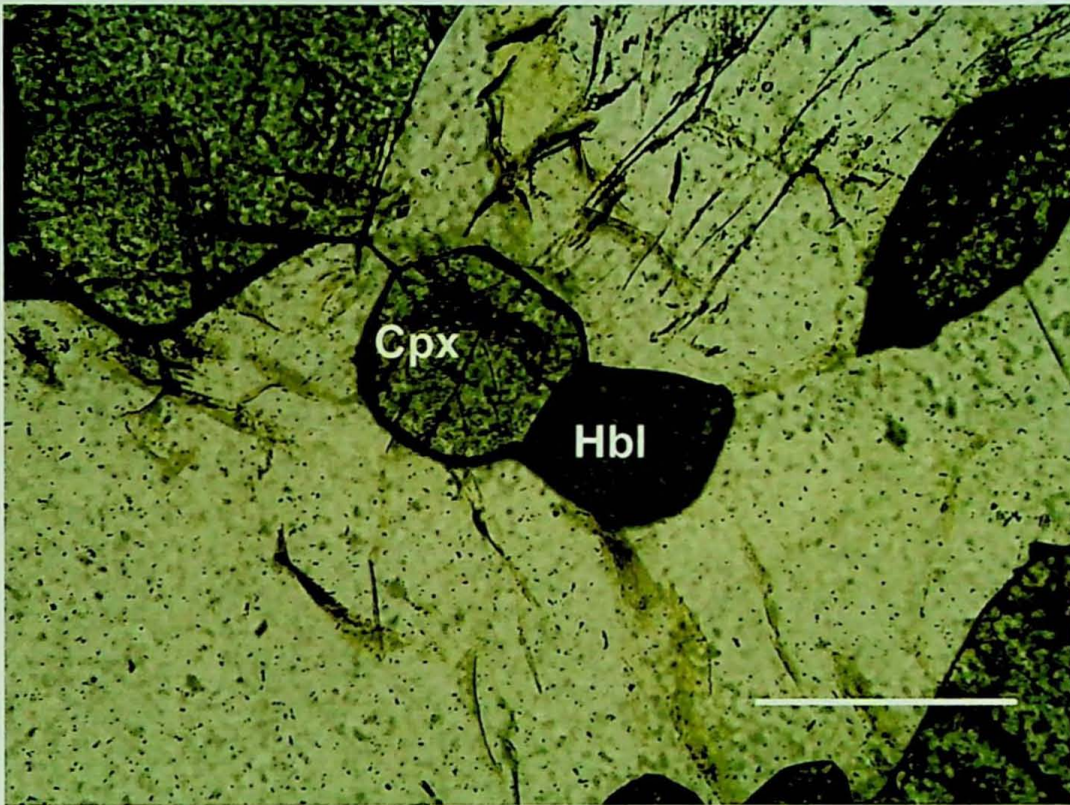


Figura 15: Contato estável do cristal de hornblenda com o clinopiroxênio. A barra mede 1,5 mm. Nicóis descruzados. Lâmina BA-4B.

Além disso, são observadas feições importantes para caracterizar algumas etapas do metamorfismo. A primeira mostra cristal de piroxênio com lamelas de exsolução e a segunda envolve a relação de contato entre a hornblenda que bordeja o clinopiroxênio (Fig. 16 e 17).

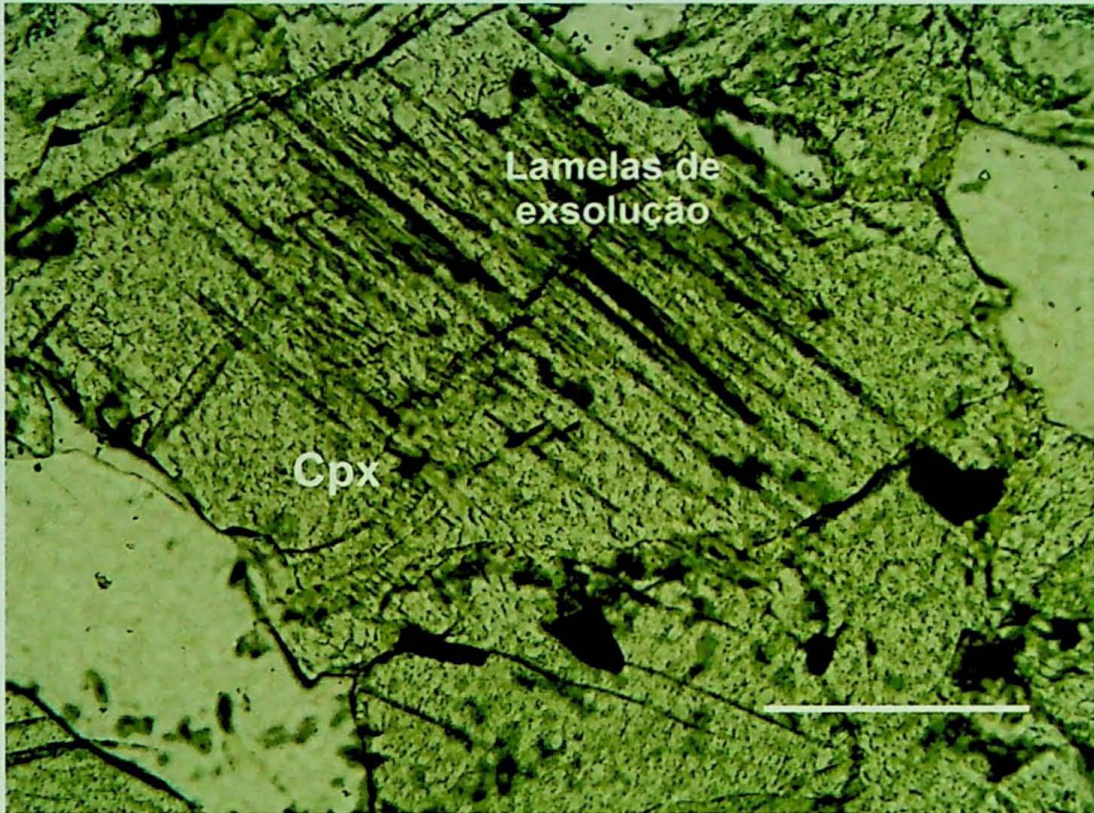


Figura 16: Cristal de clinopiroxênio com lamelas de exsolução. A barra mede 1,2 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-44.

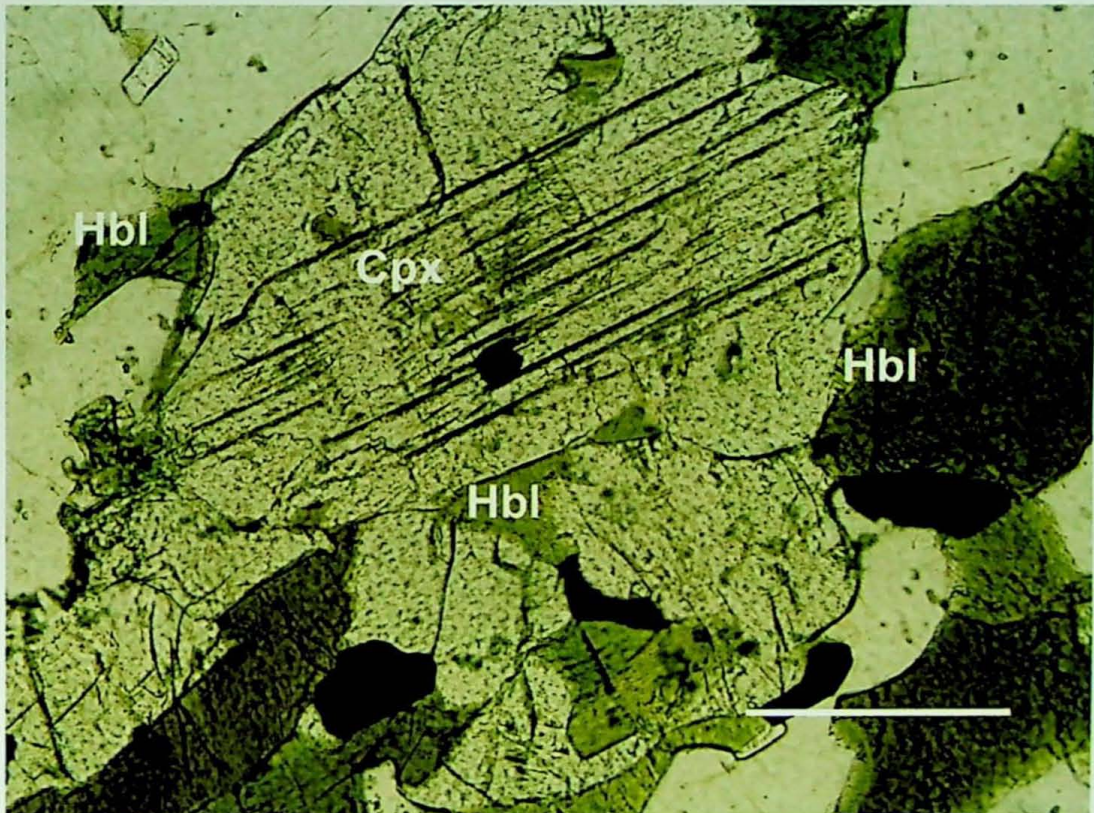


Figura 17: Hornblenda bordejando clinopiroxênio. A barra mede 0,94 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-44.

c) Banda rica em granada:

A terceira banda é rica em granada, apresenta contato gradual com as bandas ricas em clinopiroxênio e contato brusco com as bandas ricas em hornblenda, plagioclásio e titanita. Apresenta granulação que varia de fina a média, com porções granoblásticas intercaladas com leitos nematoblásticos. A composição mineralógica consiste de: 25% de hornblenda, 20% de piroxênio, 20% de plagioclásio, 15% de epidoto e clinozoisita, 8% de titanita, 7% de granada, 5% de quartzo.

Os cristais de hornblenda da banda diferenciam-se dos seus outros cristais, pois se encontram mais dispersos, dos quais somente alguns definem a orientação preferencial da foliação. Além disso, apresentam bordas corroídas e curvilíneas em contato com porções félsicas, e estas podem estar inclusas em forma de cristais arredondados. Os cristais de piroxênio em sua maioria são subédricos até anédricos e possuem bordas corroídas em contato com minerais félsicos. Fazem contato também com a hornblenda, pelo qual muitas vezes é possível notar a hornblenda contornando as bordas dos cristais de clinopiroxênio (Fig. 18). Os cristais de plagioclásio e quartzo encontram-se em filetes alongados e intersticialmente entre os minerais. Também podem estar inclusos em granada, piroxênio e hornblenda. Os cristais de clinozoisita e epidoto são abundantes e sempre associados aos cristais de plagioclásio. Encontram-se concentrados e aglutinados apresentando individualmente formato prismático. Os cristais de titanita são abundantes por todas as bandas. Encontram-se inclusos ou nos contatos de todos os minerais. Apresentam diversos tamanhos de grãos. Os cristais de granada apresentam-se muito fraturados e corroídos, com preenchimento de minerais félsicos, quartzo e plagioclásio. Ocorre freqüentemente intercrescimento de granada com clinopiroxênio, não ocorrendo esta relação entre granada e ortopiroxênio (Fig. 19). Quando a granada ocorre intercrescida com o clinopiroxênio, pode haver inclusões de hornblenda (Fig. 20). Comumente a granada apresenta-se euédrica, porém varia conforme a granulometria. Em raras bandas, o ortopiroxênio está presente, mas em geral não ocorre em contato com a granada (Fig. 19).

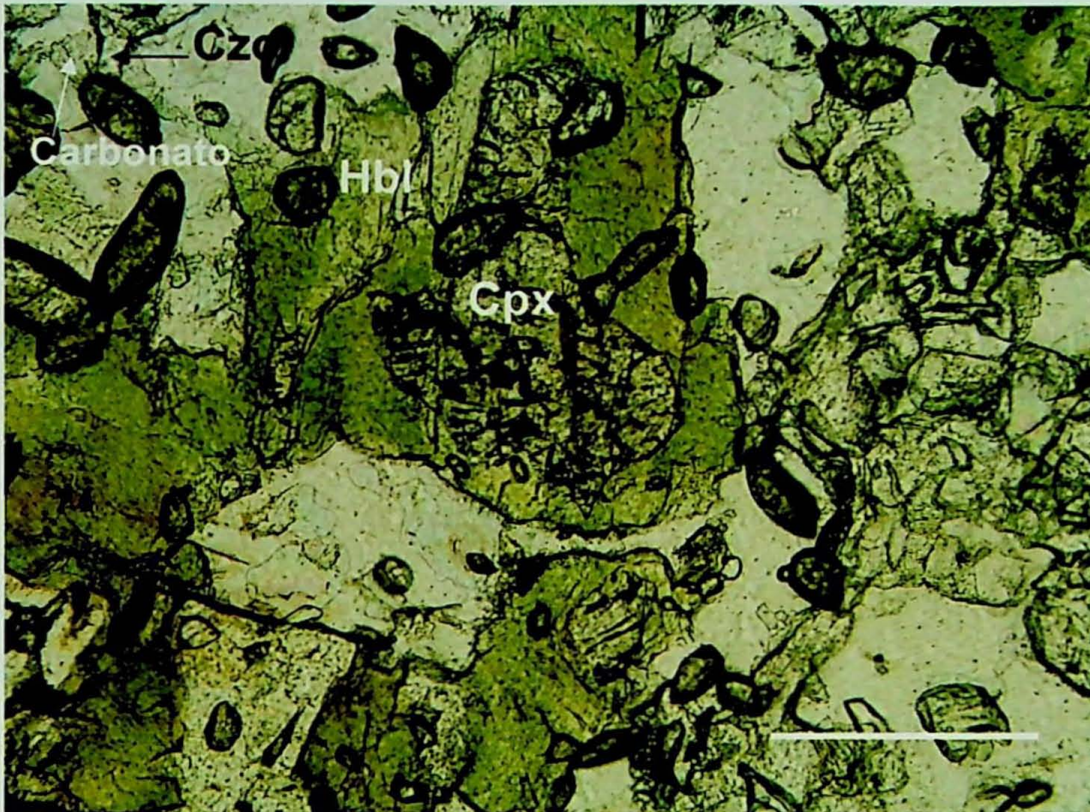


Figura 18: Retrometamorfismo evidenciado por cristal de clinopiroxênio envolto por hornblenda. Associados estão clinozoisita e carbonato. A barra mede 0,94 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-42.

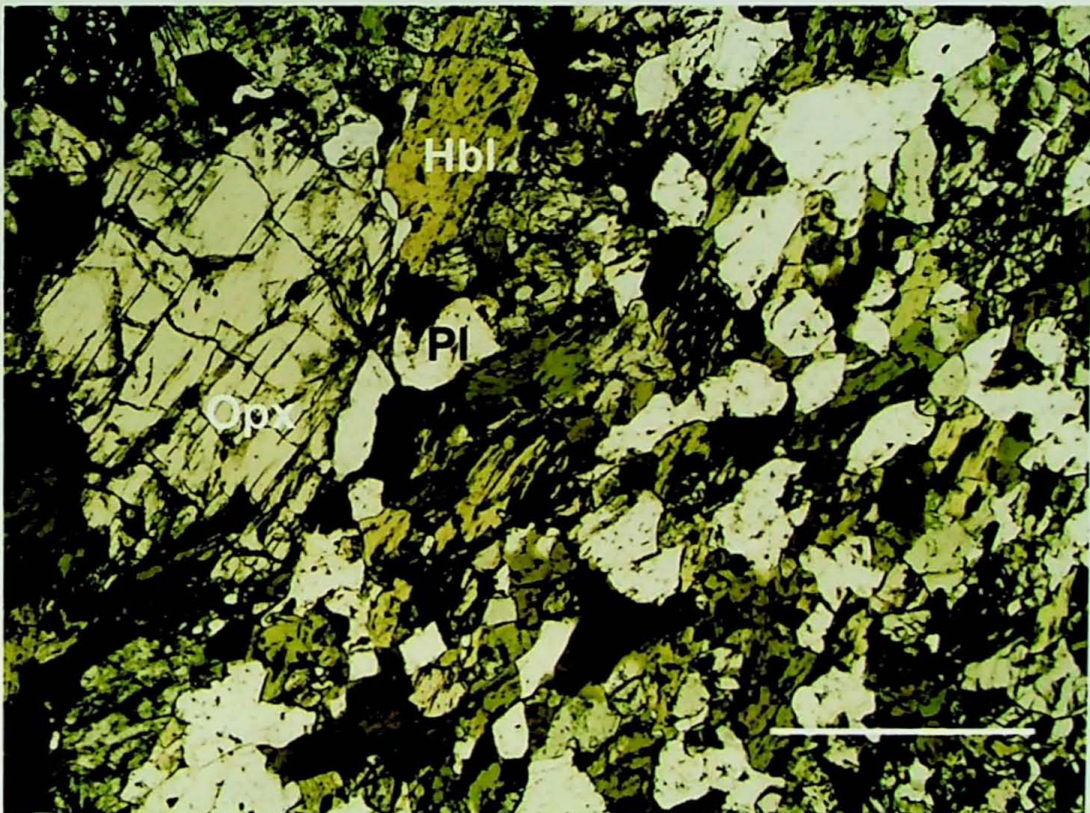


Figura 19: Ortopiroxênio com inclusão de clinopiroxênio. Esta banda é rica em granada, piroxênio, hornblenda, plagioclásio,  $\pm$  quartzo e titanita. A barra mede 0,19 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-322.

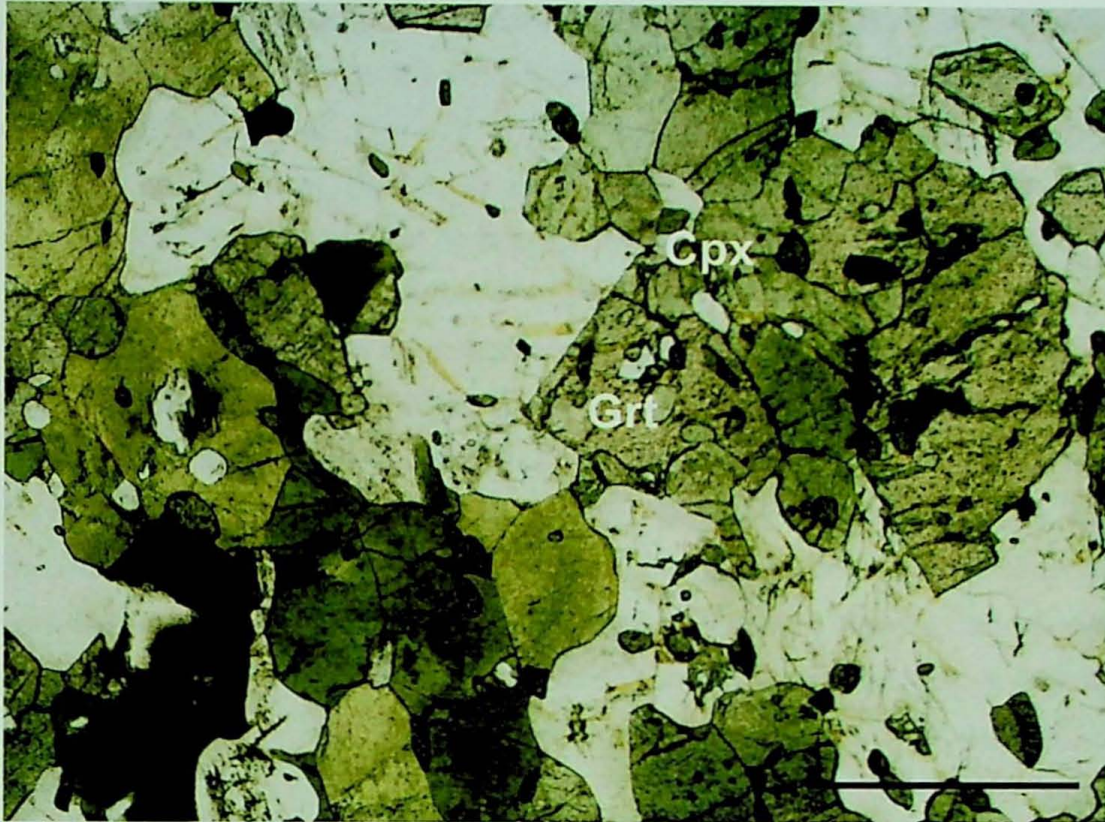


Figura 20: Banda rica em granada, clinopiroxênio, hornblenda, plagioclásio,  $\pm$  quartzo e titanita. Nota-se granada intercrescida com clinopiroxênio. A barra mede 0,3 mm. Nicóis descruzados. Lâmina BA-4B.

A composição mineralógica varia quando o contato entre as bandas enriquecidas de clinopiroxênio e granada é gradacional. A composição modal varia desde leitos constituídos de 50% de hornblenda, 15% de piroxênio, predominando o clinopiroxênio, 15% de plagioclásio, 10% de granada, 7% de quartzo e 3% de titanita, até leitos com 40% de piroxênio, menos freqüente o ortopiroxênio, 20% de hornblenda, 15% de granada, 10% de plagioclásio, 5% de quartzo e 5% de titanita. Estes leitos são caracterizados pelo bandamento que varia de porções das quais predominam hornblenda, com enriquecimento em cristais de piroxênio e ocorrência de granada, a porções com empobrecimento em hornblenda, abundância em clinopiroxênio e enriquecimento em granada.

Nos leitos onde predominam cristais de hornblenda, a textura é nematoblástica com intercalações descontínuas de porções granoblásticas félsicas, com granulometria que varia de fina a média. Os cristais de hornblenda ainda constituem a orientação preferencial da banda, com alguns cristais de piroxênio associados. O piroxênio encontra-se com granulometria fina, com formato anedral a subedral, constituindo lentes contínuas, porém não extensas. A granada é geralmente euédrica, facetada em contato com cristais de plagioclásio, quartzo, clinopiroxênio e hornblenda. Os cristais intersticiais de plagioclásio e quartzo são mais evidentes e em maior proporção, aumentando com a diminuição da quantidade de hornblenda.

Nota-se nesta variação a diminuição na proporção de hornblenda e, em contrapartida, o aumento na quantidade de clinopiroxênio, ocorrendo com maior frequência, simultaneamente ao enriquecimento de granada (Fig. 21 e 22). Nestes leitos, a textura e a granulometria continuam sendo as mesmas, porém há uma maior presença das porções granoblásticas félsicas e dos cristais intersticiais em forma de filetes de plagioclásio e quartzo (Fig. 23). A orientação preferencial agora é definida pelos cristais de piroxênio, principalmente o clinopiroxênio, com alguns cristais de hornblenda associados. Os grãos de clinopiroxênio são subédricos. Os contatos entre os grãos de clinopiroxênio e granada geralmente são retilíneos e contínuos. Ocorre também contato lobado entre os cristais de clinopiroxênio com os de plagioclásio, quartzo e hornblenda. Os grãos de hornblenda, menos abundantes, são menores e subédricos, formando leitos contínuos alternados com leitos contínuos de clinopiroxênio. Os cristais de granada apresentam-se maiores, euédricos em contato com cristais de clinopiroxênio e hornblenda, todos estes manteados por cristais de quartzo e plagioclásio. A granada também apresenta cristais subédricos, corroídos e com inclusões de clinopiroxênio, quartzo, plagioclásio e opacos.

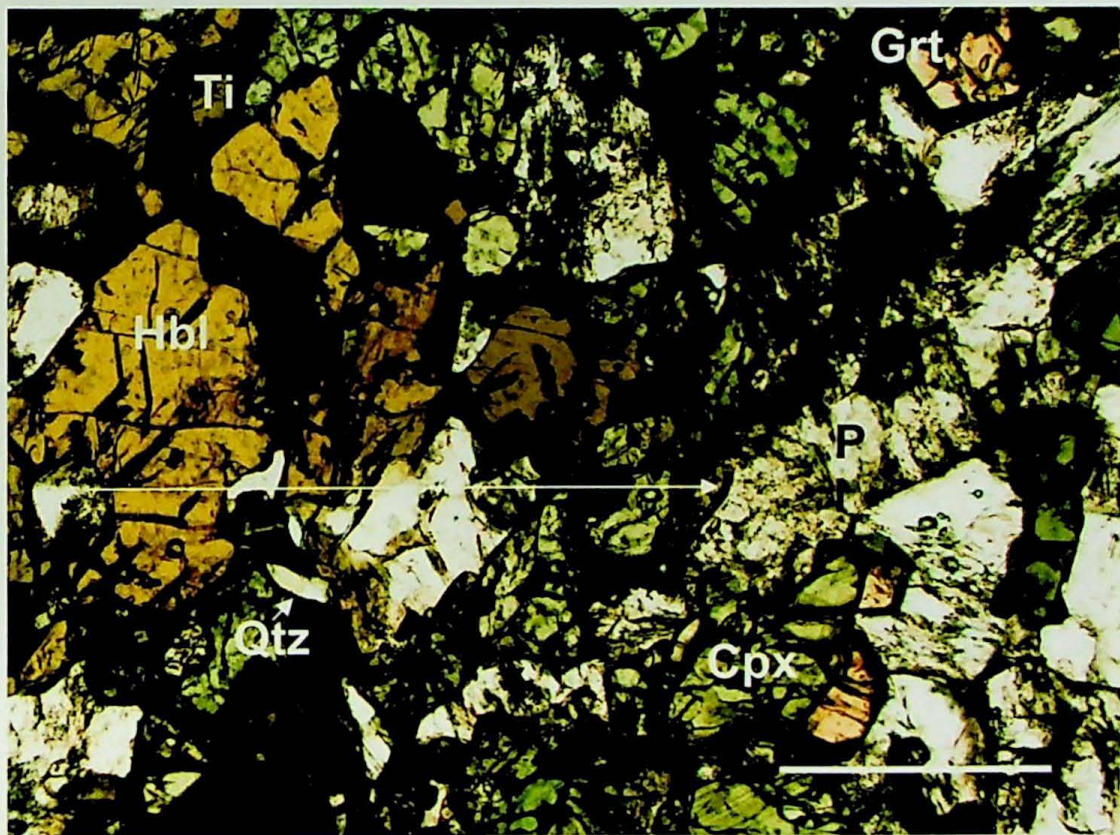


Figura 21: Bandamento rico em clinopiroxênio e granada. Nota-se empobrecimento na quantidade de hornblenda e titanita e aumento de quartzo e plagioclásio, indicados pela seta. A barra mede 0,3 mm. Nicóis descruzados. Lâmina 803-055.



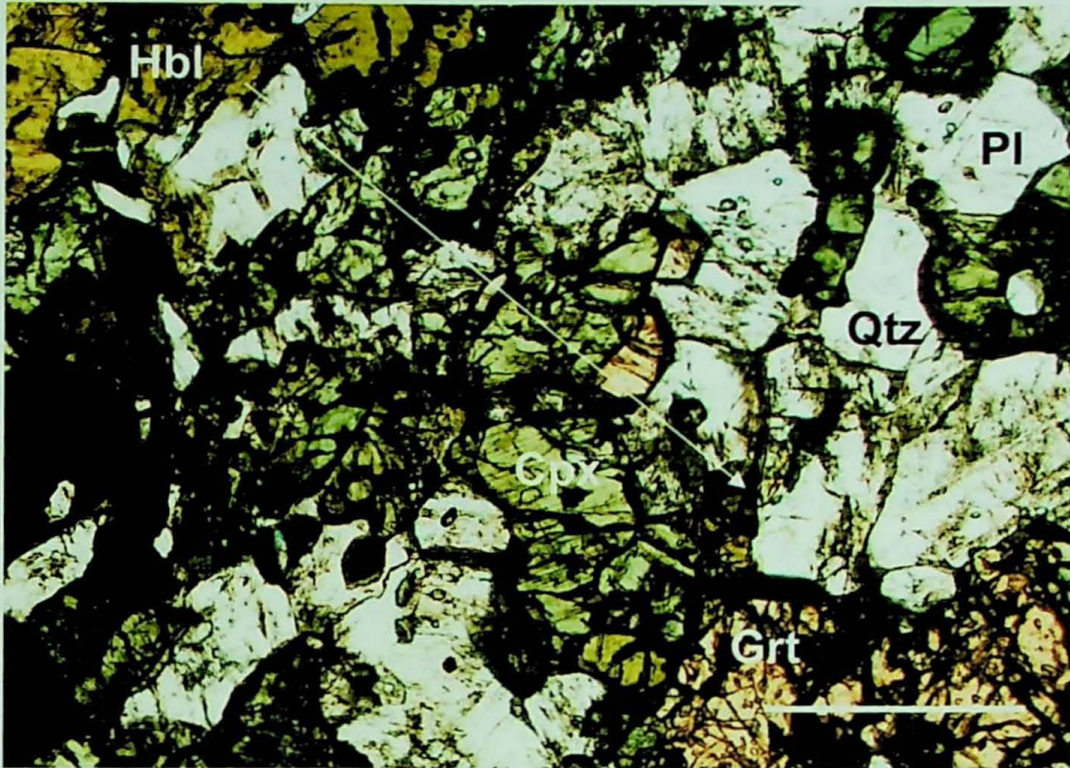


Figura 22: Do canto superior esquerdo até o seu lado oposto, observa-se diminuição na proporção de hornblenda, em contraste com o aumento na proporção de granada e clinopiroxênio, o que é indicado pela seta. A barra mede 0,3 mm. Nicóis descruzados. Lâmina 803-055.

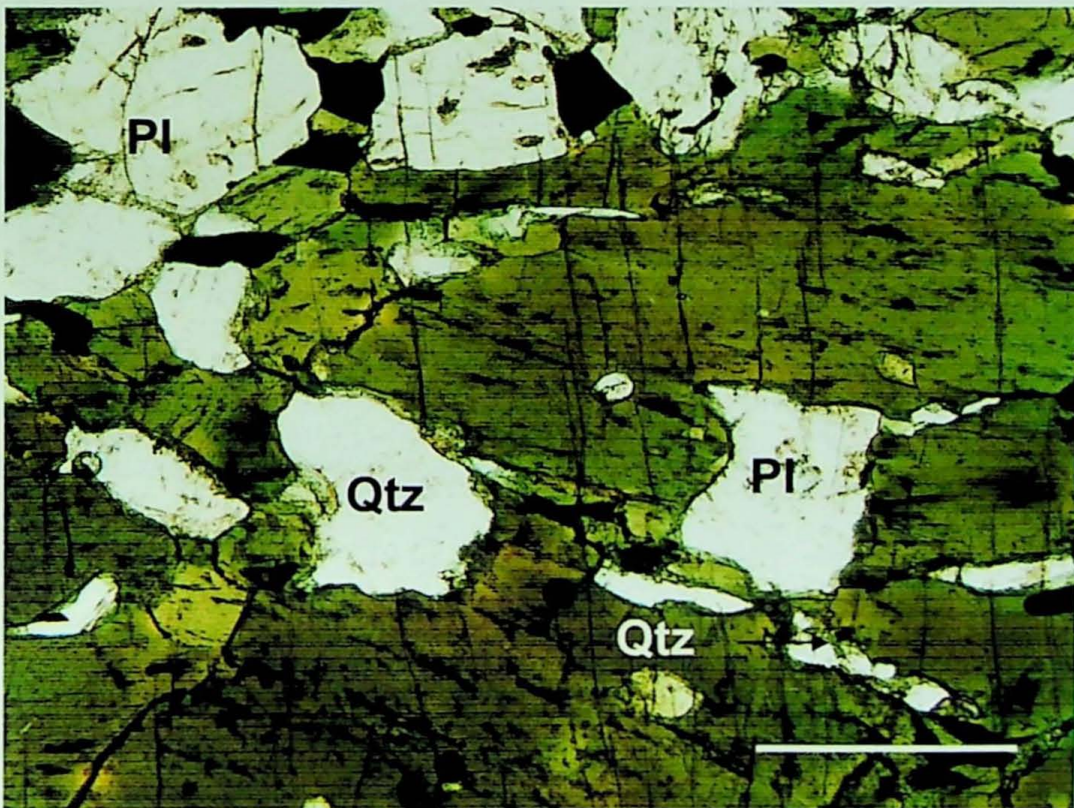


Figura 23: Quartzo e plagioclásio intersticial. A barra mede 0,48 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-422.

d) Banda rica em porfiroblastos de clinopiroxênio, granada e hornblenda:

Esta banda apresenta composição mineralógica semelhante a anterior, porém há mudança brusca na granulometria dos cristais de piroxênio, granada e hornblenda. Esta variação caracteriza a quarta banda onde predominam porfiroblastos de granada e piroxênio, e alguns porfiroblastos de hornblenda. A matriz é constituída por cristais de granulometria fina de plagioclásio, quartzo, piroxênio e hornblenda. A textura é porfiroblástica em meio a matriz que apresenta alternâncias de leitos granoblásticos e nematoblásticos. A hornblenda define a orientação principal da banda, porém esta ocorre intercrescida com cristais de piroxênio. A granada porfiroblástica apresenta inclusões de piroxênio (sub-arredondados), plagioclásio, hornblenda, quartzo e opacos e é manteeda por opacos, quartzo e plagioclásio. Esta possui contato com porfiroblastos de hornblenda, com inclusões de quartzo e plagioclásio. Os porfiroblastos de piroxênio, em sua maioria clinopiroxênio, são anédricos e apresentam inclusões de hornblenda, titanita, plagioclásio e quartzo. Suas bordas são irregulares, curvilíneas em contato ao redor por hornblenda, opacos, plagioclásio e quartzo. Na figura 24, observa-se um porfiroblasto de ortopiroxênio situado em uma banda rica em clinopiroxênio, hornblenda, plagioclásio e quartzo.

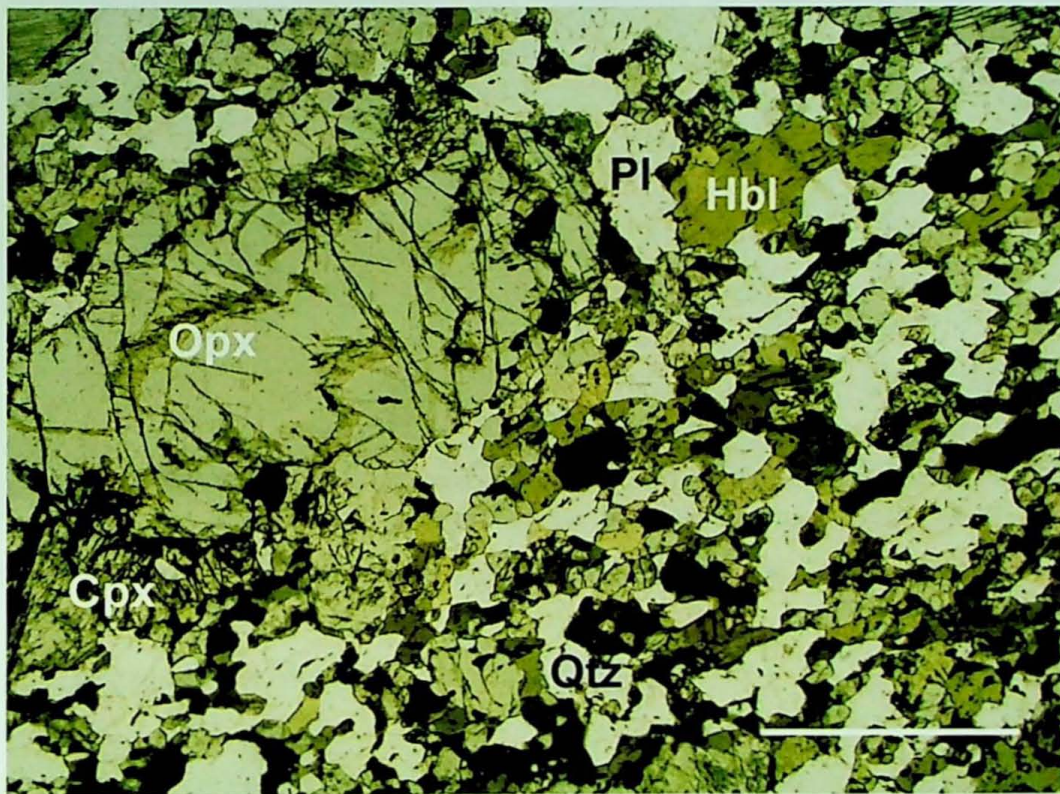


Figura 24: Porfiroblasto de ortopiroxênio inserido em uma banda rica em clinopiroxênio, hornblenda, quartzo e plagioclásio. A barra mede 0,12 mm. Nicóis descruzados. Lâmina RM-322.

e) Banda rica em quartzo e plagioclásio:

A quinta banda é composta por quartzo e plagioclásio. Caracteriza-se como o leucossoma da rocha e é constituído por 70% de quartzo e 30% de plagioclásio. O quartzo ocorre intersticial aos grãos de feldspato, em forma de filetes, em contato curvilíneo, ou em formato cúspide. Seus grãos variam finos a grossos. Observa-se nesta banda intercalação de lentes quartzosas e lentes feldspáticas ricas em plagioclásio. Comumente está em contato com a banda rica em hornblenda, plagioclásio e titanita (Fig. 25). Nas proximidades das bandas ricas em hornblenda, plagioclásio e titanita, o leucossoma apresenta pequenos cristais de anfibólio, opacos e biotita na matriz. Sua composição mineralógica modal equivale a 45% de quartzo, 40% de plagioclásio (andesina  $Ab_{39} - An_{61}$  e labradorita  $Ab_{58} - An_{42}$ ), 13% de anfibólio e 2% de opacos.

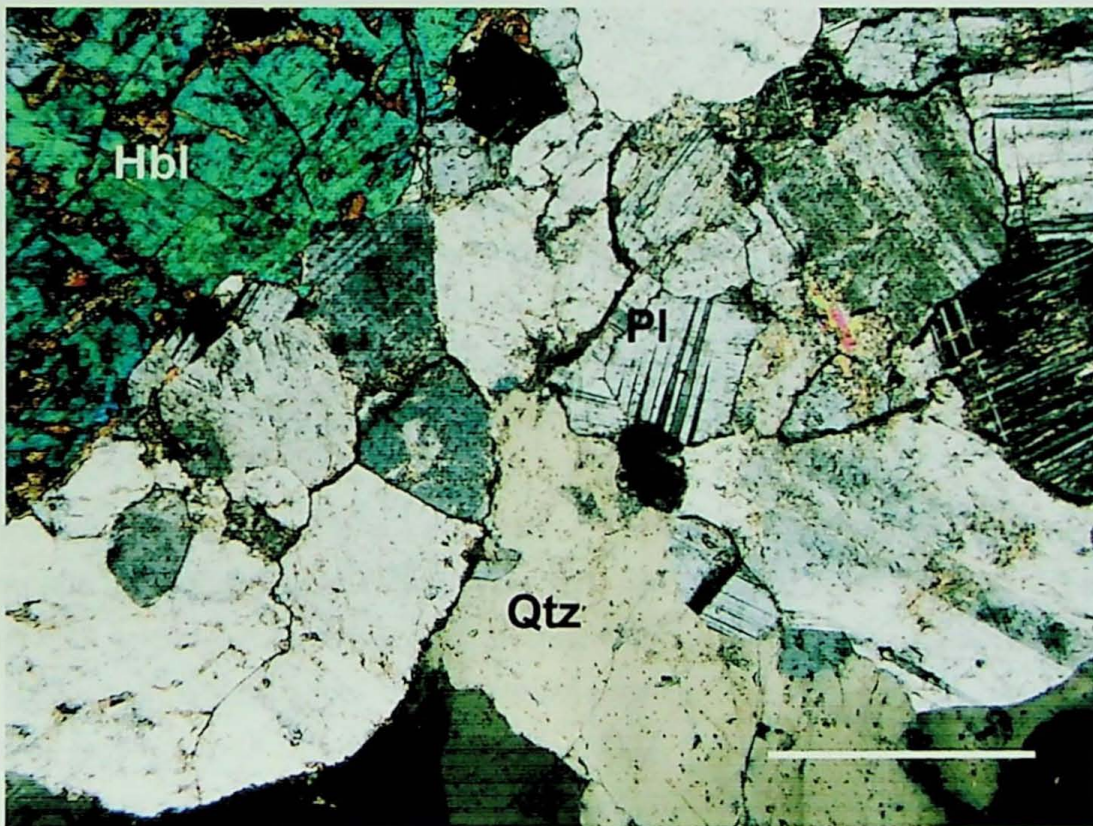


Figura 25: Banda félsica centimétrica, rica em quartzo e plagioclásio, intercalada com banda máfica, rica em hornblenda. A barra mede 0,3 mm. Nicóis cruzados. Lâmina RM-129.

#### 4.2 . Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a caracterização mais detalhada das microestruturas de quartzo presentes no anfibolito estudado foram feitas imagens com a utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura, no Laboratório MEV do IGc-USP. A técnica apresenta alta resolução espacial, permitindo a determinação da composição química, e além disso, propicia a correlação entre a composição química e a morfologia dos grãos. São realizadas duas análises durante a

observação da lâmina, uma qualitativa e outra quantitativa. Na análise qualitativa, o feixe eletrônico é operado rastreando uma dada área da amostra pelo método de varredura (scanning). Esta metodologia é de considerável importância nos estudos mineralógicos, pois obtém-se informações diversas, tais como: textura e topografia, distribuição dos elementos presentes, composição e homogeneidade química dos minerais. Na análise quantitativa, os resultados são obtidos quando da interação dos elétrons do feixe com o alvo sólido. A distribuição em profundidade da radiação gerada é função da maneira como os elétrons são espalhados e absorvidos no interior da amostra. A penetração dos elétrons e sua difusão lateral são responsáveis pela formação de uma área de radiação logo abaixo da superfície da amostra. A extensão dessa área é função da energia dos elétrons incidentes e sua forma, correlacionada diretamente com os núcleos atômicos. Esta análise permite obter imagens de varredura, oferecendo informações sobre a topografia e as características texturais (Gomes, 1984). As análises realizadas com o microscópio eletrônico de varredura permitiram obter imagens das quais foram destacados os contatos entre os grãos e composição. As densidades foram determinadas a partir da diferenciação de cor, onde a mais escura apresentava menor densidade e a mais clara, maior. Para a composição, aplicou-se a análise por dispersão de energia (EDA) ou também chamado de detector de estado sólido (EDS). Este detector resulta do fato de que a radiação está associada a todos os elementos, sendo assim captados simultaneamente, gerando uma resposta de composição em gráfico do mineral analisado (Gomes, 1984).

As imagens são referentes as lâminas 803-055, 803-145 e RM-135. São destacadas principalmente as feições texturais do quartzo em contato com os outros minerais. Ao analisarmos as imagens, podemos verificar que a textura do quartzo na rocha não apresenta contatos retilíneos e formando textura granoblástica com os outros cristais. O quartzo apresenta-se em forma de filetes e filmes (Fig. 26, 27, 31). Os filmes de quartzo encontram-se ao redor dos cristais de hornblenda, clinopiroxênio, granada e plagioclásio. Observa-se também que o quartzo, em forma de filme, preenche os interstícios e os espaços vazios entre os cristais, muitas vezes como se estivesse mimetizando o líquido (Fig. 28, 29, 30 e 32). Entretanto, na figura 33 observa-se cristal de quartzo do leucossoma bem formado.

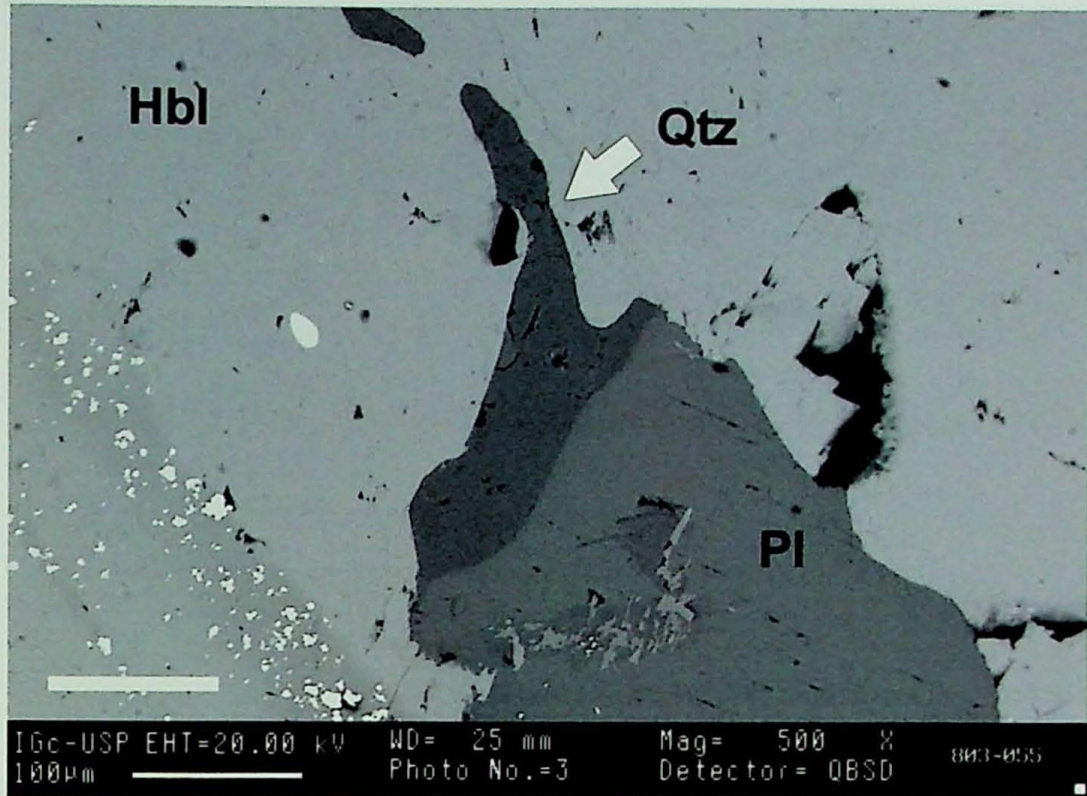


Figura 26: Filme de quartzo ao redor do grão de plagioclásio, localizado na banda rica em hornblenda. Lâmina 803-055. As barras medem 100 µm.

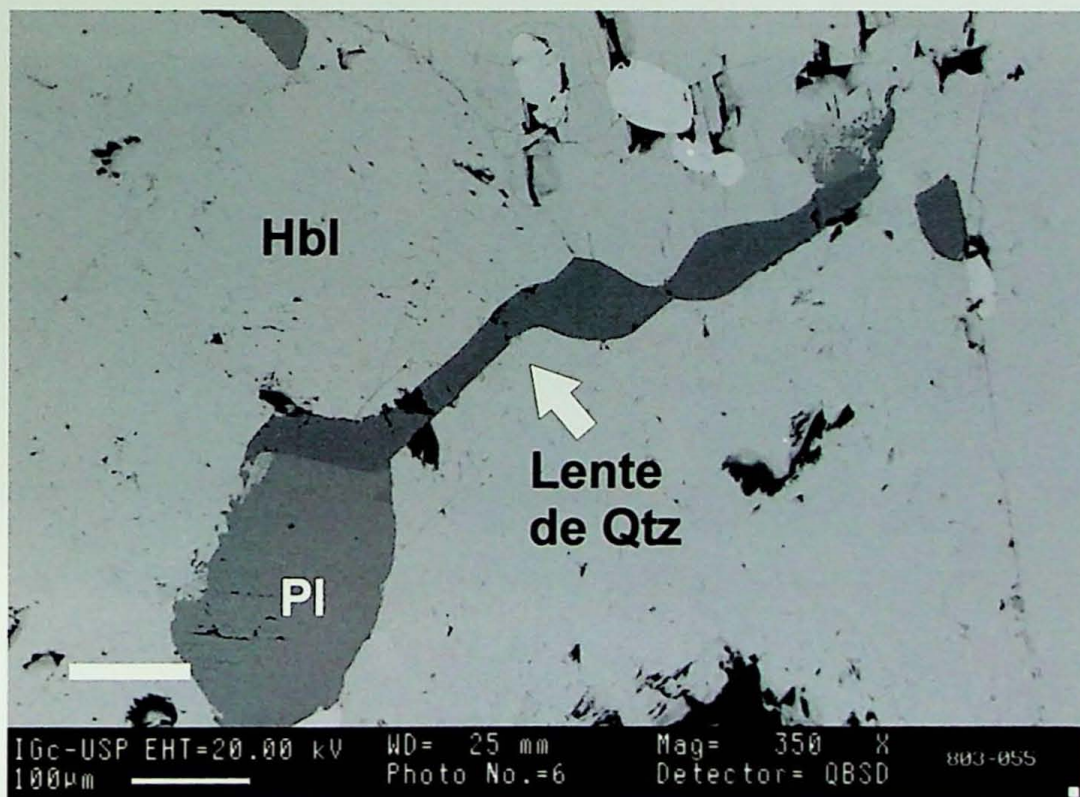


Figura 27: Filme de quartzo entre o grão de plagioclásio, localizado na banda rica em hornblenda. Lâmina 803-055. As barras medem 100 µm.

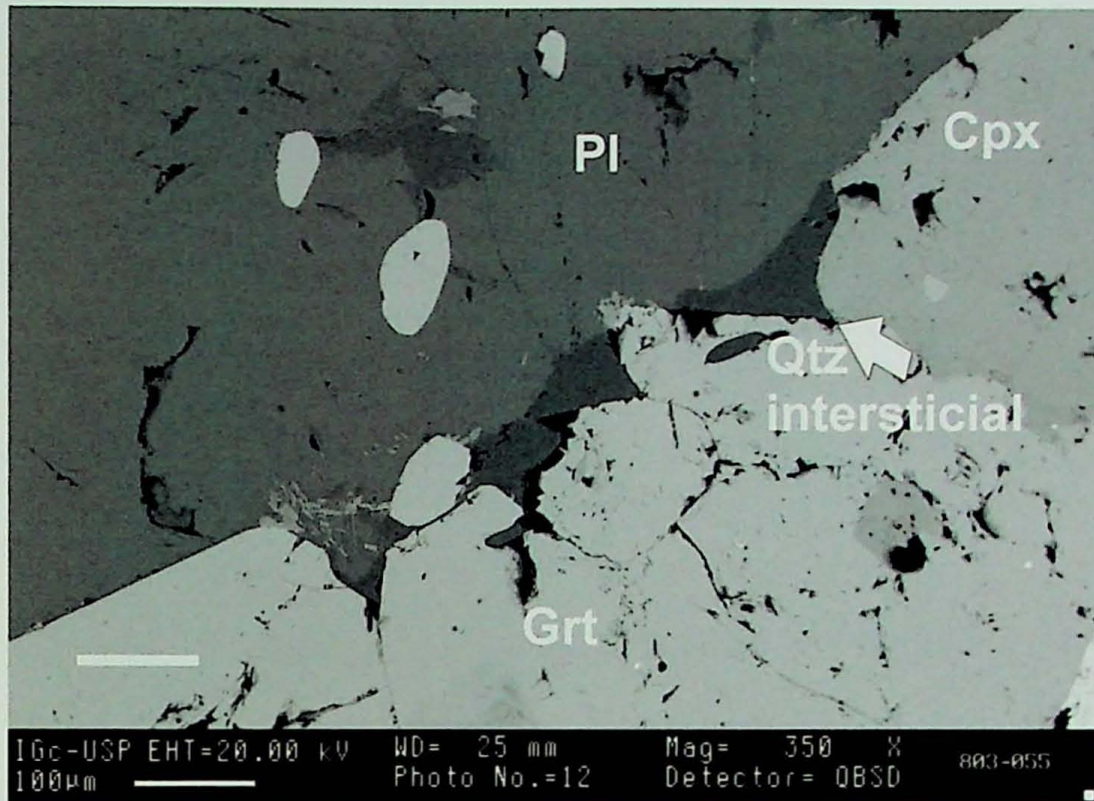


Figura 28: Filmes de quartzo intersticiais entre os grãos de clinopiroxênio, granada e plagioclásio. Lâmina 803-055. A barra mede 100 µm.

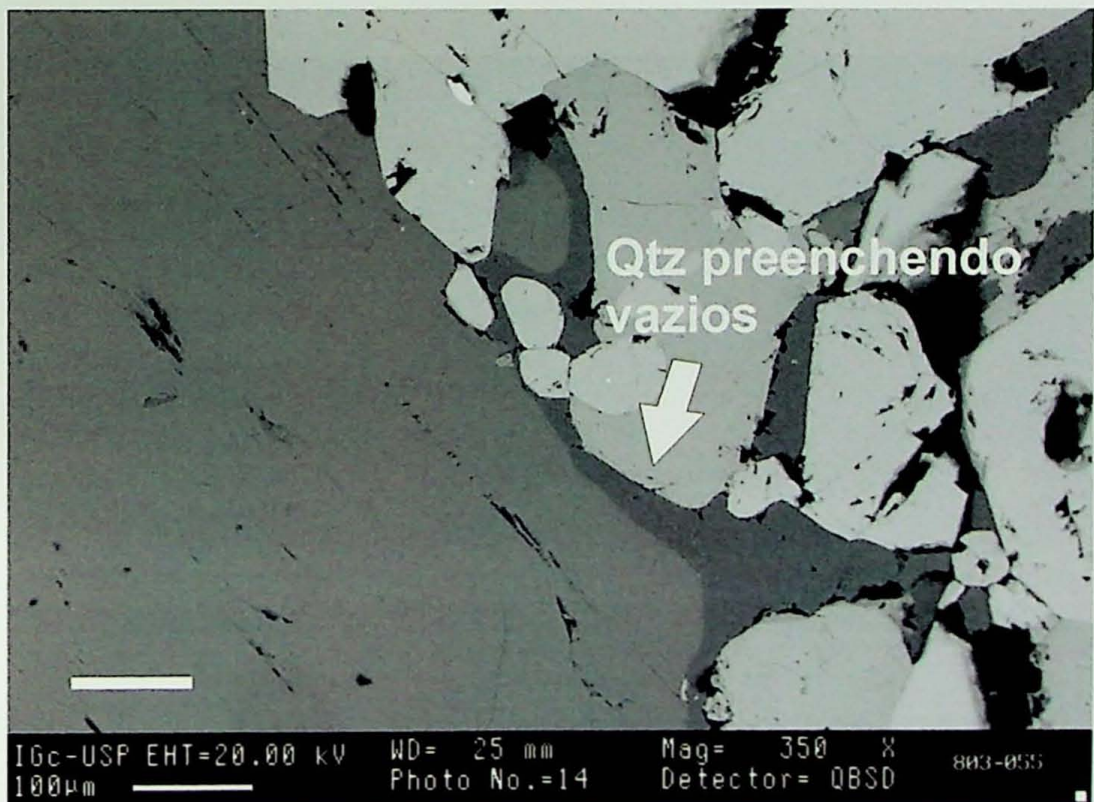


Figura 29: Filmes de quartzo envolvendo o grão de plagioclásio e preenchendo espaços vazios, em forma de fuido. Lâmina 803-055. A barra mede 100 µm.

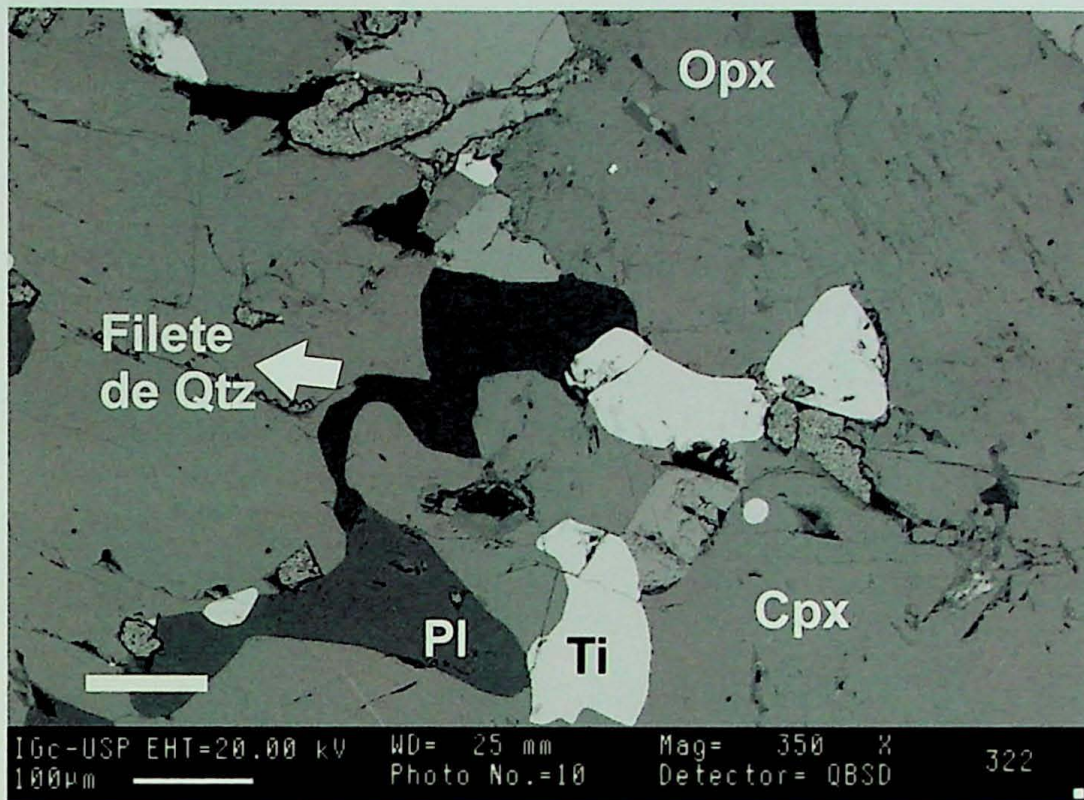


Figura 30: Filme de quartzo, em formato sinuoso, como fluido, em contato com os grãos de plagioclásio e clinopiroxênio. Lâmina RM-322. A barra mede 100 µm.

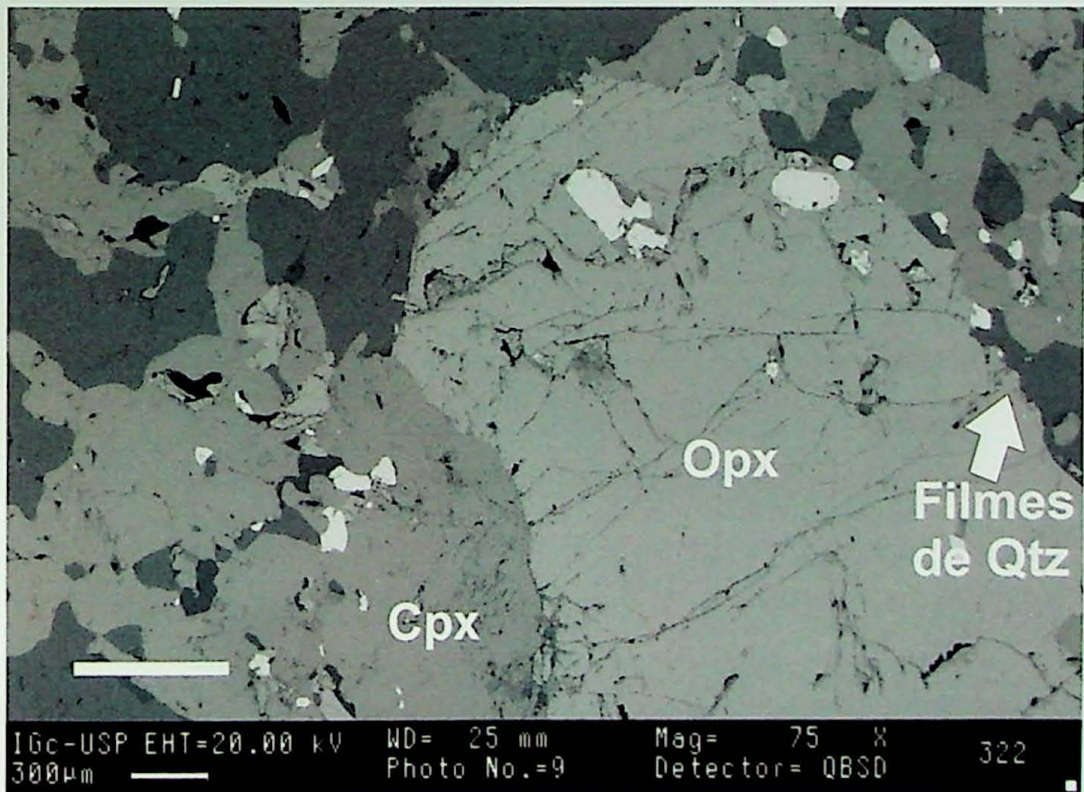


Figura 31: Filmes de quartzo envolvendo o porfiroblasto de ortopiroxênio e finas lentes inclusas no clinopiroxênio. Lâmina RM-322. A barra mede 600 µm.

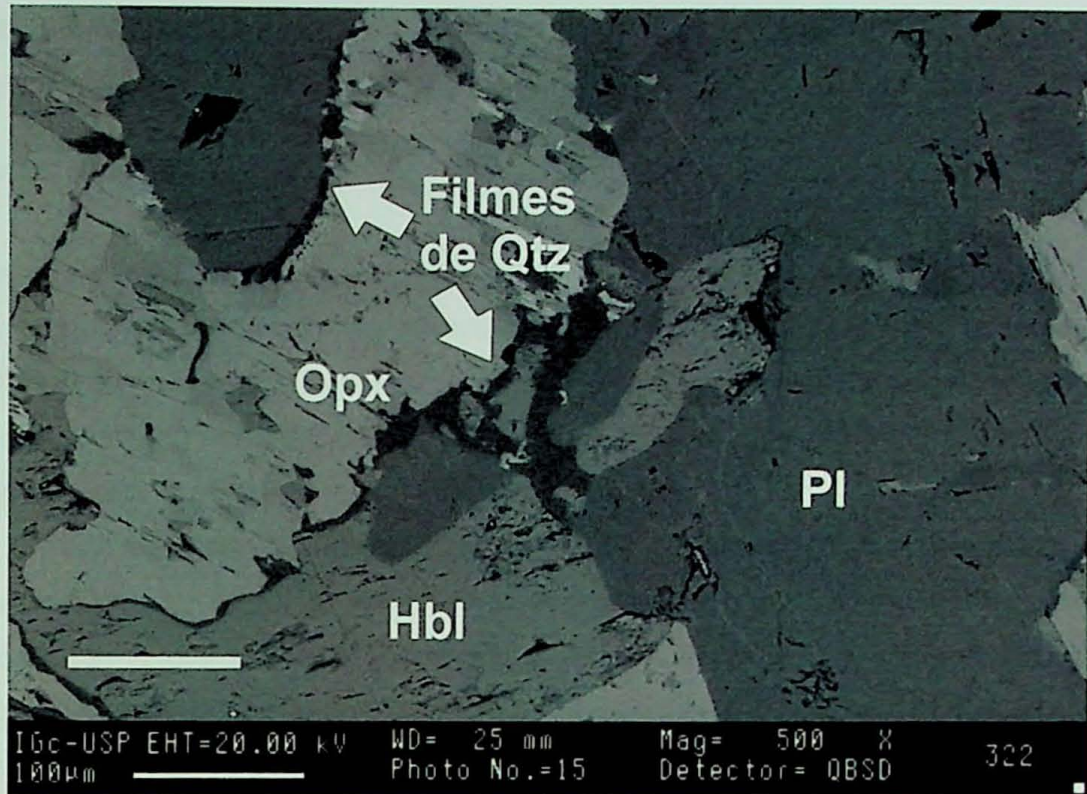


Figura 32: Filmes de quartzo envolvendo cristais de plagioclásio e hornblenda, estes em contato com o ortopiroxênio. Lâmina RM-322. A barra mede 100 µm.

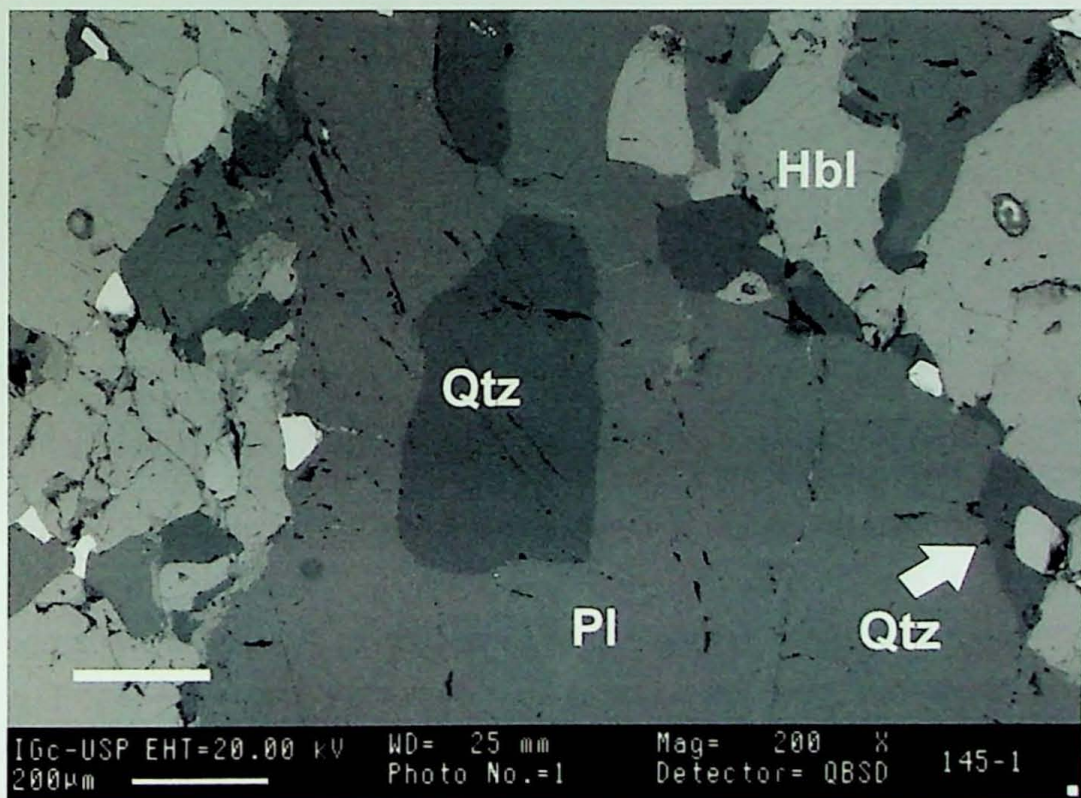


Figura 33: Grão de quartzo bem formado incluso no leucossoma. Lâmina 803-145. A barra mede 200 µm.



## 5. Química mineral

### 5.1. Introdução

As condições de temperatura e pressão podem ser avaliadas pelas associações minerais. Para entender como os minerais interagem entre si em uma associação mineral, deve-se ter conhecimento da sua composição química e da relação entre a composição dos mesmos e as condições de temperatura e pressão em que foram formados. Para isso examina-se a composição dos minerais com a microsonda eletrônica.

A organização dos átomos é dada pelo arranjo geométrico dos ânions e cátions dentro da estrutura do mineral. O arranjo é representado por poliedros de coordenações interconectados. A configuração poliedral dos ânions ao redor dos cátions depende tanto do raio iônico de ambos quanto da quantidade de ânions que irá rodear os cátions. O ânion dominante em rochas formadoras de silicatos é o oxigênio. Os cátions presentes no silicato são numerosos e os mais comuns podem ser observados na tabela 1.

Cátion	Número de Coordenação
K <sup>+</sup>	8-12
Na <sup>+</sup>	6-8-12
Ca <sup>2+</sup>	6-8
Mn <sup>2+</sup>	6, 8
Fe <sup>2+</sup>	6, 8, 4*
Mg <sup>2+</sup>	6, 8
Fe <sup>3+</sup>	6
Ti <sup>4+</sup>	6
Al <sup>3+</sup>	6-4
Si <sup>4+</sup>	4

Tabela 1: Cátions mais comuns com respectivos número de coordenação. \* Fe<sup>2+</sup> com número de coordenação 4 pertence somente à estauroлита (Spear, 1993).

O sítio cristalográfico é uma posição atômica dentro do cristal e cada sítio catiônico pode ser descrito por um poliedro de coordenação, dependendo do número de coordenação. Um mineral pode ter diversos sítios catiônicos, todos com o mesmo número de coordenação, mas devido a estrutura particular do cristal, estes sítios podem ser levemente diferentes em tamanho e/ou forma. Por exemplo, nos silicatos o Si ocupado um tetraédro, constituindo assim poliedro de coordenação 4, pois o Si fica no centro e nos vértices do tetraédro ficam quatro oxigênios.

A razão para descrever a química mineral em termos de poliedros de coordenação é devido a este método ser mais conveniente pois prevê as substituições químicas que são permitidas no mineral. As substituições químicas podem ser descritas pelos vetores de troca. O

vetor de troca é um artifício matemático que representa a diferença entre as fórmulas de dois membros finais e possui direção e módulo como todos os vetores. A direção indica os átomos envolvidos na substituição e o módulo a quantidade deles (Spear, 1993). Os vetores de troca representam as variações composicionais dentro de cada mineral, ou seja, uma substituição que ocorre no mineral durante uma reação qualquer.

Sendo assim, através da composição das fases são estabelecidas as principais substituições (vetores de troca) atuantes em cada mineral e suas relações com o metamorfismo. Estabelecidas as fases que estiveram em equilíbrio durante o pico metamórfico, são realizadas análises químicas sobre estas fases. A partir dos dados da química do mineral pode ser calculada a fórmula estrutural do mineral. A fórmula estrutural será então utilizada para o cálculo das condições de pressão e temperatura.

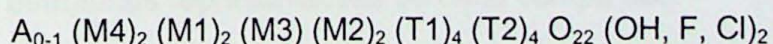
## **5. 2 . Química mineral do anfibolito Cafelândia**

As fases analisadas para este trabalho pertencem ao anfibolito Cafelândia, e estas são: granada, plagioclásio, anfibólio e clinopiroxênio. As análises químicas dos minerais foram realizadas na Microsonda Eletrônica JEOL, modelo JXA 8600, no Laboratório de Microsonda da Universidade de São Paulo. As condições usadas para as análises foram 20nÅ, 15kV e feixe com diâmetro de 5µ. A lâmina analisada apresenta feições típicas do anfibolito Cafelândia e foram destacados dois campos distintos, um pertencente a banda rica em hornblenda e outro a banda rica em clinopiroxênio e granada, e em cada campo foram analisados entre 2 a 3 grãos de cada mineral. As análises foram feitas ao longo de todo o cristal, envolvendo as bordas e núcleo.

Posteriormente, foram tratados os dados de química mineral e estes foram utilizados para o cálculo da fórmula estrutural dos minerais. Para isso foi utilizado o programa AX – Activity Composition (Holland & Powell, 2000). A partir da fórmula estrutural foram feitos gráficos diversos para verificar as variações composicionais de cada mineral.

### **5. 2. 1. Anfibólio**

O grupo dos anfibólios é de grande importância nas rochas metamórficas. Sua grande flexibilidade composicional permite sua ocorrência em extenso conjunto de rochas e em amplo espectro de condições *P* e *T* do metamorfismo. A fórmula geral dos anfibólios é:



Os principais cátions que ocupam os sítios cristalográficos e seu respectivo número de coordenação podem ser: A – coordenação 12 / Na e K; M4 – coordenação 6 ou 8 / Na, Li, Ca, Mn, Fe<sup>2+</sup>, Mg; M1 e M3 – coordenação 6 / Mn, Fe<sup>2+</sup>, Mg; M2 – coordenação 6 / Al, Ti Fe<sup>3+</sup>, Mg, Fe<sup>2+</sup>; T1 – coordenação 4 / Al, Si e T2 – coordenação 4 / Si (Al) (Moraes, 1997).

A classificação dos anfibólios é baseada na ocupação do sítio M4, sendo dividida em quatro grupos:

- Grupo dos anfibólios de Fe – Mg – Mn /  $(Ca+Na)_{M4} < 1,34$
- Grupo dos anfibólios cálcicos /  $(Ca+Na)_{M4} \geq 1,34 - Na_{M4} \leq 0,67$
- Grupo dos anfibólios sódico-cálcicos /  $(Ca+Na)_{M4} \geq 1,34 - 0,67 \leq Na_{M4} \leq 1,34$
- Grupo dos anfibólios alcalinos /  $Na_{M4} \geq 1,34$

A classificação depende do modo como a fórmula química do anfibólio é calculada. A melhor forma de calcular a fórmula estrutural é através das análises via úmida, com as quais é possível a determinação de água e a razão Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>. Nesse caso, a fórmula estrutural pode ser normalizada a 24 (O, OH, F, Cl). Nas análises efetuadas com microsonda eletrônica, não é possível determinar Fe<sup>3+</sup> e água e a normalização a 23 O, assumindo 2 (OH, F, Cl), é recomendada (Robinson *et al*, 1982).

### Anfibólio no anfibolito Cafelândia

Foram analisados 5 cristais de anfibólio (anexo 1). Estes foram classificados como cálcicos e estão concentrados na divisória dos campos 2 e 4 (figura 34). Os campos indicam hornblenda-tschermakítica e ferro-hornblenda.

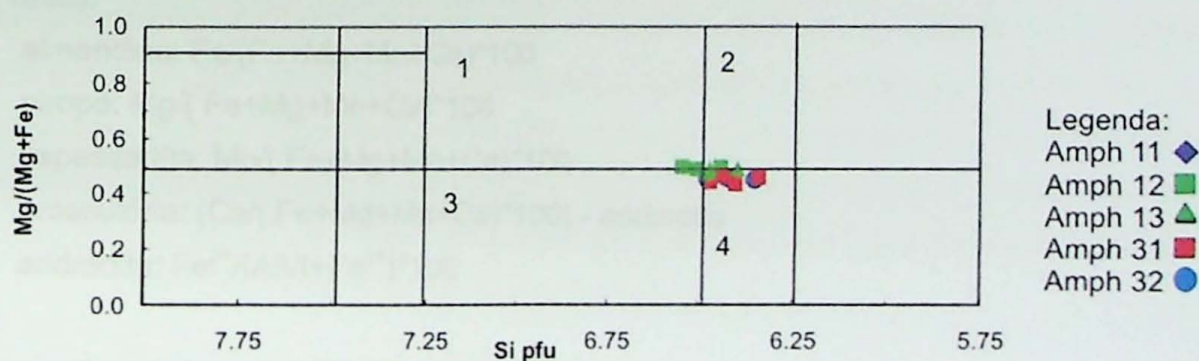


Figura 34: Classificação dos anfibólios para os anfibólios do Anfibolito Cafelândia. campo 1: magnésio-hornblenda; campo 2: hornblenda tschermakítica; campo 3: ferro-hornblenda; campo 4: ferro hornblenda-tschermakítica.

As fórmulas estruturais representativas de cada campo são:

Campo 1:

núcleo:  $K_{0.07}, Na_{0.304} (Na_{0.143}, Ca_{1.857})_2 (Fe^{2+}_{2.051}, Mg_{2.022}, Mn_{0.017}, Fe^{3+}_{0.278}, Ti_{0.134}, Al_{0.556})_5 (Al_{1.45}, Si_{6.55})_8 O_{22} (OH, F, Cl)_2$

borda:  $K_{0.065}, Na_{0.36} (Na_{0.115}, Ca_{1.885})_2 (Fe^{2+}_{2.074}, Mg_{1.981}, Mn_{0.019}, Fe^{3+}_{0.216}, Ti_{0.122}, Al_{0.633})_5 (Al_{1.494}, Si_{6.506})_8 O_{22} (OH, F, Cl)_2$

Campo 3:

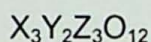
núcleo:  $K_{0.084}, Na_{0.372} (Na_{0.124}, Ca_{1.876})_2 (Fe^{2+}_{2.167}, Mg_{1.786}, Mn_{0.015}, Fe^{3+}_{0.269}, Ti_{0.132}, Al_{0.683})_5 (Al_{1.647}, Si_{6.353})_8 O_{22}$

borda:  $K_{0.079}, Na_{0.385} (Na_{0.081}, Ca_{1.919})_2 (Fe^{2+}_{2.174}, Mg_{1.819}, Mn_{0.014}, Fe^{3+}_{0.201}, Ti_{0.104}, Al_{0.719})_5 (Al_{1.575}, Si_{6.425})_8 O_{22}$

## 5. 2. 2. Granada

O grupo da granada é muito importante para o estudo das rochas metamórficas, pois a granada também apresenta amplo espectro composicional permitindo sua estabilidade em diversas rochas. Devido a sua estabilidade em quase todos os intervalos de temperatura e pressão do metamorfismo, sua participação é muito importante nos cálculos utilizando os geobarômetros e os geotermômetros.

A fórmula geral da granada é:



Os sítios são ocupados por cátions di, tri e tetravalentes (Fe, Mg, Mn, Fe<sup>3+</sup>, Al, Cr, Ti e Si). A fração molar de cada membro final foi calculada de acordo com as seguintes expressões (Deer *et al.*, 1992):

- almandina:  $Fe/(Fe+Mg+Mn+Ca)*100$
- piropo:  $Mg/(Fe+Mg+Mn+Ca)*100$
- espessartita:  $Mn/(Fe+Mg+Mn+Ca)*100$
- grossulária:  $(Ca/(Fe+Mg+Mn+Ca)*100) - andradita$
- andradita:  $Fe^{3+}/(AlVI+Fe^{3+})*100$

### Granada no anfibolito Cafelândia

Foram analisados 4 cristais de granada em bandas distintas da rocha (anexo 1). Por se tratar de anfibolito bandado, a granada irá apresentar variações quanto a sua composição de banda para banda. Além da variação pelo bandamento, a composição da granada pode variar também em relação as condições de temperatura e pressão.

Foram calculadas as seguintes fórmulas estruturais:

Campo 1:

Grão 1, borda:  $(\text{Fe}^{2+}_{1.644}, \text{Mn}_{0.17}, \text{Mg}_{0.237}, \text{Ca}_{0.94}) \text{Al}_{2.002} \text{Si}_{2.999} \text{O}_{12}$

$\text{Alm}_{54.96} \text{Sps}_{7.92} \text{Pir}_{5.68} \text{Grs}_{31.43}$

núcleo:  $(\text{Fe}^{2+}_{1.604}, \text{Mn}_{0.174}, \text{Mg}_{0.273}, \text{Ca}_{0.919}) \text{Al}_{2.002} \text{Si}_{2.969} \text{O}_{12}$

$\text{Alm}_{54.01} \text{Sps}_{9.19} \text{Pir}_{5.86} \text{Grs}_{28.13}$

Grão 2, borda:  $(\text{Fe}^{2+}_{1.674}, \text{Mn}_{0.161}, \text{Mg}_{0.232}, \text{Ca}_{0.935}) \text{Al}_{1.997} \text{Si}_{2.999} \text{O}_{12}$

$\text{Alm}_{55.76} \text{Sps}_{7.73} \text{Pir}_{5.36} \text{Grs}_{31.10}$

núcleo:  $(\text{Fe}^{2+}_{1.651}, \text{Mn}_{0.181}, \text{Mg}_{0.277}, \text{Ca}_{0.892}) \text{Al}_{1.987} \text{Si}_3 \text{O}_{12}$

$\text{Alm}_{55.01} \text{Sps}_{9.23} \text{Pir}_{6.03} \text{Grs}_{29.72}$

Campo 3:

Grão 1, borda:  $(\text{Fe}^{2+}_{1.708}, \text{Mn}_{0.122}, \text{Mg}_{0.23}, \text{Ca}_{0.936}) \text{Al}_{2.003} \text{Si}_{2.988} \text{O}_{12}$

$\text{Alm}_{57.01} \text{Sps}_{7.68} \text{Pir}_{4.07} \text{Grs}_{31.24}$

núcleo:  $(\text{Fe}^{2+}_{1.681}, \text{Mn}_{0.136}, \text{Mg}_{0.269}, \text{Ca}_{0.901}) \text{Al}_{1.986} \text{Si}_{2.982} \text{O}_{12}$

$\text{Alm}_{56.28} \text{Sps}_{9.01} \text{Pir}_{4.55} \text{Grs}_{30.16}$

Grão 2, borda:  $(\text{Fe}^{2+}_{1.69}, \text{Mn}_{0.129}, \text{Mg}_{0.272}, \text{Ca}_{0.901}) \text{Al}_{1.968} \text{Si}_{2.985} \text{O}_{12}$

$\text{Alm}_{56.48} \text{Sps}_{9.09} \text{Pir}_{4.31} \text{Grs}_{30.11}$

núcleo:  $(\text{Fe}^{2+}_{1.645}, \text{Mn}_{0.127}, \text{Mg}_{0.261}, \text{Ca}_{0.942}) \text{Al}_{1.965} \text{Si}_{2.968} \text{O}_{12}$

$\text{Alm}_{55.29} \text{Sps}_{8.77} \text{Pir}_{4.27} \text{Grs}_{31.66}$

Após calcular as fórmulas estruturais, foram feitos perfis composicionais utilizando a fração molar de cada membro final dos grãos de granada analisados. Em sua totalidade os perfis composicionais são levemente planos (figura 35). A maior parte dos grãos analisados não apresentam grande zonação química e as variações entre núcleo e borda são pequenas. Almandina é o membro final mais abundante e praticamente sem diferenças do núcleo para as bordas. Grossulária é o segundo membro final mais abundante e apresenta leve enriquecimento nas bordas, enquanto piropo e essartita apresentam leve empobrecimento nas bordas (figura 35). Muitas vezes, as variações da grossulária ocorrem para compensar as variações de piropo e almandina.

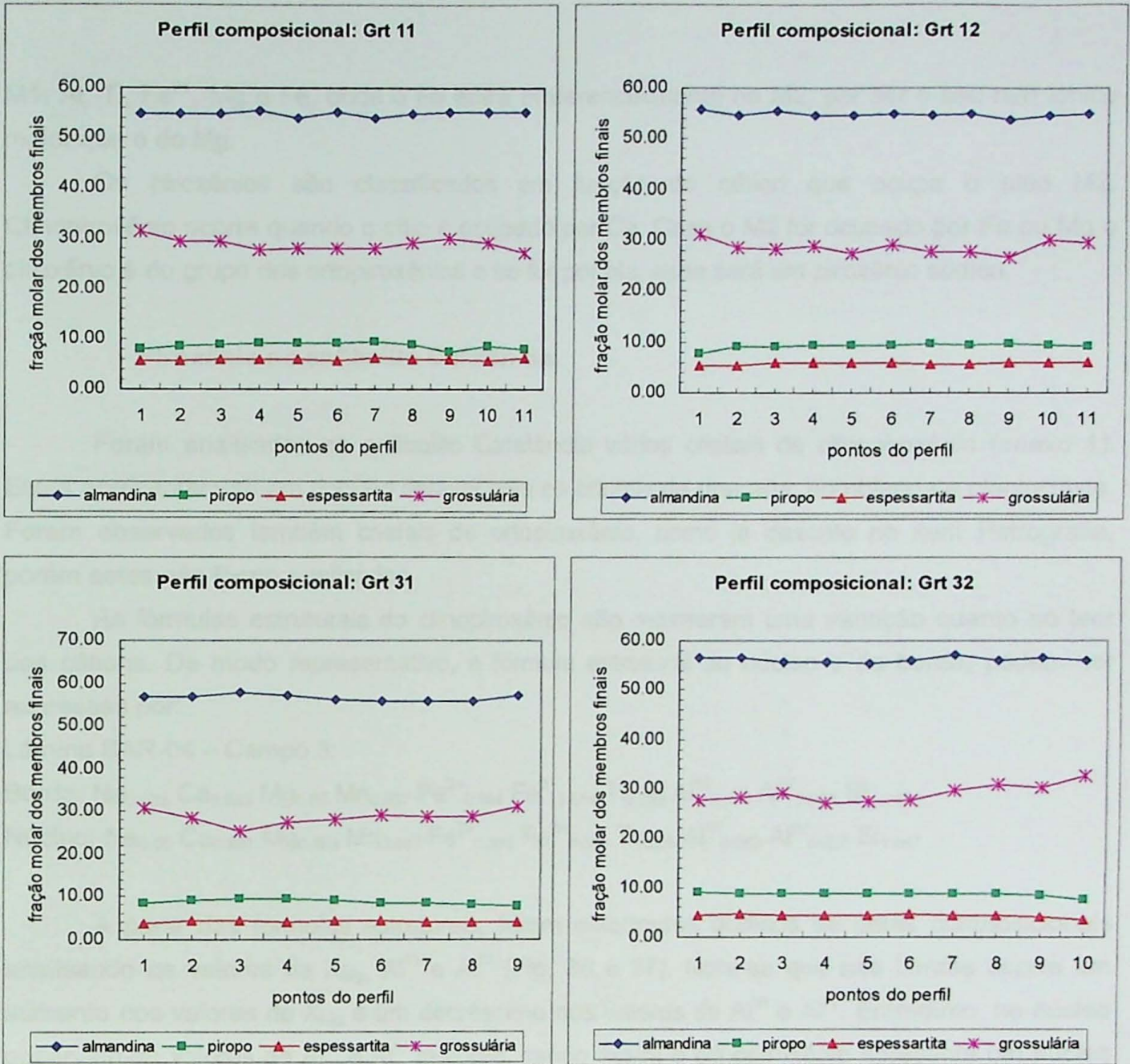
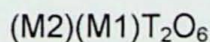


Figura 35: Perfis composicionais dos cristais de granada do Anfibolito Cafelândia da amostra BAR-04. Estes apresentam os perfis dos membros finais em fração molar.

### 5. 2. 3. Piroxênio

Os cristais de piroxênio são comuns em rochas metamórficas que atingem as condições fácies anfibolito superior e granulito. A fórmula estrutural geral do piroxênio é expressa por:



Os principais cátions que ocupam os sítios cristalográficos M2 (sítio maior, de coordenação variando entre 6 e 8) e M1 (sítio menor, de coordenação 6) são:

M2: Na, Ca, Mn, Fe e Mg

M1: Al, Ti, Fe<sup>3+</sup>, Mg e Fe, onde o Fe entra preferencialmente no M2, por ser o seu raio iônico maior que o do Mg.

Os piroxênios são classificados em função do cátion que ocupa o sítio M2. Clinopiroxênio ocorre quando o sítio é ocupado por Ca. Caso o M2 for ocupado por Fe ou Mg o piroxênio é do grupo dos ortopiroxênios e se for por Na, esse será um piroxênio sódico.

### Piroxênio no anfibolito Cafelândia

Foram analisados no anfibolito Cafelândia vários cristais de clinopiroxênio (anexo 1). Estes apresentam-se em contato estável com os cristais de granada, hornblenda e plagioclásio. Foram observados também cristais de ortopiroxênio, como já descrito no item Petrografia, porém estes não foram analisados.

As fórmulas estruturais do clinopiroxênio não mostraram uma variação quanto ao teor dos cátions. De modo representativo, a fórmula estrutural do núcleo e da borda, podem ser expressas por:

Lâmina BAR-04 – Campo 3:

Borda: Na<sub>0.032</sub> Ca<sub>0.933</sub> Mg<sub>0.55</sub> Mn<sub>0.007</sub> Fe<sup>2+</sup><sub>0.394</sub> Fe<sup>3+</sup><sub>0.054</sub> Ti<sub>0.008</sub> Al<sup>VI</sup><sub>0.058</sub> Al<sup>IV</sup><sub>0.020</sub> Si<sub>1.942</sub>

Núcleo: Na<sub>0.03</sub> Ca<sub>0.937</sub> Mg<sub>0.553</sub> Mn<sub>0.007</sub> Fe<sup>2+</sup><sub>0.396</sub> Fe<sup>3+</sup><sub>0.036</sub> Ti<sub>0.005</sub> Al<sup>VI</sup><sub>0.053</sub> Al<sup>IV</sup><sub>0.037</sub> Si<sub>1.947</sub>

A partir das fórmulas estruturais, foram elaborados gráficos de perfis composicionais analisando os valores de X<sub>Mg</sub>, Al<sup>VI</sup> e Al<sup>IV</sup> (Fig. 36 e 37). Nota-se que nas bordas ocorre um aumento nos valores de X<sub>Mg</sub> e um decréscimo nos valores de Al<sup>VI</sup> e Al<sup>IV</sup>. Entretanto, no núcleo observam-se valores de Al<sup>VI</sup> e Al<sup>IV</sup> maiores, sendo assim o clinopiroxênio apresenta um núcleo mais rico em alumínio. Reunindo todas as fórmulas estruturais obtidas, foi elaborado um gráfico XMg x Al<sup>VI</sup> (Fig. 38). Os pontos plotados representam cada amostra analisada de clinopiroxênio. O gráfico nos mostra uma pequena dispersão, indicando a ocorrência de uma leve variação na composição interna do clinopiroxênio, em relação a quantidade de Mg e Al.

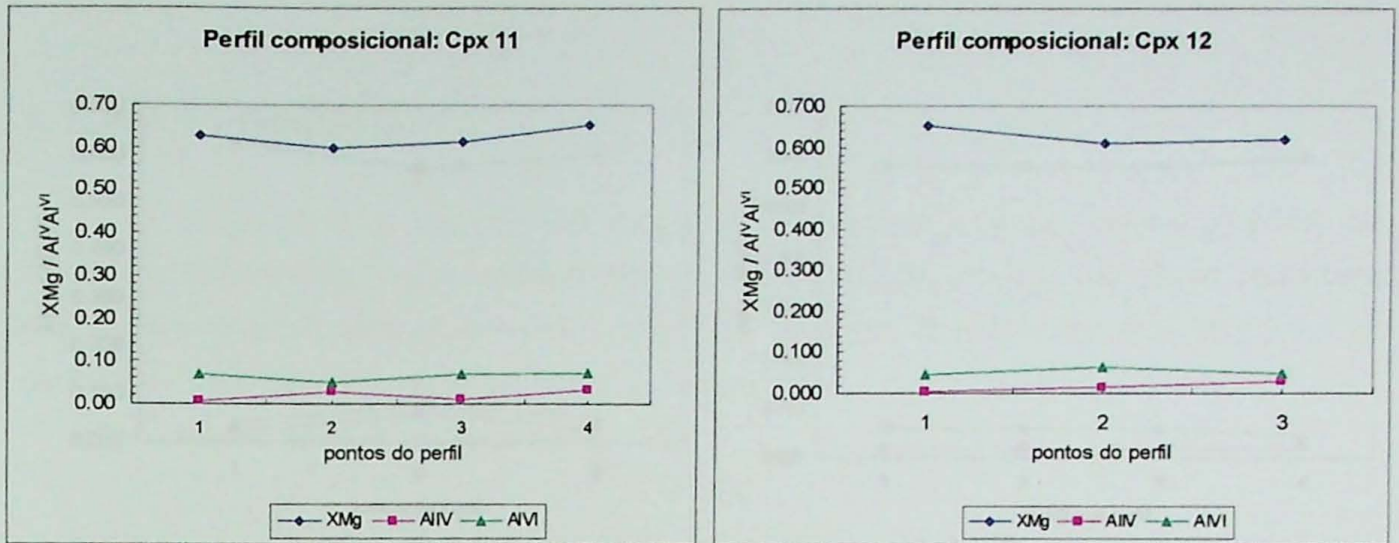


Figura 36: Perfil composicional envolvendo valores de XMg, Al<sup>IV</sup> e Al<sup>VI</sup>. Lâmina BAR-04, campo 1.

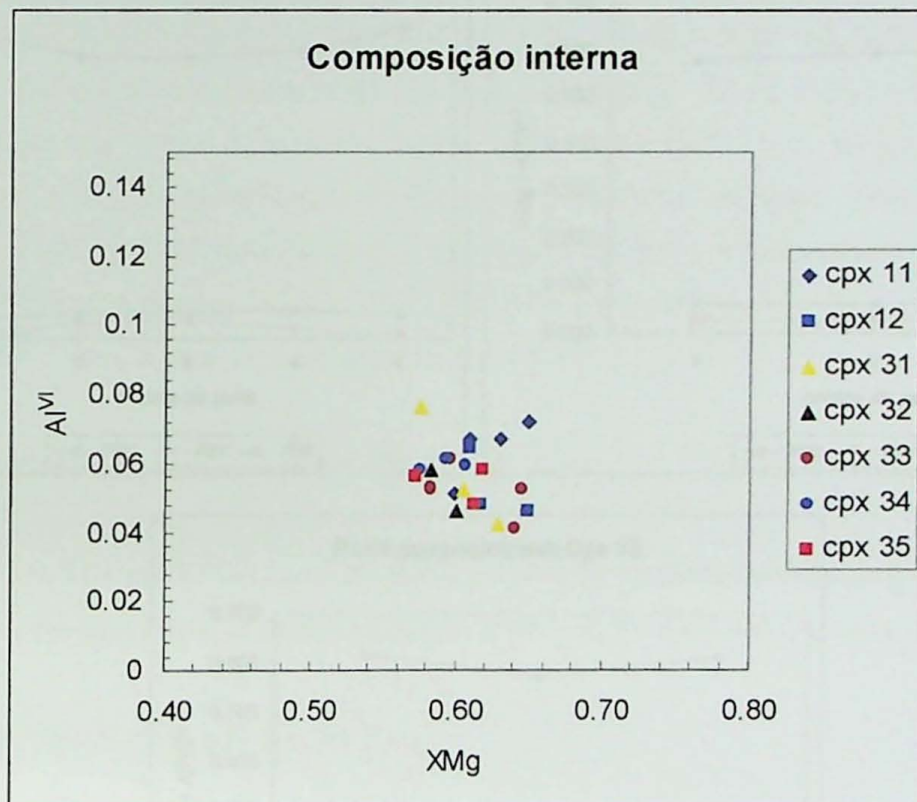


Figura 38: Gráfico de composição interna do clinopiroxênio.



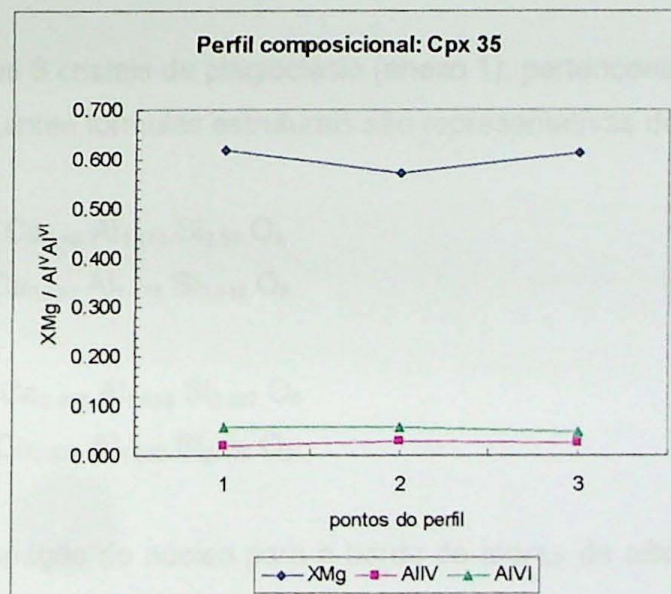
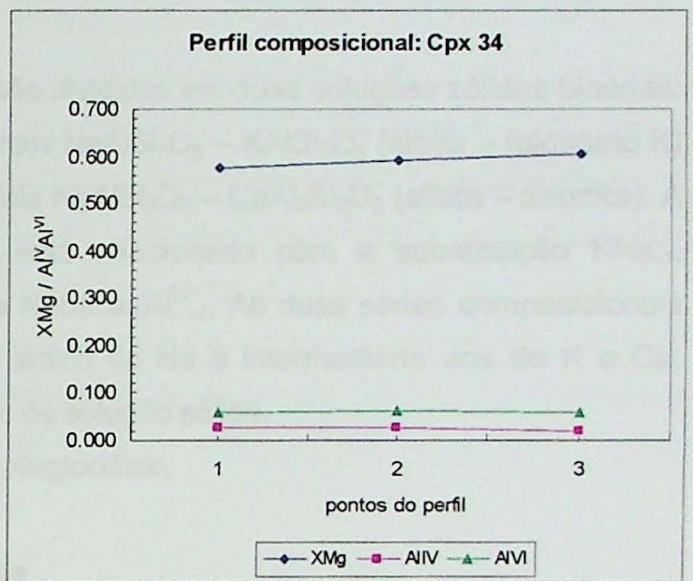
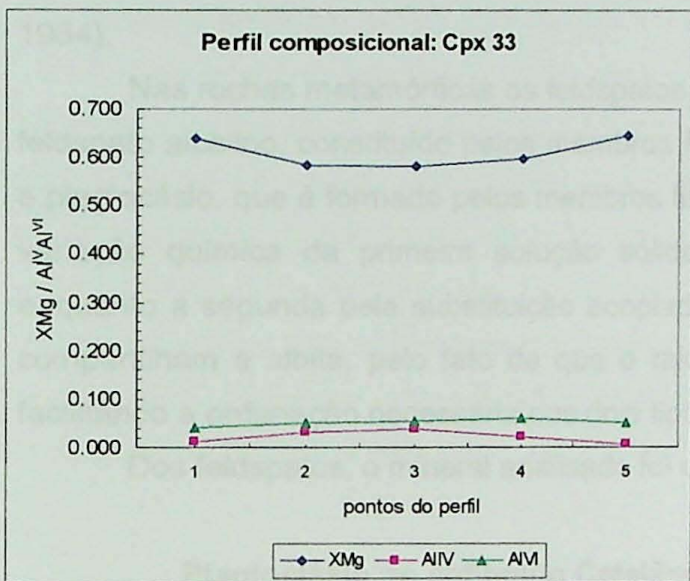
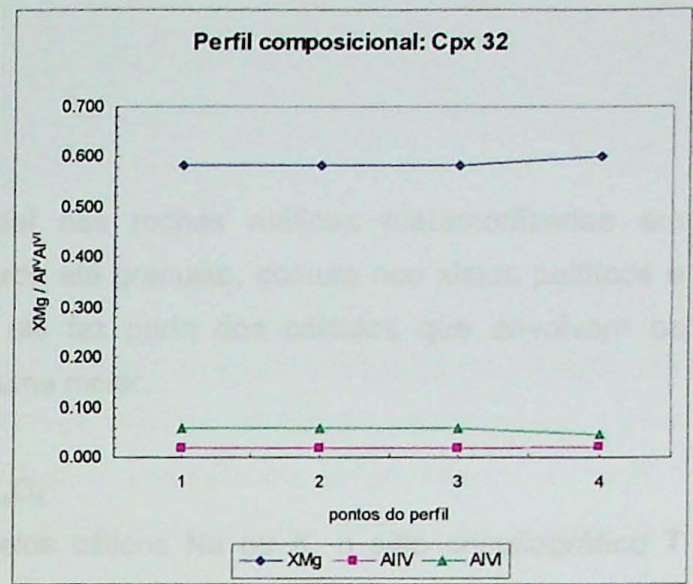
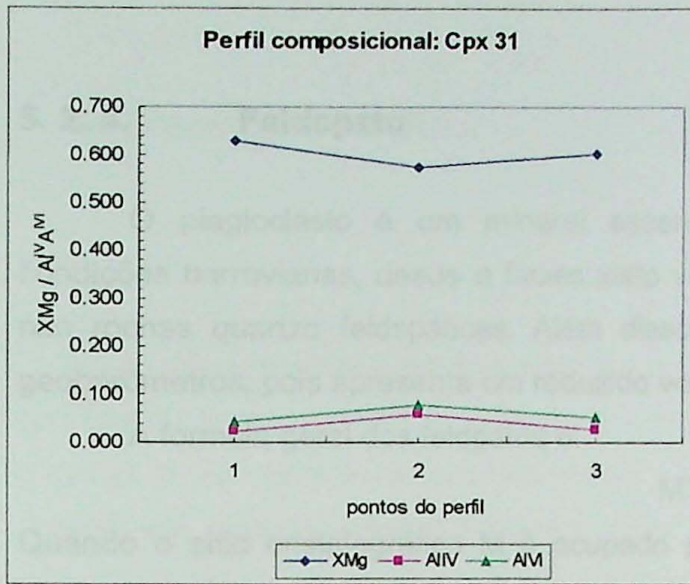


Figura 37: Perfil composicional envolvendo valores de XMg, Al<sup>IV</sup> e Al<sup>VI</sup>. Lâmina BAR-04, campo 3.

#### 5. 2. 4. Feldspato

O plagioclásio é um mineral essencial nas rochas máficas metamorfolizadas em condições barrovianas, desde a fácies xisto verde até granulito, comum nos xistos pelíticos e nas rochas quartzo feldspáticas. Além disso ele faz parte dos cálculos que envolvem os geobarômetros, pois apresenta um reduzido volume molar.

A fórmula geral dos feldspatos é:



Quando o sítio cristalográfico M é ocupado pelos cátions Na ou K, o sítio cristalográfico T receberá os cátions 1 Al + 3 Si. Caso M seja igual a Ca, T receberá 2Al + 2Si (Smith & Brown, 1984).

Nas rochas metamórficas os feldspatos são divididos em duas soluções sólidas binárias: feldspato alcalino, constituído pelos membros finais  $NaAlSi_3O_8 - KAlSi_3O_8$  (albita – feldspato K) e plagioclásio, que é formado pelos membros finais  $NaAlSi_3O_8 - CaAl_2Si_2O_8$  (albita – anortita). A variação química da primeira solução sólida está relacionada com a substituição  $KNa_{-1}$ , enquanto a segunda pela substituição acoplada  $NaSiCa_{-1}Al^IV_{-1}$ . As duas séries composicionais compartilham a albita, pelo fato de que o raio iônico do Na é intermediário aos do K e Ca, facilitando a ordenação necessária nos dois tipos de solução sólida.

Dos feldspatos, o mineral analisado foi o plagioclásio.

#### Plagioclásio no anfibolito Cafelândia

Foram analisados 6 cristais de plagioclásio (anexo 1), pertencentes aos campos 1 e 3 da lâmina BAR-04. As seguintes fórmulas estruturais são representativas de cada campo:

Campo 1:

núcleo:  $An_{47.525} - Na_{0.527} Ca_{0.48} Al_{1.474} Si_{2.52} O_8$

borda:  $An_{48.245} - Na_{0.513} Ca_{0.481} Al_{1.478} Si_{2.519} O_8$

Campo 3:

núcleo:  $An_{50.253} - Na_{0.488} Ca_{0.496} Al_{1.506} Si_{2.497} O_8$

borda:  $An_{52.716} - Na_{0.467} Ca_{0.524} Al_{1.523} Si_{2.476} O_8$

Observa-se a variação do núcleo para a borda de teores de albita e anortita. Os teores de albita aumentam em direção a borda e os teores de anortita aumentam em direção ao núcleo do mineral. O ortoclásio, por sua vez, não apresenta uma variação significativa.

## 6. Geotermobarometria

### 6.1. Introdução

Rochas originalmente formadas em ambiente ígneo ou sedimentar, quando passam por processos de transformação, tornam-se rochas metamórficas. Nelas se desenvolvem novas texturas, e frequentemente novos minerais e durante o processo de metamorfismo, as rochas reagem até atingir o equilíbrio químico. Quando atingem o equilíbrio, formam-se associações minerais. Para determinar as condições de pressão e temperatura de uma associação mineral, que atingiu o equilíbrio, utiliza-se a geotermobarometria.

Geotermobarometria é o nome dado ao conjunto de técnicas que procura estimar tais condições de temperatura e pressão do metamorfismo (Moraes, 1997). Os indicadores minerais de pressão e temperatura são denominados, respectivamente, geobarômetros e geotermômetros. A geotermobarometria baseia-se em reações metamórficas, que podem ser univariantes, contínuas ou de troca catiônica. As melhores reações para determinar a pressão de metamorfismo são as que ocorrem praticamente à mesma pressão sob largas variações de temperatura, enquanto uma reação com características opostas será um bom indicador de temperatura (Yardley, 2004; figura 39).

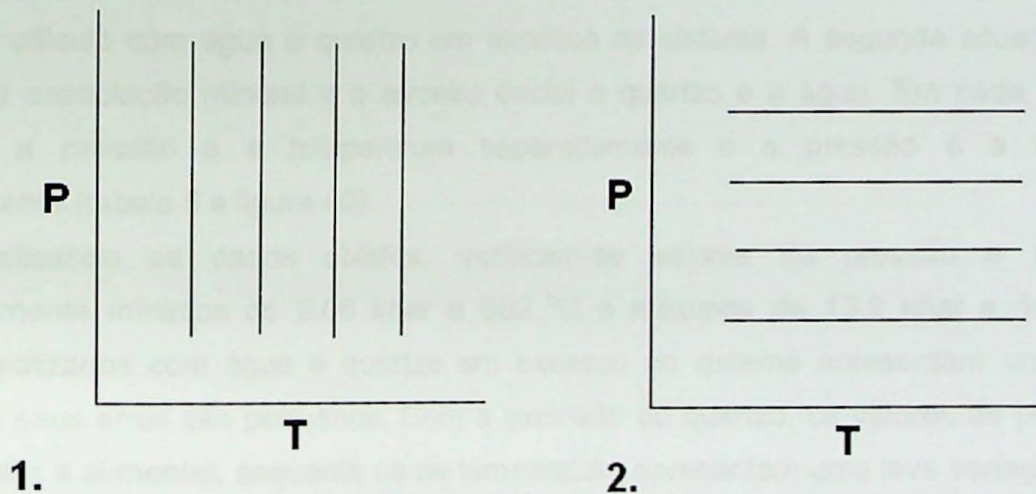


Figura 39: Diagramas  $P$ - $T$  esquemáticos. 1. Geotermômetro. 2. Geobarômetro.

Reações que fornecem bom indicadores de pressão são reações que envolvem grandes variações de volume molar e energia livre de Gibbs, estas relativas a produtos e reagentes. Em

contraste, reações com grande variação de entropia (ou entalpia, segundo Philpotts, 1990) e baixa variação de volume são predominantemente sensíveis à temperatura, e estas serão bons geotermômetros (Yardley, 2004). Reações de troca catiônica e de devolatilização são sensíveis à temperatura. A primeira devido a pequena variação de volume que ocorre durante a reação e a segunda, em virtude do aumento de entropia que acompanha a liberação de voláteis a partir de estruturas ordenadas.

## **6. 2 . Resultados**

Para este trabalho foram calculadas as condições de pressão e temperatura usando termobarometria convencional e o THERMOCALC (Powell & Holland, 1988). Foram selecionadas 6 amostras para calcular a pressão e a temperatura. Para isso foi utilizado o programa THERMOCALC, um banco de dados termodinâmicos internamente consistente (Powell & Holland, 1985, 1988; Holland & Powell, 1985, 1990). As lâminas selecionadas foram: 803-055, 803-145, RM-135, RM-322, RM-422 e BAR-04. A exceção da última amostra, os dados de química mineral foram compilados dos dados de Moraes (1997). Os dados de química mineral da amostra BAR-04 foram coletados para o presente trabalho. As análises químicas e as fórmulas estruturais dos minerais, usados nos cálculos  $P$ - $T$  do anfibolito Cafelândia, estão apresentados na tabela 2, 3 e 4.

Os cálculos com o THERMOCALC foram feitos sob três diferentes situações. A primeira apresenta cálculo com água e quartzo em excesso no sistema. A segunda situação exclui o quartzo da associação mineral e a terceira exclui o quartzo e a água. Em cada situação foi calculada a pressão e a temperatura separadamente e a pressão e a temperatura conjuntamente (tabela 5 e figura 40).

Analisando os dados obtidos, verificam-se valores de pressão e temperatura respectivamente mínimos de 9.95 kbar e 662 °C e máximos de 13.2 kbar e 1001 °C. Os cálculos realizados com água e quartzo em excesso no sistema apresentam uma pequena variação e seus erros são pequenos. Com a exclusão do quartzo, os valores de pressão e os erros tendem a aumentar, enquanto os de temperatura apresentam uma leve variação. Quando retiramos do sistema o quartzo e a água, os valores de pressão e temperatura variam consideravelmente, assim como seus erros, contudo o erro dos valores de temperatura é muito maior se comparado às duas situações anteriores.

Tabela 2: Fórmulas estruturais dos principais minerais das amostras analisadas do anfibólito Cafelândia. Dados compilados de Moraes (1997).

	803-055				803-145				RM-135			
	granada	diopsídio	plagioclásio	hornblenda	granada	diopsídio	plagioclásio	hornblenda	granada	diopsídio	plagioclásio	hornblenda
SiO <sub>2</sub>	37.19	51.3	56.03	42.67	37.09	51.58	56.82	43.38	37.26	51.05	57.06	42.83
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.2	0	1.39	0.05	0.21	0	1.61	0.1	0.24	0	1.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.76	1.74	27.95	11.94	20.86	1.71	27.77	11.39	20.45	2.08	27.24	11.22
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0	0	0.09	0	0	0	0.04	0	0.01	0	0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.16	0	0.24	1.22	1.92	0.7	0.05	1.35	2.13	0.75	0.06	1.18
FeO	24.76	14.57	0	19.41	25.93	13.23	0	17.46	25.56	13.6	0	17.97
MnO	1.65	0.18	0	0.12	2.39	0.37	0	0.18	1.73	0.2	0	0.05
MgO	2.05	9.01	0	7.17	3.16	10.2	0	8.65	3.08	9.88	0	8.27
CaO	11.26	22.37	10.04	11.47	8.12	22.15	9.66	11.54	9.23	21.49	9.59	11.33
Na <sub>2</sub> O	0	0.39	5.88	1.69	0	0.37	6.1	1.69	0	0.5	6.37	1.79
K <sub>2</sub> O	0	0.01	0.05	0.54	0	0	0.09	0.56	0	0	0.09	0.53
Total	99.88	99.77	100.2	97.7	99.54	100.52	100.49	97.84	99.56	99.8	100.4	97.14
Oxigênios	12	6	8	23	12	6	8	23	12	6	8	23
Si	2.959	1.972	2.514	6.486	2.959	1.959	2.538	6.526	2.969	1.954	2.552	6.506
Ti	0.002	0.006	0	0.159	0.003	0.006	0	0.182	0.006	0.007	0	0.223
Al	1.947	0.079	1.479	2.139	1.961	0.076	1.462	2.02	1.921	0.094	1.436	2.01
Cr	0	0	0	0.011	0	0	0	0.005	0	0	0	0.002
Fe <sub>3</sub>	0.129	0	0.008	0.139	0.115	0.02	0.002	0.153	0.128	0.022	0.002	0.135
Fe <sub>2</sub>	1.648	0.468	0	2.467	1.73	0.42	0	2.197	1.704	0.435	0	2.283
Mn	0.111	0.006	0	0.015	0.162	0.012	0	0.023	0.117	0.006	0	0.007
Mg	0.243	0.516	0	1.623	0.376	0.577	0	1.939	0.366	0.564	0	1.872
Ca	0.961	0.921	0.483	1.869	0.695	0.902	0.462	1.86	0.789	0.881	0.46	1.844
Na	0	0.029	0.512	0.499	0	0.027	0.529	0.493	0	0.037	0.552	0.528
K	0	0	0.003	0.105	0	0	0.005	0.108	0	0	0.005	0.102
Soma	8	3.998	4.999	15.512	8	4	4.997	15.504	8	4	5.007	15.512

Tabela 3: Fórmulas estruturais dos principais minerais das amostras analisadas do anfibólito Cafelândia. Dados compilados de Moraes (1997) e lâmina BAR-04 analisada neste trabalho.

	RM-322			RM-422			BAR-04			campo 1			diopsídio	plagioclásio	hornblenda
	granada	diopsídio	plagioclásio	hornblenda	granada	diopsídio	plagioclásio	hornblenda	granada	diopsídio	plagioclásio	hornblenda			
SiO2	38.13	52.41	53.99	45.95	37.84	51.01	56.67	43.75	SiO2	37.22	50.130	54.18	43.22		
TiO2	0.01	0.14	0	1.27	0.04	0.27	0	1.51	TiO2	0	0.070	0.02	0.95		
Al2O3	21.36	1.93	29.44	10.34	21.13	2.56	28.08	11.34	Al2O3	21.29	2.310	27.58	12.75		
Cr2O3	0	0	0	0.01	0.08	0	0	0.11	Cr2O3	0	0.000	0	0		
Fe2O3	1.29	0	0.14	3.21	0.29	1.13	0.17	1.21	Fe2O3	0.97	2.130	0.09	1.81		
FeO	27.11	10.25	0	12.64	27.21	12.46	0	15.72	FeO	24.04	10.090	0	16.96		
MnO	0.87	0.15	0	0.06	1.48	0.25	0	0	MnO	2.57	0.240	0	0.21		
MgO	4.62	12.56	0	11.76	3.28	11.22	0	9.72	MgO	2.29	10.600	0.01	8.3		
CaO	7.32	22.23	11.29	11.49	8.33	21.07	9.68	11.74	CaO	10.75	22.720	9.94	11.79		
Na2O	0	0.31	4.49	1.14	0	0.33	5.48	1.44	Na2O	0	0.340	5.83	1.58		
K2O	0	0	0.13	0.38	0	0	0.17	0.53	K2O	0	0.020	0.02	0.35		
Totals	100.73	99.98	99.48	98.25	99.7	100.3	100.25	97.08	Totals	99.16	98.650	97.68	97.93		
Oxigénios	12	6	8	23	12	6	8	23	Oxigénios	12	6.000	8	23		
Si	2.978	1.965	2.444	6.709	2.999	1.931	2.533	6.565	Si	2.969	1.928	2.497	6.473		
Ti	0	0.004	0	0.139	0.003	0.008	0	0.17	Ti	0	0.002	0.001	0.107		
Al	1.967	0.085	1.571	1.779	1.975	0.114	1.48	2.007	Al	2.002	0.105	1.498	2.251		
Cr	0	0	0	0.001	0.005	0	0	0.013	Cr	0	0	0	0		
Fe3	0.076	0	0.005	0.353	0.017	0.032	0.006	0.137	Fe3	0.058	0.062	0.003	0.204		
Fe2	1.77	0.321	0	1.544	1.804	0.395	0	1.973	Fe2	1.604	0.325	0	2.124		
Mn	0.058	0.005	0	0.007	0.1	0.008	0	0	Mn	0.174	0.008	0	0.026		
Mg	0.538	0.702	0	2.559	0.387	0.633	0	2.174	Mg	0.273	0.608	0.001	1.853		
Ca	0.613	0.893	0.548	1.797	0.708	0.855	0.464	1.887	Ca	0.919	0.936	0.491	1.892		
Na	0	0.023	0.394	0.323	0	0.024	0.475	0.42	Na	0	0.026	0.521	0.459		
K	0	0	0.008	0.071	0	0	0.01	0.101	K	0	0.001	0.001	0.066		
Soma	8	3.999	4.969	15.282	7.999	4	4.967	15.447	Soma	8	4.000	5.013	15.456		

Tabela 4: Fórmulas estruturais dos principais minerais dos campos analisados do anfibólito Cafelândia. Lâmina BAR-04

BAR-04	campo 2				campo 3				campo 4			
	granada	diopsídio	plagioclásio	hornblenda	granada	diopsídio	plagioclásio	hornblenda	granada	diopsídio	plagioclásio	hornblenda
SiO2	38.08	51.08	55.56	42.88	37.36	51.17	55.13	42.58	37.86	50.09	54.72	41.76
TiO2	0	0.01	0.01	1.32	0.01	0.12	0	1.17	0.05	0.17	0	1.52
Al2O3	21.39	1.06	27.66	12.35	20.99	1.48	28.44	13.25	21.43	1.68	28.07	12.59
Cr2O3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe2O3	0.21	2.34	0.08	3.63	0.63	1.78	0	2.39	0	1.94	0.05	2.47
FeO	25.06	10.43	0	16.15	25.52	11.72	0	17.37	25.58	11.5	0	17.01
MnO	2.71	0.36	0	0.28	1.85	0.26	0	0.12	1.93	0.18	0.05	0.1
MgO	2.36	10.86	0.02	8.53	2.4	9.91	0	8.03	2.21	9.95	0	8.07
CaO	10.56	22.95	9.9	11.36	10.16	23.07	10.59	11.73	10.39	22.67	10.27	11.65
Na2O	0	0.33	5.84	1.69	0	0.45	5.45	1.71	0	0.34	5.48	1.67
K2O	0	0	0.06	0.38	0	0	0.06	0.44	0	0.01	0.04	0.38
Totals	100.39	99.43	99.14	98.57	98.92	99.97	99.67	98.81	99.45	98.52	98.66	97.22
Oxigênio	12	6	8	23	12	6	8	23	12	6	8	23
Si	3	1.954	2.519	6.396	2.99	1.954	2.489	6.353	3.006	1.941	2.494	6.338
Ti	0	0	0.001	0.148	0.001	0.003	0	0.132	0.003	0.005	0	0.174
Al	1.987	0.048	1.478	2.172	1.981	0.067	1.513	2.33	2.006	0.077	1.508	2.253
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe3	0.013	0.067	0.003	0.407	0.038	0.051	0	0.269	0	0.057	0.002	0.282
Fe2	1.651	0.334	0	2.015	1.708	0.374	0	2.167	1.699	0.373	0	2.159
Mn	0.181	0.012	0	0.035	0.125	0.008	0	0.015	0.13	0.006	0.002	0.013
Mg	0.277	0.619	0.001	1.897	0.286	0.564	0	1.786	0.262	0.574	0	1.825
Ca	0.892	0.941	0.481	1.816	0.872	0.944	0.512	1.876	0.884	0.942	0.501	1.895
Na	0	0.025	0.513	0.488	0	0.033	0.477	0.496	0	0.025	0.484	0.492
K	0	0	0.003	0.073	0	0	0.004	0.084	0	0	0.002	0.074
Soma	8	4.000	4.999	15.447	8	4.00	4.995	15.506	7.989	4.000	4.994	15.504

Tabela 5: Valores de pressão e temperatura calculados com o THERMOCALC. Três situações de cálculo: a primeira situação é o cálculo com quartzo e H<sub>2</sub>O no sistema, a segunda exclui quartzo do sistema e a terceira exclui quartzo e H<sub>2</sub>O. Nota-se que há um aumento no erro à medida que se excluem os fluidos (quartzo e H<sub>2</sub>O), porém não há alteração significativa quanto às medidas de temperatura e pressão.

<b>Lâmina RM-135</b>	<i>P</i> (kbar)	<i>T</i> (°C)	<i>P</i> (kbar) e <i>T</i> (°C)
com Qtz e H <sub>2</sub> O	10.44 ± 0.97	889 ± 53	10.8 ± 1.1 e 895 ± 59
sem Qtz e com H <sub>2</sub> O	11.17 ± 1.35	878 ± 54	11.5 ± 1.5 e 896 ± 59
sem Qtz e sem H <sub>2</sub> O	11.19 ± 1.40	914 ± 74	13.2 ± 2.2 e 1001 ± 118
<b>Lâmina 803-145</b>			
com Qtz e H <sub>2</sub> O	9.95 ± 1.04	893 ± 58	10.2 ± 1.1 e 895 ± 65
sem Qtz e com H <sub>2</sub> O	10.65 ± 1.51	880 ± 61	10.8 ± 1.5 e 891 ± 65
sem Qtz e sem H <sub>2</sub> O	10.45 ± 1.52	887 ± 83	11.2 ± 2 e 922 ± 111
<b>Lâmina 803-055</b>			
com Qtz e H <sub>2</sub> O	10.86 ± 0.93	830 ± 56	10.9 ± 1.1 e 858 ± 66
sem Qtz e com H <sub>2</sub> O	11.55 ± 1.7	825 ± 65	11.5 ± 1.46 e 857 ± 72
sem Qtz e sem H <sub>2</sub> O	11.70 ± 1.63	840 ± 93	13.3 ± 2.5 e 969 ± 132
<b>Lâmina RM-322</b>			
com Qtz e H <sub>2</sub> O	10.80 ± 1.04	918 ± 56	11.1 ± 1.2 e 937 ± 63
sem Qtz e com H <sub>2</sub> O	11.56 ± 1.39	907 ± 60	11.7 ± 1.5 e 932 ± 66
sem Qtz e sem H <sub>2</sub> O	11.41 ± 1.56	891 ± 88	12.0 ± 2.3 e 950 ± 127
<b>Lâmina RM-422</b>			
com Qtz e H <sub>2</sub> O	10.31 ± 1.05	849 ± 59	10.0 ± 1.0 e 842 ± 58
sem Qtz e com H <sub>2</sub> O	10.61 ± 1.42	833 ± 61	10.3 ± 1.4 e 838 ± 58
sem Qtz e sem H <sub>2</sub> O	11.05 ± 1.52	859 ± 83	10.7 ± 1.8 e 862 ± 98
<b>Lâmina BAR-04</b>			
Campo 11	<i>P</i> (kbar)	<i>T</i> (°C)	<i>P</i> (kbar) e <i>T</i> (°C)
com Qtz e H <sub>2</sub> O	11.42 ± 1.44	800 ± 53	10.2 ± 1.4 e 790 ± 66
sem Qtz e com H <sub>2</sub> O	12.29 ± 1.92	778 ± 57	10.9 ± 1.7 e 780 ± 69
sem Qtz e sem H <sub>2</sub> O	12.81 ± 2.03	849 ± 96	10.6 ± 3.6 e 765 ± 189
Campo 12			
com Qtz e H <sub>2</sub> O	10.45 ± 1.13	828 ± 52	9.5 ± 1.1 e 807 ± 54
sem Qtz e com H <sub>2</sub> O	11.09 ± 1.54	805 ± 55	10 ± 1.4 e 804 ± 55
sem Qtz e sem H <sub>2</sub> O	11.13 ± 1.74	785 ± 74	7.7 ± 1.7 e 662 ± 85
Campo 31			
com Qtz e H <sub>2</sub> O	10.32 ± 1.26	821 ± 65	9.6 ± 1.2 e 815 ± 66
sem Qtz e com H <sub>2</sub> O	11.13 ± 1.77	796 ± 62	10.3 ± 1.6 e 808 ± 70
sem Qtz e sem H <sub>2</sub> O	11.19 ± 2.11	806 ± 96	8.6 ± 2.0 e 704 ± 101
Campo 32			
com Qtz e H <sub>2</sub> O	10.45 ± 1.33	814 ± 66	9.6 ± 1.3 e 805 ± 69
sem Qtz e com H <sub>2</sub> O	11.36 ± 1.86	786 ± 62	10.4 ± 1.7 e 797 ± 71
sem Qtz e sem H <sub>2</sub> O	11.49 ± 2.20	827 ± 107	8.3 ± 1.9 e 671 ± 97



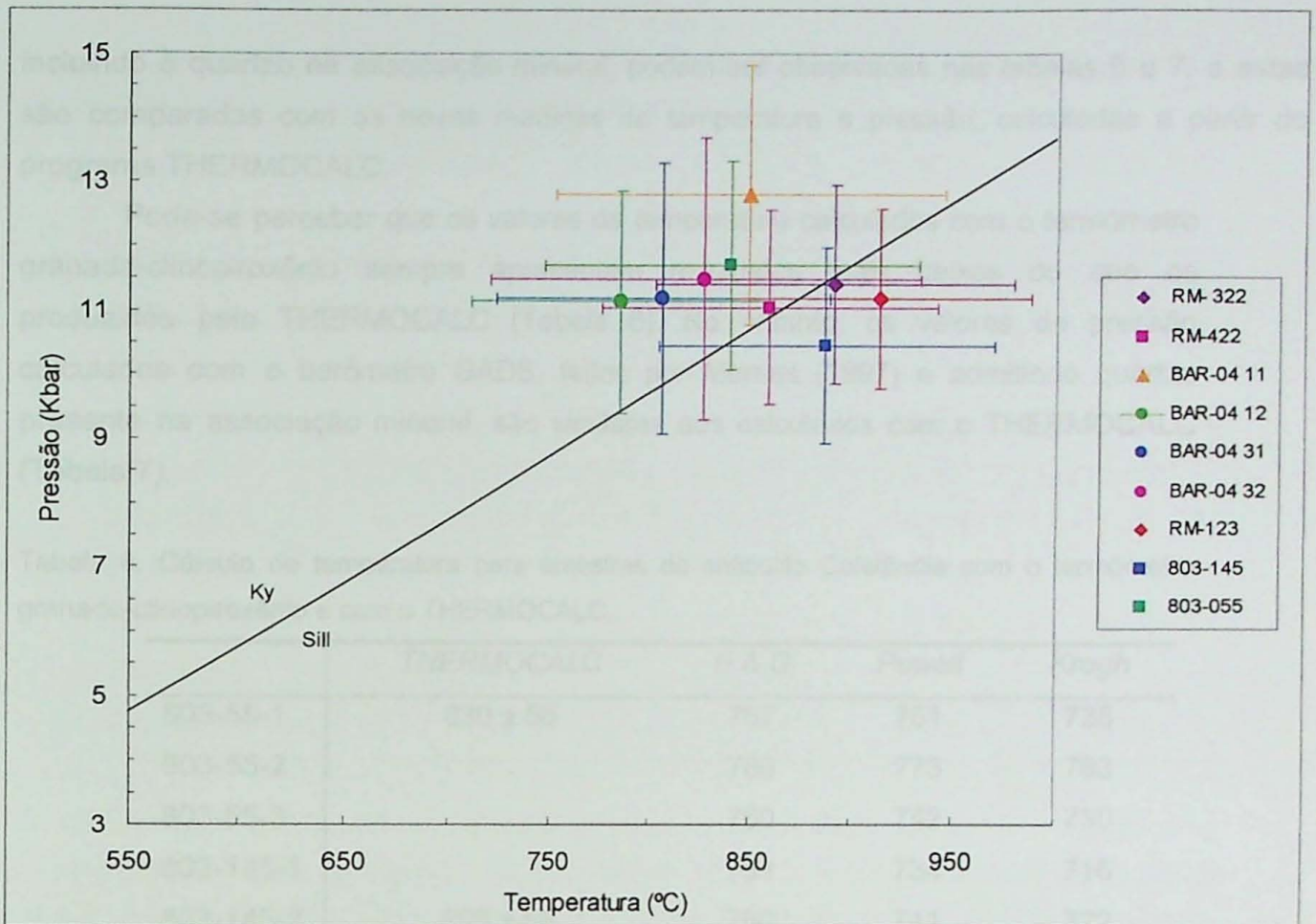


Figura 40: Diagrama de resultados do cálculo de pressão e temperatura com o programa THERMOCALC. Foram utilizados os dados de cálculo sem quartzo e  $H_2O$  no sistema. Os três pontos correspondem aos dados de temperatura e pressão, calculados separadamente. Nota-se que os pontos estão entre os campos da sillimanita e da cianita, em temperaturas entre 840 e 950° C e pressões entre 10 e 12kbar.

Com os dados verificados, conclui-se que, durante o metamorfismo, a rocha atingiu condições de pressão e temperatura em torno de 10 kbar e 880 °C. Estes dados calculados pelo THERMOCALC são condizentes com os dados experimentais de Patiño Douce & Beard (1995), Wolf & Wyllie (1991) e Vielzeuf & Schmidt (2001). No diagrama extraído de Patiño Douce & Beard (1995 – Figura 41), ao plotar a paragênese anfibólio (hornblenda) – ortopiroxênio – clinopiroxênio – líquido – granada, com quartzo, plagioclásio e titanita sempre presentes, estimam-se pressões e temperaturas respectivamente mínimas de 10 kbar e 900° C e máximas de 17 kbar e 960° C. O cálculo de pressão com o geobarômetro GADS (baseado na associação mineral contendo granada-clinopiroxênio-plagioclásio-quartzo) não pode ser realizado neste trabalho, pois foi determinada a ausência de quartzo como fase mineral presente no pico metamórfico. Entretanto, medidas calculadas previamente (Moraes, 1997),

incluindo o quartzo na associação mineral, podem ser observadas nas tabelas 6 e 7, e estas são comparadas com as novas medidas de temperatura e pressão, calculadas a partir do programa THERMOCALC.

Pode-se perceber que os valores de temperatura calculados com o termômetro granada-clinopiroxênio sempre apresentam resultados mais baixos do que os produzidos pelo THERMOCALC (Tabela 6). No entanto, os valores de pressão calculados com o barômetro GADS, feitos por Moraes (1997) e admitindo quartzo presente na associação mineral, são similares aos calculados com o THERMOCALC (Tabela 7).

Tabela 6. Cálculo de temperatura para amostras do anfibolito Cafelândia com o termômetro granada-clinopiroxênio e com o THERMOCALC.

	<i>THERMOCALC</i>	<i>E &amp; G</i>	<i>Powell</i>	<i>Krogh</i>
803-55-1	830 ± 56	767	751	738
803-55-2		789	773	763
803-55-3		760	742	730
803-145-1		753	734	716
803-145-2	893 ± 58	760	741	722
RM-135-1		720	701	679
RM-135-2		779	762	750
RM-135-3	889 ± 53	770	752	738
RM-322-2	891 ± 88	739	720	688
RM-422-2	859 ± 83	760	742	726

Os cálculos de *T* com o termômetro granada-clinopiroxênio foram extraídos de Moraes (1997). O último número após o número das amostras identifica o campo analisado. Temperaturas em °C. Para o cálculo de temperatura, foram usados o THERMOCALC e o geotermômetro granada - clinopiroxênio (E & G - Ellis & Green 1979, Powell - Powell 1985, Krogh - Krogh 1988).

Levando-se em conta os valores calculados com o THERMOCALC, 10.2 kbar e 825° C e máximas de 13.3 kbar e 1001° C (Fig. 40), conclui-se as condições de pressão e temperatura são semelhantes aos dos experimentos de Patiño Douce & Beard (1995 - Fig. 41), Wolf & Wyllie (1991) e Vielzeuf & Schmidt (2001).

Tabela 7. Cálculo de pressão para amostras do anfibolito Cafelândia com o barômetro granada-clinopiroxênio-plagioclásio-quartzo e com o THERMOCALC.

	<i>THERMOCALC</i>	GADS - <i>N &amp; P</i>	GADS - <i>N</i> & <i>PC</i>	GADS - <i>Eckert</i>	GADS - <i>P &amp;</i> <i>H</i>
803-55-1	10,86 ± 0,93	7,32	8,92	9,93	9,43
803-55-2	-	7,52	9,12	10,17	9,64
803-55-3	-	7,07	8,67	9,7	9,08
803-145-1	-	6,95	8,55	9,65	8,84
803-145-2	9,95 ± 1,04	6,95	8,55	9,66	8,83
RM-135-1	-	7,01	8,61	9,75	8,93
RM-135-2	-	8,02	9,62	10,74	10,00
RM-135-3	10,44 ± 0,97	7,84	9,44	10,59	9,79
RM-322-2	11,41 ± 1,56				
RM-422-2	11,05 ± 1,52	6,2	7,8	8,69	8,06

Os cálculos de *P* com o barômetro granada-clinopiroxênio-plagioclásio-quartzo foram extraídos de Moraes (1997). Tabela 6b: Pressão calculada com o THERMOCALC e três calibrações do GADS (*N & P* - Newton & Perkins 1981; com correção empírica; *Eckert* - Eckert *et al.* 1991; *P & H* - Powell & Holland 1988).

## 7. Metamorfismo

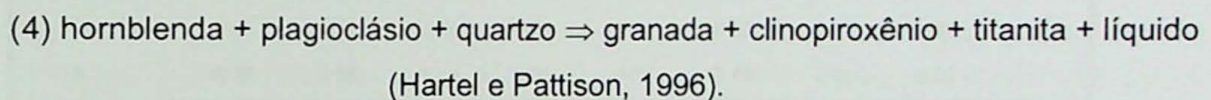
### 7.1. Metamorfismo e fusão de rochas máficas

A região de ocorrência do anfibolito Cafelândia apresenta grande variedade de rochas metamórficas e por isso torna-se interessante para o estudo das condições do metamorfismo. Para a classificação das condições metamórficas que atingiram o anfibolito Cafelândia serão feitas interpretações das descrições petrográficas, a fim de determinar as paragêneses principais.

Apesar de descrito como anfibolito, algumas de suas bandas apresentam paragêneses de fácies granulito caracterizadas pelas associações clinopiroxênio + granada + quartzo e ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio ± hornblenda (Yardley, 2004). A ocorrência de mobilizados tonalíticos em associação comum com o anfibolito Cafelândia e a presença da lente de granulito félsico alojada em meio à unidade são aspectos de campo que confirmam as

condições do metamorfismo de temperatura elevada (Moraes, 1997). A caracterização do metamorfismo granulítico na unidade é dificultada pela grande quantidade modal de hornblenda na rocha (Moraes, 1997).

Em se tratando dos cristais de granada, piroxênio e hornblenda, o crescimento inicial das duas primeiras ocorre ao longo de bordas da hornblenda e com o aumento progressivo da reação, os porfiroblastos de granada e clinopiroxênio se desenvolvem, à semelhança do que foi observado por Hartel & Pattison (1996). Além dessas feições que indicam metamorfismo progressivo, observam-se outras como a granada intercrescida com clinopiroxênio (Fig. 19), inclusões de clinopiroxênio em cristais de granada, a hornblenda em contato estável com o clinopiroxênio (Fig. 15) e o clinopiroxênio metamórfico com lamelas de exsolução (Fig. 16), indicando que o metamorfismo atingiu altas temperaturas. Assim, estes diferentes tipos texturais são interpretados como representantes de diferentes estágios do crescimento progressivo da granada, do clinopiroxênio e da titanita à medida que a hornblenda e o plagioclásio são consumidos, marcados pela reação:



As texturas apresentadas acima se relacionam com as texturas formadas por cristais de quartzo e plagioclásio, que se apresentam, em sua maioria, em segregações granoblásticas e por vezes em pequenas porções e/ou filetes entre os minerais, neste caso a textura é formada principalmente pelo quartzo (Fig. 10, 11, 12, 23 e imagens do MEV Fig. 26, 27 e 31). Essas duas texturas sugerem diferentes modos de origem pela qual o quartzo intersticial e os filmes de plagioclásio + quartzo são remanescentes de textura produzida a partir de produtos da fusão parcial, mostrada em experimentos de Mehnert *et al.* (1973), Paquet & François (1980), Jurewicz & Watson (1984), Hacker (1990) e Wolf & Wyllie (1991). Conseqüentemente, o quartzo observado na rocha não constituía fase mineral individualizada no período de pico metamórfico, constituía pequenos volumes remanescentes de fusão fracionada. Sendo assim, o quartzo intersticial formou-se após o pico metamórfico, quando da cristalização tardia dos líquidos remanescentes.

O processo que desencadeou a formação de fase fundida, e conseqüentemente as texturas de quartzo e plagioclásio em filmes intersticiais e filetes foi a fusão por desidratação da hornblenda. Segundo Patiño Douce & Beard (1995), experimentos realizados em quartzo anfíbolito sintético descrevem a evolução do metamorfismo e destacam as reações de fusão da hornblenda e as reações progressivas de fusão por desidratação. A reação de fusão da hornblenda inicia-se a  $P \leq 10 \text{ kbar}$ , ocorrendo consumo de hornblenda e quartzo (hornblenda  $\gg$  quartzo) para a formação de plagioclásio, piroxênio (clinopiroxênio  $\gg$  ortopiroxênio), óxidos e líquido. Todo o conteúdo de álcalis é derivado da hornblenda e produz líquido granitóide, que

inicialmente varia entre 16% e 25% em volume. Entre 5 e 10kbar a proporção de plagioclásio produzido pela reação de fusão decresce, enquanto a proporção de clinopiroxênio aumenta. Com o aumento de pressão, ocorre a quebra da hornblenda, que resulta na liberação de Ca e Na no sistema, e a formação de clinopiroxênio, ao invés de plagioclásio, e líquido. O Ca liberado no sistema é consumido na formação do clinopiroxênio, enquanto o Na, permanece no líquido. Em pressões maiores que 10 kbar, começa a ser formada a granada, enquanto o plagioclásio passa a ser consumido, como visto na tabela 8.

	Amp	Qtz	Plg	Melt	Opx	Cpx	Ox	Gar
<i>Synthetic quartz amphibolite (SQA)</i>								
3	0.80	0.20	= 0.04	0.24	0.28	0.39	0.04	
5	0.84	0.16	= 0.13	0.16	0.25	0.41	0.05	
7	0.82	0.18	= 0.08	0.22	0.22	0.45	0.02	
10	0.86	0.14	= 0.02	0.25	0.20	0.51	0.02	
12.5	0.83	0.12	0.05 =	0.21	0.24	0.46	0.01	0.08
15	0.75	0.05	0.19 =	0.21	0.11	0.46	0.01	0.22

Tabela 8: Estequiometria das reações do processo de fusão por desidratação. Composições do líquido (Melt), do piroxênio (Opx e Cpx), da granada (Grt) e dos óxidos (Ox) (Patino Douce & Beard, 1995).

A partir da interpretação das feições petrográficas e da caracterização da paragênese predominante na rocha, definiu-se o campo de pressão e temperatura. Para isso foi utilizado o diagrama de pressão e temperatura do quartzo anfibolito sintético, pelos quais quartzo, plagioclásio e titanita estão sempre presentes e a paragênese predominante é anfibólio (hornblenda) – ortopiroxênio – clinopiroxênio – líquido – granada (Fig. 41). Assim, as condições de metamorfismo estão em: pressões em torno de 10 e 17 kbar e temperaturas em torno de 900° e 960° C. Retrometamorfismo é evidenciado na Fig. 18 pelo cristal de clinopiroxênio envolto por hornblenda, com associações de clinozoisita e carbonato nas bordas e na Fig. 14 pela hornblenda tardia envolvendo o cristal de clinopiroxênio.

Cabe aqui a seguinte pergunta, nos experimentos realizados por Patino Douce & Beard (1995), o quartzo realmente permaneceu no estado sólido ao longo de todas as condições do experimento? Pelas feições texturais observadas no anfibolito Cafelândia, isso parece improvável.

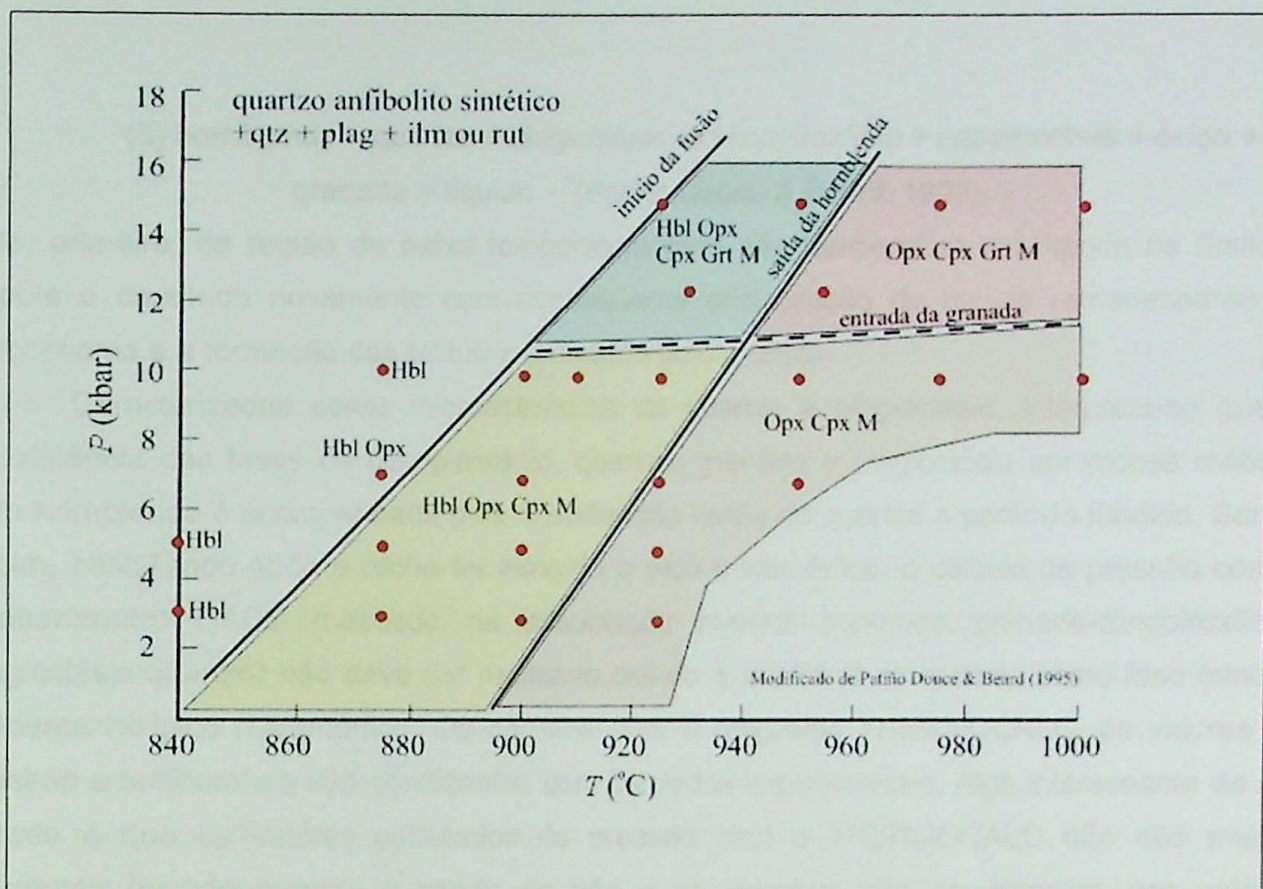


Figura 41: A rocha encontra-se no campo de coloração azulada, marcada pela paragênese Hbl-Opx-Cpx-Grt-Líquido. Modificado de Patiño Douce & Beard, 1995.

## 8. Discussões

A partir da bibliografia estudada, da petrografia, do trabalho de campo, das imagens realizadas com o MEV, das análises químicas compiladas de Moraes (1997) e análises químicas realizadas com a microsonda eletrônica para a lâmina BAR-04, foi possível estimar as condições de metamorfismo e reconhecer e mapear as microestruturas formadas pelos grãos de quartzo, de modo a identificar a importância do mesmo durante o metamorfismo e a fusão.

Pelas descrições petrográficas foram observadas microestruturas que confirmam que a rocha passou por processo de fusão por desidratação. Quartzo na forma de filmes, filetes e grãos intersticiais formam importantes feições que indicam que a rocha sofreu fusão parcial. Em escala de afloramento, a rocha também apresenta características marcantes de fusão, como os veios de leucossoma (Fig. 5). O quartzo presente na rocha é proveniente da cristalização tardia do fundido, gerado pela fusão por desidratação da hornblenda, que gera o fundido insaturado em H<sub>2</sub>O e fases peritéticas, provavelmente pelo cruzamento da reação:

(5) hornblenda + quartzo + plagioclásio  $\Rightarrow$  clinopiroxênio + ortopiroxênio + óxido + granada + líquido (Patiño Douce & Beard, 1995),

indo, primeiro, da região de baixa temperatura para alta temperatura resultando na fusão e depois a cruzando novamente com conseqüente cristalização do líquido remanescente no leucossoma e a formação das texturas formadas pelo quartzo.

Caracterizadas essas microestruturas do quartzo e plagioclásio, interpreta-se que a coexistência das fases de clinopiroxênio, quartzo, granada e plagioclásio em rochas máficas com hornblenda é acompanhada pela cristalização tardia do quartzo a partir do fundido. Sendo assim, cristalizado após a rocha ter atingido o pico metamórfico, o cálculo de pressão com o geobarômetro GADS (baseado na associação mineral contendo granada-clinopiroxênio-plagioclásio-quartzo) não deve ser realizado devido à ausência de quartzo como fase mineral presente no pico metamórfico. Os cálculos com o programa THERMOCALC, os valores de pressão e temperatura são condizentes com os dados experimentais. Algo interessante de ser notado é que os valores calculados de pressão com o THERMOCALC não são muitos diferentes quando quartzo é usado ou não e os mesmos são semelhantes aos valores supostamente errôneos calculados com o GADS.

## 9. Conclusões

O Anfibolito Cafelândia apresenta bandamento marcante, definido pela variação na proporção modal de hornblenda, plagioclásio, titanita, clinopiroxênio, granada e quartzo. Veios de leucossoma, concordantes e discordantes são observados no bandamento, indicando que a rocha entrou em fusão. Apesar de descrito como anfibolito, algumas de suas bandas apresenta paragênese de fácies granulito caracterizadas pela associação ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio  $\pm$  hornblenda. Sendo assim, a caracterização do metamorfismo granulítico na unidade é dificultada pela grande quantidade modal de hornblenda na rocha (Moraes, 1997). Outras evidências que caracterizam o anfibolito Cafelândia em fácies granulito, podem ser observadas em campo e em cálculos de geotermobarometria. Em se tratando do campo, são descritos mobilizados tonalíticos em associação comum com o anfibolito Cafelândia e lentes de granulito félsico alojados em meio à unidade. Estes confirmam que as condições do metamorfismo atingiram temperaturas elevadas. Além disso, os cálculos de geotermobarometria indicam condições de metamorfismo da fácies granulito, em torno de 870 °C e 10,9 kbar, como observados nas tabelas 5, 6 e 7.

Os cálculos foram realizados para estabelecer as condições de metamorfismo da rocha. A associação mineral utilizada para a caracterização do auge do metamorfismo não

apresentava quartzo. Para caracterizar a presença ou a ausência do quartzo foram realizadas descrições petrográficas e imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura, com a finalidade de destacar as texturas do quartzo. Através dessas análises observou-se que o quartzo apresenta-se em filetes e filmes intersticiais ou bordejando os grãos de hornblenda. Estas feições indicam que o quartzo não estava presente na paragênese do pico metamórfico. O quartzo é produto de cristalização tardia de líquido remanescente na rocha. A fusão por desidratação da hornblenda resulta na formação de fundido quartzo-feldspático e a cristalização desse líquido remanescente, tardiamente, resultou na formação dos filmes de quartzo.

Definido o caráter do quartzo, foram realizadas as análises de geotermobarometria utilizando-se o programa THERMOCALC. As amostras usadas na análise foram a RM-135, a 803-145, a 803-055, a RM-322, a RM-422 e a BAR-04. Como foi caracterizada a ausência do quartzo durante o auge do metamorfismo, os cálculos mais confiáveis foram aqueles feitos sem quartzo na paragênese (vide tabela 5). Estes valores foram plotados em diagrama de temperatura e pressão (Fig. 40). Os pontos concentram-se nos intervalos entre 10 e 13 kbar e 785 e 914 °C, podendo ser observado que os mesmos plotam dentro das condições da fácies granulito. Ao comparar este diagrama com o diagrama de Patiño Douce & Beard (1995, Fig. 41), conclui-se que os valores de temperatura e pressão encontrados pelo programa THERMOCALC são compatíveis com os valores experimentais determinados pelos referidos experimentos. Estes valores equivalem ao campo da associação mineral hornblenda, clinopiroxênio, ortopiroxênio, granada e fluido, coincidentemente semelhante à associação mineral encontrada no anfibolito Cafelândia.

Sendo assim, as condições do metamorfismo, estabelecidas em torno de 770 °C e 8,5 kbar (Moraes, 1997), são incompatíveis com os dados experimentais disponíveis para fusão de anfibolito com geração de líquido granítico e granada + clinopiroxênio peritéticos. Para isso são necessárias condições mínimas de 880 °C a 10 kbar, segundo os dados experimentais de Patiño Douce & Beard (1995) ou 900 °C a 10 kbar, segundo Vielzeuf & Schmidt (2001), valores compatíveis com os calculados pelo THERMOCALC, em torno de 870° C e 10,88 kbar.



## 10. Referências bibliográficas

- Aranovich, L.Y. & Pattison, D.R.M. 1995. Reassessment of the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer: I. Evaluation of the Pattison and Newton (1989) experiments. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119: 16-29.
- Berman, R. G., Aranovich, L. Y. & Pattison, D. R. M., 1995. Reassessment of the Garnet-Clinopyroxene Fe-Mg Exchange Thermometer .2. Thermodynamic Analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119: 30-42.
- Correia, C.T. 1994. Petrologia do Complexo Máfico-ultramáfico de Cana Brava, Goiás. 151 p. (Tese de Doutorado. IG/USP).
- Danni, J.C.M., Fuck, R.A., Leonardos, O.H. 1982. Archean and Lower Proterozoic units in Central Brazil. *Geol. Rundschau*, 71 (1): 291-317.
- Danni, J.C.M., Fuck, R.A., Kuyumjian, R.M., Leonardos, O.H., Winge, M. 1984. O Complexo Barro Alto na Região de Ceres – Rubiataba, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 14 (2): 128-136.
- Deer, W.A., Howie, R.A & Zussman, J. 1992. An introduction to the rock-forming minerals. Harlow, England : Longman Scientific & Technical ; New York, NY : Wiley, 1992. 696 p
- Eckert, J.O., Newton, R.C. & Kleppa, O.J. 1991. The  $\Delta H$  of reaction and recalibration of garnet-pyroxene-plagioclase-quartz geobarometers in the CMAS system by solution calorimetry. *American Mineralogist*, 76: 148-160.
- Ellis, D.J. & Green, D.H. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 71: 13-22.
- Ferreira Filho, C.F., Kamo, S.L., Fuck, R.A., Krogh, T.E., Naldrett, A.J. 1994. Zircon and rutile U-Pb geochronology of the Niquelândia layered mafic and ultramafic intrusion, Brazil: constraints for the timing of the magmatism and high grade metamorphism. *Precambrian Research*, 68: 241-255.
- Fuck, R.A., Marini, O.J. 1981. O Grupo Araxá e unidades homotaxiais. Simposio sobre o Cráton São Francisco e suas Faixas Marginais, Salvador, Anais, SBG/CPM, 1: 118-130.
- Fuck, R.A., Pimentel, M.M., Silva, L.J.H. 1994. Compartimentação tectônica na porção oriental da Província Tocantins. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38. Balneário Camboriú, 1994, Boletim de Resumos Expandidos v.1. Camboriú, SBG, p. 215-216.
- Fyfe, W.S. 1973. The granulite facies, partial melting and the Archaean crust. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 273A: 457-461.

- Girardi, V. A. V., Kawashita, K., Basai, M. A. S. & Cordani, U. G., 1978. Algumas consideracoes sobre a evolucao geológica da região de Cana Brava, a partir de dados geocronológicos. In: Sociedade Brasileira de Geologia; anais do XXX congresso (ed Gomes Farias, C.E.), pp. 337-348, Sociedade Brasileira de Geologia
- Girardi, V.A.; Rivalenti,G.; Siena,F. & Sinigoi, S. 1981. Precambrian Barro Alto Complex of Goiás, Brazil: Bulk geochemistry and phase equilibria. N. Jb. Miner. Abh. 142 (3): 270 - 291.
- Girardi, V.A.; Rivalenti,G. & Sinigoi, S. 1986. The petrogenesis of the Niquelândia layered basic-ultrabasic Complex, central Goiás, Brazil. Journal of Petrology, 27 (3): 715 – 744.
- Gomes, C.B. 1984. Microsonda Eletrônica: princípios e aplicações na geologia. In: Técnicas analíticas e instrumentais aplicadas à geologia, Cap.5.
- Green, D.H. & Ringwood, A.E. 1967. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. Geochimica et Cosmochimica Acta, 31: 767-833.
- Hacker, B.R. 1990. Amphibolite facies-to-granulite facies reactions in experimentally deformed, unpowdered amphibolite. American Mineralogist, 75: 1349-1361.
- Harley, S.L 1984. An experimental study of the partitioning of the Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. Contributions to Mineralogy and Petrology, 86: 359-373.
- Hartel, T.H.D. & Pattison, R.M. 1996. Genesis of the Kapuskasing (Ontario) migmatitic mafic granulites by dehydration melting of amphibolite: the importance of quartz to reaction progress. Journal of Metamorphic Geology, 14: 591-612.
- Holland, T.J.B. & Blundy, J.D. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. Journal of Contributions to Mineralogy and Petrology, 116 (4): 433-447.
- Holland, T.J.B. & Powell, R. 1985. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 2. Data and results. Journal of Metamorphic Geology. 3: 343 - 370.
- Holland, T.J.B. & Powell, R. 1990 An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations in the system: K<sub>2</sub>O - Na<sub>2</sub>O - CaO - MgO - MnO - FeO - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> - TiO<sub>2</sub> - C - H<sub>2</sub> - O<sub>2</sub>. Journal of Metamorphic Geology, 8: 89 - 124.
- Holland, TJB, and Powell, R, 2001 Calculation of phase relations involving haplogranitic melts using an internally-consistent thermodynamic dataset Journal of Petrology, 42: 673 - 683
- Jurewicz, S.R. & Watson, E.B. 1984. Distribution of partial melt in a felsic system: the importance of surface energy. Contributions to Mineralogy and Petrology, 85: 25-29.
- Krogh, E. J. 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer - a reinterpretation of existing experimental data. Contributions to Mineralogy and Petrology, 99: 44-48.

- Mehnert, K.R., Busch, W. & Schneider, G. 1973. Initial melting at grain boundaries of quartz and feldspar in gneisses and granulites. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte*, 1973: 165-183.
- Moraes, R., Fuck, R.A., Pimentel, M.M., Gioia, S.M.C.L., Hollanda, M.H.B.M., Armstrong, R. 2006. The bimodal rift-related Juscelândia volcano-sedimentary Sequence in Central Brazil: Mesoproterozoic extension and Neoproterozoic metamorphism. *Journal of South America Earth Sciences*, 20: 287-301.
- Moraes, R. 1997. Condições e evolução do metamorfismo no Complexo Barro Alto e litogeoquímica do vulcanismo bimodal da seqüência Juscelândia, Goianésia, Goiás. Instituto de Geociências - Universidade de Brasília. PhD Thesis. p 385.
- Newton, R.C. & Perkins, D. 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblage garnet - plagioclase - orthopyroxene (clinopyroxene) - quartz. *American Mineralogist*, 67: 203-222.
- Paquet, J. & Francois, P. 1980. Experimental deformation of partially melted granitic rocks at 600° – 900°C and 250 MPa confining pressure. *Tectonophysics*, 68: 131-146.
- Patiño Douce, A.E. & Beard, J.S. 1995. Dehydration Melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, 36: 707-738.
- Pattison, D.R.M. & Newton, R.C. 1989. Reversed experimental calibration of the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 101: 87-103.
- Percival, J.A. 1983. High-grade metamorphism in the Chapleau - Foleyet Area, Ontario. *American Mineralogist*, 68: 667-686.
- Perkins, D. & Chipera, S.J. 1985. Garnet-orthopyroxene-plagioclase-quartz geobarometry: refinements and application to the English River subprovince and the Minnesota River Valley. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 89: 69-80.
- Philpotts, A.R. 1990. *Principles Of Igneous And Metamorphic Petrology*. Prentice Hall, New Jersey, 498.
- Powell, R. & Holland, T.J.B. 1988. An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: 3 Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *Journal of Metamorphic Geology*, 6: 173-204.
- Powell, R. 1985. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer /geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited. *Journal of Metamorphic Geology*, 3: 231-243.
- Robinson, P., Spear, F.S., Schumacher, J.C., Laird, J., Klein, C., Evans, B.W. & Doolan, B.L. 1982. Phase relations of metamorphic amphiboles: natural occurrence and theory. *Reviews in Mineralogy*. 9B: 1 - .

- Smith, J.V. & Brown, W.L. Feldspar Minerals 1. crystal structures, physical, chemical and microtextural properties. 2nd ed. Heidelberg, Springer-Verlag. 828p.
- Spear, F.S. 1993. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time Paths. Mineralogical Society of America Monograph. Chelsea, Michigan. 799p.
- Suita, M.T.F.; Kamo, S. L.; Krough, T.E.; Fyfe, W.S. & Hartmann, L.A. 1994. U-Pb ages from the high-grade Barro Alto mafic-ultramafic Complex (Goiás, central Brazil): Middle Proterozoic continental mafic magmatism and the Upper Proterozoic continental collision. In: Eighth International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology. Berkeley, 1994. US Geological Survey Circular 1107. Berkeley. p. 309.
- Suita, M.T.F. 1996. Geoquímica e metalogenia de elementos do grupo da Platina (EGP + Au) em complexos máfico-ultramáficos do Brasil: critérios e guias com ênfase no Complexo máfico-ultramáfico acamadado de alto grau de Barro Alto (CBA, Goiás). Tese de Doutorado. IG-UFRGS. 600 p.
- Vielzeuf, D. & Schmidt, M.W. 2001. Melting relations in hydrous systems revisited: application to metapelites, metagreywackes and metabasalts. *Contrib. Mineral Petrol.*, 141: 251-267
- Wolf, M.B. & Wyllie, P.J. 1991. Dehydration-melting of solid amphibolite at 10 kbar: textural development, liquid interconectivity and applications to the segregation of magmas. *Mineralogy and Petrology*, 44: 151-179.
- Yardley, B.W.D. 2004. Introdução à petrologia metamórfica. Editora UnB. Brasília. 340p.

# ANEXO I

Tabela com as análises químicas dos minerais da amostra BAR-04

Hornblenda

	11N1	11B1	11B2	12B1	12N1	12B2	13B1	13N1	13N2	13B2	31N1	31B1	31B2	32B1
SiO2	43.22	42.90	43.25	43.78	43.04	42.83	43.15	42.91	42.88	38.81	42.58	43.11	43.26	42.94
TiO2	0.95	1.04	1.04	1.19	1.07	1.13	1.01	1.47	1.32	1.08	1.17	0.93	1.02	1.14
Al2O3	12.75	12.94	12.55	11.37	11.94	12.16	12.71	12.15	12.35	20.71	13.25	13.06	13.46	12.70
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	1.81	1.56	1.90	2.47	1.90	3.00	1.58	1.36	3.63	2.96	2.39	1.79	0.57	2.28
FeO	16.96	17.01	16.98	16.39	16.40	15.97	16.44	16.87	16.15	13.68	17.37	17.44	17.47	16.94
MnO	0.21	0.19	0.17	0.14	0.15	0.19	0.15	0.21	0.28	0.21	0.12	0.11	0.13	0.09
MgO	8.30	8.17	8.38	9.07	8.79	8.69	8.68	8.52	8.53	7.48	8.03	8.19	8.00	8.28
CaO	11.79	11.71	11.88	11.59	11.64	11.60	11.80	11.69	11.36	10.59	11.73	12.02	12.00	11.71
Na2O	1.58	1.55	1.53	1.54	1.62	1.57	1.54	1.55	1.69	1.39	1.71	1.61	1.37	1.48
K2O	0.35	0.39	0.35	0.36	0.34	0.34	0.38	0.40	0.38	0.32	0.44	0.41	0.50	0.39
Total	97.93	97.45	98.03	97.90	96.89	97.48	97.45	97.13	98.57	97.24	98.81	98.67	97.78	97.96
Oxigênio	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23.00
Si	6.473	6.455	6.473	6.550	6.506	6.443	6.475	6.479	6.396	5.763	6.353	6.425	6.476	6.436
Ti	0.107	0.117	0.117	0.134	0.122	0.128	0.114	0.167	0.148	0.121	0.132	0.104	0.115	0.129
Al	2.251	2.295	2.215	2.006	2.127	2.156	2.249	2.163	2.172	3.625	2.330	2.294	2.376	2.245
Cr	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
Fe3	0.204	0.177	0.214	0.278	0.216	0.340	0.178	0.154	0.407	0.331	0.269	0.201	0.064	0.258
Fe2	2.124	2.140	2.125	2.051	2.074	2.009	2.063	2.131	2.015	1.699	2.167	2.174	2.187	2.123
Mn	0.026	0.024	0.021	0.017	0.019	0.024	0.019	0.026	0.035	0.027	0.015	0.014	0.016	0.011
Mg	1.853	1.832	1.869	2.022	1.981	1.949	1.941	1.918	1.897	1.656	1.786	1.819	1.785	1.849
Ca	1.892	1.889	1.905	1.857	1.885	1.870	1.898	1.892	1.816	1.685	1.876	1.919	1.924	1.880
Na	0.459	0.452	0.445	0.447	0.475	0.458	0.449	0.454	0.488	0.400	0.496	0.466	0.399	0.431
K	0.066	0.074	0.067	0.070	0.065	0.065	0.073	0.078	0.073	0.061	0.084	0.079	0.095	0.075
Soma	15.456	15.455	15.451	15.432	15.470	15.443	15.458	15.461	15.447	15.368	15.506	15.495	15.436	15.437
XMg	0.466	0.461	0.468	0.496	0.489	0.492	0.485	0.474	0.485	0.494	0.452	0.456	0.449	0.466

Hornblenda

	32N1	32N2	32B2
SiO2	41.76	42.74	43.19
TiO2	1.52	1.35	1.10
Al2O3	12.59	12.94	12.70
Cr2O3	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	2.47	1.30	1.06
FeO	17.01	18.22	18.07
MnO	0.10	0.09	0.11
MgO	8.07	7.87	8.05
CaO	11.65	11.82	11.84
Na2O	1.67	1.69	1.74
K2O	0.38	0.42	0.37
Total	97.22	98.45	98.23
Oxigênio	23	23	23
Si	6.338	6.405	6.471
Ti	0.174	0.153	0.124
Al	2.253	2.285	2.243
Cr	0.000	0.000	0.000
Fe3	0.282	0.147	0.120
Fe2	2.159	2.284	2.265
Mn	0.013	0.011	0.014
Mg	1.825	1.757	1.797
Ca	1.895	1.899	1.901
Na	0.492	0.491	0.505
K	0.074	0.081	0.072
Soma	15.504	15.512	15.512
XMg	0.458	0.435	0.442

Para o anfíbólio a normalização é feita para 23 oxigênios e o Fe3+ é calculado de acordo com Holland & Blundy, 1994.

## Granada

	11B1	11B2	11I1	11I2	11I3	11I4	11I5	11I6	11B3	11B4	12B1	12B2
SiO2	37.72	37.63	37.92	37.71	37.22	37.43	37.52	37.84	37.85	37.74	37.57	36.58
TiO2	0.06	0.07	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.02	0.09	0.06	0.03	0.07
Al2O3	21.37	21.37	21.44	21.74	21.29	21.09	21.46	21.73	21.63	21.46	21.22	20.75
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	0.00	0.48	0.31	0.66	0.97	0.51	0.95	0.42	0.37	1.13	0.02	0.69
FeO	24.73	24.76	24.91	24.96	24.04	24.77	24.19	24.96	25.03	24.91	25.07	23.98
MnO	2.52	2.52	2.66	2.63	2.57	2.59	2.73	2.71	2.60	2.79	2.38	2.36
MgO	2.00	2.15	2.22	2.29	2.29	2.32	2.34	1.92	2.20	2.06	1.95	2.25
CaO	11.03	10.86	10.76	10.45	10.75	10.35	10.73	11.05	10.73	10.76	10.91	10.47
Na2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.44	99.84	100.22	100.44	99.16	99.12	99.95	100.66	100.52	100.93	99.17	97.16
Oxigênio	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Si	2.999	2.983	2.993	2.971	2.969	2.989	2.969	2.978	2.980	2.968	2.999	2.979
Ti	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.001	0.005	0.004	0.002	0.004
Al	2.003	1.997	1.995	2.019	2.002	1.986	2.003	2.016	2.008	1.989	1.997	1.991
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe3	0.000	0.028	0.018	0.039	0.058	0.031	0.056	0.025	0.022	0.067	0.001	0.042
Fe2	1.644	1.642	1.644	1.644	1.604	1.654	1.601	1.642	1.648	1.638	1.674	1.633
Mn	0.170	0.169	0.178	0.175	0.174	0.175	0.183	0.181	0.174	0.186	0.161	0.163
Mg	0.237	0.254	0.261	0.269	0.273	0.277	0.276	0.225	0.258	0.241	0.232	0.273
Ca	0.940	0.923	0.911	0.883	0.919	0.886	0.911	0.932	0.906	0.907	0.935	0.915
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Soma	7.996	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
almandina	54.96	54.95	54.91	55.33	54.01	55.28	53.89	55.10	55.19	55.11	54.73	55.37
piropo	7.92	8.50	8.72	9.05	9.19	9.26	9.29	7.55	8.64	8.11	9.15	9.10
espessartita	5.68	5.66	5.95	5.89	5.86	5.85	6.16	6.07	5.83	6.26	5.46	5.90
grossulária	31.43	30.89	30.43	29.72	30.94	29.61	30.66	31.28	30.34	30.52	30.66	29.63



## Granada

	12I1	12I2	12I3	12I4	12I5	12I6	12B3	12B4	31B1	31B2	31I1	31I2	31N1	31I3	31I4
SiO2	37.81	37.31	36.70	38.08	37.12	36.72	37.56	37.61	37.87	37.79	36.59	37.36	37.65	37.63	37.31
TiO2	0.15	0.07	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.05	0.03	0.07	0.04	0.01	0.05	0.05	0.13
Al2O3	21.18	21.21	20.84	21.39	21.03	20.90	21.45	21.51	21.53	21.30	20.82	20.99	21.27	20.93	20.92
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	0.44	0.43	0.95	0.21	0.69	1.35	0.13	0.28	0.00	0.41	1.06	0.63	0.71	0.76	0.92
FeO	25.12	24.36	23.97	25.06	24.36	23.61	24.49	24.73	25.66	25.79	25.26	25.52	25.37	25.13	24.93
MnO	2.64	2.60	2.52	2.71	2.53	2.57	2.64	2.69	1.73	1.98	1.90	1.85	2.03	1.91	1.81
MgO	2.31	2.35	2.29	2.36	2.36	2.40	2.33	2.25	2.12	2.29	2.32	2.40	2.28	2.18	2.16
CaO	10.48	10.53	10.36	10.56	10.35	10.48	10.60	10.57	10.85	10.44	9.73	10.16	10.60	11.00	11.03
Na2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.13	98.87	97.66	100.39	98.46	98.03	99.21	99.71	99.80	100.08	97.72	98.92	99.97	99.61	99.22

## Oxigênio

	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Si	2.990	2.983	2.974	3.000	2.982	2.964	2.989	2.983	2.998	2.990	2.969	2.990	2.982	2.993	2.979
Ti	0.009	0.004	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	0.002	0.004	0.002	0.001	0.003	0.003	0.008
Al	1.975	1.999	1.991	1.987	1.992	1.989	2.013	2.011	2.009	1.987	1.992	1.981	1.986	1.962	1.969
Cr	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	0.000
Fe3	0.026	0.026	0.058	0.013	0.042	0.082	0.008	0.016	0.000	0.025	0.064	0.038	0.043	0.045	0.055
Fe2	1.661	1.629	1.625	1.651	1.637	1.594	1.631	1.640	1.699	1.706	1.714	1.708	1.681	1.671	1.665
Mn	0.177	0.176	0.173	0.181	0.172	0.176	0.178	0.181	0.116	0.132	0.131	0.125	0.136	0.129	0.122
Mg	0.273	0.280	0.277	0.277	0.282	0.288	0.276	0.267	0.250	0.270	0.280	0.286	0.269	0.258	0.257
Ca	0.889	0.903	0.900	0.892	0.892	0.907	0.905	0.900	0.921	0.886	0.847	0.872	0.901	0.938	0.944
Na	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	0.000
K	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	0.000
Soma	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	7.996	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000

almandina  
piropo  
espessartita  
grossulária

	54.52	54.62	55.01	54.59	53.76	54.55	54.89	56.90	56.90	56.98	57.67	57.10	56.28	55.77	55.72
	9.37	9.31	9.23	9.52	9.71	9.23	8.94	8.37	8.37	9.02	9.42	9.56	9.01	8.61	8.60
	5.89	5.82	6.03	5.58	5.94	5.95	6.06	3.88	3.88	4.41	4.41	4.18	4.55	4.31	4.08
	30.22	30.25	29.72	30.31	30.59	30.27	30.12	30.84	30.84	29.59	28.50	29.15	30.16	31.31	31.59

## Granada

	31B3	31B4	32B1	32B2	32I1	32I2	32N1	32N2	32I3	32I4	32B3	32B4
SiO <sub>2</sub>	37.28	37.39	37.53	37.81	37.52	37.15	37.51	37.66	37.86	37.79	37.78	37.35
TiO <sub>2</sub>	0.09	0.12	0.09	0.05	0.04	0.00	0.12	0.10	0.05	0.02	0.09	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.12	21.26	20.99	21.27	20.86	20.86	21.06	20.94	21.43	21.35	21.19	21.28
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.06	0.07	0.84	0.64	0.79	1.37	1.44	1.16	0.00	0.00	0.24	0.15
FeO	24.87	25.55	25.41	25.63	24.99	24.72	24.87	25.18	25.58	25.29	25.52	25.06
MnO	1.80	1.80	1.91	2.06	1.92	1.98	1.90	2.03	1.93	1.96	1.86	1.52
MgO	2.08	1.94	2.29	2.23	2.19	2.19	2.21	2.19	2.21	2.21	2.17	1.89
CaO	11.14	10.92	10.56	10.60	10.98	10.76	11.10	10.92	10.39	10.92	10.92	11.53
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.45	99.07	99.63	100.30	99.30	99.05	100.22	100.19	99.45	99.55	99.78	98.87
Oxigênio	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Si	2.970	2.988	2.985	2.987	2.993	2.974	2.968	2.982	3.006	2.999	2.997	2.987
Ti	0.006	0.007	0.005	0.003	0.003	0.000	0.007	0.006	0.003	0.001	0.005	0.005
Al	1.984	2.003	1.968	1.981	1.961	1.969	1.965	1.955	2.006	1.998	1.981	2.007
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe <sub>3</sub>	0.064	0.004	0.050	0.038	0.047	0.082	0.086	0.069	0.000	0.001	0.014	0.009
Fe <sub>2</sub>	1.657	1.708	1.690	1.693	1.667	1.655	1.645	1.667	1.699	1.677	1.693	1.676
Mn	0.121	0.122	0.129	0.138	0.130	0.134	0.127	0.136	0.130	0.132	0.125	0.103
Mg	0.246	0.230	0.272	0.262	0.260	0.262	0.261	0.258	0.262	0.261	0.256	0.226
Ca	0.952	0.936	0.901	0.898	0.939	0.924	0.942	0.927	0.884	0.930	0.929	0.989
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Soma	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	7.989	8.000	8.000	8.000
almandina	55.68	57.01	56.48	56.60	55.64	55.63	55.29	55.79	57.11	55.90	56.38	55.98
piropo	8.27	7.68	9.09	8.76	8.68	8.81	8.77	8.63	8.81	8.70	8.52	7.55
espessartita	4.07	4.07	4.31	4.61	4.34	4.50	4.27	4.55	4.37	4.40	4.16	3.44
grossulária	31.99	31.24	30.11	30.02	31.34	31.06	31.66	31.02	29.71	31.00	30.94	33.03

Legenda: 11N/1B1, o primeiro número refere-se ao campo, o segundo refere-se ao cristal, N, I e B são respectivamente núcleo, interior e borda e o último número refere-se ao número de pontos realizados ao longo do cristal.

Para a granada, o Fe<sup>3+</sup> é calculado com normalização para 8 cátions e 12 oxigênios.

Clinopiroxênio

	11B1	11N1	11N2	11B2	12B1	12N1	12B2	31B1	31N1	31B2	32B1	32N1	32N2
SiO2	50.47	50.93	50.12	50.13	51.08	50.22	50.18	51.42	50.18	50.94	50.96	50.96	50.96
TiO2	0.13	0.16	0.27	0.07	0.01	0.18	0.17	0.09	0.23	0.13	0.28	0.28	0.28
Al2O3	1.62	1.76	1.72	2.31	1.06	1.73	1.68	1.41	2.98	1.70	1.74	1.74	1.74
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	2.81	1.50	2.28	2.13	2.34	2.32	1.36	1.55	1.11	1.66	1.87	1.87	1.87
FeO	10.77	11.90	11.31	10.09	10.43	11.58	11.29	11.14	12.63	11.76	12.38	12.38	12.38
MnO	0.31	0.34	0.35	0.24	0.36	0.28	0.35	0.13	0.24	0.19	0.23	0.23	0.23
MgO	10.22	10.01	10.12	10.60	10.86	10.13	10.21	10.59	9.58	10.10	9.69	9.69	9.69
CaO	22.96	22.68	22.50	22.72	22.95	22.26	22.20	23.11	22.29	22.90	22.86	22.86	22.86
Na2O	0.38	0.41	0.36	0.34	0.33	0.38	0.41	0.38	0.36	0.38	0.44	0.44	0.44
K2O	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.67	99.69	99.02	98.65	99.43	99.08	97.84	99.84	99.60	99.76	100.46	100.46	100.46
Oxigênio	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Si	1.933	1.949	1.933	1.928	1.954	1.936	1.952	1.958	1.924	1.948	1.942	1.942	1.942
Ti	0.004	0.005	0.008	0.002	0.000	0.005	0.005	0.003	0.007	0.004	0.008	0.008	0.008
Al	0.073	0.079	0.078	0.105	0.048	0.078	0.077	0.063	0.135	0.077	0.078	0.078	0.078
Cr	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
Fe3	0.081	0.043	0.066	0.062	0.067	0.067	0.040	0.044	0.032	0.048	0.054	0.054	0.054
Fe2	0.345	0.381	0.365	0.325	0.334	0.373	0.367	0.355	0.405	0.376	0.394	0.394	0.394
Mn	0.010	0.011	0.011	0.008	0.012	0.009	0.011	0.004	0.008	0.006	0.007	0.007	0.007
Mg	0.583	0.571	0.582	0.608	0.619	0.582	0.592	0.601	0.547	0.575	0.550	0.550	0.550
Ca	0.943	0.930	0.930	0.936	0.941	0.919	0.925	0.943	0.916	0.938	0.933	0.933	0.933
Na	0.028	0.030	0.027	0.026	0.025	0.029	0.031	0.028	0.027	0.028	0.032	0.032	0.032
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Soma	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
XMg	0.63	0.60	0.61	0.65	0.65	0.609	0.617	0.629	0.575	0.605	0.583	0.583	0.583

## Clinopiroxênio

	32B2	33B1	33I1	33N1	33I2	33B2	33B1	33I1	33N1	33I2	33B2	34B1	34N1	34B2	35B1
SiO2	51.17	51.51	51.01	50.82	50.60	50.83	51.51	51.01	50.82	50.60	50.83	50.74	49.44	50.09	50.21
TiO2	0.12	0.10	0.15	0.17	0.21	0.14	0.10	0.15	0.17	0.21	0.14	0.29	0.18	0.17	0.24
Al2O3	1.48	1.21	1.88	1.99	1.80	1.32	1.21	1.88	1.99	1.80	1.32	1.89	1.86	1.68	1.71
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	1.78	1.66	1.50	1.26	2.15	2.22	1.66	1.50	1.26	2.15	2.22	1.29	1.74	1.94	1.72
FeO	11.72	10.69	12.42	12.36	11.78	10.39	10.69	12.42	12.36	11.78	10.39	12.81	11.77	11.50	11.09
MnO	0.26	0.14	0.20	0.20	0.20	0.16	0.14	0.20	0.20	0.20	0.16	0.25	0.23	0.18	0.21
MgO	9.91	10.70	9.77	9.68	9.81	10.66	10.70	9.77	9.68	9.81	10.66	9.79	9.64	9.95	10.09
CaO	23.07	23.55	22.70	22.83	22.71	23.08	23.55	22.70	22.83	22.71	23.08	22.66	22.23	22.67	22.90
Na2O	0.45	0.34	0.43	0.40	0.46	0.38	0.34	0.43	0.40	0.46	0.38	0.29	0.34	0.34	0.35
K2O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00
Total	99.97	99.91	100.07	99.71	99.73	99.19	99.91	100.07	99.71	99.73	99.19	100.02	97.45	98.52	98.52
Oxigênio	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Si	1.954	1.959	1.948	1.947	1.939	1.948	1.959	1.948	1.947	1.939	1.948	1.942	1.939	1.941	1.942
Ti	0.003	0.003	0.004	0.005	0.006	0.004	0.003	0.004	0.005	0.006	0.004	0.008	0.005	0.005	0.007
Al	0.067	0.054	0.085	0.090	0.082	0.060	0.054	0.085	0.090	0.082	0.060	0.085	0.086	0.077	0.078
Cr	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	0.000
Fe3	0.051	0.048	0.043	0.036	0.062	0.064	0.048	0.043	0.036	0.062	0.064	0.037	0.051	0.057	0.050
Fe2	0.374	0.340	0.397	0.396	0.378	0.333	0.340	0.397	0.396	0.378	0.333	0.410	0.386	0.373	0.359
Mn	0.008	0.005	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.007	0.007	0.007	0.005	0.008	0.008	0.006	0.007
Mg	0.564	0.606	0.556	0.553	0.560	0.609	0.606	0.556	0.553	0.560	0.609	0.558	0.564	0.574	0.582
Ca	0.944	0.960	0.929	0.937	0.932	0.948	0.960	0.929	0.937	0.932	0.948	0.929	0.934	0.942	0.949
Na	0.033	0.025	0.032	0.030	0.034	0.028	0.025	0.032	0.030	0.034	0.028	0.021	0.026	0.025	0.026
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Soma	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
XMg	0.601	0.641	0.583	0.583	0.597	0.646	0.641	0.583	0.583	0.597	0.646	0.576	0.594	0.606	0.618

Clinopiroxênio

	35N1	35B2
SiO2	50.17	50.07
TiO2	0.21	0.19
Al2O3	1.85	1.58
Cr2O3	0.00	0.00
Fe2O3	1.52	1.23
FeO	12.61	11.42
MnO	0.25	0.13
MgO	9.50	10.09
CaO	22.33	22.68
Na2O	0.38	0.31
K2O	0.00	0.00
Total	98.82	97.70

Oxigênio	6	6
Si	1.944	1.952
Ti	0.006	0.005
Al	0.085	0.073
Cr	0.000	0.000
Fe3	0.044	0.036
Fe2	0.409	0.372
Mn	0.008	0.004
Mg	0.548	0.586
Ca	0.927	0.947
Na	0.029	0.024
K	0.000	0.000
Soma	4.000	4.000

XMg 0.573 0.612

Para o piroxênio, o Fe3+ calculado com normalização para 4 cátions e 6 oxigênios.

## Plagioclásio

	11B1	11I1	11N1	11N2	11I2	11B2	12B1	12N1	12N2	12B2	13B1	13I1	13N1	13I2
SiO2	57.52	54.76	55.82	54.18	55.20	55.00	56.42	55.18	54.69	54.28	55.61	55.65	55.56	55.62
TiO2	0.06	0.04	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Al2O3	26.17	27.72	27.77	27.58	27.66	28.02	25.95	28.23	27.77	27.86	27.59	27.84	27.66	27.95
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	0.10	0.11	0.05	0.09	0.07	0.26	0.08	0.00	0.05	0.13	0.10	0.02	0.08	0.11
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
MgO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
CaO	8.07	10.26	10.08	9.94	10.01	9.95	7.97	10.17	10.06	9.89	9.88	9.88	9.90	9.57
Na2O	6.96	5.83	5.84	5.83	5.77	5.69	6.77	5.56	5.62	5.69	6.00	5.88	5.84	5.82
K2O	0.02	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.02	0.05	0.03	0.05	0.04	0.06	0.04
Total	98.90	98.78	99.59	97.68	98.77	98.98	97.23	99.19	98.24	97.90	99.21	99.32	99.14	99.14

## Oxigênio

	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.601	2.498	2.519	2.497	2.513	2.499	2.595	2.499	2.503	2.494	2.520	2.517	2.519	2.518
Ti	0.002	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	1.395	1.491	1.478	1.498	1.484	1.501	1.407	1.508	1.498	1.509	1.474	1.485	1.478	1.491
Cr	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
Fe3	0.003	0.004	0.002	0.003	0.003	0.009	0.003	0.000	0.002	0.005	0.003	0.001	0.003	0.004
Fe2	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
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Ca	0.391	0.501	0.487	0.491	0.488	0.485	0.393	0.493	0.493	0.487	0.480	0.479	0.481	0.464
Na	0.610	0.516	0.511	0.521	0.510	0.501	0.603	0.488	0.499	0.507	0.527	0.516	0.513	0.511
K	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.003	0.002	0.003	0.002
Soma	5.004	5.013	4.998	5.013	5.000	4.998	5.003	4.991	4.998	5.003	5.006	4.999	4.999	4.991
anortita	39.022	49.166	48.749	48.470	48.800	49.089	50.204	49.548	48.945	47.525	48.044	48.245	47.492	48.600

Plagioclásio

	13B2	31B1	31N1	31B2	32B1	32N1	32B2	33B1	33N1	33B2	33N2	33B2
SiO2	55.40	55.11	55.13	55.07	55.17	54.69	56.00	56.15	54.72	55.22	55.22	54.80
TiO2	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04
Al2O3	27.84	28.07	28.44	28.05	28.21	28.54	27.26	27.73	28.07	28.21	28.21	27.88
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	0.11	0.11	0.00	0.04	0.12	0.05	0.09	0.09	0.05	0.00	0.00	0.08
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.04	0.05	0.03	0.03	0.01
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
CaO	10.01	10.09	10.59	10.51	10.22	10.79	10.00	9.67	10.27	10.12	10.12	10.14
Na2O	5.81	5.67	5.45	5.58	5.56	5.32	5.96	5.93	5.48	5.55	5.55	5.58
K2O	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.04	0.07	0.07	0.06
Total	99.25	99.12	99.67	99.33	99.34	99.48	99.41	99.67	98.66	99.19	99.19	98.62
Oxigênio	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Si	2.510	2.500	2.489	2.496	2.497	2.476	2.533	2.529	2.494	2.501	2.501	2.499
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
Al	1.487	1.501	1.513	1.499	1.506	1.523	1.453	1.472	1.508	1.506	1.506	1.499
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe3	0.004	0.004	0.000	0.002	0.004	0.002	0.003	0.003	0.002	0.000	0.000	0.003
Fe2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000
Mg	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Ca	0.486	0.490	0.512	0.510	0.496	0.524	0.484	0.467	0.501	0.491	0.491	0.496
Na	0.511	0.499	0.477	0.490	0.488	0.467	0.522	0.518	0.484	0.488	0.488	0.494
K	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.004	0.004	0.004
Soma	5.002	4.999	4.995	5.001	4.993	4.997	5.000	4.994	4.994	4.992	4.992	4.997
anortita	49.395	49.395	51.561	50.797	50.253	52.716	47.968	47.267	50.760	49.949	49.949	49.899

Para o plagioclásio, todo o Fe é calculado como Fe3+.





