

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Geociências

**Metamorfismo dos pelitos do Grupo Dom Silvério na região de Ponte Nova,
MG: condições e trajetória *P-T* do metamorfismo**

TRABALHO DE FORMATURA

TF 2020-21

ALUNA: PAULA DRIELE JULIANO

ORIENTADOR: PROFESSOR RENATO DE MORAES

SÃO PAULO, 2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP. Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação: Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Juliano, Paula Driele

Metamorfismo dos pelitos do Grupo Dom Silvério na região de Ponte Nova, MG: condições e trajetórias *P-T* do metamorfismo - São Paulo, 2020.

55 p.: il.

Trabalho de formatura : IGc/USP

Orient.: Moraes, Renato de

1. Grupo Dom Silvério 2. Rocha pelítica 3. Termobarometria 4. Ponte Nova-MG I. Título

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Metamorfismo dos pelitos do Grupo Dom Silvério na região de Ponte Nova,
MG: condições e trajetória *P-T* do metamorfismo**

PAULA DRIELE JULIANO

Orientador: Professor Renato de Moraes

Trabalho de formatura

Nº2020/21

COMISSÃO JULGADORA

Patrício Montecinos Muños

Renato de Moraes

Glaúcia N. Queiroga

SÃO PAULO

2020

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e em meus sonhos, estando constantemente me apoiando e me encorajaram a estudar. Sem eles não seria possível estudar nessa universidade, e por isso serei eternamente grata.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer as seguintes pessoas:

Aos meus pais que me apoiaram nesses últimos cinco anos, sempre se colocando a disposição e me ajudando em tudo que precisei. Além de sempre me incentivarem a sonhar e acreditar.

Ao meu orientador, Renato de Moraes, que foi meu professor antes de tudo e me ensinou a gostar de rochas metamórficas. Sem ele este trabalho nunca seria possível.

Ao professor Gergely Andres Julio Szabó que gentilmente forneceu as análises químicas do projeto da Fapesp (95/3173-3) da professora Maria Ângela Fornoni Cândia, o qual trabalho em conjunto.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado nos últimos cinco anos, me fazendo chamar a cidade de São Paulo de lar.

E a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente ajudaram de alguma forma nesse trabalho, em especial a mestrande Bruna da Silva Ricardo que me ajudou com a pseudosseção.

RESUMO

O presente trabalho tem o intuito de determinar as condições P - T do metamorfismo dos pelitos do Grupo Dom Silvério, localizadas na região de Ponte Nova, MG. Para tanto se realizou a descrição petrográfica e a análise química mineral, bem como sua termobarometria convencional e o programa *THERMOCALC*, além de uma pseudosseção calculada com o Perplex. A descrição petrográfica revelou que os pelitos têm paragêse mineral composta por cianita, granada e biotita, sendo possível observar algumas variedades com porfiroblastos de granada e/ou com estauroлита, quase sempre com quartzo e muscovita em excesso. Com o auxílio dos diagramas KFMASH foi possível inferir as condições metamórficas em que as rochas, foram submetidas ao pico metamórfico. A pressão encontrada foi de 7,5 a 11,8 kbar e a temperatura foi de 640 a 750 °C, determinadas pelas reações de quebra da estauroлита e antes da quebra da muscovita. Alguns métodos mais robustos de determinação de pressão e temperatura revelaram condições metamórficas distintas da petrografia. É o caso do programa *THERMOCALC* que obteve o intervalo de pressão 6,2 a 9,64 kbar e o intervalo de temperatura de 572 a 641 °C, temperatura aquém do esperado. A planilha de barômetros, que leva em consideração a temperatura de termômetro granada-biotita, obteve o intervalo de pressão 4,35 a 10,5 kbar e o intervalo de temperatura 557 a 623 °C. A planilha de várias calibrações do termômetro granada-biotita, por sua vez, indica temperaturas de 536 a 646 °C. Ainda foi possível se elaborar uma pseudosseção no programa Perplex, cujo intervalo de pressão obtido se encontra entre 7,5 a 8 kbar e a temperatura se encontra acima de 650 °C. Os diferentes resultados de P - T podem ser reflexo de retromorfismo, a hipótese é corroborada tanto pela petrografia, quanto pela pseudosseção que indica perturbação na análise química mineral.

Palavras-chave: Grupo Dom Silvério, rocha pelítica, termobarometria, Ponte Nova-MG.

ABSTRACT

This work aims to determine the P-T conditions of the metamorphism of the Dom Silvério Group pelites, located in the region of Ponte Nova, MG. For this purpose, the petrographic description and the mineral chemistry analysis were carried out, as well as its conventional thermobarometry and with the THERMOCALC program, in addition to the calculation of a pseudosection using Perplex. The petrographic description revealed that the pelites have mineral paragenesis made up of kyanite, garnet and biotite, and it is possible to observe some with either garnet or staurolite porphyroblasts, almost always with quartz and muscovite excess. With the aid of the KFMASH diagrams it was possible to infer the metamorphic conditions, in which the rocks were subjected to the metamorphic peak. The pressure found was 7.5 to 11.8 kbar and the temperature was 640 to 750 °C, determined by the break down reaction of the staurolite and before the break down of muscovite. Some more robust methods of determining pressure and temperature have revealed metamorphic conditions distinct from petrography. This is the case with the THERMOCALC program, which obtained a pressure range of 6.2 to 9.64 kbar and a temperature range of 572 to 641 °C, which is below expectations. The barometer spreadsheet, which takes into account the temperature of the garnet-biotite thermometer, obtained a pressure range of 4.35 to 10.5 kbar and a temperature range of 557 to 623 °C. The spreadsheet of several calibrations of the garnet-biotite thermometer, in turn, indicates temperatures from 536 to 646 °C. It was still possible to elaborate a pseudosection with Perplex program, whose pressure range obtained is between 7.5 to 8 kbar and the temperature is above 650 °C. The different results of P-T can be a reflex of retromorphism, the hypothesis is corroborated both by petrography and by the pseudosection that indicates disturbance in the mineral chemistry.

Keywords: Dom Silvério Group, pelitic rock, thermobarometry, Ponte Nova- MG.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. LOCALIZAÇÃO	2
4. BIBLIOGRAFIA	3
4.1 <i>Geologia Regional</i>	3
4.1.1 Província Mantiqueira	3
4.1.2 Faixa Araçuaí	4
4.1.3 Complexo Mantiqueira	4
4.1.4 Grupo Dom Silvério	5
5. MATERIAIS E MÉTODOS	6
5.1 Revisão Bibliográfica e Petrografia	6
5.2 Química mineral	6
5.3 Termobarometria.....	7
5.3.1 Termobarometria com <i>THERMOCALC</i>	7
5.3.2 Termobarometria com planilhas <i>Metapelite Geotherbarometry</i> e termômetro granada- biotita	9
5.3.3 Pseudosseção.....	10
6. RESULTADOS OBTIDOS	11
6.1 Petrografia.....	12
6.1.1 Lâmina 14-I-20-A.....	12
6.1.2 Lâmina 14-I-20-B	13
6.1.3 Lâmina MP-37.....	14
6.1.4 Lâmina PN-13-04.....	15
6.2 Descrição das amostras com dados de análise química	16
6.3 Química Mineral	17
6.3.1 Granada	18
6.3.2 Plagioclásio.....	21
6.3.3 Biotita	22
6.3.4 Estaurolita	25
6.3.5 Muscovita	26
6.4 METAMORFISMO	27
6.4.1 Metamorfismo com base na petrografia.....	27
6.4.2 Metamorfismo com base na análise química fornecida.....	30
6.4.3 Pseudosseção.....	38

7. DISCUSSÃO	41
8. CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS	45
ANEXOS.....	48

1. INTRODUÇÃO

O Grupo Dom Silvério intriga os pesquisadores desde 1973, quando foi descrito pela primeira vez por Lima et al. (1973) como um pacote de quarto-mica xisto e quartzito. Com o passar do tempo as rochas do grupo serviram como objeto de estudo em outros trabalhos como mapeamento geológico, descrição e caracterização petrográfica, estrutural e petrológica (Jordt-Evangelista & Roeser, 1988; Jordt-Evangelista et al., 1990; Brandalise, 1991; Raposo, 1991; Jordt-Evangelista, 1992; Baltazar & Raposo 1993; Dürkop et al., 1997; Peres 2000; Benevides, 2003; Perez et al., 2004).

Na região de Ponte Nova, MG, principalmente ao longo do leito do Rio Piranga, o Grupo Dom Silvério aflora em grande extensão, o que facilita o estudo de determinadas rochas que o compõe, como por exemplo (estauroлита)-cianita-granada-biotita xisto, com ou sem plagioclásio, anfíbolito e rocha calcissilicática. As rochas citadas encontram-se intercaladas de forma tectônica com os gnaisses, migmatitos e granitos do Complexo Mantiqueira e, muitas vezes, apresentam espessura de poucos metros (Perez et al., 2004).

As rochas do Grupo Dom Silvério apresentam paragênese metamórfica composta de estauroлита, cianita, granada, biotita, muscovita, plagioclásio, quartzo e rutilo, o que as torna ideais para a determinação de condições metamórficas, pressão e temperatura, com o auxílio da petrografia e métodos de geotermobarometria. Além disso, as rochas apresentam monazita que possibilita a sua datação e determinação da idade do metamorfismo. O presente trabalho se propôs a estudar a unidade pelítica do Grupo Dom Silvério, aflorante ao longo do Rio Piranga, com o intuito de determinar as condições metamórficas de sua formação e a idade de seu metamorfismo.

2. OBJETIVOS

O objetivo do trabalho consiste na análise das condições metamórficas das rochas do Grupo Dom Silvério na região de Ponte Nova, MG. O trabalho é focado nas rochas pelíticas do grupo, mais precisamente na biotita xisto com granada, cianita e estauroлита. O trabalho visa estabelecer as condições de pressão e temperatura, além da idade de seu metamorfismo.

Devido ao período de quarentena na cidade de São Paulo, a universidade de São Paulo teve suas atividades paralisadas, desde meados de março de 2020 até o final de outubro de 2020, período em que deu início em sua flexibilização. Devido a isso, não foi possível realizar a etapa de determinação da idade do metamorfismo a partir da datação de monazita. Além disso, a ideia de se obter novos dados de química mineral, mapas composicionais e análises de rutilo foram também impossibilitadas. Deste modo, para que o trabalho fosse concluído, uma compilação de dados do Projeto Pesquisa da Prof. Maria Ângela Fornoni Cândia (FAPESP: 95/3173-3) foi feita para que a pesquisa pudesse ter continuidade.

3. LOCALIZAÇÃO

As rochas estudadas neste trabalho são originárias de afloramentos próximos a região de Ponte Nova, MG, principalmente a margem sul do rio Piranga. Na figura 1, pode-se observar, em destaque a área de estudo. Já na figura 2, pode-se observar um dos afloramentos que serviram de base para as amostras e lâminas estudadas.

Figura 1. Mapa geológico simplificado com as faixas Araçuaí e Ribeira e o núcleo cristalino do orógeno Araçuaí-Congo. O destaque, em coloração preta, realça a área de estudo do trabalho. Fonte: Peres et al. (2004).

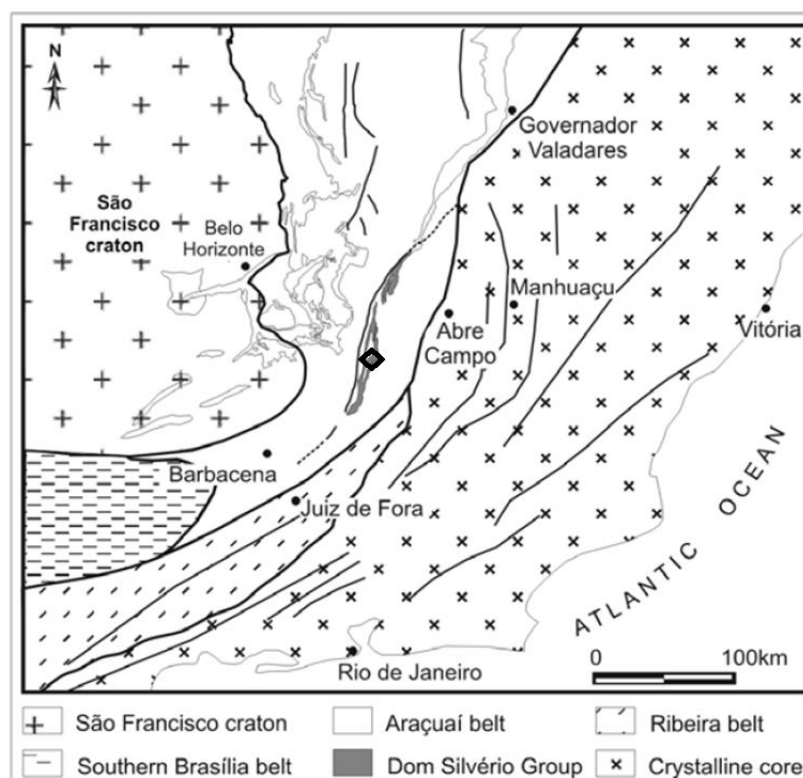




Figura 2. Afloramento na margem do Rio Piranga. Próximo a cidade de Ponte Nova, MG.

4. BIBLIOGRAFIA

4.1 Geologia Regional

O presente trabalho é focado nas rochas pelíticas do Grupo Dom Silvério que se encontram localizadas na região de Ponte Nova, MG. A unidade está inserida na faixa Araçuaí que, por sua vez, compõe a parte Setentrional da Província Mantiqueira.

4.1.1 Província Mantiqueira

De acordo com Heilbron et al. (2004), a Província Mantiqueira representa um sistema orogênico Neoproterozóico que engloba os orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Gabriel, sendo situados no sul e sudeste do Brasil, mais precisamente do sul da Bahia até o estado do Rio Grande do Sul.

A província tem cerca de 3000 km de comprimento e delinea uma faixa de direção NE-SW que se estende do sul da Bahia até o Uruguai (Almeida et al, 1977/1981), já sua área abrange cerca de 700 mil km² (Heilbron et al.,2004). É delimitada principalmente pelas províncias Tocantins, São Francisco e Paraná, sendo também delimitada, a Leste, pela margem continental e pelas bacias costeiras do Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas (Almeida et al,1977/1981).

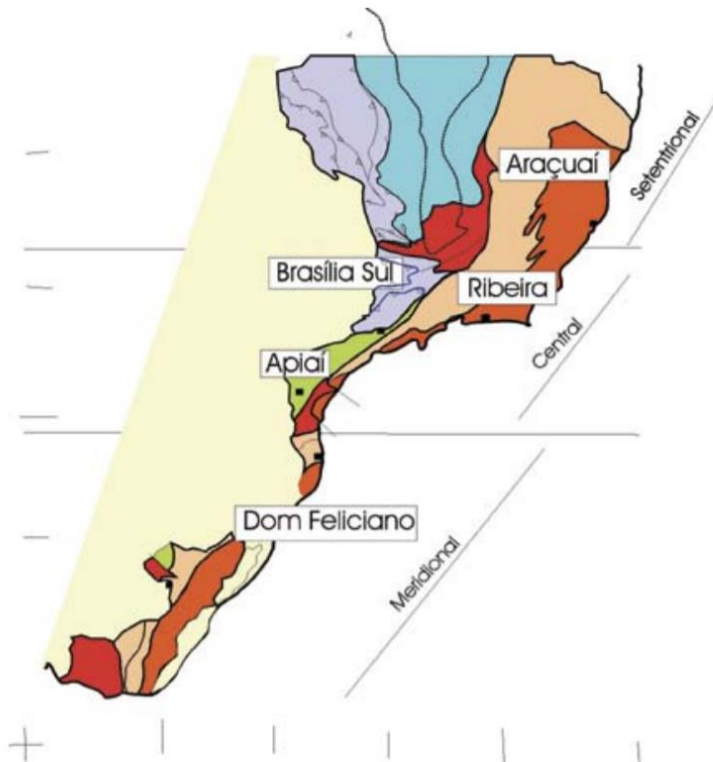


Figura 3. Subdivisão do sistema orogênico Mantiqueira. Fonte: Heilbron et al. (2004).

4.1.2 Faixa Araçuaí

A Faixa Araçuaí foi definida por Almeida et al. (1977), como uma faixa de dobramentos desenvolvida na porção leste do Craton São Francisco durante o Neoproterozóico. Para os autores, a faixa representa a parte setentrional da Província Mantiqueira, sendo limitada ao norte e leste pelo Craton São Francisco e ao Sul pela Faixa Ribeira. De acordo com Alkmin et al. (2007), a disposição atual da Faixa Araçuaí decorreu de um rifteamento responsável por separar a porção brasileira da porção africana (nomeada como orógeno congo ocidental) que ocorreu entre o neoproterozóico e o início do paleozoico, devido a orogenia Brasileira/Panafricana.

A parte Sul da Faixa Araçuaí, tem como principais unidades o Complexo Mantiqueira, o Grupo Dom Silvério, o granulito Pedra Dourada e a suíte Borrachudos (Figura 1; Peres et al.,2004).

4.1.3 Complexo Mantiqueira

A designação “Complexo Mantiqueira” surgiu a partir de Barbosa (1954 in Brandalise 1991), sendo utilizada para denominar gnaisses ao sul e a leste do espinhaço. Já para Brandalise (1991), a designação se refere a rochas de natureza

ortoderivadas constituídas por ortognaisses, granito-tonalíticos intercalados com anfibolitos e pequenos corpos de rochas granulíticas.

A unidade constitui o embasamento do Grupo Dom Silvério e de acordo com Cunningham et al. (1998) e Ebert e Hasui (1998, in Benevides 2003) é delimitado pela borda leste do quadrilátero ferrífero e pela região onde predomina-se rochas dos São João Del Rei e Andrêlandia.

4.1.4 Grupo Dom Silvério

Na área de estudo ocorrem extensas exposições dos pelitos, principalmente nas margens do Rio Piranga, as quais incluem (estaurolita)-cianita-granada-biotita-xisto, com ou sem plagioclásio, além de anfibolitos e rochas calciossilicáticas. Essas rochas estão intimamente intercaladas, de forma tectônica, com os gnaisses, migmatitos e granitos do Complexo Mantiqueira e, muitas vezes, apresentam espessura de poucos metros (Perez et al., 2004).

O Grupo Dom Silvério foi definido por Lima et al. (1973) que o descreveu como pacote de quartzo-mica-xisto e quartzitos. Desde então diversos estudos com maior detalhe foram realizados (Jordt-Evangelista & Roeser, 1988; Jordt-Evangelista et al., 1990; Brandalise, 1991; Raposo, 1991; Jordt-Evangelista, 1992; Baltazar & Raposo 1993; Dürkop et al., 1997; Peres 2000; Benevides, 2003; Peres et al., 2004). O Grupo Dom Silvério ocorre como faixa com cerca de 10 quilômetros de espessura e 150 quilômetros de extensão, que se localiza no leste de Minas Gerais, entre os municípios de Ipatinga e Viçosa. Seu embasamento é formado pelas rochas do Complexo Mantiqueira, no qual mantém contato abrupto, paralelo às bandas composicionais e a foliação dominante destas (Peres et al., 2004). O Grupo Dom Silvério pode ser dividido em cinco unidades (Benevides, 2003): biotita xisto com granada, cianita e estaurolita, muscovita xisto grafitoso, paragnaisse, metabasito e metagranito porfirítico. Trata-se de rochas com granulação fina a muito grossa, que apresentam foliação milonítica, com cristais centimétricos de granada, cianita, estaurolita e grafita podendo ou não conter muscovita (Benevides, 2003).

Os pelitos do Grupo Dom Silvério são de extrema importância para a compreensão do evento metamórfico-cinemático da Faixa Araçuaí, o qual é registrado pelos minerais essenciais acessórios da rocha, tais como granada, estaurolita, cianita e monazita (Peres et al., 2004).

Os primeiros estudos de condições metamórficas feitos no Grupo Dom Silvério foram realizados por Jordt-Evangelista e Roeser (1988), que através de geotermobarometria encontraram a temperatura de 550 °C e pressão de 5 kbar, estes foram corroborados pelos cálculos de Rettinger et al. (1998). Estudos mais recentes revelaram diferentes condições metamórficas. De acordo com Peres et al. (2004), a presença de muscovita com outras fases minerais e a paragénese estaurolita + cianita indicam temperaturas de metamorfismo entre 520 a 640 °C e pressões superiores a 4 kbar (Peres et al., 2004). Benevides (2003), através de geotermobarometria, encontrou temperaturas superiores a 680° C e pressão de 7-12 kbar. Já Cutts et al. (2018) encontraram temperaturas de 650 °C e pressão de 8-9 kbar.

Em relação à idade do metamorfismo, estudos geocronológicos usando o método Sm-Nd em xistos com granada e plagioclásio no Grupo Dom Silvério obtiveram a datação isocrônica de 547 ± 29 Ma que foi interpretada como a idade do metamorfismo (Brueckner et al. 2000). Cutts et al. (2018) dataram monazita com microsonda eletrônica em rochas do Grupo Dom Silvério e identificam duas idades para a unidade: 593 ± 4 Ma e 543 ± 12 Ma.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Revisão Bibliográfica e Petrografia

A revisão bibliográfica foi feita com o auxílio da ferramenta de busca Google Scholar. Já a petrografia foi baseada na coleção de lâminas pelíticas do Grupo Dom Silvério disponível no Instituto de Geociências cuja coleta foi feita nos últimos vinte anos junto as aulas de campo do curso de Petrografia Metamórfica, na região de Ponte Nova, MG, principalmente próximo a margem sul do Rio Piranga.

A descrição das rochas foi feita no Laboratório de Microscopia Petrográfica, no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, usando microscópio Olympus BX 40. As amostras descritas foram o conjunto 14-I-20 A, 14-I-20 B, MP37 e PN-13-04.

5.2 Química mineral

Para a determinação de *P-T* seria necessário a análise química, via microsonda eletrônica, dos seguintes minerais: Biotita, muscovita, plagioclásio, granada e estaurolita.

A ideia original do trabalho era a utilização da microsonda eletrônica do Laboratório do NAP-Geoanalítica, do instituto de geociências. Neste seriam realizados a análise química das amostras 14-I-20-A, 14-I-20-B, MP37 e PN-13-04. Os elementos que seriam analisados estão expostos na tabela abaixo.

Tabela 1. Análise química dos elementos em cada mineral.

biotita	Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Cl e F
muscovita	Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Cl e F
plagioclásio	Si, Al, Fe, Ca, Na, Sr, Ba e K
granada	Si, Ti, Al, Cr, Fe, Mn, Mg e Ca
estauroлита	Si, Li, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Zn

A paralisação das atividades na universidade São Paulo, devido a pandemia do Covid-19, inviabilizou a utilização do laboratório NAP- Geoanalítica. A solução encontrada para o problema foi a utilização de dados químicos de um projeto anterior coordenado pela professora Maria Ângela Fornoni Cândia (Fapesp- 95/3173-3). Os dados químicos foram coletados na antiga microsonda eletrônica JEOL modelo JXA8600 com condições de análise 15k e 20 nA. As amostras utilizadas foram: PN96-67B, PN96-79A, PN96-81B e PN96-85C, sendo que seus resultados podem ser consultados nos anexos 2,3,4 e 5.

5.3 Termobarometria

5.3.1 Termobarometria com *THERMOCALC*

Para os cálculos termobarométricos, ou aplicação da geotermobarometria, foram utilizadas as composições químicas dos minerais que refletem equilíbrio na rocha metamórfica investigada. De acordo com Spear (1989), os valores de temperatura e pressão podem ser determinados através da dependência que essas variáveis possuem em relação à constante de equilíbrio (K_d) de uma reação metamórfica entre membros finais dos minerais presentes na rocha. O ponto central da geotermobarometria está no fato de que, com a aplicação de modelos apropriados de atividade (a), o valor da constante de equilíbrio (K_d) pode ser determinado através da composição de minerais coexistentes na rocha. A petrografia determinou quais fases minerais estavam presentes e em equilíbrio textural na rocha durante seu pico metamórfico, enquanto a análise química na microsonda eletrônica determinou sua composição, o que possibilitou o cálculo das condições P - T do pico metamórfico. Para isso, faz-se necessário a determinação da posição de pelo menos duas reações

adequadas, uma de alta inclinação, outra de baixa inclinação, além do local em que se cruzam. As inclinações precisam ser bem diferentes para que se tenha uma boa precisão no cálculo de P - T .

De acordo com Spear (1989), reações de alta inclinação (baixa dT/dP) envolvem grande variação de entropia (ΔS) e pequena variação de volume ($\Delta V \approx 0$). Estas são bons geotermômetros devido sua pouca dependência da pressão no espaço P - T . Geralmente as reações mencionadas envolvem minerais que trocam elementos com raios iônicos semelhantes, entre sítios cristalográficos de mesma coordenação, como a substituição FeMg_{-1} (Carswell & Harley 1990).

Já as reações de baixa inclinação (alta dT/dP ; Spear, 1989) são caracterizadas pela grande variação de volume (ΔV). Estas são bons geobarômetros, pois envolvem reações de substituições acopladas entre elementos de raios iônicos diferentes que se permutam entre sítios cristalográficos com configurações diferentes (Carswell & Harley 1990), tais como $\text{Al}^{\text{VI}}\text{Al}^{\text{IV}}\text{Mg}_{-1}\text{Si}_{-1}$ ou $\text{NaAl}^{\text{VI}}\text{Ca}_{-1}\text{Mg}_{-1}$.

Existem programas, como o *THERMOCALC* (Powell & Holland, 1985), que usam banco de dados termodinâmicos internamente consistentes, que geram cálculos de temperatura e pressão para as várias rochas metamórficas, através de dados termodinâmicos das reações disponíveis no banco de dados, estas são combinadas de modo linear, até que sejam gerados grupos de reações linearmente independentes que usem todos os minerais da rocha investigada (Powell & Holland, 1994). Os resultados P - T calculados por esse método são bastante consistentes, pois levam em consideração toda a associação mineral da rocha e não apenas um par de reações metamórficas.

As rochas estudadas ocorrem com e sem estaurolita. Devido a esta variação mineral, o presente trabalho optou por realizar os cálculos de P - T em mais de uma etapa. As condições metamórficas foram calculadas sem o mineral estaurolita e posteriormente foram calculadas com o mineral estaurolita. Além disso, o programa *THERMOCALC* fornece a opção de calcular P - T em conjunto e P - T separadamente, para uma melhor análise, efetuou-se as duas opções.

5.3.2 Termobarometria com planilhas *Metapelite Geotherbarometry* e termômetro granada-biotita

Além do *THERMOCALC*, há outras formas de determinar as condições de pressão e temperatura, como os termômetros e barômetros convencionais. No trabalho se utilizou a planilha *Metapelite Geotherbarometry* e a planilha de termômetro granada biotita elaborada por Dave Waters (https://www.earth.ox.ac.uk/~davewa/pt/th_tools.html).

5.3.2.1 Planilha *Metapelite Geotherbarometry*

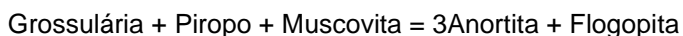
A planilha, utilizada com o programa Microsoft Excel, *Metapelite Geotherbarometry* foi elaborada por Dave Waters (<https://www.earth.ox.ac.uk/~davewa/pt/index.html>) com o termômetro granada-biotita de Bhattacharya et al. (1992). Para o cálculo de pressão, a planilha em questão utiliza os barômetros GASP, GPMB-Mg e GPBM-Fe que, por sua vez, utilizam os dados das análises químicas de cada mineral, mais especificamente a quantidade de cátions de determinados elementos, bem como a quantidade dos membros finais da granada e da biotita.

Os três barômetros utilizam a equação $P = A + BT + CT \ln K$, onde P é a pressão obtida, T é a temperatura em °C e $\ln K$ é a temperatura em kelvin (Sendo estas fornecidas pelo próprio usuário ou calculadas com base no termômetro granada-biotita que a própria planilha gera). As constantes A , B e C são obtidas de maneira individualizada e são geradas a partir da equação específica de cada barômetro.

O barômetro GASP (Garnet alumino Silicate Plagioclase) obtém as constantes A , B e C com a equação:



Já o barômetro GPMB-MG define as constantes A , B e C com a equação:



Por fim o barômetro GPMB-Fe gera as constantes A , B e C a partir da equação.



O Termômetro da planilha em questão é o termômetro granada-biotita, calibrado por Bhattacharya et al. (1992), com os modelos de granada dos autores Ganguly & Saxena (1984) e Hackler & Wood (1984).

5.3.2.2 Termômetro granada biotita

A planilha que contém o termômetro de granada- biotita, pode ser utilizada com o programa Microsoft Excel. Esta tem apenas o objetivo de calcular as prováveis temperaturas da rocha, com base em 8 calibrações diferentes.

As calibrações presentes nesta planilha são: termômetro granada-biotita de Bhattacharya et al. (1992), com base nos modelos de atividade de granada de Ganguly & Saxena (1984) e Hackler & Wood (1984); Termômetro de Dasgupta et al., (1991); termômetro de Ferry and Spear, (1978); Termômetro de Hodges and Spear, (1982); Termômetro de Perchuck, 1983; Termômetro de Thompson, (1976); Termometro de Holdaway and Lee, (1977).

5.3.3 Pseudosseção

As pseudosseções são calculadas em determinada janela P - T e com base em composição fixa, de uma rocha ou textura. Pode-se considerar que a pseudosseção é o mapa das associações minerais no espaço P - T , desenvolvidas para uma composição ou volume de equilíbrio específico. Assim, na pseudosseção são apenas representados os segmentos de reações univariantes, ou faixa equivalente em sistema químico mais complexo, que a composição da rocha pode “ver” (Powell et al., 1998). A combinação da química dos minerais da rocha investigada, com as variações composicionais calculadas na pseudosseção, fornece um dos modos mais precisos para a termobarometria, além de ser possível inferir trajetórias P - T pela comparação das texturas e os campos di-, tri-, tetra- ou de variância maior da pseudosseção (White et al., 2007).

No presente trabalho, a pseudosseção foi realizada com o auxílio do programa Perplex (Conolly, 2005), usando o banco de dados hp11ver (Holland & Powell, 2011). Os modelos de atividade usados para a muscovita, clorita, biotita, granada, estauroilita, cordierita e ilmenita são de White et al. (2014) e o modelo de feldspato é de Fuhrman e Lindsley (1988). A água foi considerada como uma fase fluida pura e em excesso para os cálculos.

Para a elaboração da pseudosseção seria necessário a composição da rocha, contudo, não foi possível obter este dado, devido ao advento da pandemia do Covid-19. A solução encontrada foi a elaboração de uma rocha montada utilizando a composição modal da amostra MP-37 (da coleção didática da disciplina petrologia metamórfica) e as análises químicas dos minerais da amostra PN96-85C (compiladas do relatório da professora Maria Ângela Fornoni Cândia), pois são muito semelhantes petrograficamente. A partir da petrografia, foi possível se obter a proporção modal de cada mineral da amostra MP-37, que quando multiplicado pelas suas densidades, gera o volume de cada mineral. Ao se multiplicar o volume obtido pela análise química do mineral (amostra PN96-85C), encontra-se a composição da rocha. Feito isto, é necessário a normalização para porcentagem e depois a determinação da composição molar. Este último é o dado utilizado no programa Perplex. A tabela gerada no programa Excel pode consultada no anexo 1, onde pode-se observar os resultados obtidos.

6. RESULTADOS OBTIDOS

O objetivo inicial do trabalho era a definição das condições de P - T das rochas pelíticas do grupo Dom Silvério e da determinação da idade de seu metamorfismo.

Para a determinação das condições de P - T foi-se realizado a descrição petrográfica das amostras 14-I-20-A, 14-I-20-B, MP-37 e PN-13-04. Posteriormente, as amostras observadas seriam encaminhadas para o laboratório NAP-Geoanalítica para a análise química, via microsonda eletrônica. Contudo, o período da quarentena ocasionou a paralisação das atividades na universidade de São Paulo, inviabilizando esta parte crucial do projeto. Para dar continuidade aos estudos, o orientador deste trabalho, Renato de Moraes, sugeriu a utilização de análises químicas de um estudo anterior. O estudo mencionado foi realizado pela professora Maria Ângela Fornoni Cândia (Fapesp 95/3173-3) com o auxílio do professor Gergely Andres Julio Szabó, na região de Ponte Nova, MG, em rochas do Grupo Dom Silvério. Os professores cederam as análises químicas das amostras PN96-67B, PN96-79A, PN96-81B e PN96-85C. Com isso, foi possível a realização da termobarometria via Thermocalc e via planilhas de barômetros e termômetros, além de ser possível a elaboração de uma pseudosseção.

A determinação da idade do metamorfismo seria feita através da datação de monazita, contudo não foi possível se obter análises químicas das lâminas observadas na petrografia e nem de outras amostras (de estudos anteriores). Até a início de novembro de 2020, o laboratório de microsonda eletrônica não voltou a funcionar. Devido isso, esta etapa também não foi realizada.

Em suma, os resultados foram divididos em duas etapas. A primeira consistiu na observação das amostras 14-I-20-A, 14-I-20-B, MP37 e PN-13-04 e a segunda consistiu na análise da química mineral das amostras PN96-67B, PN96-79A, PN96-81B e PN96-85C. Feito isso, foi feito o estudo da P - T a partir da petrografia e a partir da análise química. No primeiro caso foi utilizado os diagramas KFMASH e de estabilidade da muscovita (Spear & Cheney (2000) e Spear et al. (1999)). Já no segundo caso, se utilizou os programas Ax e THERMOCALC, além da planilha *Metapelite Geotherbarometry* (elaborada por Dave Waters e com calibração de Bhattacharya et al. (1992)) e do termômetro granada-biotita. A fim de verificar as condições de P - T , ainda se realizou uma pseudosseção no programa Perplex.

6.1 Petrografia

Apesar do Grupo Dom Silvério abranger um série de diferentes rochas, a petrografia foi concentrada em xistos pelíticos, principalmente em (estaurolita)-cianita-granada-biotita xisto com plagioclásio, que é um dos litotipos mais comuns na unidade e que é útil para inferir as condições P - T e para ser usado em termobarometria. Todas as mostras foram coletadas ao longo do leito do rio Piranga, próximo à Ponte Nova.

6.1.1 Lâmina 14-I-20-A

As lâminas deste conjunto foram nomeadas cianita-quartzo-biotita xisto com porfiroblastos de granada. Sua mineralogia é composta por granada, biotita, quartzo e cianita, contando também com minerais menos expressivos (<3%) como monazita, estaurolita, muscovita, plagioclásio, rutilo e minerais opacos. A rocha apresenta matriz fina a média, composta por quartzo, que varia de 0,1 a 3 mm. Sua textura é grano-lepidoblástica e porfiroblástica, enquanto sua estrutura é xistosa e definida pela biotita.

O mineral granada forma porfiroblastos subidioblásticos, maiores que 5 mm e que apresentam inclusões de quartzo, minerais opacos, rutilo e biotita. Além disso, apresenta fraturas e contato regular com a foliação principal, definida pela biotita. Já

a cianita apresenta cristais subidioblásticos, de aproximadamente 1 mm e que estão orientados conforme a foliação principal, contudo seu contato é irregular com a biotita.

A monazita está presente em todas as lâminas, porém compõe menos de 1% da rocha, sua ocorrência ou está relacionada à matriz, neste caso dispersa, ou associada à biotita, neste caso, produz halos pleocróicos.

A estaurolita, por sua vez, não ocorre em todas as lâminas e, quando ocorre, apresenta diferentes porcentagens, chegando até 5% do total da rocha. Seus cristais são xenoblásticos e variam de 0,5 mm a 2 mm. O mineral apresenta contato irregular com a biotita, granada e cianita, como se estivesse sendo consumido.

As rochas ainda apresentam pequenos bolsões quartzo-feldspáticos que ocorrem dispersos nas lâminas e, em alguns casos, associado com a sericita.

6.1.2 Lâmina 14-I-20-B

As lâminas deste conjunto são da rocha granada-cianita-plagioclásio-muscovita-biotita-quartzo xisto. Esta apresenta textura grano-lepidoblastica, granulometria fina a média e estrutura xistosa. A mineralogia é composta por quartzo, muscovita, biotita, cianita, plagioclásio e granada que compõem cerca de 95% da rocha, enquanto os 5% restantes se distribuem entre rutilo, monazita e minerais opacos.

A foliação principal do xisto é definida por muscovita e biotita, sendo que está se encontrada dobrada em partes restritas das lâminas. Já a matriz da rocha apresenta o quartzo como mineral principal, que conta com cristais xenoblásticos e de tamanhos variados que raramente são superiores a 1mm.

A cianita se encontra com cristais subidioblástico a idioblástico, de tamanhos menores que 1mm e orientados conforme a foliação principal. O mineral ocorre associado à biotita e a muscovita, sendo que seus contatos são irregulares, onde é possível notar o contato brusco (truncamento) da cianita sobre a muscovita e a biotita.

A granada apresenta contato regular com a muscovita e com a biotita, seus minerais são xenoblásticos, de tamanhos diversos, de 1-2 mm, e com inclusões de quartzo.

O plagioclásio compõe a matriz e apresenta cristais xenoblásticos e de tamanhos próximos a 2 mm, além disso encontra-se alterado, parcialmente saussuritizado.

Os minerais em menor proporção aparecem dispersos nas lâminas. A monazita ocorre associada à matriz ou à biotita, sendo que, neste caso, produz halo pleocróico.

6.1.3 Lâmina MP-37

A amostra MP-37 (figura 4) é nomeado como estaurolita-cianita-muscovita-biotita-quartzo xisto com porfiroblastos de granada. Em lâmina, apresenta granulometria que varia de fina a média, estrutura xistosa e textura granolepidoblástica e porfiroblástica. Sua mineralogia é composta por estaurolita, granada, biotita, muscovita, cianita, quartzo, monazita, rutilo e minerais opacos, sendo também comum a presença de pequenas porcentagens de clorita associada às micas.

A foliação principal da rocha é definida por biotita e muscovita, enquanto a matriz é composta, essencialmente, por quartzo de tamanhos diversos, podendo ser menores que 0,1 ou maiores que 1 mm.

A granada forma fenocristais maiores que 1,5 mm, estes não têm orientação preferencial, são sub idioblásticos e contêm inclusões de quartzo, muscovita e clorita.

A cianita, por sua vez, forma cristais sub idioblásticos, maiores que 0,5 mm e que se orientam, predominantemente, conforme a foliação principal, além disso nota-se seu contanto irregular com a biotita e a muscovita.

A estaurolita, como a granada, ocorre como fenocristais, sendo que estes variam de sub idioblásticos a idioblásticos e têm tamanhos superiores a 1 mm. Os cristais observados ocorrem associados aos minerais micáceos, dessa forma se encontram levemente orientados conforme a foliação principal. Seu contato é irregular com a biotita e a muscovita, sendo possível notar um 'truncamento' e um aspecto de formação recente da estaurolita.

A clorita, o rutilo e a monazita aparecem em pequenas quantidades. A clorita forma cristais menores que 0,05 mm e encontra-se inclusa nas granadas ou associada as micas. Já o rutilo forma cristais sub idioblásticos, de aproximadamente 0,1 mm e que se encontram na matriz. A monazita ocorre como cristais xenoblásticos, menores

que 0,1 mm, podendo estar dispersa na matriz ou associada a biotita, caso em que é possível notar haloprecoísmo.

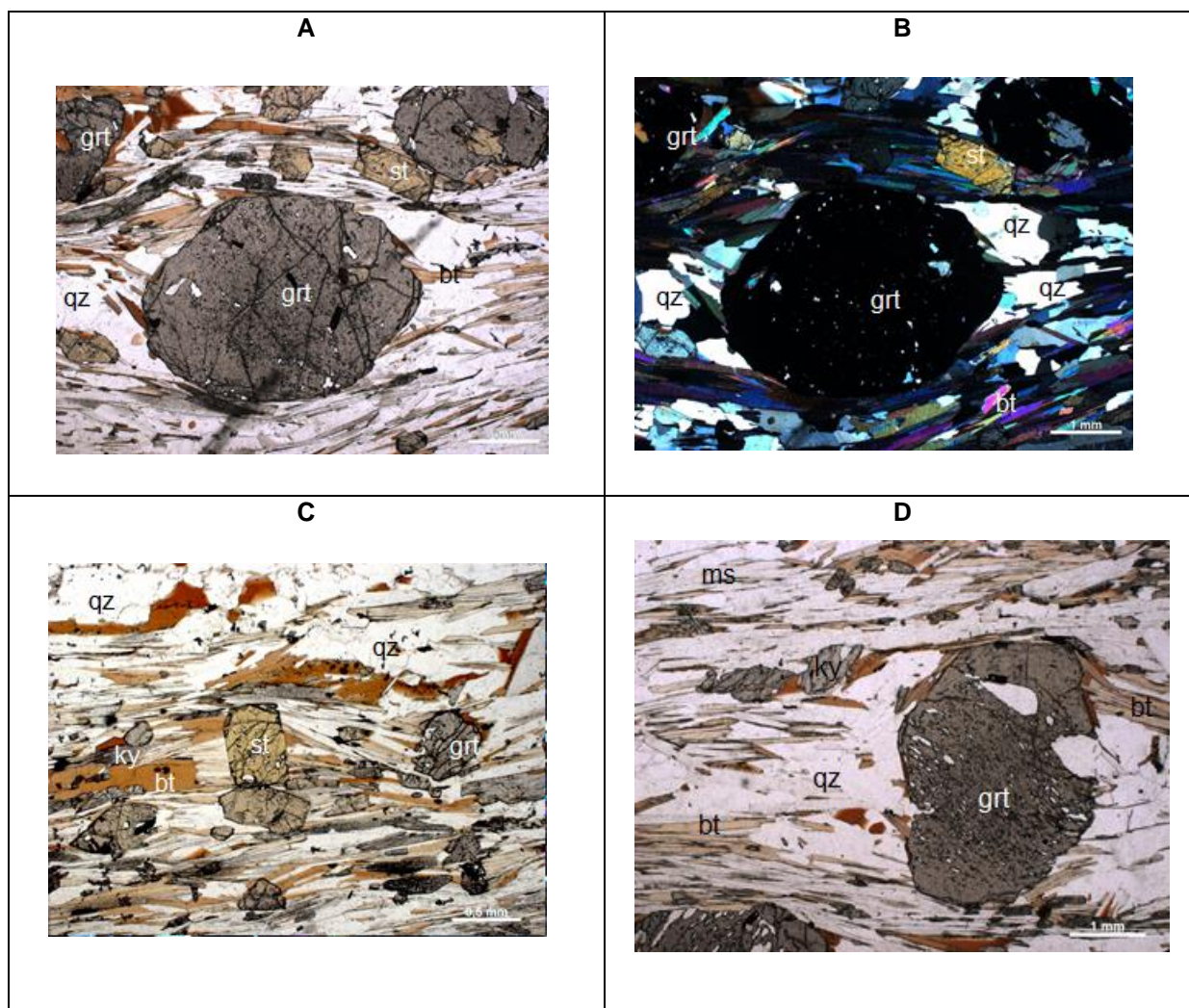


Figura 4. Fotomicrografias da lâmina MP-37, lajedo do Rio Piranga. A: parágênese constituída por estaurolita + cianita + granada + biotita + muscovita + quartzo definindo a foliação. Luz plano paralela. B: parágênese constituída por estaurolita + cianita + granada + biotita + muscovita + quartzo definindo a foliação. Luz plano polarizada. C: parágênese constituída por estaurolita + cianita + granada + biotita + muscovita + quartzo definindo a foliação e estaurolita pós cinemática. Luz plano paralela. D: parágênese composta por granada+ biotita+ cianita+ +muscovita+ quartzo. Luz plano paralela. Abreviações minerais de Whitney & Evans, 2010.

6.1.4 Lâmina PN-13-04

A amostra PN-13-04 representa a rocha nomeada como cianita-granada-muscovita-biotita-quartzo xisto. Em lâmina, pode-se observar granulometria fina, textura grano lepidoblástica e estrutura xistosa. Sua mineralogia consiste em quartzo, biotita, muscovita, granada e cianita, além de plagioclásio, monazita e opacos que ocorrem em pequenas quantidades.

A foliação principal da rocha é definida pelos minerais micáceos, biotita e muscovita. Já sua matriz é composta, principalmente, por quartzo que conta com cristais xenoblásticos e de tamanhos variados, 0.5-4 mm, com predominância da granulometria fina.

A granada ocorre sub idioblástica, com inclusões de quartzo e de tamanhos variados (1 a 2 mm). A cianita também ocorre com cristais sub idioblásticos, que acompanham a foliação principal.

Os minerais em menor quantidade ocorrem dispersos na lâmina. Os cristais de plagioclásio são sub idioblásticos, tem tamanhos variados, indo de 2 a 3 mm, e frequentemente ocorrem com geminação do tipo albita. Já a monazita apresenta cristais menores que 0,1 mm, podendo estar associada com a matriz da rocha ou com a biotita, sendo que neste último caso apresenta halo pleocróico.

6.2 Descrição das amostras com dados de análise química

As análises químicas foram obtidas a partir das amostras PN96-67B, PN96-79A, PN96-81B e PN96-85C. Estas foram coletadas e estudas pela professora Maria Ângela Fornoni Cândia (Fapesp- 95/3173-3). De forma geral, as amostras cedidas são xistos com cianita que apresentam indícios de retrometamorfismo em alguns porfiroblastos de granada e, como crescimento tardio de clorita.

A amostra PN96-67B foi coletada em um afloramento pertencente ao Grupo Dom Silvério próximo a estrada de saída da cidade de Ponte Nova, MG, sentido Noroeste. A amostra foi nomeada como granada- estaurolita-biotita- muscovita xisto com cianita grafitoso. Está apresenta porfiroblastos de granada e tem sua foliação definida pelos minerais micáceos, além de apresentar quartzo granoblástico e estaurolita com inclusões de grafita. A professora Maria Ângela ainda destaca que os cristais de cianita se encontram deformados e que as inclusões de grafita revelam duas fases de metamorfismo, sendo uma sin- cinemática com cristais acompanhando a foliação (deformados) e outra pós cinemática com cristais discordas da foliação. A análise química dessa amostra fornece dados de biotita, granada, muscovita e estaurolita.

A amostra PN96-79A é originaria da estrada de ferro entre a cidade de Ponte Nova e a cidade de Barro Branco. Esta foi nomeada como granada-cianita-biotita-muscovita xisto grafitoso. De acordo com a professora Ângela Fornoni Cândia, a amostra tem

foliação definida por biotita e muscovita, além de conter cianita de duas fases, sendo que uma fase acompanha a foliação principal e uma é discordante. A amostra ainda apresenta porfiroblastos de granada com inclusões de minerais diversos e plagioclásio com crescimento pós cinemático. A análise química desta amostra apresenta dados de biotita, feldspato e granada.

A amostra PN96-81B foi tem sua localização marcado como rio Piranga. Esta foi nomeada, pela professora, como xisto com biotita, muscovita, quartzo e plagioclásio. Como a amostra anterior, esta conta com cianita de duas fases, sendo uma concordante com a foliação e outra discordante (pós cinemática). Além disso, apresenta granada porfiroblástica sin-pós cisalhamento. Os dados químicos desta amostra forneceram dados de biotita, feldspato, granada e muscovita.

A última amostra cedida pela professora Ângela Fornoni Cândia, foi a PN96-85, de acordo com ela, a amostra é um cianita- granada-muscovita xisto com porfiroblastos sin-pós cinemáticos de granada. A amostra foi retirada da estrada de ferro Garimpo-Mariana. Como as outras amostras, a cianita desta também apresenta duas fases de crescimento, uma acompanhando a foliação e outra pós cinemática. Esta amostra é a que apresenta o maior número de minerais com dados químicos, sendo eles biotita, estauroлита, feldspato, granada e muscovita.

6.3 Química Mineral

Como mencionado, o estudo contou com quatro amostras de rochas distintas, que foram nomeadas como granada-estauroлита-biotita-muscovita xisto com cianita grafitoso (PN96-67B), granada-cianita-biotita-muscovita xisto grafitoso (PN96-79A), cianita-granada-muscovita xisto (PN96-85C) e biotita-muscovita-quartzo-plagioclásio xisto (PN96-81B).

Os seguintes elementos químicos foram analisados para cada mineral listado:

- granada: Si, Ti, Al, Cr, Fe, Mn, Mg e Ca;
- biotita: Si, Ti, Al, Cr, Fe, Mn, Mg, Ca, Na e K;
- muscovita: Si, Ti, Al, Fe, Mg, Na e K;
- plagioclásio: Si, Al, Ca, Na e K;
- estauroлита: Si, Ti, Al, Cr, Fe, Mn e Mg.

6.3.1 Granada

De forma geral, as granadas analisadas são compostas pelos membros finais almandina, piropo, espessartita e grossulária, sendo a almandina o membro final predominante. Além das composições citadas, pode-se observar ocasionalmente a presença do membro final andradita que é derivado de menor quantidade de Fe^{3+} , sendo que o Fe^{3+} foi calculado por balanço de cargas, considerando 8 cátions e 12 oxigênios na fórmula estrutural.

A granada do granada-estauroлита-biotita-muscovita xisto com cianita grafitoso (PN96-67B) apresenta os maiores valores de almandina que variam de 73 -78%. Além disso, apresenta cerca de 12-14% de piropo, 5-6% de espessartita e 3-6% grossulária. A presença de Fe^{3+} é variável, sendo possível observar análises sem o elemento e análises com o suficiente para a formação de até 3% de andradita. Ocorre aumento de Fe em uma das bordas e diminuição na outra, e o mesmo com Mg, mas o perfil é relativamente plano (figura 5).

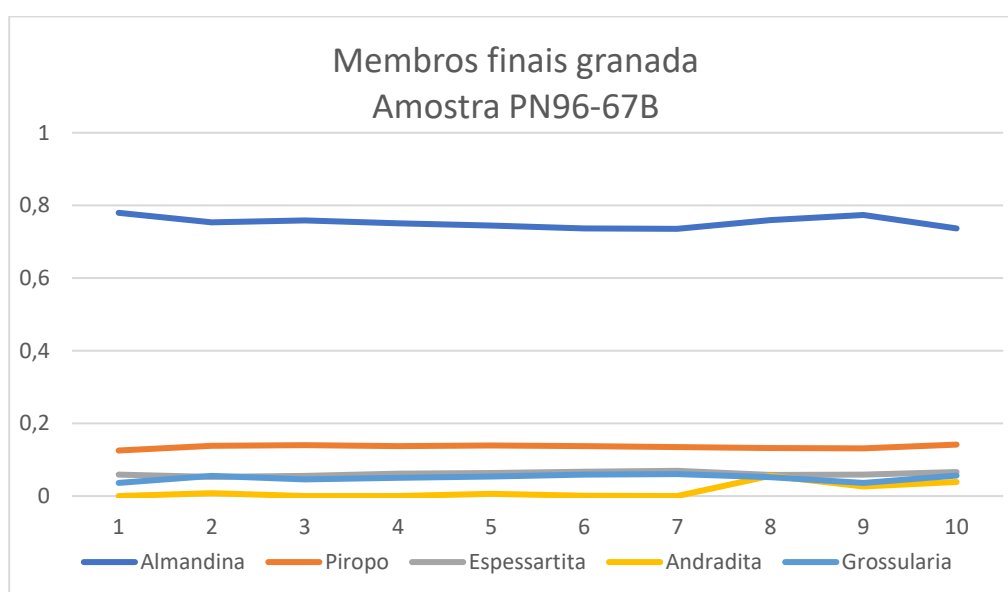


Figura 5. Representação das porcentagens (eixo y) dos membros finais da granada nas amostras (eixo x) da rocha granada-estauroлита-biotita-muscovita xisto com cianita grafitoso (PN96-67B).

O granada-cianita-biotita-muscovita xisto grafitoso (PN96-79A) é a rocha em que a granada apresenta os menores valores de almandina, que variam de 65-68%. Contudo, é a rocha com os maiores valores de espessartita, que varia de 7-15%, e de andradita, que ocorre em cerca de 8% das análises. Além desses membros finais, a granada ainda é composta por cerca de 12-15% de piropo e 5,5-12% de grossulária (figura 6). Ocorre variação apreciável no cálculo do Fe^{3+} em todas as análises, o que

pode indicar que pode ter ocorrido algum problema analítico ou que o grão analisado poderia estar um pouco alterado, talvez por intemperismo. Deste modo, fica difícil descrever o perfil.

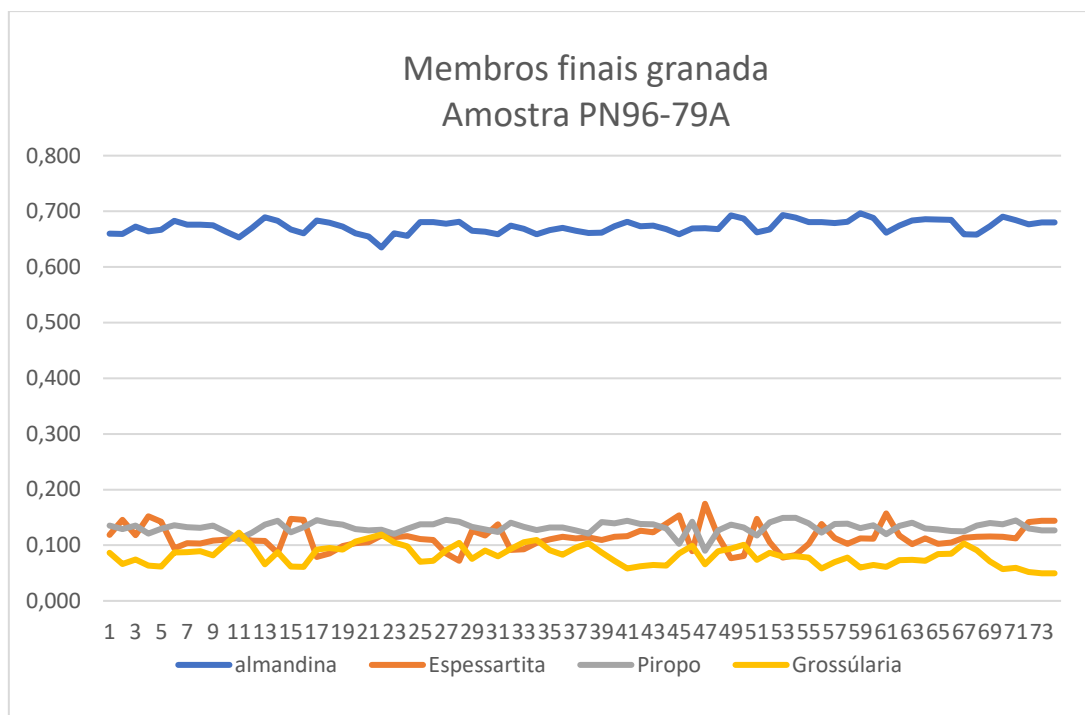


Figura 6. Representação das porcentagens (eixo y) dos membros finais da granada nas amostras (eixo x) da rocha granada-cianita- biotita-muscovita xisto grafitoso (PN96-79A).

A granada do cianita-granada-muscovita xisto (PN96-85C) é composta majoritariamente por almandina que varia de 70-73% nas análises. A composição restante é dividida entre piropo, que varia de 10-11%, espessartita, que varia de 0,5-11%, andradita, que não ocorre em todas as amostras e quando ocorre pode chegar até 4%, e grossulária, que varia de 14-17%. Vale ressaltar que na rocha em questão se encontra os maiores valores de Ca que reflete nos maiores valores de grossulária. Ocorre aumento de Fe e diminuição de Mg em direção às bordas (figura 7).

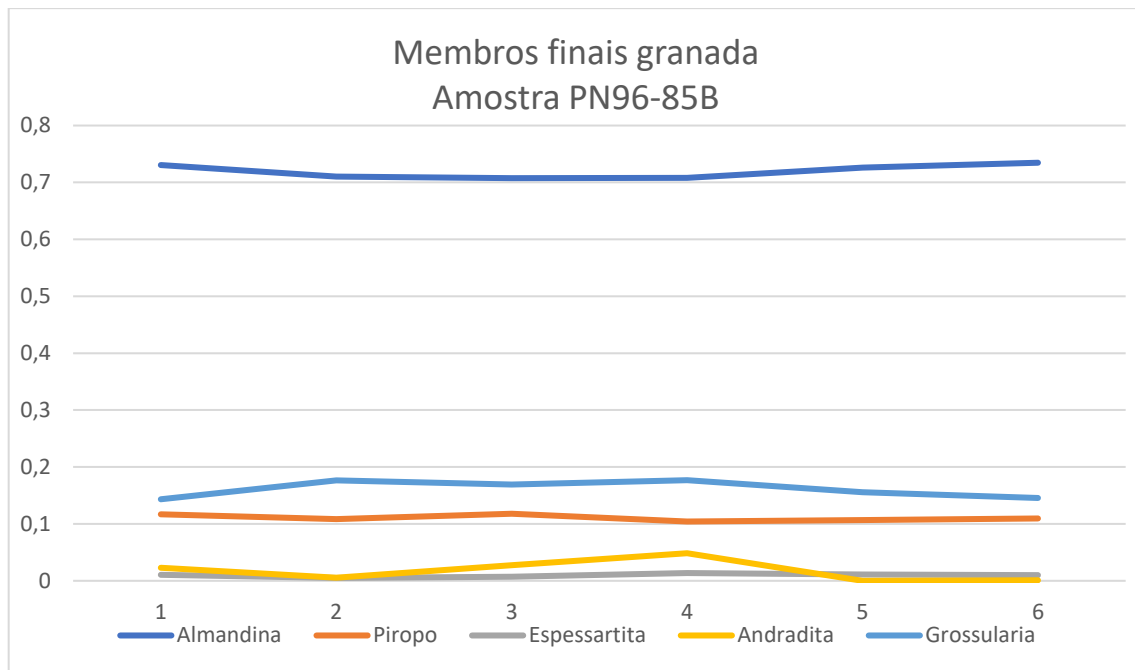


Figura 7. Representação das porcentagens (eixo y) dos membros finais da granada nas amostras (eixo x) da rocha cianita-granada-muscovita xisto (PN96-85C).

O xisto com biotita, muscovita, quartzo e plagioclásio (PN96-81B) conta com os membros finais almandina, que varia de 69-71%, piropo, que varia de 9-13%, espessartita, que varia de 7-12%, grossulária, que varia de 5-13% e andradita que, como a maioria das rochas analisadas, não ocorre em todas amostras, mas quando ocorre pode ser observada com até 5%. Embora, Fe e Mg sejam relativamente planos, Ca e Mn apresentam distribuição quase espelhada, com Mn com maior concentração no núcleo e diminuição nas bordas (figura 8).

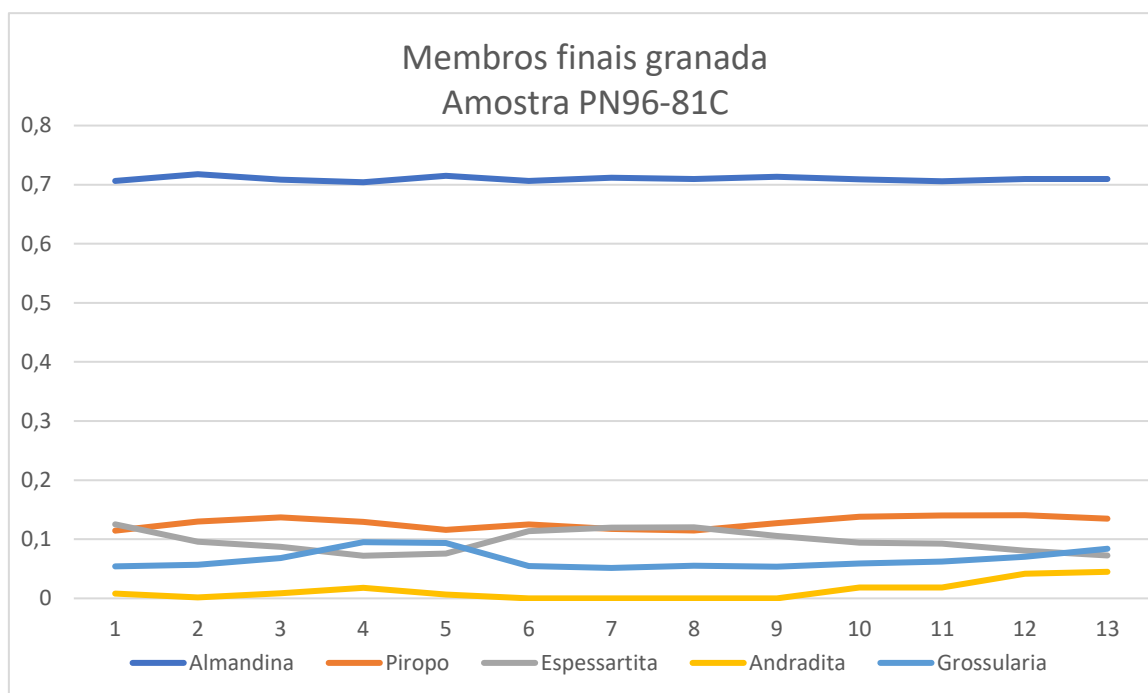


Figura 8. Representação das porcentagens (eixo y) dos membros finais da granada nas amostras (eixo x) do xisto com biotita, muscovita, quartzo e plagioclásio (PN96-81B).

6.3.2 Plagioclásio

O plagioclásio das rochas estudadas apresenta grande concentração do elemento sódio em sua composição, fazendo com os membros finais anortita e feldspato potássico apareçam em menor proporção (Figura 9).

O plagioclásio das amostras da rocha granada-cianita-biotita-muscovita xisto grafitoso (PN96-79A) apresentam de 29-33% de anortita, enquanto os da cianita-granada-muscovita xisto (PN96-85B) apresentam 28-30% e os do xisto com biotita, muscovita, quartzo e plagioclásio (PN96-81B) conta com 23-30%, sendo todos classificados como oligoclásio cálcico ou andesina.

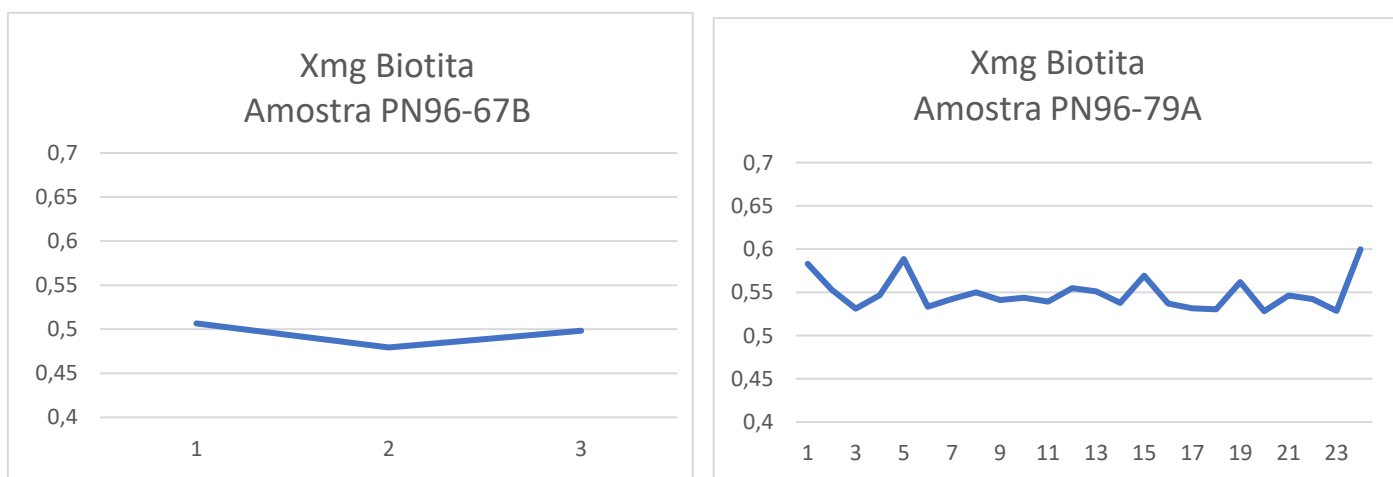
Em relação ao membro final feldspato potássico, nenhuma das rochas apresenta mais de 1% do mesmo. Vale ressaltar que não há dados químicos do plagioclásio para a granada-estaurolita-biotita-muscovita-xisto com cianita.



Figura 9. Representação das porcentagens (eixo y) dos membros finais de feldspatos nas amostras (eixo x) PN96-79A, PN96-81C e PN96-85C.

6.3.3 Biotita

Os xistos estudados apresentam biotita com alumínio, silício e magnésio pouco variáveis. O X_{Mg} predominante na amostra PN96-67B varia de 0,5 a 0,6, enquanto nas amostras PN96-67B e PN96-81 tem valores de X_{Mg} próximo a 0,5 (figura 10). A rocha cianita-granada-muscovita xisto (PN96-85C), no entanto, apresenta valores menores de X_{Mg} que se encontram entre 0,43 a 0,45.



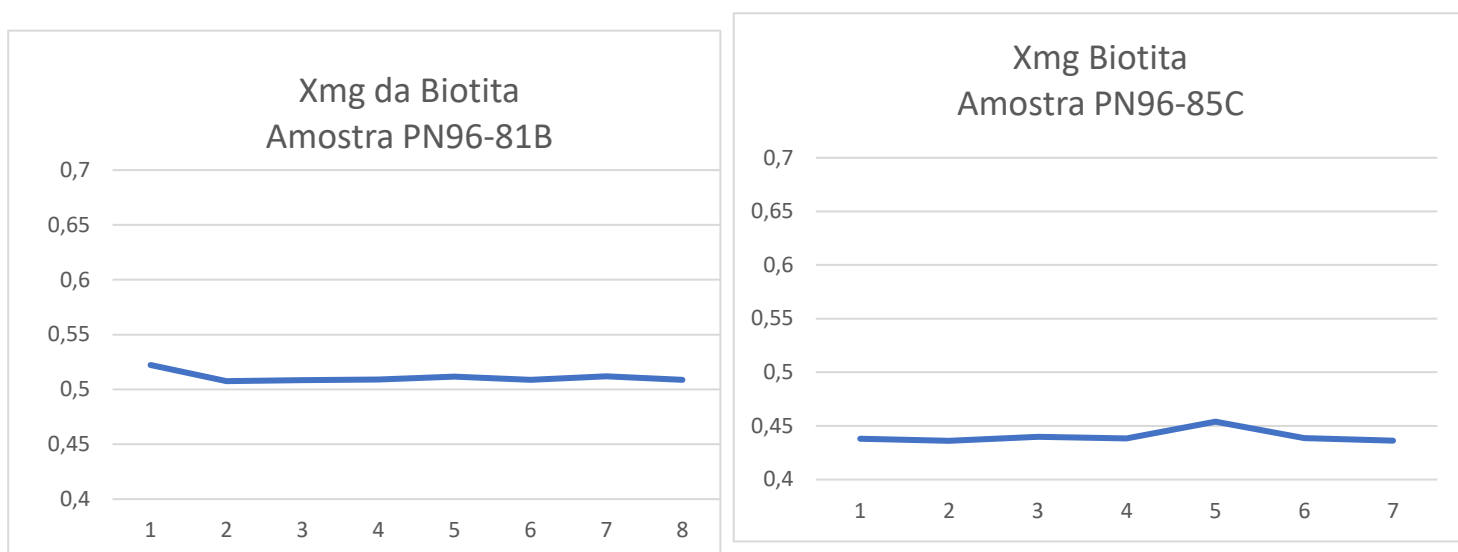


Figura 10. Valores químicos de Xmg ((Mg/ Mg+Fe) - eixo y) nas amostras (eixo x) PN96-67B, PN96-79A, PN96-81B e PN96-85C.

Ao se analisar os valores de íons de Al e os valores dos íons Si+Mg, que representa a substituição tschermak, observa-se uma semelhança entre as rochas estudadas. Na granada-cianita- biotita-muscovita xisto grafitoso (PN96-79A), os valores de Al variam de 1,74 a 1,83, enquanto os valores de Si+Mg variam de 3,87 a 3,99 (Figura 11). No xisto com biotita, muscovita, quartzo e plagioclásio (PN96-81B) os valores de Al variam de 1,73 a 1,77 e os valores de Si+Mg variam de 3,86 a 3,89 (Figura 11). Já na cianita-granada-muscovita xisto (PN96-85C), os valores de Al variam de 1,68 a 1,76, enquanto os valores de Si+Mg variam de 3,66 a 3,80 (Figura 11). A rocha granada-estaurolita-biotita-muscovita xisto com cianita grafitoso (PN96-67B) apresenta apenas três pontos de análise de biotita, sendo que nesses o Al varia de 1,73 a 1,77 e o Si+Mg varia de 3,81 a 3,90.

As amostras em conjunto apresentam a janela de variação do Al de 1,73 a 1,83 e a janela de variação de Si+Mg de 3,66 a 3,99, o que significa uma variação de 0,10 para o alumínio e uma variação de 0,33 para o silício + magnésio. A dispersão dos valores pode ser considerada pequena o que significa baixa variação composicional.

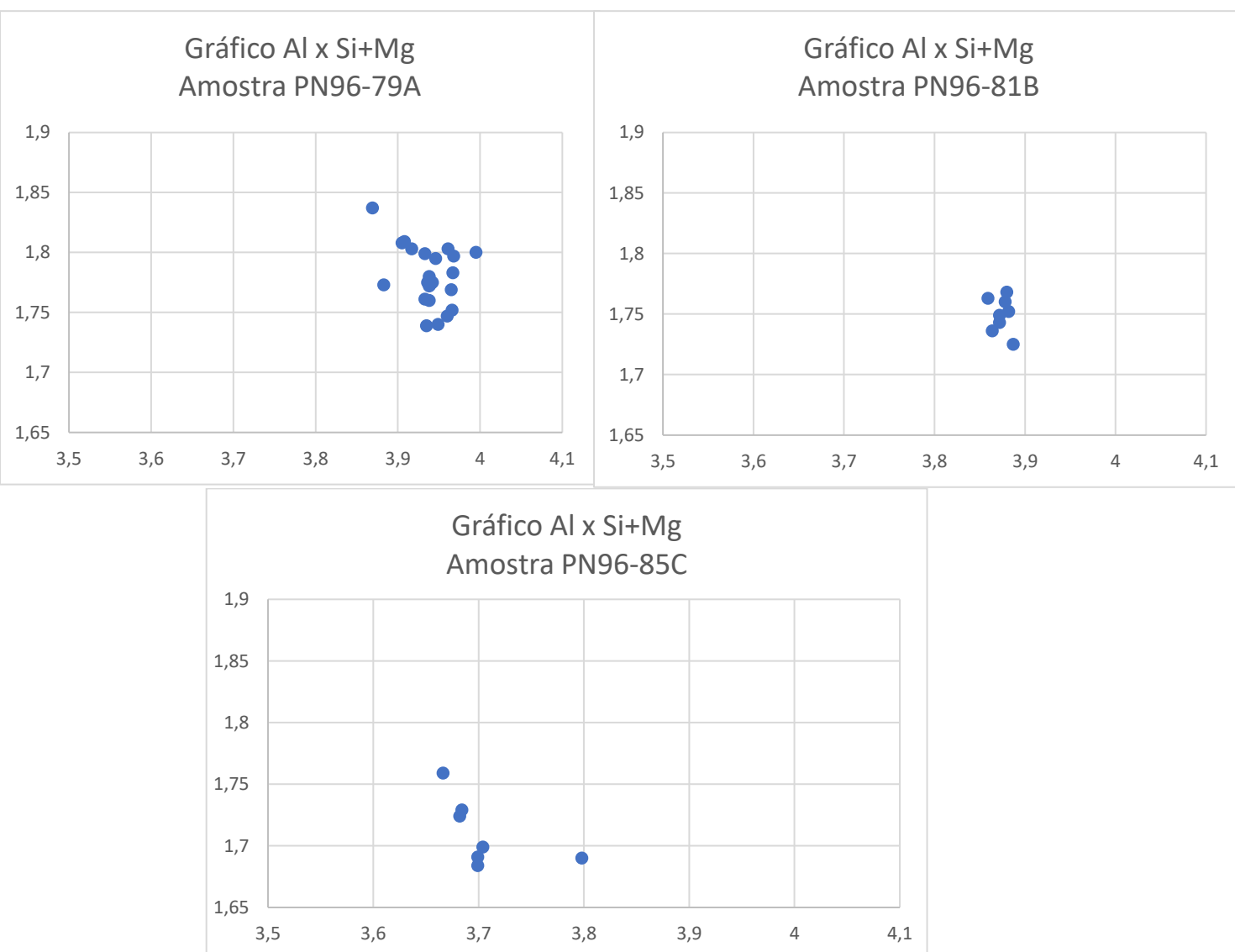


Figura 11. Gráfico de dispersão de íons de Al x Si+Mg, amostras PN96-79A, PN96-81B e PN96-85C (cianita-granada-muscovita xisto). Valores de Al no eixo Y e valores de Si+Mg no eixo X.

A porcentagem de titânio na biotita é um bom indicativo da temperatura que a rocha foi submetida. Nas rochas estudadas os valores de íons de Ti variam de 0,076 a 0,157 (figura 12) o que corresponde a 0,98% a 2,02% das rochas estudadas, sendo que os valores predominantes ocorrem perto de 1,5%.

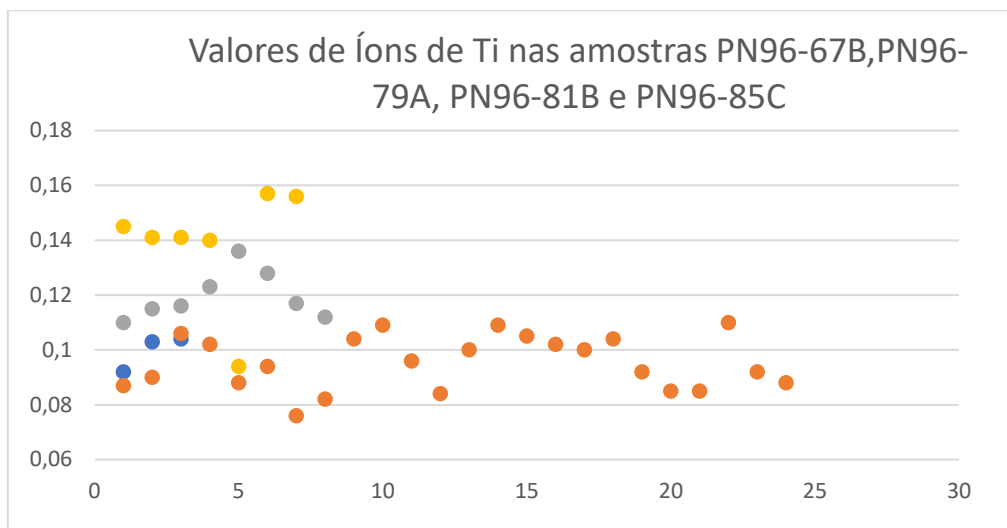


Figura 12. Gráfico de íons (Eixo y) de Ti nas amostras (Eixo X) das rochas PN96-67B, PN96-79A, PN96-81B e PN96-85C. Em azul observa-se o conjunto PN96-67B, em laranja observa-se o conjunto PN96-79A, em cinza observa-se o conjunto PN96-81B e em amarelo observa-se o conjunto PN96-85C.

6.3.4 Estauroлита

Das rochas estudadas, apenas duas apresentam estauroлита sendo elas a granada-estauroлита-biotita-muscovita xisto com cianita grafitoso (PN96-67B) e a cianita-granada-muscovita xisto (PN96-85C).

A amostra PN96-67B é a que apresenta a maior variação dos valores de X_{Mg} , variando de 0,12 a 0,18. Já a amostra PN96-85C apresenta valores mais semelhantes de aproximadamente 0,18 (figura 13).

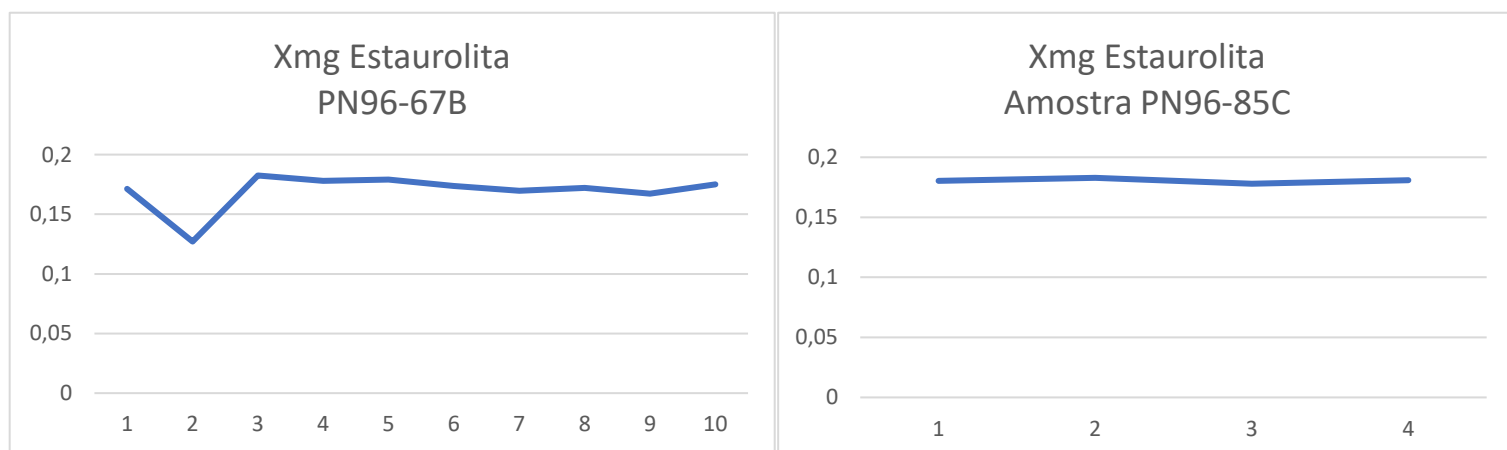


Figura 13. Gráfico X_{mg} da estauroлита nas amostras PN96-67B (granada-estauroлита-biotita-muscovita xisto com cianita grafitoso) e PN96-85(cianita-granada-muscovita xisto).

6.3.5 Muscovita

Dentre as amostras analisadas, apenas a amostra PN96-79A não contém análise de química mineral da muscovita. Já nas outras amostras é possível observar, que de maneira geral, os valores de Si e Al estão próximos de 3 o que significa uma baixa substituição de Al por outros elementos, como por exemplo Fe, Mg e Ti.

No granada-estauroлита-biotita-muscovita xisto com cianita grafitoso (PN96-67B) os íons de Si variam de 3,004 a 3,005, enquanto os íons de Al variam de 2,871 a 2,911. No xisto com biotita, muscovita, quartzo e plagioclásio (PN96-81B), os íons de Si variam de 2,993 a 3,053, enquanto os íons de Al variam de 2,822 a 2,885. Já na cianita-granada-muscovita xisto (PN96-85C), os íons de Si variam de 3,034 a 3,062, enquanto os íons de Al variam de 2,832 a 2,852. A figura a seguir esboça os valores de íons em relação as amostras de cada rocha (figura 14).

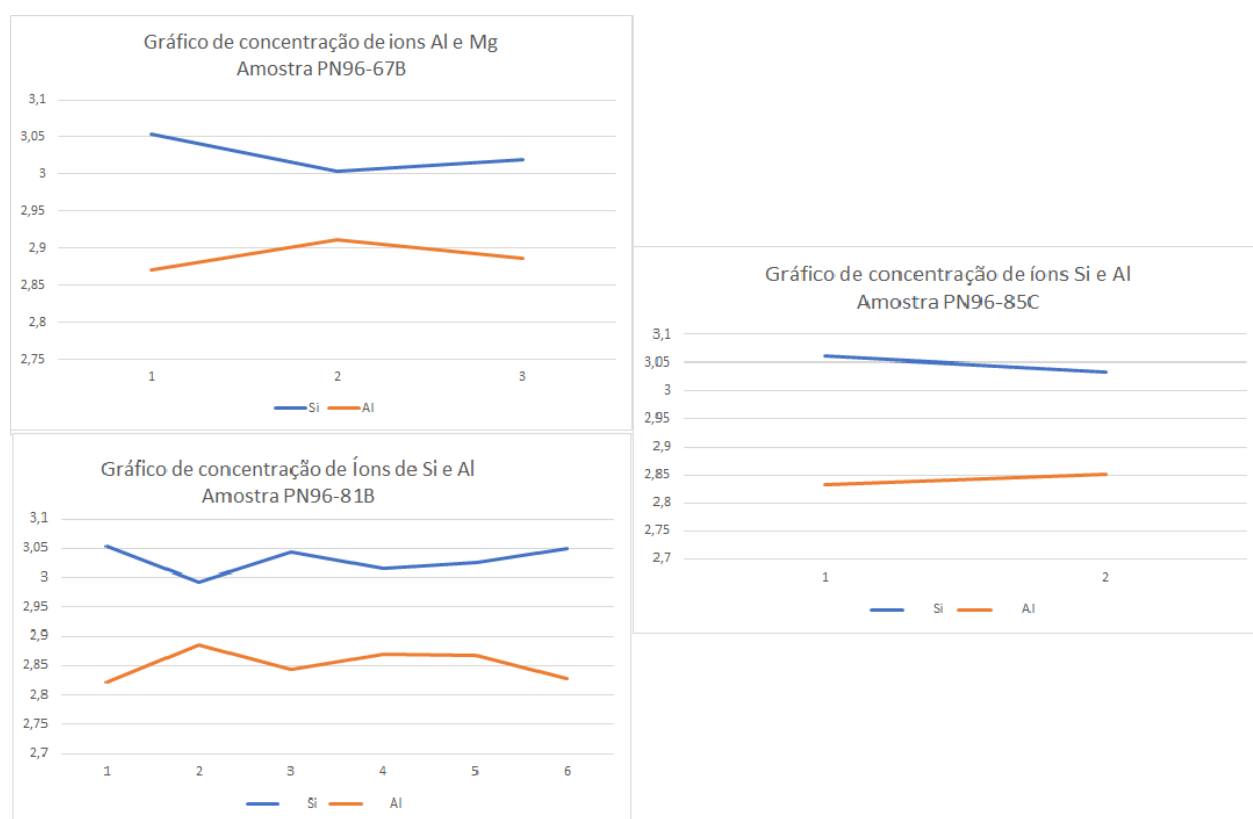


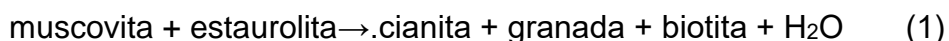
Figura 14. Gráfico de concentração de íons de Si e Al na muscovita das amostras PN96-67B, PN96-81B e PN96-85C.

6.4 METAMORFISMO

Como mencionado, o objetivo do trabalho foi definir as condições de pressão e temperatura que as rochas pelíticas do Grupo Dom Silvério foram submetidas. Para tanto, optou-se por definir um campo de P - T com base nos diagramas KFMASH (Spear & Cheney, 2000) e de estabilidade da muscovita (Spear et al. 1999), a partir da observação petrográfica. Posteriormente, as amostras utilizadas para a petrografia seriam encaminhadas para análise química e a P - T seriam definidas a partir do programa *THERMOCALC*. Com o advento da pandemia, a segunda etapa não foi realizada, porém foram cedidas análises químicas de rochas semelhantes as rochas estudadas e que são originárias de um local próximo a área de estudo original. Os resultados obtidos de P - T obtidos a partir da petrografia, bem como os obtidos a partir análises químicas, estão expostos nos próximos tópicos.

6.4.1 Metamorfismo com base na petrografia

As lâminas 14-I-20-A apresentam quatro minerais característicos de pico metamórfico, que no caso são cianita, granada, biotita e estaurolita. Como foi descrito, a estaurolita presente apresenta cristais xenoblásticos e ocorre associada a granada e a biotita, sendo que os contatos com esses minerais se desenvolvem de maneira irregular, o que indica seu consumo. Com essas informações, pode se inferir que a estaurolita é um mineral remanescente, enquanto a cianita, a granada e a biotita compõem a paragênese da rocha. De acordo com o diagrama KFMASH (figura 15) de Spear et al. (2000), a reação que descreve a paragênese em questão é



(2000), que revela que a rocha é descrita pela reação de quebra da estauroлита e tem como paragênese a granada, cianita e biotita.

Devido a presença de muscovita, a determinação das condições de metamorfismo ocorre de modo semelhante as lâminas 14-I-20-B e PN-13-04, isto é, observa-se o diagrama de Spear & Cheney (2000) (figura 15) e Spear et al. (1999) (figura 16). Com isso, pode se inferir as condições de P - T que são $P = 7,5-11,8$ kbar e $T = 640-750$ °C.

Em algumas lâminas do conjunto, ainda pode se observar estauroлита retro metamórfica. Como já mencionado, seus cristais são sub-idioblásticos a idioblásticos e truncam a foliação principal da rocha (composta pela biotita e muscovita). A textura observada indica que, provavelmente, a rocha foi formada cruzando a reação 1 (acima) primeiro indo do lado de baixa temperatura para alta temperatura e consumindo a estauroлита e, depois do lado de alta temperatura para baixa temperatura, produzindo estauroлита, representada pelos cristais que sobrecrescem a foliação.

A paragênese da rocha foi formada a partir da reação 1. Em algum momento do metamorfismo a rocha pode ter sofrido diminuição de pressão e temperatura, ocasionando no retro metamorfismo e na formação de estauroлита.

6.4.2 Metamorfismo com base na análise química fornecida

O projeto em questão foi finalizado com o auxílio das análises químicas das lâminas estudadas pela professora Maria Ângela Fornoni Cândia (Fapesp- 95/3173-3). Com as análises em mão, foi possível a realização de métodos mais robustos para a determinação de pressão e temperatura.

As condições metamórficas foram calculadas com o auxílio do programa *THERMOCALC* e com as planilhas *Metapelite Geobarometry* e *termômetro granada-biotita*, planilha elaborada por Dave Waters e contendo calibrações do termômetro granada-biotita (Bhattacharya et al. (1992) e do barômetro GASP.

6.4.2.1 Resultados *THERMOCALC*

No programa *THERMOCALC*, versão 3.26, calculou-se a pressão e temperatura de duas formas. Em um primeiro momento a P - T foi calculada de forma isolada e, em seguida, calculada em conjunto. Além disso, a presença de estauroлита

nas amostras PN96-67B e PN96-85C fez com que se optasse pelo cálculo da *P-T* com estauroлита e sem estauroлита com o intuito de observar se há ou não influencia nas condições metamórficas da presença do mineral. Os resultados obtidos estão expostos na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Resultados termobarométricos calculados com o programa THERMOCALC. A abreviação St se refere ao mineral estauroлита.

Amostra	PN96-67B	PN96-79A	PN96-81B	PN96-85C
Pressão (kbar)	7,82±2,22 com St 6,92± 2,2 sem St	7,25±0,95	9,03±0,83	9,58±0,87 com st 9,64±0,78 sem st
Temperatura (C°)	641±23 com st 600±101 sem st	605±98	572±99	621±21com st 618±42 sem st
Pressão e temperatura (calculados juntos)	8,1±2,2 e 641± 26 com st 6,9±2,2 e 604±97 sem st	6,2±2 e 583±112	7,3±1,4 e 535±76	9,4± 0.9 e 623±24 com st 8±1,4 e 549±77 sem st

Analisando a tabela 2, pode-se observar temperaturas por volta de 600 °C, sendo a máxima temperatura 641 °C e a mínima 572 °C. Em relação à pressão pode-se observar variação maior, sendo a máxima 9,64 kbar e a mínima 6,2 kbar.

Comparando-se a *P-T* de cada amostra nota-se uma disparidade. A amostra PN96-67B têm condições metamórficas que variam de 6,9 - 8,1 kbar e 600 a 641 °C. Na amostra PN96-79A a pressão varia de 6,2 a 7,25 kbar, enquanto a temperatura varia de 583 a 605 °C. Na amostra PN96-81B a pressão varia de 7,3 a 9,03 kbar e a temperatura varia de 535 a 572 °C. Já na amostra PN96-85C a pressão varia de 8 a 9,64 kbar e a temperatura varia de 549 a 623 °C. A provável diferença dos intervalos de *P-T* obtidos ocorre devido as análises químicas utilizadas. A amostra PN96-67B não tem dados químicos de plagioclásio, enquanto as amostras PN96-79A e PN96-81C não tem dados químicos de estauroлита, sendo que no primeiro caso ainda se nota valores consideráveis de Fe³⁺ (provavelmente causado por intemperismo químico da granada, em virtude da grande variação dos valores calculados por balanço de cargas). A lâmina PN96-85C, por sua vez, é a amostra com maior número de minerais com dados químicos (Anexo ZO), além de ser a que mais se aproxima com os valores de *P-T* estimados pelos diagramas de Spear & Cheney (2000) e Spear et al (1999),

cuja pressão determinada varia de 7,5 a 11,8 kbar e temperatura varia de 640-750 °C, para rochas com a paragénese cianita, granada e biotita.

Ao comparar-se as amostras individualmente em relação a P - T calculada separadamente com a P - T calculada em conjunto, observa-se, em geral, pouca variação. Na lâmina PN96-67B a maior diferença ocorre em relação a pressão calculada com a presença de estaurolita, sendo que P calculado isoladamente é de 7,82 kbar, enquanto P calculado junto com a T é de 8,1 kbar. Já nas lâminas PN96-79A e PN96-81B a diferença é mais expressiva, sendo que na primeira a pressão varia 1,15 kbar e a temperatura varia 22 °C, enquanto na segunda a pressão varia 1,7 kbar e a temperatura varia 37 °C. Na lâmina PN96-85C a maior variação ocorre quando se calcula P - T sem a presença de estaurolita, sendo 1,64 kbar a variação na pressão e 59 °C a variação na temperatura.

Outra observação importante é em relação a influência na P - T quando há ou não estaurolita. As únicas lâminas com dados químicos de estaurolita são a PN96-67B e PN96-85C. A lâmina PN96-67B indica que a presença ou não de estaurolita não tem influência direta na P - T . Já a lâmina PN96-85C tem resultados diferentes de P - T quando calculados isoladamente e quando calculados em conjunto, sendo que no primeiro caso tem-se o indício de uma não influência da estaurolita, ao contrário do segundo caso que indica influência.

Nenhum resultado calculado com o THERMOCAL resultou em valores P - T dentro do campo esperado e indicado pela petrografia, ou seja, em condições acima da quebra da estaurolita e antes da quebra da muscovita, estando todos ainda dentro do campo de estabilidade da estaurolita.

6.4.2.2 Resultados obtidos com Geobarômetro GASP e o termômetro granada-biotita

Com o auxílio do barômetro GASP e algumas calibrações do termômetro granada-biotita, foi possível calcular P - T das rochas estudadas através da química mineral e de planilha Microsoft Excel elaborada por Dave Waters.

No primeiro caso, calculou-se P - T usando-se como referência a calibração de granada-biotita de Bhattacharya et al. (1992) e variando o modelo de solução sólida da granada entre o de Ganguly & Saxena (1984) e o de Hackler & Wood (1984), além de

se calcular a pressão em função das temperaturas fornecidas pelo usuário (600 °C, 650 °C e 700 °C). Foram utilizados os barômetros GASP, GPMB-Mg e GPMB-Fe, calibrados por Bhattacharya et al. (1992).

No segundo caso, calculou-se a temperatura das amostras, em função das pressões fornecidas pelo usuário (6,7,8 e 9 kbar) com o termômetro granada biotita usando as calibrações de Bathacharya et al. (1992; com modelos de granada Hackler and Wood, 1984 e Ganguly and Saxena, 1984), Dasgupta et al, (1991), Ferry and Spear, (1978), Perchuk and Lavret'Eva, (1983), Thompson, (1976); Holdaway and Lee, (1977).

Os estudos foram realizados com o intuito de se comparar os resultados obtidos no THERMOCALC, além de se comparar as variações de P e T quando se fornece um referencial.

6.4.2.2.1 Metapelite Geotherbarometry

As condições metamórficas obtidas estão expostas a seguir.

6.4.2.2.1.1 Modelo granada *Ganguly & Saxena (1984)*

Tabela 3. Resultados de P-T obtidos com temperatura calculada pela própria planilha. A lâmina PN96-67 não tem resultados de pressão, pois não apresenta plagioclásio. Já a lâmina PN96-79A não tem os resultados de pressão GPMB-Mg e GPMB-Fe, pois não tem dados químicos de muscovita. A incerteza do termômetro granada-biotita de Bhattacharya et al (1992) é de 20 °C, já a incerteza do barômetro GASP é de aproximadamente 0,5-1kbar (Hodges & Spear, 1982).

	GASP	GPMB-Mg	GPMB-Fe	Temperatura
<i>PN96-67B</i>	-	-	-	585 °C
<i>PN96-79A</i>	<i>4,35 kbar</i>	-	-	560 °C
<i>PN96-81B</i>	<i>6,17 kbar</i>	<i>8,10kbar</i>	<i>6,12 kbar</i>	605 °C
<i>PN96-85C</i>	<i>8,75 kbar</i>	<i>10,5 kbar</i>	<i>7,92 kbar</i>	624 °C

Tabela 4. Pressão obtida com temperatura constante de 600° C. A lâmina PN96-67 não tem resultados de pressão, pois não apresenta plagioclásio. Já a lâmina PN96-79A não tem os resultados de pressão GPMB-Mg e GPMB-Fe, pois não tem dados químicos de muscovita. A incerteza do barômetro GASP é de 0,5-1 kbar, já as incertezas do GPMB-Mg e GPMB-Fe não foram encontradas na literatura.

	GASP	GPMB-Mg	GPMB-Fe	Temperatura
<i>PN96-67B</i>	-	-	-	600°C
<i>PN96-79A</i>	<i>5,03 kbar</i>	-	-	600°C
<i>PN96-81B</i>	<i>6,08 kbar</i>	<i>8,06 kbar</i>	<i>6,04 kbar</i>	600°C
<i>PN96-85C</i>	<i>8,24 kbar</i>	<i>10,26 kbar</i>	<i>7,50 kbar</i>	600°C

Tabela 5. Pressão obtida com temperatura constante de 650° C. A lâmina PN96-67 não tem resultados de pressão, pois não apresenta plagioclásio. Já a lâmina PN96-79A não tem os resultados de pressão GPMB-Mg e GPMB-Fe, pois não tem dados químicos de muscovita. A incerteza do barômetro GASP é de 0,5-1 kbar, já as incertezas do GPMB-Mg e GPMB-Fe não foram encontradas na literatura.

	GASP	GPMB-Mg	GPMB-Fe	Temperatura
<i>PN96-67B</i>	-	-	-	650°C
<i>PN96-79A</i>	5,87 kbar	-	-	650°C
<i>PN96-81B</i>	7 kbar	8,47 kbar	6,81 kbar	650°C
<i>PN96-85C</i>	9,28 kbar	10,75 kbar	8,36 kbar	650°C

Tabela 6. Pressão obtida com temperatura constante de 700° C. A lâmina PN96-67 não tem resultados de pressão, pois não apresenta plagioclásio. Já a lâmina PN96-79A não tem os resultados de pressão GPMB-Mg e GPMB-Fe, pois não tem dados químicos de muscovita. A incerteza do barômetro GASP é de 0,5-1 kbar, já as incertezas do GPMB-Mg e GPMB-Fe não foram encontradas na literatura.

	GASP	GPMB-Mg	GPMB-Fe	Temperatura
<i>PN96-67B</i>	-	-	-	700°C
<i>PN96-79A</i>	6,72 kbar	-	-	700°C
<i>PN96-81B</i>	7,91 kbar	8,89 kbar	7,58 kbar	700°C
<i>PN96-85C</i>	10,31 kbar	11,25 kbar	9,21 kbar	700°C

6.4.2.2.1.2 Modelo de granada Hackler & Wood (1984)

Tabela 7. Resultados de P-T obtidos com temperatura calculada pela própria planilha. A lâmina PN96-67 não tem resultados de pressão, pois não apresenta plagioclásio. Já a lâmina PN96-79A não tem os resultados de pressão GPMB-Mg e GPMB-Fe, pois não tem dados químicos de muscovita. A incerteza do termômetro granada-biotita de Bhattacharya et al (1992) é de 20 °C, já a incerteza do barômetro GASP é de aproximadamente 0,5-1kbar (Hodges & Spear, 1982).

	GASP	GPMB-Mg	GPMB-Fe	Temperatura
<i>PN96-67B</i>	-	-	-	578°C
<i>PN96-79A</i>	4,5 kbar	-	-	557°C
<i>PN96-81B</i>	6,34 kbar	7,69kbar	6,20 kbar	603°C
<i>PN96-85C</i>	8,9 kbar	9,93 kbar	7,99 kbar	623°C

Tabela 8. Pressão obtida com temperatura constante de 600°C. A lâmina PN96-67 não tem resultados de pressão, pois não apresenta plagioclásio. Já a lâmina PN96-79A não tem os resultados de pressão GPMB-Mg e GPMB-Fe, pois não tem dados químicos de muscovita. A incerteza do barômetro GASP é de 0,5-1 kbar, já as incertezas do GPMB-Mg e GPMB-Fe não foram encontradas na literatura.

	GASP	GPMB-Mg	GPMB-Fe	Temperatura
<i>PN96-67B</i>	-	-	-	600°C

<i>PN96-79A</i>	<i>5,22 kbar</i>	-	-	<i>600°C</i>
<i>PN96-81B</i>	<i>6,29 kbar</i>	<i>7,67 kbar</i>	<i>6,15 kbar</i>	<i>600°C</i>
<i>PN96-85C</i>	<i>8,42 kbar</i>	<i>9,7 kbar</i>	<i>7,59 kbar</i>	<i>600°C</i>

Tabela 9. Pressão obtida com temperatura constante de 650° C. A lâmina PN96-67 não tem resultados de pressão, pois não apresenta plagioclásio. Já a lâmina PN96-79A não tem os resultados de pressão GPMB-Mg e GPMB-Fe, pois não tem dados químicos de muscovita. A incerteza do barômetro GASP é de 0,5-1 kbar, já as incertezas do GPMB-Mg e GPMB-Fe não foram encontradas na literatura.

	GASP	GPMB-Mg	GPMB-Fe	Temperatura
<i>PN96-67B</i>	-	-	-	<i>650°C</i>
<i>PN96-79A</i>	<i>6,06 kbar</i>	-	-	<i>650°C</i>
<i>PN96-81B</i>	<i>7,21 kbar</i>	<i>8,09 kbar</i>	<i>6,92 kbar</i>	<i>650°C</i>
<i>PN96-85C</i>	<i>9,46 kbar</i>	<i>10,20 kbar</i>	<i>8,45 kbar</i>	<i>650°C</i>

Tabela 10. Pressão obtida com temperatura constante de 700° C. A lâmina PN96-67 não tem resultados de pressão, pois não apresenta plagioclásio. Já a lâmina PN96-79A não tem os resultados de pressão GPMB-Mg e GPMB-Fe, pois não tem dados químicos de muscovita. A incerteza do barômetro GASP é de 0,5-1 kbar, já as incertezas do GPMB-Mg e GPMB-Fe não foram encontradas na literatura.

	GASP	GPMB-Mg	GPMB-Fe	Temperatura
<i>PN96-67B</i>	-	-	-	<i>700°C</i>
<i>PN96-79A</i>	<i>6,91</i>	-	-	<i>700°C</i>
<i>PN96-81B</i>	<i>8,12 kbar</i>	<i>8,5 kbar</i>	<i>7,69 kbar</i>	<i>700°C</i>
<i>PN96-85C</i>	<i>10,49</i>	<i>10,69</i>	<i>9,3 kbar</i>	<i>700°C</i>

Comparando-se os resultados obtidos de Bathacharya et al. (1992) de uma mesma amostra, através da calibração de granada-biotita com os modelos de granada de Ganguly & Saxena (1984, GS) e do modelo de granada Hackler & Wood (1984, HW), nota-se que os resultados têm pouco variação, um exemplo é a amostra PN96-85C que tem temperatura calculada em 624 °C com o primeiro modelo 623 °C com o uso do segundo (tabela 3 e 7).

Ao se comparar os resultados *P-T* obtidos entre diferentes amostras (tabela 3 e tabela 7) nota-se diferenças consideráveis, com *P* variando de 4,35 kbar a 7,92 kbar (GS) e 4,5 kbar a 7,99 kbar (HW) e *T* variando de 560 a 624°C (GS) e 557 a 623°C (HW). A amostra PN96-67B não fornece resultados de pressão, pois não contém dados de plagioclásio, porém fornece temperatura de 585 °C (GS) e 578 °C (HW).

A amostra PN96-79A apresenta os menores resultados de P - T (tabela 3 e 7) com P por volta de 4,5 kbar e T por volta de 560 °C. Vale ressaltar que nesta amostra só foi possível utilizar o barômetro GASP, devido à ausência de dados químicos de muscovita.

De forma geral, a amostra PN96-81B apresenta P e T (tabela 3 e 7) de aproximadamente 6,2 kbar e 600 °C, sendo esses valores obtidos nos barômetros GASP e GMPB-Fe. O barômetro GMPB-Mg é o único com valor de pressão diferente dos outros barômetros, além de ser diferente quando se altera o modelo da granada. Neste a P obtida foi 8,10 kbar (GS) e 7,69 kbar (HW).

A amostra PN96-85C revela temperatura de 624 °C (Tabela 3 e 7). Em relação a P , pode-se observar uma variação em função do barômetro utilizado e em relação ao modelo da granada. No barômetro GASP a P varia de 8,75 a 8,9 kbar (GS-HW), já o barômetro GMPB-Mg tem P variando de 10,5 a 9,93 kbar (GS-HW) e barômetro GMPB-Fe tem P variando de 7,92 a 7,99 kbar (GS-HW).

As tabelas 4, 5, 6, 8, 9 e 10 foram feitas com o objetivo de se comparar a variação de P com T constante.

Nas tabelas 4 e 8 as pressões foram calculadas com temperatura fixa de 600 °C, nelas pode-se observar que as pressões variam mais em função da amostra observado do que do barômetro utilizado. A amostra PN96-79A apresenta P por volta de 5 kbar, enquanto a amostra PN96-81B apresenta P por volta de 6 kbar, nos barômetros GASP e GMPB-Fe, e 7-8 kbar no barômetro GMPB-Mg. Já a amostra PN96-85C apresenta P diferente nos três barômetros, sendo estes por volta de 8,2 kbar, 10 kbar e 7,5 kbar em GASP, GMPB-Mg e GMPB-Fe respectivamente.

As tabelas 5 e 9 foram calculadas com temperatura fixa de 650 °C. A amostra PN96-79A tem P por volta de 6 kbar, já a amostra PN96-81B tem P variando em função do barômetro, sendo por volta de 7 kbar, em GASP e GMPB-Fe, e 8 kbar, em GMPB-Mg. A amostra PN96-85C tem P por volta de 9 kbar, 10 kbar e 8 kbar nos barômetros GASP, GMPB-Mg e GMPB-Fe, respectivamente.

As tabelas 6 e 10 foram calculadas com temperatura fixa de 700 °C. A amostra PN96-79A forneceu P por volta de 7kbar. Já a amostra PN96-81B revela P por volta de 8 kbar, nos barômetros GASP e GMPB-Fe, e 9 kbar no barômetro GMPB-Mg. A

amostra PN96-85C apresenta P diferente nos três barômetros, sendo eles por volta de 10 kbar, em GASP, 11 kbar, em GMPB-Mg, e 9 kbar GPMB-Fe.

Como mencionado anteriormente, a amostra PN96-85C é a amostra mais completa, devido a sua quantidade de minerais com análises químicas. A partir desta, pode-se observar que a pressão provável da rocha varia de 7,92 kbar a 10,5 kbar (tabela 3 e 7) e sua temperatura calculada fica em torno de 624 °C. Das tabelas com valores fixos de temperatura (600, 650 e 700°C) pode-se observar que quanto maior a temperatura, maior será a pressão calculada.

6.4.2.2.2 Termômetro granada-biotita

O método em questão é específico para calcular diferentes temperaturas em função de uma pressão referencial. Dessa forma, calculou-se a temperatura das amostras PN96-67B, PN96-79A, PN96-81B e PN96-85C nas pressões 5, 6, 7 e 8 kbar. Os resultados obtidos estão expostos abaixo. Vale ressaltar que o único termômetro com incerteza conhecida é o termômetro granada-biotita calibrado por Bhattacharya et al (1992) com os modelos de granada de Ganguly & Saxena (1984) e Hackler & Wood (1984), cuja incerteza é de 20 °C.

Tabela 11. Temperatura (em °C) obtida em diferentes calibrações com pressão de 5 kbar.

Amostra	P(kbar)	HW	GS	Dasg91	FS78	HS82	PL83	T76	HL77
67B	5	579	585	345	565	580	576	586	570
79A	5	558	560	348	536	560	559	563	550
81B	5	603	605	391	606	634	598	617	598
85C	5	575	584	353	514	569	547	545	534

Tabela 12. Temperatura (em °C) obtida em diferentes calibrações com pressão de 6 kbar.

Amostra	P(kbar)	HW	GS	Dasg91	FS78	HS82	PL83	T76	HL77
67B	6	579	586	350	569	583	579	593	573
79A	6	558	561	353	540	563	562	569	553
81B	6	604	606	396	610	638	601	625	601
85C	6	576	585	358	518	572	549	552	537

Tabela 13. Temperatura (em °C) obtida em diferentes calibrações com pressão de 7 kbar.

Amostra	P(kbar)	HW	GS	Dasg91	FS78	HS82	PL83	T76	HL77
67B	7	580	587	354	573	587	581	600	576
79A	7	559	562	357	543	567	565	576	556
81B	7	604	607	401	614	642	604	632	604
85C	7	577	586	362	521	576	552	558	541

Tabela 14. Temperatura (em °C) obtida em diferentes calibrações com pressão de 8 kbar.

Amostra	P(kbar)	HW	GS	Dasg91	FS78	HS82	PL83	T76	HL77
67B	8	581	588	359	576	591	584	607	580
79A	8	560	563	361	547	570	567	583	559
81B	8	605	608	406	618	646	607	639	608
85C	8	577	587	366	525	579	554	565	544

Observando as tabelas 11, 12, 13 e 14 nota-se que o aumento da pressão não influencia de forma muito expressiva nos valores de temperatura (em relação a um mesmo barômetro), sendo a variação de no máximo 22 °C de diferença (tabela Z1 e Z4, barômetro T76).

Em relação ao resultado da temperatura pode-se dizer que os diferentes barômetros utilizados fornecerem valores de T semelhantes, com exceção do barômetro Dasg91. A temperatura obtida na amostra PN96-67B está no intervalo de 565 °C a 607 °C. Já a amostra PN96-79A tem temperaturas no intervalo de 536 °C a 583 °C. A amostra PN96-81B é a amostra com maiores valores de T , sendo seu intervalo de 598 °C a 646 °C. Por fim, a temperatura da amostra PN96-81C varia de 514 °C a 587 °C, sendo este o menor intervalo de temperatura calculado.

6.4.3 Pseudosseção

A pseudosseção foi elaborada no programa Perplex (Conolly,2005) a partir da rocha montada que foi construída através da combinação das informações da amostra MP-37 e PN96-85C (Tópico 5.3.3). O resultado pode ser observado na figura 17.

Ainda com o programa Perplex, se realizou a elaboração de isopletras para quatro minerais (Figura 18), com o intuito de verificar se a composição dos mesmos pode indicar condições P - T do metamorfismo. Para isso se elaborou uma isopletra de Xmg da estauroлита, isopletra de Xmg da biotita, uma isopletra de Xmg da granada e uma isopletra de teor de anortita.

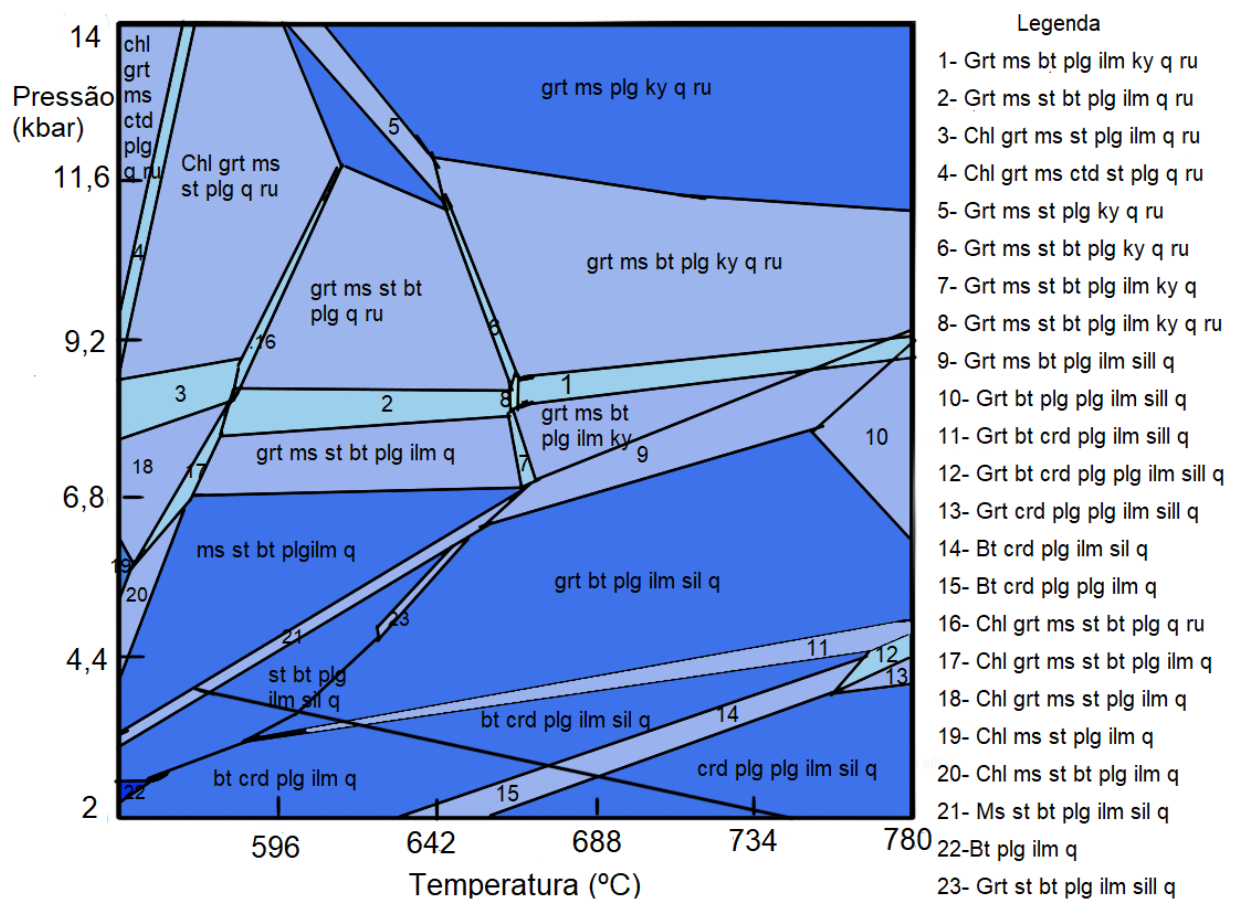
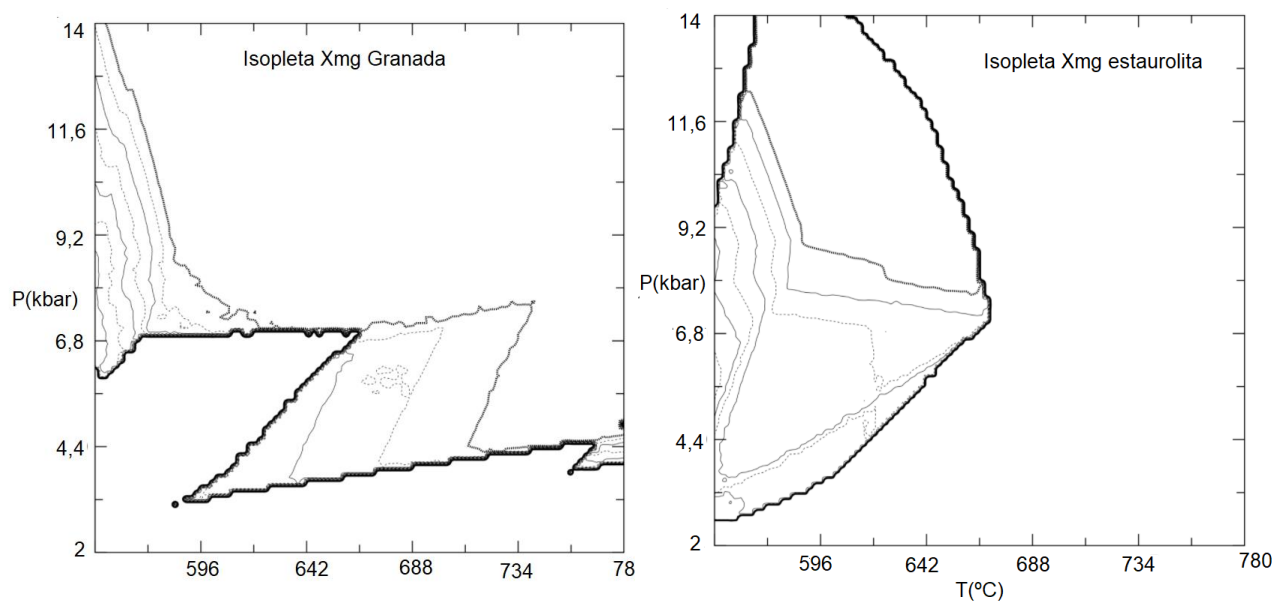


Figura 17. Pseudosseção realizada a partir de uma rocha montada, através da moda da amostra MP-37 (Analisada através da petrografia) e da análise química da amostra PN96-85C (fornecida pela professora Maria Ângela Fornoni Cândia). Programa Perplex (Conolly, 2005).



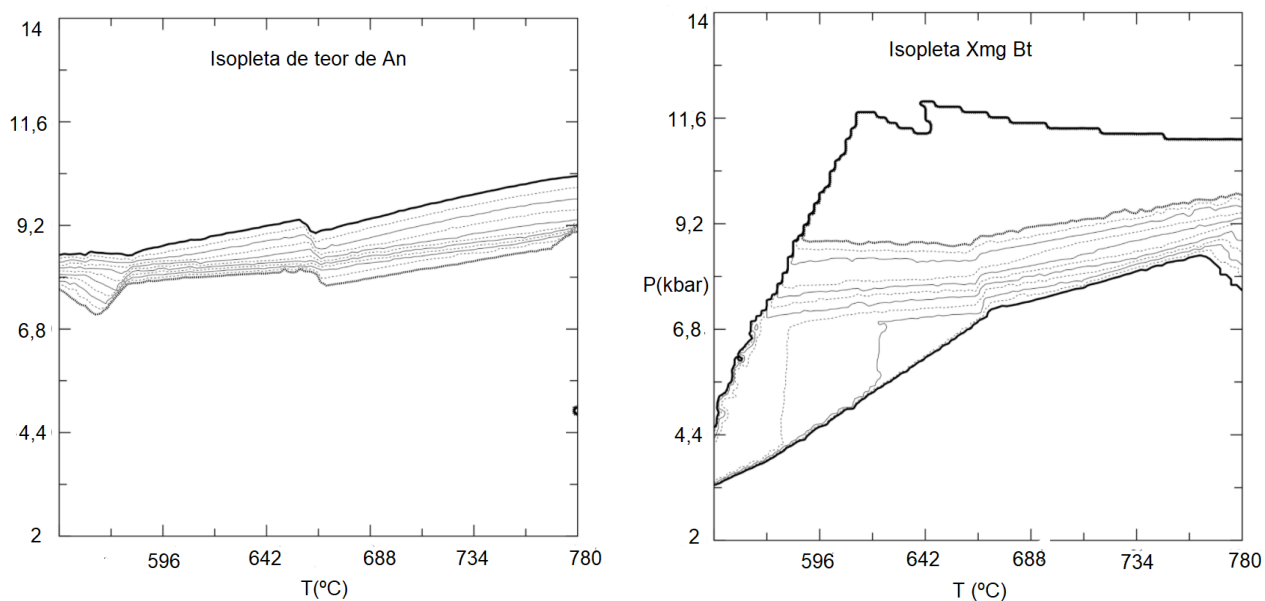


Figura 18. Isopletas elaboradas no programa Perplex (Conolly, 2005). Realizada com os dados de composição da rocha da amostra MP-37.

A pseudosseção conta mais de 30 campos com associações minerais (figura 17). Ao se analisar a associação mineral presente na rocha estudada (através da petrografia), nota-se que os minerais frequentes são estaurolita, cianita, plagioclásio, biotita, muscovita, granada, ilmenita, rutilo e quartzo, que de acordo com a pseudosseção ocorre por volta da 650 °C e 7,5 a 8 kbar, ou em condições *P-T* algo acima disso, como inferido pelas grades petrogenéticas (figura 17 - campo 8 c/ St e 1 sem St).

As isopletas, por sua vez, revelam que não é possível inferir condições *P-T* com base em todas as composições químicas. Uma boa concordância das composições químicas forneceria a convergência e todas as isopletas, ou da maior delas, em um campo de associação mineral da rocha. Contudo, pode-se observar que as isopletas de biotita e, principalmente, de granada apresentam composições que se afastam dos campos 1 e 8. Em contrapartida, pode-se observar que a isopleta de teor de anortita acompanha a associação mineral da rocha, da mesma forma que a isopleta de estaurolita. Com uma sobreposição das isopletas de estaurolita e anortita, pode-se observar que sua intersecção ocorre próximo ao campo de quebra da estaurolita que coincide com as condições próximas do campo provável de pico metamórfico das rochas estudadas.

7. DISCUSSÃO

A partir da petrografia realizada nas lâminas 14-I-20-A, 14-I-20-B, MP-37 e PN-1304, pode-se estimar as condições metamórficas da rocha estuda através dos diagramas de Spear & Cheney (2000) (figura 15) e Spear et al. (1999; figura 16). A partir deles, pode-se inferir pressão de 7,5 a 11,8 kbar e temperatura de 640 a 750 °C.

Com a análise química das amostras PN96-67B, PN96-79A, PN96-81B e PN96-85C, foi possível utilizar o programa THERMOCALC e as planilhas de geobarômetros. No programa no THERMOCALC, os resultados obtidos para P foram de 6,2 a 9,64 kbar e para T foram de 572 °C a 641 °C. Na planilha *Metapelite Geobarometry*, o intervalo de pressão obtido foi de 4,35 kbar a 10,5 kbar, enquanto o intervalo de temperatura foi de 557 °C a 623 °C.

A utilização da amostra MP-37 em conjunto com as análises químicas da amostra PN96-85C gerou uma pseudosseção que indica temperatura por volta de 650 °C e pressão por volta de 7,5 a 8 kbar, em consonância com o inferido pela petrografia e grades petrogenéticas.

Comparando-se os resultados da petrografia, com os resultados das isopletras minerais da pseudosseção, nota-se uma certa divergência, o que fica ainda mais discrepante em relação as temperaturas calculadas pela termobarometria. Já as pressões variam de acordo com o método e do estado da amostra, mas de forma geral ainda conseguem se localizar dentro do campo estimado da pressão. No tópico (6.2) de descrição das amostras PN96-67B, PN96-79A, PN96-81B e PN85C é citado que as amostras estudadas pela professora Maria Ângela Fornoni Cândia, são amostras que sofreram algum retrometamorfismo, pois há clorita nas bordas da granada, o que pode ter gerado interferência na química mineral e, conseqüentemente nos resultados de P e T . É observado em campo o intenso cisalhamento e a intercalação tectônica desses xistos com rochas do Complexo Mantiqueira, e é possível que esse cisalhamento tenha afetado a composição química de algumas fases, especialmente das micas, dificultando os cálculos P - T . As isopletras calculadas no trabalho (figura 18), corroboram com a teoria de que as amostras tenham sofrido alguma perturbação pós-pico, visto que a isopletra de biotita e de granada mostram composições muito diferentes daquelas do campo do pico metamórfico. Essa discrepância é o que deve ter gerado as diferenças nos cálculos termobarométricos.

Os resultados obtidos a partir da química mineral (barômetros e THERMOCALC) também divergem levemente da bibliografia estudada, de acordo com Benevides (2003), as condições metamórficas do Grupo Dom Silvério tem $T > 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ e P entre 7 a 12 kbar. Já Cuts et al. (2018) encontrou $T > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ e P entre 8-9 kbar. Os dados obtidos pelo método que utiliza a análise química (barômetros e THERMOCALC) apenas concordam com Peres et al. (2004), onde os autores encontraram T entre 520 a 640°C e $P > 4$ kbar.

Vale ressaltar que a maior divergência com os autores ocorre em relação a temperatura, que no estudo não ultrapassa $641\text{ }^{\circ}\text{C}$. As pressões obtidas no estudo ocorrem em uma janela de 6 kbar de diferença, porém os resultados mais consistentes estão em intervalos menores e mais próximos dos resultados encontrados pelos autores, é o caso do THERMOCALC que obteve P entre 6,2 a 9,64 kbar, sendo que as amostras com os maior número de minerais distintos (PN96-81B e PN96-85C, anexo 4 e 5) obtiveram P entre 7 e 9,7 kbar. Já as planilhas destas mesmas amostras também indicam P com menor intervalo que fica entre 6 e 10,5 kbar.

Outro ponto a se levar em consideração é o barômetro mais adequado no método de termobarometria a partir das planilhas *Metapelite Geobarometry*, elaborada por Dave Waters. O tópico 5.3.2 menciona que o barômetro GMPB-Mg utiliza como base para o seu cálculo os membros finais piropo e flogopita, enquanto o barômetro GMPB-Fe utiliza os membros finais almandina e annita. Como observado no tópico da química mineral, as rochas estudadas são ricas em almandina, sendo que a granada é composta por mais de 70% deste membro final. Com estas informações pode-se inferir que o barômetro que melhor representa as condições de P - T é o barômetro GPMB-Fe, o que revela um intervalo de 6 a 8 kbar e 603 a $623\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tabela 4 e 7). O intervalo ainda não corresponde ao intervalo almejado pelo diagrama KFMASH e nem pelos outros autores que estudaram a área, porém o valor se aproxima dos resultados de P - T obtidos com do THERMOCALC.

Um dado interessante, obtido através das planilhas *Metapelite Geobarometry* e termômetro granada-biotita é que a rocha estudada tem sua pressão alterada, quando sua temperatura aumenta (tópico 6.4.2.2.1), porém não sofre alteração na temperatura quando a pressão aumenta ou diminui (Tópico 6.4.2.2.2).

8. CONCLUSÃO

As rochas do Grupo Dom Silvério estudadas têm paragênese mineral composta por cianita, granada e biotita, como observado no diagrama AFM (Figura 19). A partir das análises petrográficas (amostras 14-I-20-A, 14-I-20-B, MP-37 e PN13-04), pode-se inferir que a presença ou não de muscovita nas rochas, provavelmente é ocasionada pela diferença de composição, visto que as amostras foram retiradas de locais não muito distantes, o que impossibilita que tenha ocorrido temperaturas muito diferentes no metamorfismo.

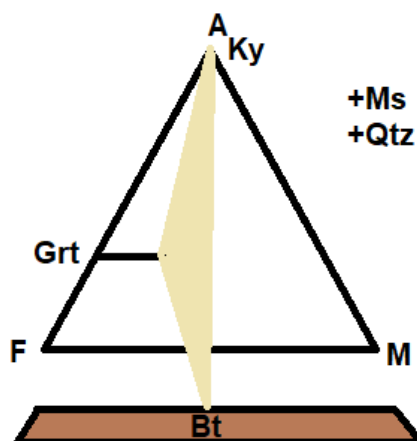


Figura 19. Diagrama AFM com a paragênese identificada nas lâminas examinadas.

Ainda com base na petrografia, se conclui que às condições metamórficas das rochas foram formadas no intervalo de pressão 7,5 a 11,8 kbar e no intervalo de temperatura 640 a 750 °C (Figura 20), o que é, em parte, corroborado pela pseudosseção calculada.

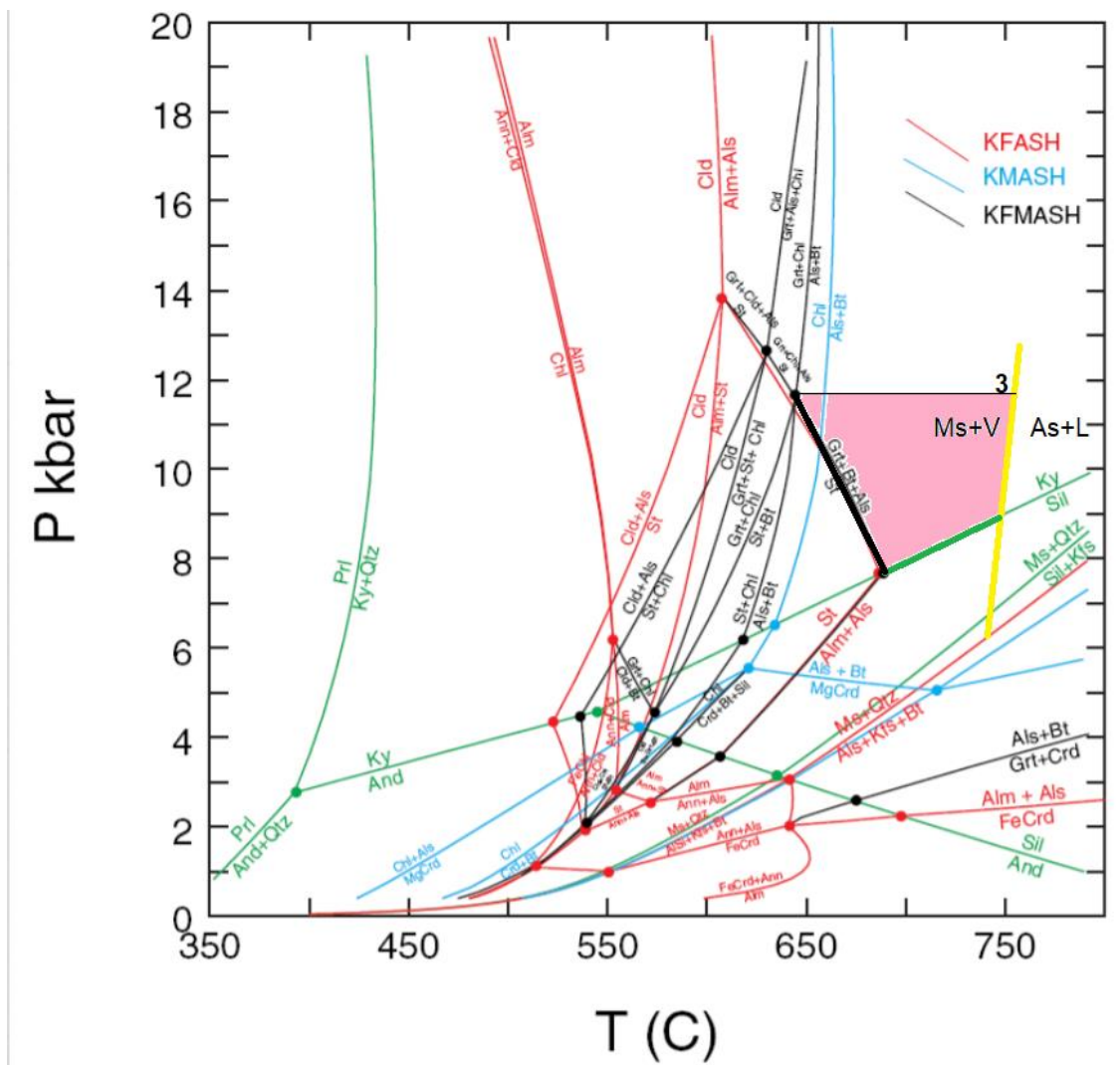


Figura 20. Diagrama inédito Spear & Cheney (2000) modificado com a reação 3 ($Ms+V \rightarrow As+L$) de Spear et al. (1999). A coloração rosa realça o intervalo de pressão e temperatura que as rochas do Grupo Dom Silvério podem ter sido submetidas. A pressão é apenas uma indicação, já que não é possível ter certeza do seu limite superior.

Já com base apenas nas análises químicas, as condições metamórficas encontradas a partir do programa *THERMOCALC* foram P entre 6,2 a 9,64 kbar e T entre 572 a 641 °C. Enquanto as planilhas revelaram P entre 4,35 e 10,5 kbar e T entre 557 a 623 °C.

Como mencionado na discussão, os valores de P - T estimados pela petrografia são diferentes dos valores de P - T obtidos a partir das análises químicas em que a termobarometria foi baseada. Não foi possível determinar com certeza absoluta o motivo da discrepância encontrada, sendo possível que seja efeito do retrometamorfismo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y.; NEVES, B.B.B. & FUCK, R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: VIII Simp. Geol. Nordeste, Campina Grande. Atas. Recife, SBG P.363- 391.
- ALMEIDA F. F. M. & HASUI Y. 1984. O pré-cambriano do Brasil. São Paulo, Edgard Blücher Ltda. 378p.
- ALKIMIM F. F.; PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; CRUZ, S. C. P. 2007. Sobre a Evolução Tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. Geonomos.
- BALTAZAR O.F. & RAPOSO F.O. 1993. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Folha Mariana, SF.23-X-B-I. Escala 1:100.000. Brasília: DNPM/CPRM, 196 p.
- BENEVIDES, T. 2003. Geotermobarometria e evolução metamórfica do segmento central do Grupo Dom Silvério, MG Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2 116p. + 2 anexos
- BRANDALISE, L.A. 1991. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Folha Ponte Nova, SF.23-X-B-II. Escala 1:100.000. Brasília: DNPM/ CPRM, 194 p.
- BRUECKNERB H, CUNNINGHAM WD, ALKMIM F.F. and MARSHAK S. 2000. Tectonic implications of Precambrian Sm-Nd dates from the southern São Francisco craton and adjacent Araçuaí and Ribeira belts, Brazil. Precamb Res 99: 255-269.
- Cândia, M.A.F. 1998. Equilíbrios Minerais Aplicados à Interpretação da Evolução de Cinturões Metamórficos do Sudeste Brasileiro – Estudo de Casos de Áreas Tipo. Relatório Final – Anexo 2 – Projeto FAPESP, 95/3173-3.
- Cutts, K.A., Lana, C.C., Alkmim, F.F., Peres, G.G. Metamorphic imprints on units of the southern Araçuaí belt, SE Brazil: the history of superimposed Transamazonian and Brasiliano orogenesis. Gondwana Research, 58: 211–234.
- CARSWELL, D.A. & HARLEY, S.L. 1990. Mineral barometry and thermometry. In Carswell, D.A. (Ed) Eclogite Facies Rocks. Chapman & Hall, New York, 82 -110.
- CONOLLY, J.A. 2005. Calculation of phase equilibria by linear programming: a tool for geodynamic modeling and its application to the decarbonization of the subduction zone. Earth and Planetary Science Letters, 236 (1–2) (2005), pp. 524 - 541
- DURKOP, C, LINDER B. & JORDT-EVANGELISTA H. 1997. Caracterização petrológica e geoquímica do Grupo Dom Silvério no seu local tipo, região de Dom Silvério, MG. In: Simp Geol Minas Gerais, 9., Anais... Ouro Preto: SBG Núcleo MG 14: 105-106.
- DASGUPTA, S., SENGUPTA, P., GUHA, D. & Fukuoka, M. 1991. A refined garnet - biotite Fe-Mg exchange geothermometer and its application in amphibolites and granulites *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109: 130–137.
- FERRY JM, SPEAR FS 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contribution Mineralogy Petrology* 66:113-117
- FUHRMAN M.L. and LINDSLEY D.H., 1988. Modeling and ternary-feldspar thermometry. *American Mineralogist*, 73 (1988), pp. 201 – 215
- GANGULY J, SAXENA SK (1984) Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and experimental data, and application to geothermo-barometry *American Mineralogist* 69:88-97
- HACKLER RT, WOOD BJ (1989) Experimental determination of Fe and Mg exchange between garnet and olivine and estimation of Fe-Mg garnet mixing properties. *American Mineralogist* 74:994-999
- HEILBRON, Monica; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, Mario da Costa; *et al.* Província Mantiqueira. In: *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* [S.l: s.n.], 2004.

- Hodges, K.V. & Spear, F.S. 1982. Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *American Mineralogist*, 67: 1118 - 1134.
- Holdaway, M.J. and Lee, S.M. 1977. Fe-Mg cordierite stability in highgrade pelitic rocks based on experimental, theoretical and natural observation; *Contributions Mineralogy Petrology* 63: 75-198.
- Holland, T.J.B e Powell R., 2011. An internally consistent thermodynamic data set improved and extended to phases of petrological interest, involving a new state equation for solids. *Journal of Metamorphic Geology*, 29 (3) (2011), pp. 333 – 383
- JORDT-EVANGELISTA, H. & ROESER H. 1988. Contribuição à petrologia do Grupo Dom Silvério, sudeste de Minas Gerais. In: *Cong Bras Geol*, 35, Anais... Belém: SBG 3: 1183-1192.
- JORDT-EVANGELISTA, H, ROESER H & CARMO VEF. 1990. Sobre o manganês no Distrito de Saúde e suas rochas encaixantes (Grupo Dom Silvério), Minas Gerais. *Rev Esc Minas* 43: 36-43.
- JORDT-EVANGELISTA, H. 1992. O Grupo Dom Silvério, SE de Minas Gerais: petrografia, metamorfismo, geoquímica e geologia econômica. *Rev Esc Minas* 45: 140-142.
- LIMA, J.O.A., FERREIRA, C.M. & SCHMIDT J.C. 1973. Relatório do mapeamento do Setor G da Geotransversal E-W. Ouro Preto: Minist. Min. Energ. DNPM - Escola de Minas/UFOP.
- PERCHUK, LL, Lavrent'eva, I. V. 1983. Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. In: Saxena, S.K. (ed) *Kinetics and equilibrium in mineral reactions*. Springer, New York, pp 199-239
- PERES, G, G. 2000. O Grupo Dom Silvério na região leste de Minas Gerais: arcabouço estrutural e evolução tectônica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 125 p.
- PERES, G.G.; ALKMIM, F.F.; JORDT-EVANGELISTA, H. 2004. The southern Araçuaí belt and the Dom Silvério Group: geologic architecture and tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76(4): 771-790.
- POWELL, R. & HOLLAND, T.J.B. 1985. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 1. Methods and a worked example. *Journal of Metamorphic Geology*, 3: 327 - 342.
- POWELL, R. & HOLLAND, T.J.B. 1994. Optimal geothermometry and geobarometry. *American Mineralogist*, 79: 120 - 133.
- POWELL, R, HOLLAND, TJB, & WORLEY, B, 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 577–588.
- PYLE, J. M.; SPEAR, F. S.; WARK, D. A.; DANIEL, C.G.; STORM, L. C. Contributions to precision and accuracy of monazite microprobe ages. *American Mineralogist*, v. 90, p. 547-577, 2005.
- RETTINGER R, OBERHANSLI R and DURKOP C. 1998. Thermometamorphic characterization of the transition zone between the Archean São Francisco Craton and the Neoproterozoic mobile belt, Minas Gerais, Brazil. *Zbl Geol Paläont Teil I* 1997: 721-738.
- SCHERRER, N. C.; ENGI, M.; GNOS, E.; JAKOB, V.; LECHTI, A. Monazite analysis: from sample preparation to microprobe age dating and REE quantification. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, v. 80, p. 93-105, 2000.
- SPEAR, F.S. 1989. Petrologic Determination of metamorphic pressure-temperature-time paths. In: Spear, F. & Peacock, S. M 1989. *Metamorphic Pressure-Temperature-Time Paths. Short Course in Geology*. vol. 7. 28th International Geology Congress. Washington, DC. 1-55.
- SPEAR, F.S.; MATTHEU, J.K. and CHENEY, J.T. 1999. P-T paths from anatetic pelites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*.
- SPEAR, F. S. and CHENEY, J.T. 2000 (inédito). KFMASH petrogenetic grid for metapelite. Disponível em: Frank S. Spear homepage: <http://ees2.geo.rpi.edu/spear/spear.html>.

- THOMPSON, J.B. Jr. 1957. The graphical analysis of mineral assemblages in pelitic schists. *American Mineralogist*, 42: 842 – 858.
- THOMPSON A.B. 1976. Mineral reactins in pelitic rocks: I Prediction of P-T-X(Fe-Mg) phase relations. *American Journal Science*, 276:401-424.
- WHITE R.W., POWELL R., HOLLAND T.J.B, JOHNSON T.E., GREEN E.C.R.,2014. New mineral-composition activity relationships for thermodynamic calculations in metaelitic systems. *Journal of metamorphic geology*, 32 (3) (2014), pp. 261 – 286
- WHITE R.W., POWELL R., JOHNSON T.E., 2014. The effect of Mn on mineral stability in metapelites revisited: New a - x ratios for minerals containing manganese. *Journal of metamorphic geology*, 32 (8) (2014), pp. 809 – 828.
- WHITNEY D. L. & EVANS B. W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, Volume 95, pages 185–187.

ANEXOS

Tabela com composição de rocha total montada a partir de composição modal e química mineral.

Análises químicas de minerais da amostra PN96-67B

Análises químicas de minerais da amostra PN96-79^a

Análises químicas de minerais da amostra PN96-81B

Análises químicas de minerais da amostra PN96-85C

Anexo 1. Tabela com composição de rocha total montada a partir de composição modal e química mineral.

	Quartzo	Plagioclasio	Muscovita	Biotita	Granada	Estaurolita	Cianita	Rutilo	Ilmenita	
Composição em %-MP-37	35	9	11	20	8	7	8	1	1	
Densidade do mineral	2,65	2,62	2,88	3,3	4,32	3,8	3,65	4,2	4,79	
Volume mineral	92,75	23,58	31,68	66	34,56	26,6	29,2	4,2	4,79	
Composição química Amostra PN96-85C										
SiO ₂	100	60,98	46,490	35,340	37,33	27,77	37,5	0		
TiO ₂	0	0	0,050	2,530	0,05	0,72		100	49,9	
Al ₂ O ₃	0	25,08	36,480	19,250	29,96	54,44	61,5	0		
Fe ₂ O ₃	0	0	0,000	0,000	1,11	0	0	0	5,7	
FeO	0	0,02	1,140	19,940	33,63	13,92	0	0	43,3	
MnO	0	0	0,000	0,000	0,47	0,02	0	0	0	
MgO	0	0	0,640	8,730	2,93	1,72	0	0	0	
CaO	0	6,42	0,000	0,010	4,95	0,03	0	0	0	
Na ₂ O	0	8,08	1,290	0,130	0	0	0	0	0	
K ₂ O	0	0,09	9,870	9,360	0	0	0	0	0	
Composição química (Amostra PN96-85C) x Volume mineral (Amostra MP-37)										Total
SiO ₂	9275	1437,9084	1472,8032	2332,44	1290,1248	738,682	1095	0	0	17641,96
TiO ₂	0	0	1,584	166,98	1,728	19,152	0	420	239,021	848,465
Al ₂ O ₃	0	591,3864	1155,6864	1270,5	1035,4176	1448,104	1795,8	0	0	7296,894
Fe ₂ O ₃	0	0	0	0	38,3616	0	0	0	27,303	65,6646
FeO	0	0,4716	36,1152	1316,04	1162,2528	370,272	0	0	207,407	3092,559
MnO	0	0	0	0	16,2432	0,532	0	0	0	16,7752
MgO	0	0	20,2752	576,18	101,2608	45,752	0	0	0	743,468
CaO	0	151,3836	0	0,66	171,072	0,798	0	0	0	323,9136
Na ₂ O	0	190,5264	40,8672	8,58	0	0	0	0	0	239,9736
K ₂ O	0	2,1222	312,6816	617,76	0	0	0	0	0	932,5638
Total										31202,24
Composição Da rocha montada		Composição da rocha montada %		molar	% molar					
0,565406791		56,54	60,08	0,9411	63,292					
0,027192439		2,72	79,88	0,0340	2,289					
0,233858031		23,39	101,96	0,2294	15,425					
0,002104484		0,21	159,69	0,0013	0,089					
0,099113352		9,91	71,85	0,1379	9,277					
0,000537628		0,05	70,94	0,0008	0,051					
0,023827392		2,38	29,88	0,0797	5,363					
0,010381101		1,04	56,08	0,0185	1,245					
0,007690909		0,77	61,98	0,0124	0,835					
0,02988772		2,99	94,2	0,0317	2,134					
				1,4869	100					

Anexo 2. Análises químicas de minerais da amostra PN96-67B.

Bi=Biotita, G=Granada, Mu= muscovita, St= Estauroлита, Fsp =Feldspato.

Sample	g 1	g 2	g 3	g 4	g 5	g 6	g 7	g 8	g 9	g 10	bi 7	bi 8	bi 9	mu 1
Min	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	bi	bi	bi	mu
SiO2	38.63	37.55	38.31	38.14	37.71	37.92	37.89	37.06	37.38	37.69	35.95	36.18	35.68	46.19
TiO2	0.00	0.14	0.00	0.00	0.10	0.00	0.04	0.00	0.06	0.00	1.63	1.82	1.85	0.75
Al2O3	21.60	21.67	21.85	21.36	21.12	21.40	21.18	20.92	21.42	21.62	19.68	20.02	19.64	36.83
Cr2O3	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00
Fe2O3	0.00	0.27	0.00	0.00	0.21	0.02	0.00	1.93	0.91	1.37	0.00	0.00	1.25	0.00
FeO	35.28	33.92	34.67	34.24	33.64	33.38	32.97	33.64	34.62	32.83	18.33	19.06	18.59	0.92
MnO	2.64	2.34	2.50	2.79	2.82	3.01	3.07	2.53	2.60	2.91	0.00	0.07	0.05	0.00
MgO	3.18	3.50	3.58	3.51	3.52	3.49	3.39	3.28	3.30	3.54	10.56	9.84	10.36	0.00
CaO	1.28	1.95	1.63	1.78	1.88	2.10	2.11	1.77	1.26	1.93	0.00	0.00	0.00	0.00
Na2O	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.26	0.24	0.23	1.12
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.49	8.01	8.52	9.18
Totals	102.65	101.31	102.57	101.79	100.98	101.32	100.65	100.93	101.46	101.86	94.95	95.29	96.05	95.00
Oxygens	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.0	11.0	11.0	11.0
Si	3.023	2.973	2.995	3.008	2.998	3.001	3.015	2.958	2.967	2.965	2.710	2.716	2.670	3.054
Ti	0.000	0.008	0.000	0.000	0.006	0.000	0.002	0.000	0.004	0.000	0.092	0.103	0.104	0.037
Al	1.993	2.022	2.014	1.986	1.980	1.997	1.987	1.968	2.004	2.005	1.749	1.772	1.733	2.871
Cr	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000
Fe3	0.000	0.016	0.000	0.000	0.012	0.001	0.000	0.116	0.054	0.081	0.000	0.000	0.071	0.000
Fe2	2.309	2.246	2.267	2.256	2.237	2.210	2.194	2.245	2.298	2.160	1.155	1.196	1.163	0.051
Mn	0.175	0.157	0.166	0.186	0.190	0.202	0.207	0.171	0.175	0.194	0.000	0.004	0.003	0.000
Mg	0.371	0.413	0.417	0.413	0.417	0.412	0.402	0.390	0.390	0.415	1.186	1.101	1.156	0.000
Ca	0.107	0.165	0.137	0.150	0.160	0.178	0.180	0.151	0.107	0.163	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.038	0.035	0.033	0.144
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.816	0.767	0.814	0.774
Sum	7.983	8.000	7.997	7.999	8.000	8.000	7.989	8.000	8.000	8.000	7.750	7.696	7.748	6.932
Sample	mu 2	mu 3	st 1	st 2	st 3	st 4	st 6	st 7	st 8	st 9	st 10	st 11		
Min	mu	mu	st	st	st	st	st	st	st	st	st	st		
SiO2	44.62	45.94	28.45	27.15	27.37	27.15	27.70	27.78	26.90	27.89	27.76	26.62		
TiO2	0.59	0.54	0.64	0.64	0.48	0.84	0.62	0.64	0.46	0.65	0.53	0.63		
Al2O3	36.68	37.26	54.78	53.43	54.56	52.99	54.43	53.79	54.61	53.31	53.60	52.96		
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00		
Fe2O3	0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
FeO	0.84	0.67	14.41	14.31	13.97	14.58	13.73	14.66	14.04	14.41	14.45	14.46		
MnO	0.00	0.00	0.13	0.17	0.12	0.24	0.18	0.18	0.15	0.12	0.15	0.21		
MgO	0.55	0.58	1.67	1.17	1.75	1.77	1.68	1.73	1.61	1.68	1.63	1.72		
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Na2O	1.11	1.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
K2O	9.08	8.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Totals	93.48	95.53	100.08	96.87	98.28	97.57	98.38	98.87	97.77	98.06	98.12	96.60		
Oxygens	11.0	11.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0		
Si	3.004	3.019	7.726	7.634	7.567	7.601	7.640	7.664	7.484	7.743	7.704	7.527		
Ti	0.030	0.027	0.131	0.135	0.100	0.177	0.129	0.133	0.096	0.136	0.111	0.134		
Al	2.911	2.887	17.538	17.711	17.784	17.490	17.699	17.494	17.913	17.449	17.538	17.655		
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.009	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000		
Fe3	0.000	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Fe2	0.047	0.036	3.273	3.365	3.230	3.414	3.167	3.382	3.267	3.346	3.354	3.420		
Mn	0.000	0.000	0.030	0.040	0.028	0.057	0.042	0.042	0.035	0.028	0.035	0.050		
Mg	0.055	0.057	0.676	0.490	0.721	0.739	0.691	0.711	0.668	0.695	0.674	0.725		
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Na	0.145	0.143	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
K	0.780	0.754	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Sum	6.973	6.947	29.374	29.376	29.438	29.477	29.377	29.447	29.463	29.397	29.416	29.511		

ANEXO 3. Análises químicas de minerais da amostra PN96-79^a

Bi=Biotita, G=Granada, Mu= muscovita, St= Estaurolita, Fsp =Feldspato.

Sample	2	5	6	7	10	100	11	12	13	14	15	16	14
Min	bi	bi	bi	bi	bi	bi	bi	bi	bi	bi	bi	bi	bi
SiO2	34.30	35.85	36.25	36.90	35.21	36.10	36.27	36.32	35.81	35.77	35.71	35.51	35.72
TiO2	1.53	1.60	1.88	1.84	1.58	1.67	1.34	1.47	1.84	1.93	1.70	1.48	1.77
Al2O3	20.16	19.70	20.01	20.07	20.55	20.61	20.17	20.51	19.99	20.00	20.07	20.30	19.90
Cr2O3	0.06	0.02	0.05	0.04	0.08	0.04	0.04	0.07	0.05	0.01	0.11	0.08	0.00
Fe2O3	3.01	1.52	0.00	0.00	2.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00
FeO	15.35	16.31	17.36	16.52	15.08	17.13	16.81	16.71	16.81	16.66	16.98	16.13	16.43
MnO	0.14	0.18	0.10	0.13	0.15	0.09	0.17	0.12	0.15	0.11	0.07	0.22	0.13
MgO	12.05	11.31	11.03	11.18	12.09	10.99	11.17	11.46	11.12	11.14	11.16	11.29	11.32
CaO	0.03	0.02	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Na2O	0.10	0.17	0.13	0.27	0.09	0.19	0.11	0.16	0.18	0.07	0.21	0.13	0.21
K2O	7.21	8.29	8.49	8.70	6.93	8.70	8.59	8.64	8.77	8.82	8.61	8.53	8.88
Totals	93.94	94.97	95.32	95.70	94.73	95.52	94.67	95.47	94.72	94.51	94.62	94.61	94.36
Oxygens	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
Si	2.590	2.686	2.706	2.732	2.620	2.688	2.719	2.699	2.692	2.692	2.687	2.669	2.693
Ti	0.087	0.090	0.106	0.102	0.088	0.094	0.076	0.082	0.104	0.109	0.096	0.084	0.100
Al	1.795	1.740	1.761	1.752	1.803	1.809	1.783	1.797	1.772	1.775	1.780	1.799	1.769
Cr	0.004	0.001	0.003	0.002	0.005	0.002	0.002	0.004	0.003	0.001	0.007	0.005	0.000
Fe3	0.171	0.086	0.000	0.000	0.166	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.052	0.000
Fe2	0.970	1.022	1.084	1.023	0.938	1.067	1.054	1.038	1.057	1.049	1.069	1.014	1.036
Mn	0.009	0.011	0.006	0.008	0.009	0.006	0.011	0.008	0.010	0.007	0.004	0.014	0.008
Mg	1.356	1.263	1.227	1.234	1.341	1.220	1.248	1.269	1.246	1.250	1.251	1.264	1.272
Ca	0.002	0.002	0.002	0.004	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
Na	0.015	0.025	0.019	0.039	0.013	0.027	0.016	0.023	0.026	0.010	0.031	0.019	0.031
K	0.695	0.792	0.808	0.822	0.658	0.827	0.822	0.819	0.841	0.847	0.827	0.818	0.854
Sum	7.693	7.719	7.721	7.719	7.641	7.740	7.732	7.740	7.751	7.740	7.752	7.739	7.765
Sample	35	36	1	3	4	8	9	101	102	104	105	106	107
Min	bi	bi	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
SiO2	34.21	35.63	38.27	37.15	38.10	38.03	38.15	38.43	38.35	37.68	37.73	37.83	38.84
TiO2	1.83	1.78	0.01	0.01	0.12	0.00	0.06	0.06	0.03	0.08	0.00	0.08	0.00
Al2O3	19.61	19.70	21.54	21.01	21.53	21.13	21.54	21.74	21.68	21.33	21.49	21.13	21.43
Cr2O3	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	3.11	0.00	0.00	0.88	0.80	0.38	0.00	0.11	0.14	0.92	0.74	0.45	0.00
FeO	15.86	16.37	30.19	29.29	30.71	30.19	30.33	31.42	31.02	30.46	29.93	29.58	30.49
MnO	0.13	0.16	5.35	6.39	5.31	6.81	6.38	4.29	4.70	4.82	4.89	5.07	4.87
MgO	11.76	10.65	3.48	3.21	3.47	3.08	3.30	3.51	3.41	3.43	3.13	2.82	3.13
CaO	0.03	0.01	3.08	2.30	2.65	2.26	2.20	3.11	3.14	2.87	3.63	4.34	3.53
Na2O	0.10	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	6.23	8.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Totals	92.97	92.70	101.92	100.24	102.69	101.88	102.01	102.71	102.47	101.61	101.54	101.31	102.29
Oxygens	11.0	11.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Si	2.604	2.723	3.003	2.980	2.978	3.005	3.000	2.994	2.996	2.975	2.978	2.996	3.033
Ti	0.105	0.102	0.001	0.001	0.007	0.000	0.004	0.004	0.002	0.005	0.000	0.005	0.000
Al	1.760	1.775	1.993	1.987	1.984	1.968	1.997	1.997	1.997	1.985	2.000	1.973	1.973
Cr	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
Fe3	0.178	0.000	0.000	0.053	0.047	0.022	0.000	0.006	0.008	0.054	0.044	0.027	0.000
Fe2	1.010	1.046	1.981	1.965	2.007	1.995	1.995	2.047	2.027	2.011	1.976	1.959	1.992
Mn	0.008	0.010	0.356	0.434	0.352	0.456	0.425	0.283	0.311	0.322	0.327	0.340	0.322

Sample	108	109	110	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
Min	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
SiO2	37.64	38.49	37.99	37.55	38.01	37.87	37.37	38.13	37.71	36.35	38.11	37.30	37.63	37.38
TiO2	0.00	0.04	0.08	0.00	0.06	0.05	0.08	0.00	0.09	0.07	0.02	0.01	0.01	0.00
Al2O3	21.61	21.37	21.51	21.09	21.31	21.03	21.00	20.99	21.60	20.85	21.76	21.10	21.07	21.02
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.06	0.04	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00
Fe2O3	0.23	0.00	0.00	1.06	0.17	0.92	1.64	0.00	0.97	2.22	0.93	0.46	1.12	1.45
FeO	31.03	31.42	30.22	29.67	31.10	30.81	30.10	30.11	29.57	27.64	30.12	29.27	30.62	30.43
MnO	4.79	3.91	6.60	6.45	3.54	3.81	4.34	4.66	4.70	5.06	5.16	5.13	4.95	4.84
MgO	3.46	3.71	3.13	3.34	3.71	3.56	3.44	3.30	3.22	3.12	3.07	3.24	3.48	3.45
CaO	2.31	3.14	2.17	2.14	3.28	3.37	3.22	3.79	3.98	4.06	3.72	3.41	2.47	2.51
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
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
Totals	101.07	102.08	101.70	101.36	101.19	101.43	101.19	101.04	101.89	99.37	102.91	99.95	101.35	101.07
Oxygens	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Si	2.983	3.013	2.999	2.980	3.000	2.990	2.964	3.019	2.964	2.936	2.971	2.988	2.982	2.972
Ti	0.000	0.002	0.005	0.000	0.004	0.003	0.005	0.000	0.005	0.004	0.001	0.001	0.001	0.000
Al	2.019	1.972	2.002	1.973	1.983	1.958	1.964	1.959	2.001	1.985	2.000	1.993	1.968	1.970
Cr	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001	0.000	0.004	0.002	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000
Fe3	0.014	0.000	0.000	0.064	0.010	0.054	0.098	0.000	0.058	0.135	0.055	0.027	0.067	0.086
Fe2	2.057	2.057	1.995	1.969	2.053	2.034	1.997	1.994	1.944	1.867	1.964	1.961	2.030	2.023
Mn	0.322	0.259	0.441	0.434	0.237	0.255	0.292	0.313	0.313	0.346	0.341	0.348	0.332	0.326
Mg	0.409	0.433	0.368	0.395	0.436	0.419	0.407	0.389	0.377	0.376	0.357	0.387	0.411	0.409
Ca	0.196	0.263	0.184	0.182	0.277	0.285	0.274	0.322	0.335	0.351	0.311	0.293	0.210	0.214
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
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
Sum	8.000	7.999	7.995	8.000	8.000	8.000	8.000	7.999	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Sample	30	31	32	33	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
Min	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
SiO2	36.93	38.53	37.85	38.09	37.68	37.07	38.41	37.90	37.56	37.13	37.85	38.10	36.52	37.37
TiO2	0.08	0.00	0.09	0.00	0.08	0.05	0.02	0.02	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
Al2O3	20.99	21.83	21.52	21.35	21.31	21.04	21.27	21.56	20.71	21.19	21.43	21.26	20.52	21.19
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.06	0.00	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03
Fe2O3	1.57	0.04	0.51	0.04	0.49	1.11	0.00	0.24	1.12	1.37	0.33	1.02	2.34	1.32
FeO	29.96	31.39	30.15	30.23	29.73	29.92	30.66	29.87	29.93	29.76	30.18	30.13	28.90	30.08
MnO	3.73	3.28	5.64	5.28	6.14	4.03	4.21	4.67	4.90	5.05	5.03	5.13	4.72	5.09
MgO	3.62	3.68	3.39	3.28	3.13	3.49	3.42	3.24	3.32	3.28	3.22	3.09	3.47	3.49
CaO	3.15	3.75	2.68	3.22	2.81	3.24	3.77	3.87	3.20	2.87	3.40	3.69	2.97	2.52
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
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
Totals	100.04	102.49	101.83	101.53	101.37	99.95	101.82	101.37	100.79	100.65	101.55	102.46	99.43	101.09
Oxygens	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Si	2.957	2.998	2.981	3.005	2.985	2.970	3.015	2.989	2.992	2.962	2.986	2.986	2.951	2.968
Ti	0.005	0.000	0.005	0.000	0.005	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000
Al	1.981	2.002	1.998	1.985	1.990	1.987	1.968	2.005	1.945	1.993	1.993	1.965	1.955	1.984
Cr	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.004	0.000	0.003	0.000	0.000	0.003	0.000	0.002
Fe3	0.095	0.002	0.030	0.002	0.029	0.067	0.000	0.014	0.067	0.082	0.019	0.060	0.142	0.079
Fe2	2.007	2.042	1.986	1.994	1.970	2.005	2.013	1.971	1.994	1.986	1.991	1.975	1.953	1.998
Mn	0.253	0.216	0.376	0.353	0.412	0.273	0.280	0.312	0.331	0.341	0.336	0.341	0.323	0.342
Mg	0.432	0.427	0.398	0.386	0.370	0.417	0.400	0.381	0.394	0.390	0.379	0.361	0.418	0.413
Ca	0.270	0.313	0.226	0.272	0.239	0.278	0.317	0.327	0.273	0.245	0.287	0.310	0.257	0.214
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
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
Sum	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	7.998	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000

Sample	65	66	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
Min	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
SiO2	37.76	37.94	37.91	37.84	38.74	38.51	38.06	37.77	37.94	37.74	37.71	37.28	36.75	37.89
TiO2	0.10	0.01	0.00	0.00	0.09	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.08
Al2O3	21.57	21.10	21.74	21.15	21.83	21.72	21.59	21.14	20.94	21.46	21.36	20.81	20.99	21.34
Cr2O3	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02	0.04	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03
Fe2O3	0.90	1.27	0.59	1.31	0.00	0.26	0.28	0.26	0.09	1.05	0.20	1.15	1.89	0.28
FeO	31.33	31.18	30.02	30.19	31.98	31.71	30.98	30.74	30.80	30.72	31.41	30.67	29.08	30.60
MnO	3.42	3.60	6.58	4.71	3.53	3.74	4.59	6.17	5.07	4.56	5.01	4.92	6.82	5.27
MgO	3.48	3.35	2.98	3.58	3.86	3.86	3.56	3.11	3.52	3.52	3.31	3.40	2.96	3.43
CaO	3.31	3.57	2.60	3.05	2.86	2.88	2.76	2.05	2.47	2.74	2.11	2.24	2.09	2.60
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
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
Totals	101.87	102.06	102.43	101.83	102.91	102.74	101.82	101.27	100.84	101.80	101.11	100.49	100.63	101.52
Oxygens	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Si	2.968	2.983	2.976	2.979	3.003	2.995	2.991	3.001	3.016	2.973	2.994	2.983	2.949	2.992
Ti	0.006	0.001	0.000	0.000	0.005	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.005
Al	1.999	1.956	2.012	1.963	1.995	1.991	2.001	1.980	1.962	1.993	2.000	1.963	1.986	1.987
Cr	0.000	0.002	0.001	0.000	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002
Fe3	0.053	0.075	0.035	0.078	0.000	0.015	0.016	0.016	0.005	0.062	0.012	0.069	0.114	0.017
Fe2	2.060	2.050	1.971	1.988	2.073	2.062	2.036	2.043	2.048	2.024	2.086	2.053	1.952	2.021
Mn	0.228	0.240	0.438	0.314	0.232	0.246	0.306	0.415	0.341	0.304	0.337	0.333	0.464	0.353
Mg	0.408	0.393	0.349	0.420	0.446	0.447	0.417	0.368	0.417	0.413	0.392	0.405	0.354	0.404
Ca	0.279	0.301	0.219	0.257	0.238	0.240	0.232	0.175	0.210	0.231	0.180	0.192	0.180	0.220
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
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
Sum	8.000	8.000	8.000	8.000	7.993	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Sample	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94		
Min	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g		
SiO2	37.78	37.81	38.33	37.98	37.98	37.07	37.56	38.51	38.02	37.91	37.90	37.90		
TiO2	0.04	0.02	0.11	0.10	0.00	0.00	0.00	0.08	0.05	0.00	0.08	0.08		
Al2O3	21.41	21.02	21.41	21.25	21.42	21.18	21.39	21.81	21.80	21.67	21.26	21.26		
Cr2O3	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Fe2O3	0.33	0.25	0.00	0.37	0.20	2.36	1.44	0.00	0.66	0.42	0.04	0.04		
FeO	30.91	31.03	30.90	31.15	29.91	29.17	30.24	31.64	31.12	30.65	30.86	30.86		
MnO	4.55	5.01	4.56	4.72	5.09	5.05	5.14	5.22	5.04	6.35	6.44	6.44		
MgO	3.56	3.30	3.25	3.21	3.18	3.37	3.53	3.54	3.69	3.31	3.23	3.23		
CaO	2.61	2.53	2.95	3.01	3.65	3.15	2.48	2.04	2.11	1.83	1.76	1.76		
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		
Totals	101.23	100.98	101.51	101.79	101.43	101.35	101.83	102.84	102.50	102.14	101.56	101.56		
Oxygens	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0		
Si	2.988	3.006	3.018	2.995	2.998	2.940	2.961	3.000	2.973	2.983	3.002	3.002		
Ti	0.002	0.001	0.007	0.006	0.000	0.000	0.000	0.005	0.003	0.000	0.005	0.005		
Al	1.996	1.970	1.988	1.976	1.993	1.980	1.988	2.003	2.010	2.010	1.985	1.985		
Cr	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Fe3	0.020	0.015	0.000	0.022	0.012	0.141	0.085	0.000	0.039	0.025	0.002	0.002		
Fe2	2.045	2.063	2.035	2.054	1.975	1.934	1.994	2.061	2.035	2.017	2.044	2.044		
Mn	0.305	0.337	0.304	0.315	0.340	0.339	0.343	0.344	0.334	0.423	0.432	0.432		
Mg	0.420	0.391	0.381	0.377	0.374	0.398	0.415	0.411	0.430	0.388	0.381	0.381		
Ca	0.221	0.216	0.249	0.254	0.309	0.268	0.210	0.170	0.177	0.154	0.149	0.149		
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		
Sum	8.000	8.000	7.982	8.000	8.000	8.000	8.000	7.994	8.000	8.000	8.000	8.000		
													53	

ANEXO 4. Análises químicas de minerais da amostra PN96-81B

Bi=Biotita, G=Granada, Mu= muscovita, St= Estauroлита, Fsp =Feldspato.

Sample	bi 1	bi 2	bi 3	bi 4	bi 5	bi 6	bi 7	bi 8	fsp 1	fsp 2	fsp 3	fsp 4	fsp 5	fsp 6
Min	bi	bi	bi	bi	bi	bi	bi	bi	fsp	fsp	fsp	fsp	fsp	fsp
SiO2	36.03	36.51	36.07	35.93	36.45	35.90	36.18	36.46	62.17	62.26	62.49	62.19	62.86	62.31
TiO2	1.97	2.07	2.06	2.18	2.43	2.27	2.09	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al2O3	20.12	19.98	19.83	19.73	19.68	19.98	19.92	20.12	24.43	24.43	24.51	24.40	23.81	24.53
Cr2O3	0.03	0.13	0.04	0.07	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe2O3	0.69	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
FeO	17.55	18.48	18.13	18.13	18.04	18.08	18.07	18.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.13	0.16	0.09	0.13	0.13	0.07	0.15	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	10.76	10.68	10.52	10.55	10.61	10.51	10.64	10.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.45	5.30	5.23	5.26	4.96	5.61
Na2O	0.12	0.26	0.30	0.23	0.27	0.23	0.17	0.25	7.71	7.86	7.65	7.62	7.75	7.44
K2O	8.24	8.28	8.57	8.50	8.29	8.41	8.51	8.33	0.05	0.04	0.04	0.08	0.12	0.09
Totals	95.58	97.02	95.62	95.46	95.91	95.46	95.78	96.17	99.81	99.89	99.92	99.55	99.50	100.01
Oxygens	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
Si	2.685	2.691	2.699	2.693	2.711	2.687	2.699	2.705	2.750	2.751	2.756	2.755	2.782	2.749
Ti	0.110	0.115	0.116	0.123	0.136	0.128	0.117	0.112	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	1.768	1.736	1.749	1.743	1.725	1.763	1.752	1.760	1.274	1.273	1.275	1.274	1.243	1.276
Cr	0.002	0.008	0.002	0.004	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe3	0.040	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe2	1.093	1.138	1.134	1.137	1.122	1.132	1.127	1.132	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.008	0.010	0.006	0.008	0.008	0.004	0.009	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	1.195	1.173	1.173	1.179	1.176	1.172	1.183	1.173	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.258	0.251	0.247	0.250	0.235	0.265
Na	0.017	0.037	0.044	0.033	0.039	0.033	0.025	0.036	0.661	0.673	0.654	0.654	0.665	0.637
K	0.783	0.779	0.818	0.813	0.787	0.803	0.810	0.788	0.003	0.002	0.002	0.005	0.007	0.005
Sum	7.701	7.717	7.741	7.734	7.704	7.723	7.725	7.715	4.946	4.950	4.935	4.938	4.932	4.933
Sample	fsp 7	fsp 8	fsp 9	fsp 10	fsp 11	g 3	g 4	g 5	g 6	g 7	g 10	g 54	g 55	g 57
Min	fsp	fsp	fsp	fsp	fsp	g	g	g	g	g	g	g	g	g
SiO2	61.20	62.81	62.81	63.29	64.05	38.08	38.17	37.84	38.19	38.35	38.06	38.43	38.90	38.41
TiO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.05	0.15	0.05	0.00	0.00	0.00	0.03
Al2O3	24.80	24.46	23.90	24.32	23.81	21.59	21.26	21.49	21.46	21.15	21.82	21.84	22.45	21.63
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00
Fe2O3	0.27	0.00	0.00	0.00	0.12	0.27	0.05	0.31	0.62	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.16	32.80	32.07	32.25	32.81	32.08	31.78	31.59	32.37
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.63	4.32	3.89	3.26	3.44	5.10	5.28	5.28	4.75
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.93	3.33	3.48	3.32	2.98	3.18	2.94	2.87	3.24
CaO	5.86	5.38	4.91	4.96	4.57	1.91	2.03	2.40	3.38	3.35	1.93	1.80	1.92	1.89
Na2O	7.59	7.53	7.85	8.11	8.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K2O	0.05	0.06	0.01	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Totals	99.77	100.24	99.48	100.70	100.79	102.54	102.03	101.53	102.57	102.35	102.17	102.10	103.04	102.32
Oxygens	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Si	2.717	2.761	2.780	2.770	2.797	2.992	3.007	2.987	2.984	3.011	2.992	3.017	3.016	3.011
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.003	0.009	0.003	0.000	0.000	0.000	0.002
Al	1.298	1.268	1.247	1.255	1.226	2.000	1.974	2.000	1.977	1.958	2.022	2.021	2.052	1.999
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.002	0.002	0.000
Fe3	0.009	0.000	0.000	0.000	0.004	0.016	0.003	0.018	0.036	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.114	2.161	2.117	2.108	2.155	2.109	2.086	2.049	2.122
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.375	0.288	0.260	0.216	0.229	0.340	0.351	0.347	0.315
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.343	0.391	0.409	0.387	0.349	0.373	0.344	0.332	0.379
Ca	0.279	0.253	0.233	0.233	0.214	0.161	0.171	0.203	0.283	0.282	0.163	0.151	0.160	0.159
Na	0.653	0.642	0.674	0.688	0.695	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.003	0.003	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sum	4.958	4.928	4.934	4.947	4.937	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	7.997	7.972	7.957	7.987

Sample	g 58	g 59	g 60	g 61	g 62	g 63	g 64	g 65	g 66	g 67	mu 1	mu 2	mu 3	mu 4
Min	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	mu	mu	mu	mu
SiO2	36.49	37.14	37.59	37.32	37.79	37.67	37.34	36.98	37.26	38.14	46.90	45.07	46.48	45.54
TiO2	0.77	0.08	0.04	0.08	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.70	0.80	0.72	0.69
Al2O3	20.93	21.29	21.34	21.13	21.54	21.42	21.27	20.81	20.84	21.43	36.77	36.85	36.85	36.76
Cr2O3	0.00	0.01	0.06	0.00	0.07	0.03	0.03	0.05	0.05	0.02	0.04	0.03	0.04	0.00
Fe2O3	0.62	0.63	1.45	1.56	0.84	0.54	1.71	1.65	1.82	0.32	0.62	0.70	0.28	0.38
FeO	31.41	31.37	31.91	31.70	31.82	32.13	31.49	30.83	31.24	31.89	0.77	0.48	0.80	0.74
MnO	4.11	4.06	3.58	3.22	3.53	3.41	3.62	3.45	2.90	3.08	0.08	0.00	0.00	0.00
MgO	3.44	3.50	3.55	3.38	2.94	2.85	2.81	2.68	2.62	2.40	0.64	0.69	0.69	0.73
CaO	2.04	2.15	2.43	2.89	3.55	3.44	3.50	4.01	4.45	4.93	0.00	0.00	0.00	0.00
Na2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.96	0.91	1.04
K2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00	9.29	9.17	9.23
Totals	99.75	100.17	101.81	101.13	101.99	101.48	101.59	100.33	101.00	102.17	96.43	94.81	95.92	95.08
Oxygens	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.0	11.0	11.0	11.0
Si	2.941	2.972	2.962	2.961	2.974	2.981	2.956	2.964	2.966	2.997	3.053	2.993	3.043	3.015
Ti	0.047	0.005	0.002	0.005	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.034	0.040	0.035	0.034
Al	1.988	2.008	1.982	1.976	1.998	1.999	1.985	1.966	1.956	1.986	2.822	2.885	2.844	2.869
Cr	0.000	0.001	0.004	0.000	0.004	0.002	0.002	0.003	0.003	0.001	0.002	0.002	0.002	0.000
Fe3	0.037	0.038	0.086	0.093	0.049	0.032	0.101	0.099	0.109	0.018	0.031	0.036	0.015	0.020
Fe2	2.117	2.100	2.103	2.104	2.095	2.127	2.085	2.067	2.080	2.096	0.041	0.026	0.043	0.040
Mn	0.281	0.275	0.239	0.216	0.235	0.229	0.243	0.234	0.196	0.205	0.004	0.000	0.000	0.000
Mg	0.413	0.417	0.417	0.400	0.345	0.336	0.332	0.320	0.311	0.281	0.062	0.068	0.067	0.072
Ca	0.176	0.184	0.205	0.246	0.299	0.292	0.297	0.344	0.380	0.415	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.122	0.124	0.116	0.134
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.747	0.787	0.766	0.780
Sum	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	6.921	6.962	6.932	6.964
Sample	mu 5	mu 6												
Min	mu	mu												
SiO2	46.43	46.34												
TiO2	0.70	0.76												
Al2O3	37.33	36.45												
Cr2O3	0.00	0.00												
Fe2O3	0.55	0.28												
FeO	0.52	0.73												
MnO	0.00	0.00												
MgO	0.69	0.81												
CaO	0.00	0.00												
Na2O	0.84	0.82												
K2O	9.37	9.25												
Totals	96.39	95.43												
Oxygens	11.0	11.0												
Si	3.025	3.050												
Ti	0.034	0.038												
Al	2.868	2.828												
Cr	0.000	0.000												
Fe3	0.028	0.015												
Fe2	0.028	0.040												
Mn	0.000	0.000												
Mg	0.067	0.079												
Ca	0.000	0.000												
Na	0.106	0.105												
K	0.779	0.777												
Sum	6.936	6.932												

Anexo 5. Análises químicas de minerais da amostra PN96-85C.

Bi=Biotita, G=Granada, Mu= muscovita, St= Estauroлита, Fsp =Feldspato.

bi 2	bi 3	bi 4	bi 5	bi 6	bi 7	st 1	st 2	st 3	st 4	fsp 1	fsp 2
bi	bi	bi	bi	bi	bi	st	st	st	st	fsp	fsp
35.20	35.20	35.12	36.99	35.22	35.24	27.77	27.54	27.47	27.46	60.98	61.35
2.46	2.47	2.42	1.67	2.73	2.70	0.72	0.67	0.33	0.39	0.00	0.00
19.12	19.60	18.77	19.10	18.73	18.63	54.44	54.27	55.86	55.99	25.08	25.16
0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	1.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03
20.01	19.70	20.08	19.58	20.03	20.10	13.92	13.85	13.34	13.65	0.00	0.00
0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.04	0.01	0.03	0.00	0.00
8.69	8.69	8.80	9.13	8.78	8.74	1.72	1.74	1.62	1.69	0.00	0.00
0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	6.42	6.02
0.14	0.09	0.12	0.07	0.25	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	8.08	8.26
9.54	9.60	9.65	6.97	9.23	9.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.09
95.18	95.41	94.97	94.93	95.00	94.99	98.62	98.12	98.63	99.21	100.67	100.91
11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	46.0	46.0	46.0	46.0	8.0	8.0
2.692	2.680	2.697	2.777	2.697	2.701	7.642	7.619	7.531	7.497	2.694	2.700
0.141	0.141	0.140	0.094	0.157	0.156	0.149	0.139	0.068	0.080	0.000	0.000
1.724	1.759	1.699	1.690	1.691	1.684	17.663	17.700	18.053	18.022	1.306	1.306
0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
1.280	1.255	1.290	1.228	1.283	1.289	3.204	3.204	3.058	3.117	0.000	0.000
0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.005	0.009	0.002	0.007	0.000	0.000
0.990	0.986	1.007	1.021	1.002	0.998	0.705	0.717	0.662	0.688	0.000	0.000
0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.009	0.003	0.000	0.000	0.304	0.284
0.021	0.013	0.018	0.010	0.037	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.692	0.705
0.931	0.933	0.945	0.668	0.902	0.915	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.005
7.781	7.772	7.796	7.579	7.770	7.772	29.377	29.392	29.375	29.412	5.001	5.001
g 1N	g 3	g 4	g 5	mu 1	mu 2						
g	g	g	g	mu	mu						
37.48	36.83	38.01	37.43	46.49	45.68						
0.25	0.06	0.04	0.00	0.05	0.10						
21.78	21.81	21.33	21.33	36.48	36.42						
0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
0.97	1.75	0.00	0.03	0.00	0.32						
31.85	31.22	32.90	33.41	1.14	1.40						
0.32	0.60	0.50	0.46	0.00	0.00						
2.98	2.58	2.71	2.80	0.64	0.66						
5.89	5.98	5.51	5.17	0.00	0.00						
0.00	0.00	0.00	0.00	1.29	1.14						
0.00	0.00	0.00	0.00	9.87	9.52						
101.46	100.66	101.01	100.64	95.97	95.22						
12.0	12.0	12.0	12.0	11.0	11.0						
2.947	2.924	3.007	2.981	3.062	3.034						
0.015	0.004	0.002	0.000	0.002	0.005						
2.019	2.041	1.989	2.003	2.832	2.852						
0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
0.057	0.104	0.000	0.002	0.000	0.017						
2.095	2.073	2.177	2.226	0.063	0.077						
0.021	0.040	0.034	0.031	0.000	0.000						
0.349	0.305	0.320	0.332	0.063	0.065						
0.496	0.509	0.467	0.441	0.000	0.000						
0.000	0.000	0.000	0.000	0.165	0.147						
0.000	0.000	0.000	0.000	0.829	0.807						
8.000	8.000	7.996	8.016	7.017	7.004						

