



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PETROGRAFIA, QUÍMICA MINERAL E GEOTERMOBAROMETRIA DE
XISTO PELÍTICO AFLORANTE NA REGIÃO DE MONSENHOR HORTA,
QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Renan Souza Teixeira

MONOGRAFIA nº 491

Ouro Preto, outubro de 2023

**PETROGRAFIA, QUÍMICA MINERAL E
GEOTERMOBAROMETRIA DE XISTO PELÍTICO
AFLORENTE NA REGIÃO DE MONSENHOR HORTA,
QUADRILÁTERO FERRÍFERO**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Geraldo Magela Santos Sampaio

MONOGRAFIA

Nº 491

**PETROGRAFIA, QUÍMICA MINERAL E
GEOTERMOBAROMETRIA DE XISTO PELÍTICO
AFLORENTE NA REGIÃO DE MONSENHOR HORTA,
QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

Renan Souza Teixeira

Orientador

Prof. Dr.^a Gláucia Nascimento Queiroga

Co-orientador

Msc. Paulo Augusto de Paiva-Silva

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2023/1.

OURO PRETO

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T266p Teixeira, Renan Souza.

Petrografia química mineral e geotermobarometria de xisto pelítico afluente na região de Monsenhor Horta Quadrilátero Ferrífero.

[manuscrito] / Renan Souza Teixeira. - 2023.

38 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Gláucia Nascimento Queiroga.

Coorientador: Me. Paulo Augusto de Paiva-Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Petrografia. 2. Química mineral. 3. Quadrilátero Ferrífero (MG). 4. Xistos - Xisto pelítico. 5. Geotermobarometria. I. Queiroga, Gláucia Nascimento. II. Paiva-Silva, Paulo Augusto de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 552.4

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Renan Souza Teixeira

Petrografia, química mineral e geotermobarometria de xisto pelítico aflorante na região de Monsenhor Horta, Quadrilátero Ferrífero

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 17 de outubro de 2023

Membros da banca

Dra. Gláucia Nascimento Queiroga - Orientadora (Departamento de Geologia/UFOP)
Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo - (Departamento de Geologia/UFOP)
MSc. Flávia Compassi da Costa - (Departamento de Geologia/UFOP)

Gláucia Nascimento Queiroga, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/10/2023



Documento assinado eletronicamente por **Gláucia Nascimento Queiroga**, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 18/10/2023, às 19:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0610139** e o código CRC **73744E7C**.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por tornar possível as inúmeras superações das quais precisei pra chegar até aqui. Agradeço aos meus pais e meu irmão pelo amor incondicional, por todo apoio que foi imprescindível nesta e em todas outras jornadas. À toda minha família, meu avô, minhas avós, meus primos e primas, tios e tias, em especial à Tia Fatinha, que se foi muito cedo, mas que viu de pertinho o início deste sonho, me dando a honra de dividir sua casa para que eu pudesse fazer o cursinho pré-vestibular, como você faz falta!

À professora Gláucia pelas inúmeras oportunidades, por acreditar em mim, por me acalmar quando precisei, pelas aulas impecáveis, pela ótima orientação, pela paciência e pela amizade que criamos. Ao Guto por toda a ajuda e orientação durante a construção deste trabalho.

Aos grandes amigos que fizeram parte desta jornada: Tatiane, Roberta, Guilherme, Luísa, João Lucas, Lucas, Laís, Camila, Kauê, Wilker, Cindy, Maria Júlia, Duda, Nathália, Caio, Dani...Com vocês vivi momentos incríveis que valeram a pena cada segundo.

Por fim agradeço à UFOP pelo ensino público e de qualidade e aos apoios dos projetos de pesquisa da FAPEMIG (nº APQ-02811-21) e do CNPq (bolsa de produtividade em pesquisa PQ-1D), concedidos à orientadora, sem os quais esse TCC não teria sido viável. Agradeço também aos laboratórios de ensino e pesquisa do DEGEO-UFOP, especialmente ao Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic).

SUMÁRIO

Agradecimentos	vi
SUMÁRIO.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	x
Resumo	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	1
1.3 NATUREZA DO PROBLEMA	2
1.4 OBJETIVOS	3
1.5 METODOLOGIA.....	3
1.5.1 Revisão Bibliográfica.....	3
1.5.2 Amostragem e descrição petrográfica.....	5
1.5.3 Química Mineral	5
1.5.4 Geotermobarometria	6
1.6 ORGANIZAÇÃO DO VOLUME	7
2 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	9
2.1 INTRODUÇÃO.....	9
2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO	9
2.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL	14
2.3.1 Nappe Curral	15
2.3.2 Sistema de Nappes Ouro Preto.....	15
2.3.3 Terceira Geração: Amplificação	15
3 RESULTADOS.....	16
3.1 PETROGRAFIA DO XISTO PELÍTICO.....	16
3.2 QUÍMICA MINERAL.....	20
3.2.1 Granada.....	21
3.2.2 Plagioclásio	25
3.2.3 Estauroлита	27
3.2.4 Biotita.....	28
3.2.5 Muscovita.....	29
3.2.6 Clorita.....	30
3.3 GEOTERMOBAROMETRIA.....	30
4 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização do distrito de Monsenhor Horta e do afloramento estudado (triângulo verde)..	2
Figura 1.2: Fluxograma de etapas desta monografia.	3
Figura 2.1: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.	10
Figura 2.2: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero	11
Figura 2.3: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero	12
Figura 3.1: Mapa geológico da região sudeste do Quadrilátero Ferrífero	16
Figura 3.2: Fotografias da amostra de mão do xisto pelítico PS-02.	17
Figura 3.3: Fotomicrografias do xisto pelítico.	19
Figura 3.4: Lâmina delgada PS-02 de xisto pelítico evidenciando as marcações dos campos para análise.	20
Figura 3.5: Imagem de elétrons retro-espalhados com a localização dos pontos 1 a 12 realizados no cristal de granada 1 presente no campo 1.	21
Figura 3.6: Perfil composicional mostrando os teores das moléculas de grossulária (Gr), piropo (Py), almandina (Al) e espessartita (Sp) da Grt do campo 1.	22
Figura 3.7: Mapas químicos composicionais de raios-x da Grt do campo 1	23
Figura 3.8: Diagrama ternário para a classificação de plagioclásio da amostra PS-02 (em amarelo).	25
Figura 4.1: Gráfico com as temperaturas médias obtidas pelo método convencional do par Bt-Grt (561°C).	34

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Síntese dos principais trabalhos sobre metamorfismo abordados no TCC.....	4
Tabela 1.2: Especificações da rotina analítica utilizada nas análises químicas.....	6
Tabela 3.1: Relação entre campos, minerais e pontos de análise de microsonda eletrônica.	20
Tabela 3.2: Resultado de análise de química mineral em granadas da amostra de xisto pelítico (PS-02)..	23
Tabela 3.3: Resultado de análise de química mineral em plagioclásios da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microsonda.	26
Tabela 3.4: Resultado de análise de química mineral em estaurolitas da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microsonda.	28
Tabela 3.5: Resultado de análise de química mineral em biotitas da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microsonda.	29
Tabela 3.6: Resultado de análise de química mineral em muscovitas da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microsonda.	30
Tabela 3.7: Geotermometria do xisto pelítico (PS-02) com base em métodos convencionais.	31

Resumo

Esta monografia propõe a caracterização petrográfica, de química mineral e geotermobarométrica de um xisto pelítico aflorante na região de Monsenhor Horta, distrito do município de Mariana, área pertencente ao Quadrilátero Ferrífero. Os principais minerais constituintes deste xisto são quartzo, granada, estaurolita, muscovita, biotita, clorita e plagioclásio, com turmalina, zircão e opacos como acessórios. Qualitativamente, a partir da análise da paragênese mineral principal, é possível definir o metamorfismo como de fácies anfibolito, além da natureza pelítica do protólito. A rocha apresenta foliação S_n marcada pela orientação de biotita, muscovita e clorita. Planos de clivagem de crenulação S_{n+1} são encontrados transpondo a S_n . Porfiroblastos de granada rotacionados demonstram o caráter sin-cinemático em relação à S_n . Granadas tardi-cinemáticas também são encontradas localmente. Quimicamente, os porfiroblastos de granada são formados predominantemente pela molécula de almandina (75,40 a 61,42%), seguida de espessartita (21,33 a 2,30%), grossulária (18,56 a 8,77%) e piropo (13,19 a 5,40%). Mapas composicionais quantitativos de granada mostram aumento nas concentrações de ferro e empobrecimento de manganês do núcleo para as bordas dos cristais, indicando crescimento dos grãos com aumento de temperatura no metamorfismo progressivo. Os cristais de plagioclásio são classificados como oligoclásio, com química bastante homogênea ($An_{13-14,6}$). Estaurolita, biotita e muscovita possuem caráter químico homogêneo. Valores de temperatura e/ou pressão foram obtidos a partir do método convencional pela utilização do par biotita-granada (princípio da troca iônica) e a partir do *software* Thermocalc, que utiliza um banco de dados termodinamicamente consistente. Pelo método convencional, fixando a pressão em 6,0 Kbar, foram encontrados valores de 539°C a 589°C. Pelo *Thermocalc* os valores de temperatura e pressão obtidos são $603 \pm 10^\circ\text{C}$ e $605 \pm 19^\circ\text{C}$, e $5,88 \pm 0,56$ Kbar, respectivamente. A análise quantitativa do metamorfismo corrobora a análise qualitativa, mostrando que o metamorfismo da amostra estudada situa-se no campo da fácies anfibolito inferior a médio. Em termos regionais, esse metamorfismo de grau médio associa-se aos pulsos finais do evento Brasiliano, com idade situada no período Cambriano, que foi recentemente determinada por datação U-Pb em granada sin a tarde-tectônica *in-situ*.

Palavras-chave: Quadrilátero Ferrífero, xisto pelítico, petrografia, química mineral, geotermobarometria.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Metamorfismo diz respeito às mudanças texturais e/ou mineralógicas às quais rochas sedimentares, ígneas ou metamórficas são submetidas, em estado sólido, em resposta à variação de, principalmente, temperatura e/ou pressão (Yardley 2004). Rochas metapelíticas, de origem sedimentar, com alto teor de Al e baixo Ca (Yardley 2004), ocorrem vastamente sobre a superfície terrestre e são, em muitos casos, importantes portadoras de recursos minerais.

Estudos geotermobarométricos com modelagem metamórfica, a partir de softwares como o THERIAK-DOMINO (De Capitani & Petrakakis 2010), por exemplo, permitem determinar com certa precisão as condições de temperatura e pressão de geração de litotipos de interesse, sendo excelentes traçadores de P e T para rochas metapelíticas. Para a região de Monsenhor Horta, nas proximidades de Mariana (MG), caracterizações dessa natureza são escassas, mesmo ali aflorando litotipos metapelíticos que marcam a transição entre as fácies xisto verde e anfibolito (Jordt-Evangelista 1984, 1988; Roeser & Jordt-Evangelista 1985; Dias *et al.* 2014; Paiva-Silva 2023).

A partir das premissas lançadas acima, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) pretendeu relacionar informações geológicas a respeito do metamorfismo de rochas pelíticas à análise de um banco de dados microquímicos e geotermobarométricos levantado pela orientadora e pelo coorientador do estudo. Este TCC é parte integrante da dissertação de mestrado de Paulo Augusto Paiva-Silva intitulada “*Petrocronologia e evolução metamórfica da porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG: Estudos P-T-t-d a partir de xistos pelíticos*” e está inserido na linha de pesquisa “Petrologia de rochas ígneas e metamórficas do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (DEGO-UFOP). Importante apoio laboratorial se deve ao DEGEO, através dos laboratórios de Microscopia da graduação e do Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais (PPGECRN) e de Microscopia e Microanálises, setor de microsonda eletrônica (LMic). Esta pesquisa também contou com apoio dos seguintes projetos de pesquisa coordenados pela orientadora: a) FAPEMIG, Demanda Universal 001/2021, projeto N° APQ-02811-21 e, b) Bolsa de Produtividade em Pesquisa 1D do CNPq, processo N° 314810-2020-0.

1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O afloramento estudado encontra-se nos arredores de Monsenhor Horta, distrito do município de Mariana-MG (Figura 1.1). Para ter acesso à região, tendo de partida a capital, Belo Horizonte, deve-se seguir a rodovia BR-356 sentido à Mariana. Adentrando o município, deve-se seguir rumo à saída

sudeste, onde a BR-356 vai de encontro à MG-262, seguindo até o posto Santo Antônio das Roças Grandes, onde, virando à esquerda, encontra-se a estrada de acesso à Monsenhor da Horta. O trajeto, a partir de Mariana, tem cerca de 21 quilômetros de distância.

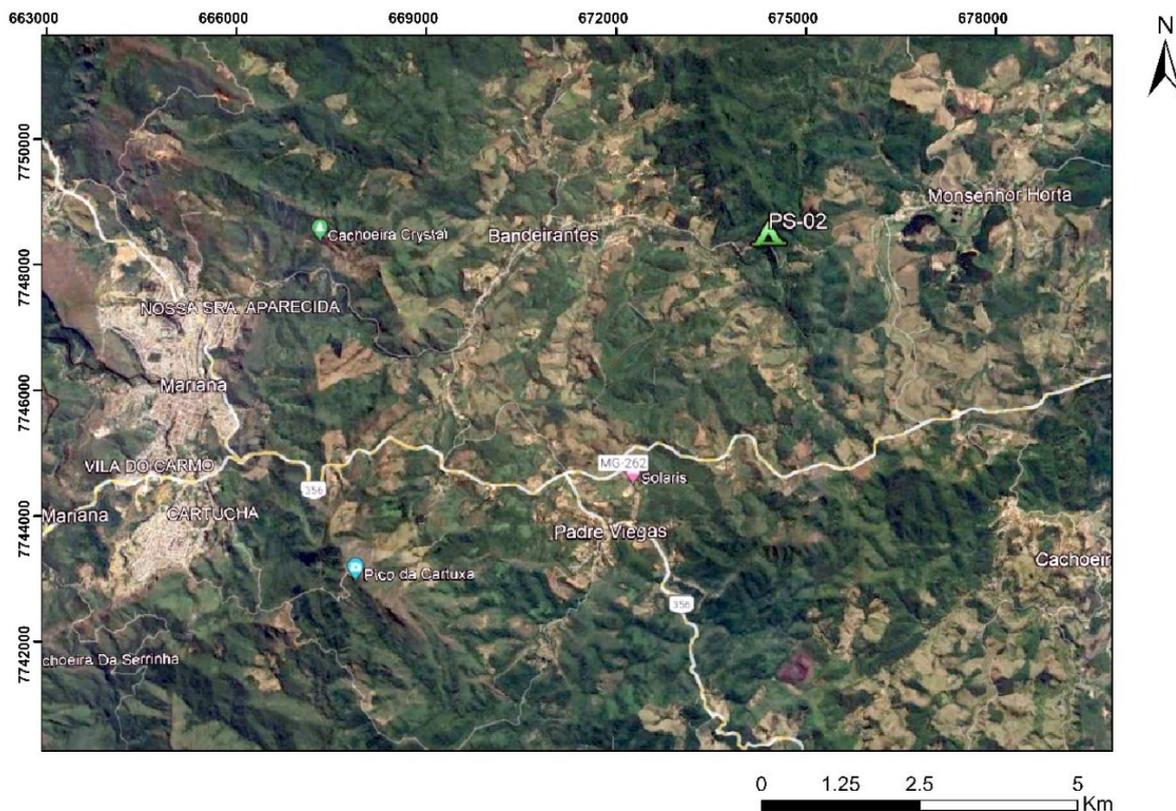


Figura 1.1: Localização do distrito de Monsenhor Horta e do afloramento estudado (triângulo verde). Fonte: Google Earth, acesso em 10/06/2023.

1.3 NATUREZA DO PROBLEMA

O metamorfismo pode acontecer em um amplo espectro de pressão e temperatura, desde a fácies sub-xisto verde, onde estão preservadas características primárias das rochas, até fácies de alta temperatura (granulito, por exemplo) e de alta pressão (xisto azul e eclogito, por exemplo) (Bucher & Grapes 2011). Portanto, há uma grande necessidade na utilização de métodos termobarométricos robustos (*e.g.* modelagem metamórfica), capazes de quantificar as condições de temperatura e pressão presentes na formação e ao decorrer da evolução metamórfica de vários litotipos.

Existem diferentes métodos que auxiliam na obtenção desses dados: seja por pseudosseções - utilizando *softwares* de modelamento como o THERIAK-DOMINO, De Capitani & Petrakakis (2010), pelo método convencional, que utiliza o princípio da troca catiônica entre elementos de mesmo raio e valência (*e.g.* par biotita-granada), desenvolvido a partir das contribuições de Thompson (1976),

Holdway & Lee (1977), Hodges & Spear (1982) e Bhattacharya *et al.* (1992), ou pelo *average P-T* do THERMOCALC (Holland & Powell 1990).

A rocha aqui analisada aflora em uma região geológica cujos estudos no âmbito da geotermobarometria são, quase todos, feitos a partir da metodologia convencional (*e.g.* Jordt-Evangelista 1992) e do *average PT* do THERMOCALC (*e.g.* Schmiedel 2014). Portanto, o presente trabalho contribui com novas e relevantes informações que enriquecerão o banco de dados geotermobarométricos da região estudada.

1.4 OBJETIVOS

O trabalho teve como objetivo principal realizar uma análise qualitativa, a partir da paragênese mineral principal, e quantitativa, pela análise dos dados microquímicos e utilização de geotermobarometria convencional e otimizada, do metamorfismo regional que levou à gênese do xisto pelítico, amostra PS-02 (Figura 1.1).

1.5 METODOLOGIA

Este TCC utilizou uma amostra da dissertação de mestrado de Paiva-Silva (2023), denominada PS02, e a partir da análise das amostras de mão, lâmina delgada e dados microquímicos, desenvolveu-se este TCC. A Figura 1.2 mostra o fluxograma de todas as etapas do trabalho, que serão detalhadas a seguir.

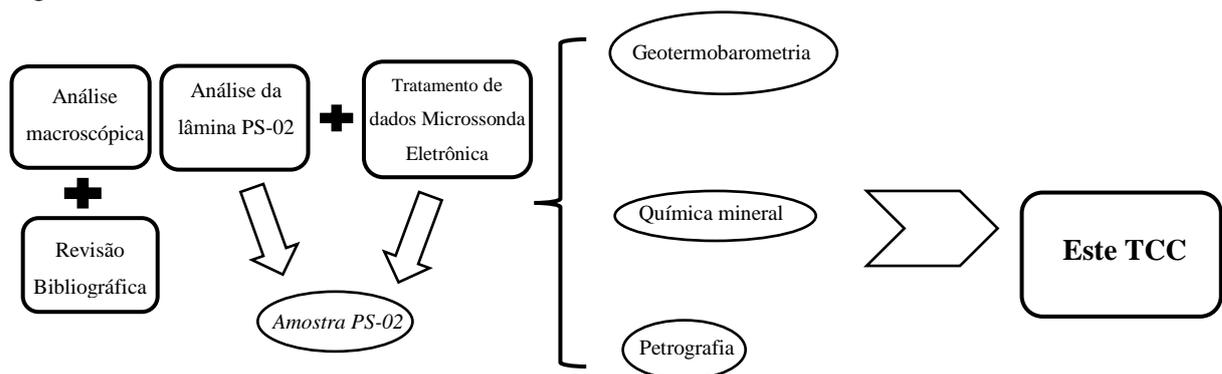


Figura 1.2: Fluxograma de etapas desta monografia.

1.5.1 Revisão Bibliográfica

Durante todo o desenvolvimento do trabalho, foram realizadas pesquisas bibliográficas a respeito dos principais conceitos que embasam o estudo do metamorfismo, bem como acerca da geologia

local e regional. Na caracterização metamórfica, deu-se ênfase ao protólito pelítico, mesmo protólito da amostra PS-02, cuja química mineral dá origem às rochas do sistema KFMASH (K_2O , Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 e H_2O). Devido à extrema importância do tema, uma síntese dos principais trabalhos abordados nesse TCC é apresentada na Tabela 1.1, tendo como suporte a síntese recém-publicada por Paiva-Silva *et al.* (2023).

Tabela 1.1: Síntese dos principais trabalhos sobre metamorfismo abordados no TCC.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	O QUE DIZ O TRABALHO
<i>Barrow (1893, 1912)</i>	Determinou nos altiplanos escoceses que os minerais formados durante o metamorfismo (regional ou progressivo) coexistem entre si a partir de combinações específicas (paragênese mineral) de acordo, principalmente, com o incremento da temperatura, definindo deste modo o conceito de zonas metamórficas.
<i>Eskola (1915, 1920, 1939)</i>	A partir do estudo de gnaisses finlandeses, instituiu o conceito de fácies metamórficas. Atualmente são adotadas onze fácies distintas, a saber: a) zeólita, prehnita-pumpelita, xisto verde, anfíbolito, granulito, de pressão média, b) xisto azul e eclogito, de pressão alta e, c) albita-epidoto hornfels, hornblenda hornfels, piroxênio hornfels e sanidinito, de pressão baixa.
<i>Winkler (1979)</i>	Criou o conceito de grau metamórfico, que é um indicador das condições de temperatura no metamorfismo. Dessa forma, têm-se grau muito baixo, baixo, médio e alto.
<i>Yardley (2004)</i>	Define as rochas metapelíticas como aquelas cuja composição apresenta alto teor de Al e baixo teor de Ca.
<i>Bucher & Grapes (2011)</i>	Definem o mesmo tipo de rocha como sendo aquelas formadas a partir do metamorfismo de sedimentos finos ou de rochas sedimentares de granulometria fina (menor que $2\mu m$), ricas em argilominerais, tais como

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	O QUE DIZ O TRABALHO
	argilitos, lamitos e folhelhos, além de rochas ou sedimentos siltosos. Os autores enfatizaram, também, a facilidade de se traçar o metamorfismo progressivo a partir da análise de metapelitos, já que bastam pequenas variações na temperatura e pressão neste tipo de rocha para que ocorra alterações em sua paragênese mineral.

1.5.2 Amostragem e descrição petrográfica

A amostra PS02, localizada nos arredores de Monsenhor Horta, foi coletada no âmbito da dissertação de mestrado de Paiva-Silva (2023). As coordenadas geográficas do afloramento são 674431/7748428 (zona 23K) (Figura 1.1).

A lâmina delgada polida, confeccionada no Laboratório de Laminação do DEGEO, foi descrita utilizando um microscópio binocular da marca Olympus, sob luz transmitida, visando a descrição detalhada da microestrutura e mineralogia da amostra, estabelecendo, assim, a paragênese mineral em equilíbrio e o caráter cinemático dos porfiroblastos de granada e estauroлита. As fotomicrografias foram tomadas com o auxílio de uma câmera AxioCam 5r acoplada ao microscópio binocular ZEISS, no Laboratório de Microscopia do PPGEARN. Todas as abreviações minerais seguiram a padronização internacional proposta por Whitney & Evans (2010).

1.5.3 Química Mineral

As microanálises de granada, plagioclásio, estauroлита, muscovita, biotita e clorita foram realizadas em uma microsonda eletrônica (EPMA) da marca JEOL, modelo JXA-8230, no Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMIC) do DEGEO. Para tanto, foram utilizados 15Kv de voltagem, 20nA de corrente e 5µm para o tamanho do feixe (*spot size*). Para todos os minerais foram feitos perfis transversais buscando englobar as bordas e o núcleo dos cristais. A Tabela 1.2 sintetiza os elementos analisados, a linha energética, os cristais associados a cada espectrômetro WDS e os padrões analíticos.

Tabela 1.2: Especificações da rotina analítica utilizada nas análises químicas. TAP- cristal de Ftalato Ácido de Tálcio (*Thallium acid phthalate*); PET – cristal de Pentaeritritol (*Pentaerythritol crystal*); LIF- cristal de Fluoreto de Lítio (*Lithium fluoride crystal*).

Elemento	Linha energética	Cristal	Padrão
Na	Ka	TAPH	Anortoclásio
Si	Ka	TAP	Quartzo
Al	Ka	TAP	Coríndon
Mg	Ka	TAP	Olivina
Fe	Ka	LIFH	Magnetita
Ti	Ka	PETJ	Rutilo
Ca	Ka	PETJ	Flúor-Apatita
K	Ka	PETL	Microclina
Mn	Ka	LIFL	MnO

Os cálculos minerais foram realizados através de planilhas do Excel desenvolvidas pela orientadora do TCC ou presentes no site <https://www.gabbrosoft.org/spreadsheets/>. As fórmulas minerais foram calculadas com base em 12 oxigênios para granada, 8 para plagioclásio, 23 oxigênios equivalentes para estauroлита e 22 oxigênios equivalente para micas. Diagramas binários e ternários utilizados para caracterizar os minerais foram obtidos por meio dos programas *Excel* e *Origin 6.1*.

1.5.4 Geotermobarometria

As análises geotermobarométricas que elucidam as condições de pressão e temperatura do litotipo analisado foram obtidas das seguintes formas:

- i. Pelo par biotita-granada, segundo os parâmetros termodinâmicos de Thompson (1976), Holdway & Lee (1977), Hodges & Spear (1982), Dasgupta *et al.* (1991) e Bhattacharya *et al.* (1992).

- ii. Utilizando-se o software THERMOCALC, que possui como base um acervo de dados termodinâmicos consistentes (Holland & Powell 1990), sendo utilizados os três modos, *average P*, *average T* e *average PT*.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO VOLUME

Este TCC está organizado em 5 capítulos, sendo eles:

Capítulo 1: Introduz a pesquisa a ser realizada, apresentando seus objetivos, a localização da área estudada, a natureza do problema tratado e a metodologia seguida.

Capítulo 2: Contextualiza, brevemente, o contexto geológico regional.

Capítulo 3: Apresenta os resultados petrográficos, microquímicos e geotermobarométricos realizados sobre a amostra PS02.

Capítulo 4: Traz as conclusões do trabalho.

Capítulo 5: Expõe a lista de referências bibliográficas que foram utilizadas ao longo da pesquisa.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 INTRODUÇÃO

A região de estudo está compreendida no sudeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), porção sul do Cráton São Francisco (CSF). Almeida (1977) classifica o Cráton São Francisco como uma grande unidade tectônica afetada por dois grandes eventos de deformação em diferentes momentos: o Transamazônico, ocorrido no Paleoproterozoico e o evento Brasileiro, ocorrido no Neoproterozoico. A área do CSF compreende grande parte do estado da Bahia, se estendendo pelos estados de Minas Gerais, Sergipe, Pernambuco e Goiás e os limites definidos pela Faixa Brasília a sul e oeste, Riacho do Pontal e Sergipana a norte, Faixa Rio Preto a noroeste e Faixa Araçuaí a sudeste (Almeida 1977, 1981).

O QF é uma região de aproximadamente 7.000 km² e objeto de estudos graças à geodiversidade e riqueza mineral. Dorr II (1969) apresentou um mapa detalhado do QF, subdividindo-o em cinco unidades litodêmicas e estratigráficas, sendo o mais importante trabalho realizado até aquele momento. Alkmim & Marshak (1998) apresentaram uma nova coluna estratigráfica, na qual subdividem unidades consideradas indivisas por Dorr II (1969). Endo *et al.* (2020) sugerem uma nova divisão para a parte superior da coluna estratigráfica do QF, baseada em unidades litodêmicas e litoestratigráficas, criando o Supergrupo Estrada Real. A seguir, uma breve síntese sobre o quadro estratigráfico do Quadrilátero Ferrífero é apresentada.

2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO

Atualmente, o QF é dividido em sete unidades litodêmicas e litoestratigráficas conforme Endo *et al.* (2020):

- i. Complexos metamórficos;
- ii. Supergrupo Rio das Velhas;
- iii. Supergrupo Minas;
- iv. Supergrupo Estrada Real;
- v. Grupo Barbacena;
- vi. Supergrupo Espinhaço;
- vii. Unidades sedimentares.

A Figura 2.1 apresenta a distribuição destas unidades no QF.

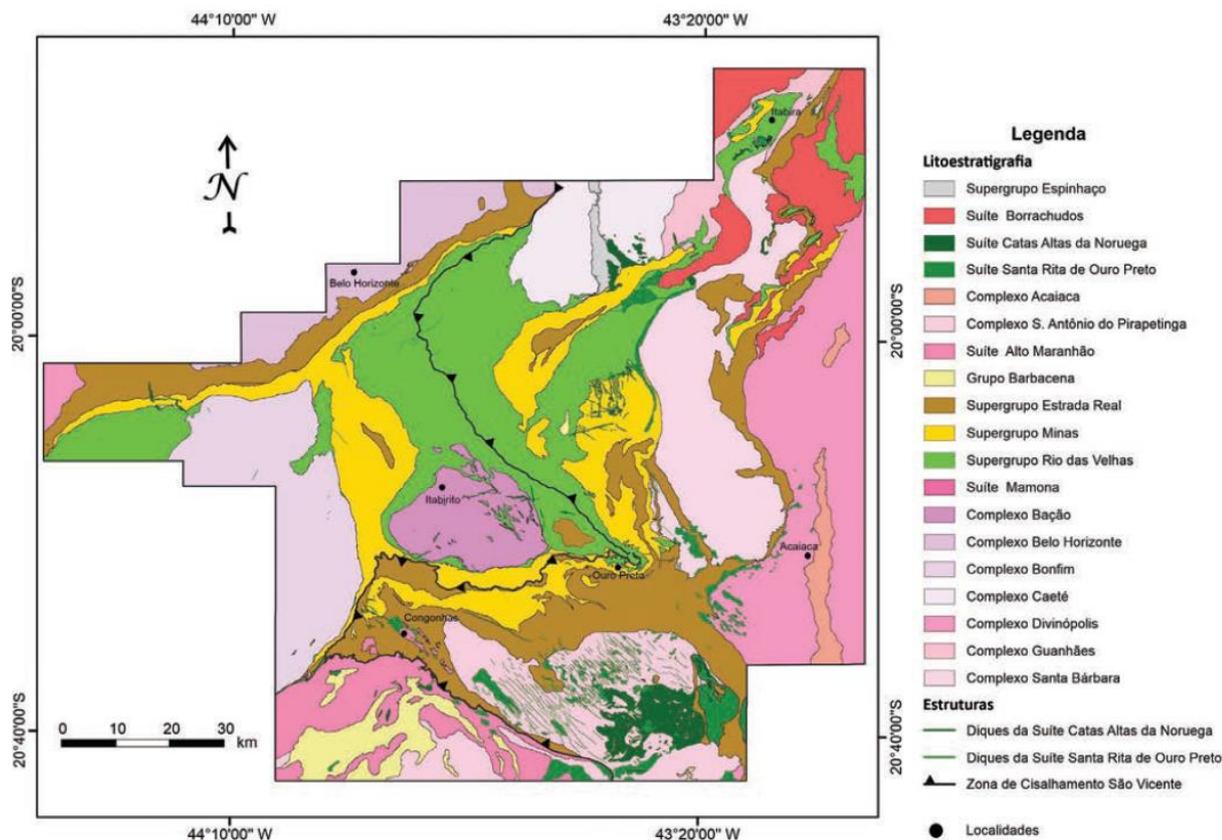


Figura 2.1: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2020).

As figuras 2.2 e 2.3 apresentam as colunas estratigráficas do QF de Alkmim & Marshak (1998) e Endo *et al.* (2020), respectivamente. Endo *et al.* (2020), adotam a nomenclatura Supergrupo Estrada Real para designar uma nova unidade estratigráfica criada no topo da coluna do QF, constituída por rochas metassedimentares e metavulcânicas dos grupos Sabará e Itacolomi, tendo o Grupo Barbacena na sua base Independentemente da nomenclatura adotada e do posicionamento estratigráfico, os significados geotectônicos dos grupos Sabará e Itacolomi são os mesmos nos trabalhos de Alkmim & Marshak (1998) e Endo *et al.* (2020), representando sequências de deposição sin-orogênica do tipo *flysh* e molassa, respectivamente. Quanto ao metamorfismo regional, tem-se a variação entre a fácies xisto verde e anfibolito, com o grau metamórfico aumentando de oeste para leste Dorr II 1969, Alkmim & Marshak 1989, Queiroz *et al.* 2019.

Neste TCC foi utilizado o estudo mais recente, adotando, portanto, as subdivisões propostas por Endo *et al.* (2020).

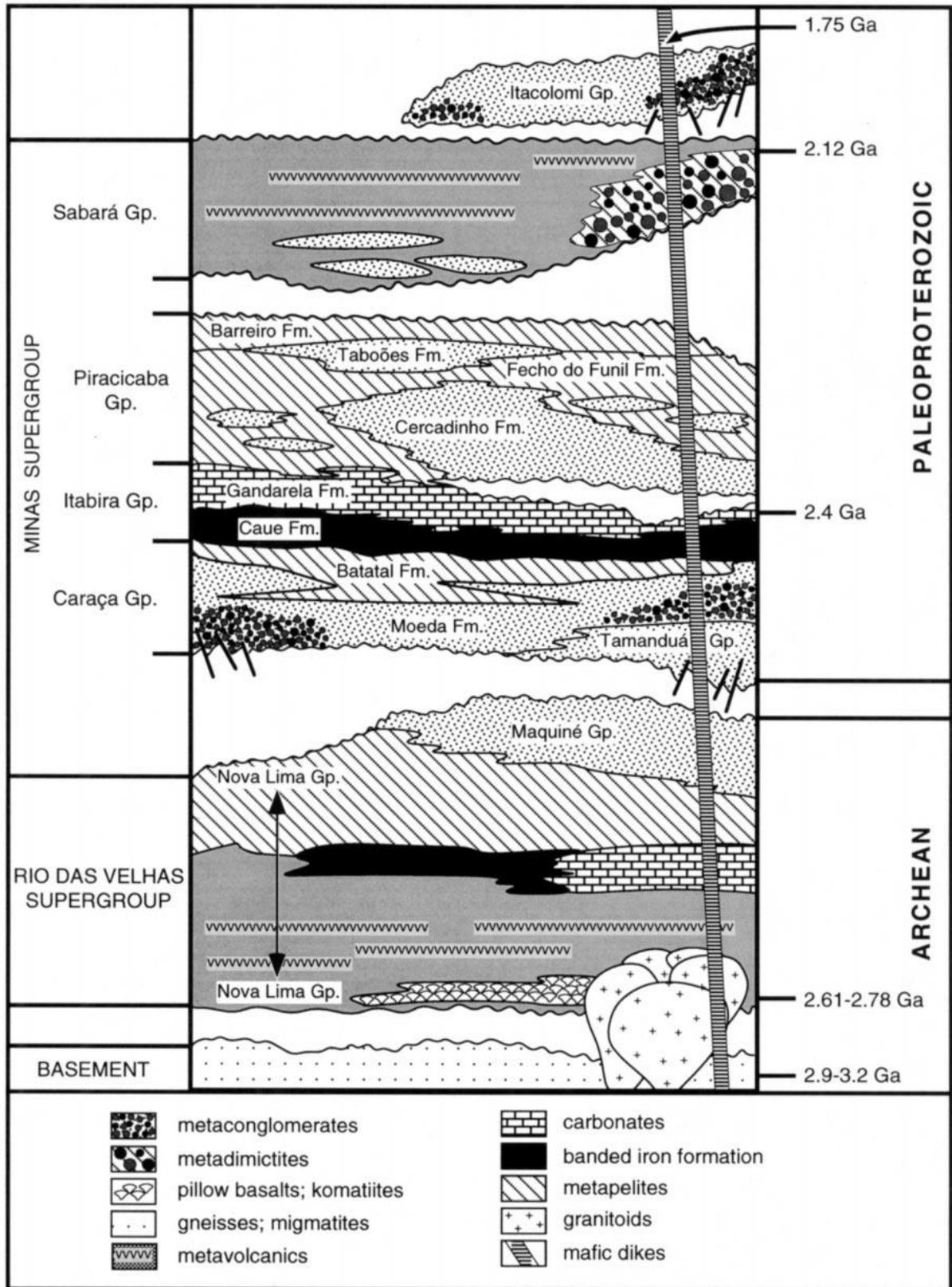


Figura 2.2: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Alkmim & Marshak 1998).

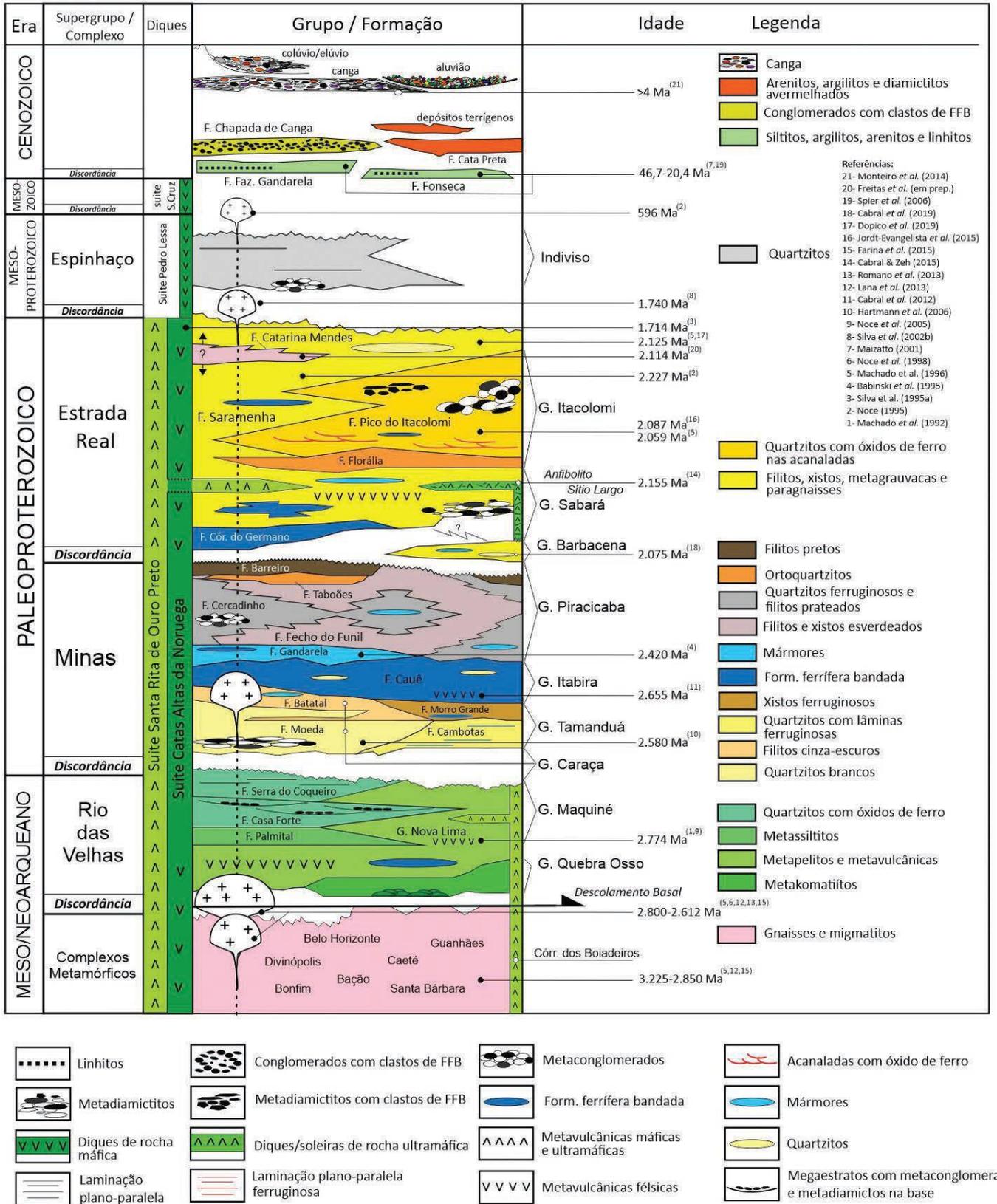


Figura 2.3: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo et al. 2020).

Complexos Metamórficos

O embasamento cristalino do QF foi inicialmente subdividido em dois grupos de rochas ígneas e dois grupos de rochas metamórficas. Atualmente é dividido em cinco complexos gnáissicos e migmatíticos compostos principalmente por ortognaisses bandados, ortognaisses finamente laminados, migmatitos, corpos intrusivos e diques máficos (Herz 1970; Carneiro 1992; Farina *et al.* 2016). São rochas de idade arqueana (3.2 a 2.6 Ga.) bandadas, alternando entre leucocráticas e meso a melanocráticas e espessuras de milímetros a centímetros (Endo *et al.* 2020) na fácies anfibolito Lana *et al.* 2013.

Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas foi definido primeiramente como uma sequência de rochas metavulcânicas e metassedimentares e subdividido nos Grupos Nova Lima, Maquiné e Quebra Osso (Dorr II 1969; Baltazar & Raposo 1993). O Grupo Nova Lima está na base da sequência e é caracterizado pela intercalação de rochas sedimentares e vulcânicas, que com incidência de metamorfismo, intercalam-se entre xistos e filitos (Dorr II 1969). O Grupo Maquiné é o topo da sequência e foi dividido em Formação Palmital e Formação Casa Forte (Gair 1962 *in* Dorr II 1969), sendo caracterizado por rochas quartzosas e conglomeráticas, sendo, portanto, mais resistentes à erosão (Dorr II 1969). O Grupo Quebra Osso é formado essencialmente por komatiitos peridotíticos (Sichel 1983 *in* Baltazar & Silva 1996) e tem a distribuição estratigráfica a leste do QF.

Endo *et al.* (2020) distribuíram as unidades do Supergrupo Rio das Velhas, da base para o topo em: Grupo Quebra Osso, contendo rochas metavulcânicas, máficas-ultramáficas e félsicas, Grupo Nova Lima composto por rochas metavulcanoclásticas, metavulcanossedimentar química, metassedimentar clástica marinha e, por fim, Grupo Maquiné contendo rochas metassedimentares não-marinhas. Esta sucessão representa uma sequência típica do tipo *greenstone belt*.

Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas está sobreposto ao Supergrupo Rio das Velhas por contato discordante. Em seus estudos, Dorr (1969) classificou o Supergrupo Minas como uma sucessão continental marinha de idade paleoproterozoica, dividido atualmente em quatro grupos, da base para o topo: Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba (Endo *et al.* 2020). O Grupo Tamanduá é formado por quartzitos, quartzitos com lâminas ferruginosas, xistos quartzosos e argilosos e formação ferrífera dolomítica (Endo *et al.* 2020). O Grupo Caraça é formado por quartzitos, filitos e metaconglomerados (Dorr 1969). O Grupo Itabira agrupa rochas metamorfizadas formadas a partir de sedimentos químicos de origem marinha (Dorr 1969). O Grupo Piracicaba é formado por rochas metassedimentares de origem marinha,

apresentando quartzitos ferruginosos, filitos, dolomitos, xistos e metaconglomerados (Dorr 1969; Endo *et al.* 2020).

Supergrupo Estrada Real

O Supergrupo Estrada Real provém da redefinição do termo e proposição do pacote rochoso do qual é composto, dividido em dois grupos: Grupo Sabará e Grupo Itacolomi (Almeida *et al.* (2005); Teixeira da Costa 1961 *in* Endo *et al.* 2020). O Grupo Sabará é a unidade mais antiga do Supergrupo Estrada Real, era tido como indiviso pelo trabalho de Dorr (1969), Ladeira (1980) e Renger *et al.* (1994), Almeida *et al.* (2005). A partir do estudo de Almeida *et al.* (2005), estabeleceu-se a primeira divisão do Grupo Sabará, a Formação Saramenha. A partir de então, outros estudos dividiram o restante do pacote rochoso em Formação Córrego do Germano (Endo *et al.* 2020) e Formação Catarina Mendes (Freitas *et al.* 2019). É composto por filitos, xistos, metagrauvas e paragnaisses (Endo *et al.* 2020).

O Grupo Itacolomi, também indiviso em estudos anteriores, foi dividido em duas novas formações, da base para o topo: Florália e Pico do Itacolomi. São compostas por quartzitos intercalados com óxido de ferro, metaconglomerados, quartzito, itabirito, filito e granito (Endo *et al.* 2020).

O Grupo Barbacena é tido como indiviso¹ a partir do trabalho de Endo *et al.* (2020). É composto por grafita xistos, gonditos, queluzitos, metacherts, xistos manganésíferos, micaxistos, quartzitos feldspáticos, filitos com intercalações de anfibolitos e rochas metaultramáficas.

Unidades Cenozoicas

As unidades cenozoicas do Quadrilátero Ferrífero são as coberturas sedimentares que ocorrem na porção leste e estão sotopostas, geralmente, por canga dura. Endo *et al.* (2020) descrevem como alúvios, elúvios ou colúvios com quatro diferentes tipos de canga: química, rica, estruturada e detrítica. Este material é formado através da dissolução do minério de ferro e posterior cimentação dos detritos da Formação Cauê (Dorr 1969).

2.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL

O Quadrilátero Ferrífero é uma zona de grande complexidade estrutural. Apresenta dobras e lineações relacionadas a mais de uma fase de deformação e eventos tectônicos ocorridos. Endo *et al.* (2020) apresentam três megaestruturas, dobras regionais para explicar os eventos tectônicos: (i) Nappe Curral, (ii) Sistema de nappes de Ouro Preto com vergência S-SW, (iii) Dobras de terceira geração resultantes de amplificação e redobramento.

¹ Anteriormente, o Grupo Barbacena era subdividido em Formação Santo Amaro, Formação Lafaiete e Unidade Máfica-Ultramáfica (Santos & Baltazar, 2013).

2.3.1 Nappe Curral

Os estudos mais recentes a respeito da Nappe Curral foram desenvolvidos por Endo *et al.* (2020). A Nappe Curral apresenta-se como uma megadrobra alóctone com vergência para norte. Na Serra do Curral, o flanco inverso dessa dobra mostra as rochas do Supergrupo Minas em posição estratigráfica invertida. O flanco normal está dobrado, formando o Sinclinal Moeda. A zona de charneira compreende estas duas regiões. A região sul da Nappe Curral encontra-se coberta pela Nappe Ouro Preto e por dobras subsidiárias.

Associadas à Nappe Curral, estão as principais dobras de segunda ordem: Anticlinal Bonfim, Anticlinal Curral, Sinclinal Moeda, Sinclinal da Mutuca, Anticlinal dos Fechos, Anticlinal Catarina, Sinclinal das Gaivotas, Sinclinal Mangabeiras (Endo *et al.* 2020).

Esta primeira fase de deformação é evidenciada por duas grandes falhas: A falha Curral, representando o descolamento basal da Nappe Curral e Mario Campos, que marca o cavalgamento do Grupo Sabará sobre o Complexo Belo Horizonte (Endo *et al.* 2020).

2.3.2 Sistema de Nappes Ouro Preto

Com vergência SSW, o sistema de Nappes Ouro Preto representa um segmento alóctone sobre a Nappe Curral, articulando quatro novas nappes: Nappe Maquiné, Nappe Santa Rita, Nappe Ouro Preto e Nappe Itabira-Rio Piracicaba. Dentre as dobras de segunda ordem, está o Anticlinal de Mariana (Endo *et al.* 2020).

2.3.3 Terceira Geração: Amplificação

A estruturas amplificadas que se encontram no Quadrilátero Ferrífero devem-se a duas direções de encurtamento crustal E-W e N-S relacionados a tectônica Brasileira. Zonas de cisalhamento geradas nessa fase delimitam o sistema de nappes Ouro Preto e todas essas estruturas apresentam topo com vergência SSW (Endo *et al.* 2020).

3.1 PETROGRAFIA DO XISTO PELÍTICO

A amostra de xisto estudada localiza-se na antiga estrada de ferro que liga as cidades de Ouro Preto, Mariana e Monsenhor Horta, nas proximidades da última localidade (Figura 1.1). O afloramento PS-02 situa-se numa baixada que acompanha a antiga ferrovia, apresentando blocos soltos e esparsos e manto intempérico decimétrico a métrico. Cartograficamente, situa-se nos domínios do Grupo Nova Lima no mapa regional de Raposo (1998).

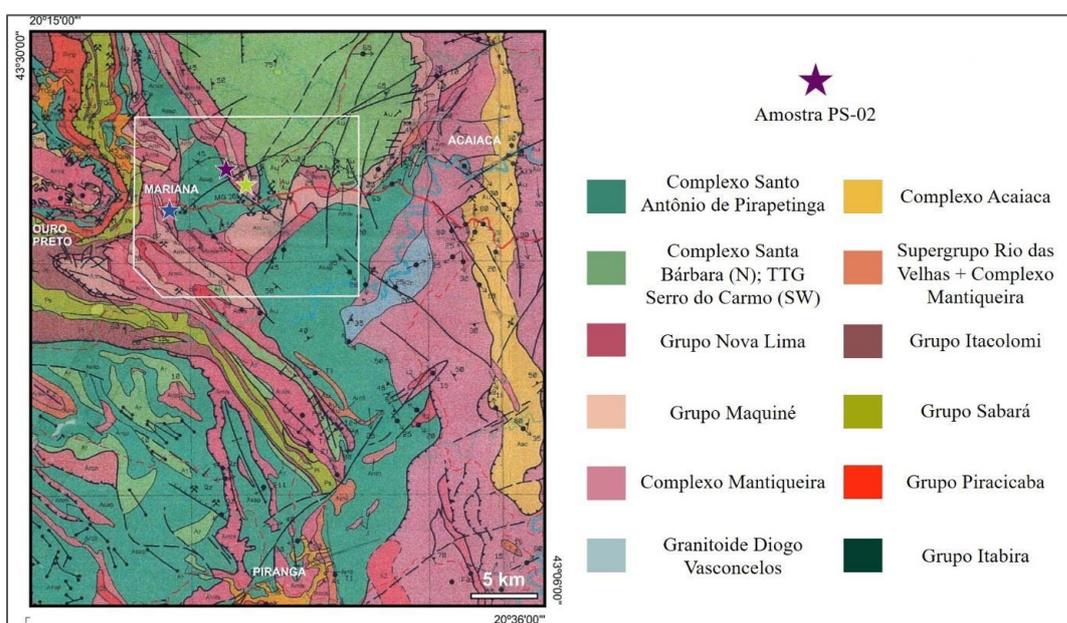


Figura 3.1: Mapa geológico da região sudeste do Quadrilátero Ferrífero (Raposo 1998, após Paiva-Silva 2023). A amostra OS-02 está ressaltada por uma estrela roxa e localizada nos domínios do Grupo Nova Lima.

A amostra PS-02 é uma rocha acinzentada, de grão médio a grosso, que alterna bandas mais claras, granoblásticas, com bandas melanocráticas compostas predominantemente por biotita (Figura 3.2). Microvênulas de quartzo podem cortar a foliação Sn da amostra, que está bem marcada pela orientação dos filossilicatos. A média das medidas da Sn é 255/85 (Paiva-Silva 2023). Subordinadamente, a xistosidade aparece dobrada (eixo de dobra = 05/26; Paiva-Silva 2023). Cristais milimétricos a centimétricos de granada e estaurolita podem ser reconhecidos a olho nu ou com auxílio de lupa de aumento 20x.

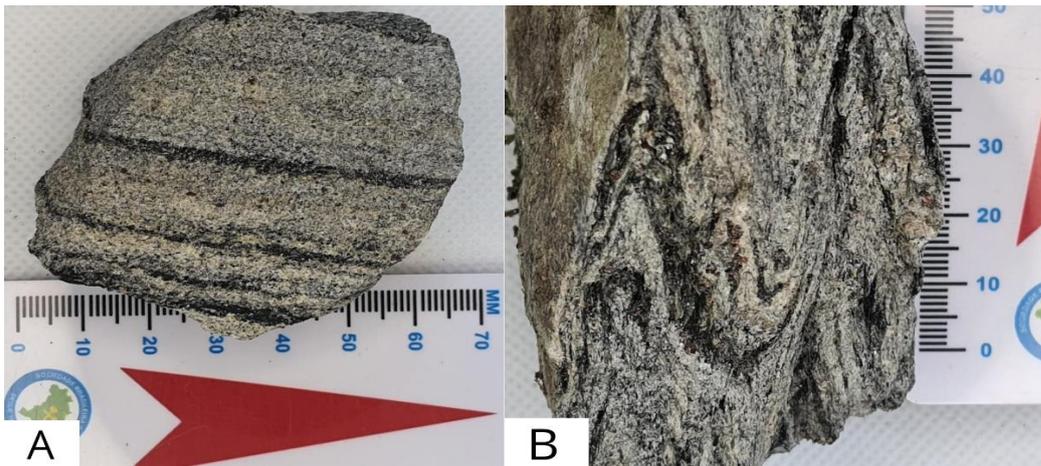


Figura 3.2: Fotografias da amostra de mão do xisto pelítico PS-02. (A) mostrando os planos de foliação marcados pela orientação de biotita e por porções quartzo-feldspáticas, (B) mostrando a xistosidade dobrada. (Fotos por Paiva-Silva 2023).

A análise da lâmina mostra uma rocha com microestrutura inequigranular porfiroblástica, poiquiloblástica, com matriz granolepidoblástica. Os porfiroblastos são de granada e estauroлита. A matriz é composta por quartzo, plagioclásio, biotita, muscovita e clorita, sendo frequentemente cortada por microveios de quartzo com microestrutura granoblástica poligonal. Há também a presença de zircão e turmalina como minerais acessórios, além de cerca de 5% de minerais opacos. Uma síntese da mineralogia e respectiva porcentagem modal é listada a seguir.

Quartzo (35%): ocorre na matriz definindo a parte granoblástica da microestrutura da rocha, com contato poligonal e indícios de recristalização mineral (extinção ondulante e subgrãos). Sob luz polarizada cruzada, apresenta cores de interferência variável entre cinza e branco de 1° ordem.

Muscovita (18%): incolor, uma direção de clivagem paralela ao maior alongamento da palheta, define a textura lepidoblástica da matriz juntamente com biotita e clorita (Figura 3.3a, b). Sob luz polarizada cruzada, apresenta cores intensas e vibrantes de 2° a 3° ordem e extinção olho-de-pássaro (Figura 3.3b, d).

Granada (12%): os porfiroblastos se destacam por seu relevo alto, exibindo tonalidades castanho claro a incolor (Figura 3.3a, b, e, f). Sob polarizadores cruzados, o mineral apresenta padrão isotrópico (Figura 3.3b, d). Na maioria dos casos, as inclusões de quartzo e minerais opacos dentro das granadas seguem um arranjo sigmoidal (Figura 3.3e), o que indica formação sin-tectônica em relação à S_n do mineral. No entanto, observam-se também poucas granadas onde as inclusões não seguem o padrão externo dos minerais alongados, com os porfiroblastos “interrompendo” a foliação (Figura 3.3a), padrão que indica formação tardi-tectônica para a sua geração.

Biotita (10%): ocorre na matriz e associadas aos porfiroblastos de granada, com forte pleocroísmo entre tons verde escuro/acastanhado, hábito tabular característico das micas e relevo moderado (Figura 3.3a, b). Sob luz polarizada cruzada exhibe as cores vibrantes de 2° ordem e extinção incompleta olho-de-pássaro (Figura 3.3b, d).

Clorita (8%): foram observadas duas gerações deste mineral na lâmina, ambas exibindo pleocroísmo incolor-verde pálido. A primeira geração, no entanto, aparece menor e associada à matriz. Sob luz polarizada cruzada, exhibe cor de interferência anômala acastanhada que, junto ao sinal de alongação (-), a caracteriza como Mg-Fe clorita. A segunda geração ocorre em cristais maiores associados à biotita nas bordas dos porfiroblastos de granada e estaurolita. Sob luz polarizada, a cor de interferência é anômala azulada, caracterizando-a como Fe-Mg clorita.

Estaurolita (7%): apresenta forte pleocroísmo em tons de amarelo claro/escuro, relevo alto e cor de interferência de primeira ordem. Muitos cristais apresentam-se esqueletiformes e crescimento “por cima” da Sn, o que indica caráter pós-tectônico.

Plagioclásio (5%): confunde-se com o quartzo, sendo deste diferenciado pela presença de extinção concêntrica marcando o zoneamento químico entre núcleo e borda dos cristais.

Minerais acessórios (5%): os minerais opacos perfazem quase 5% do volume modal da rocha, ocorrendo também, zircão e turmalina que, juntos, não somam 1% do total da lâmina.

A análise da paragênese mineral da amostra PS-02 composta pela associação de *estaurolita* + *granada* + *biotita* + *muscovita* + *clorita* + *quartzo* + *plagioclásio* permite classificar qualitativamente o metamorfismo como pertencente à fácies anfíbolito, zona da estaurolita, do grau médio.

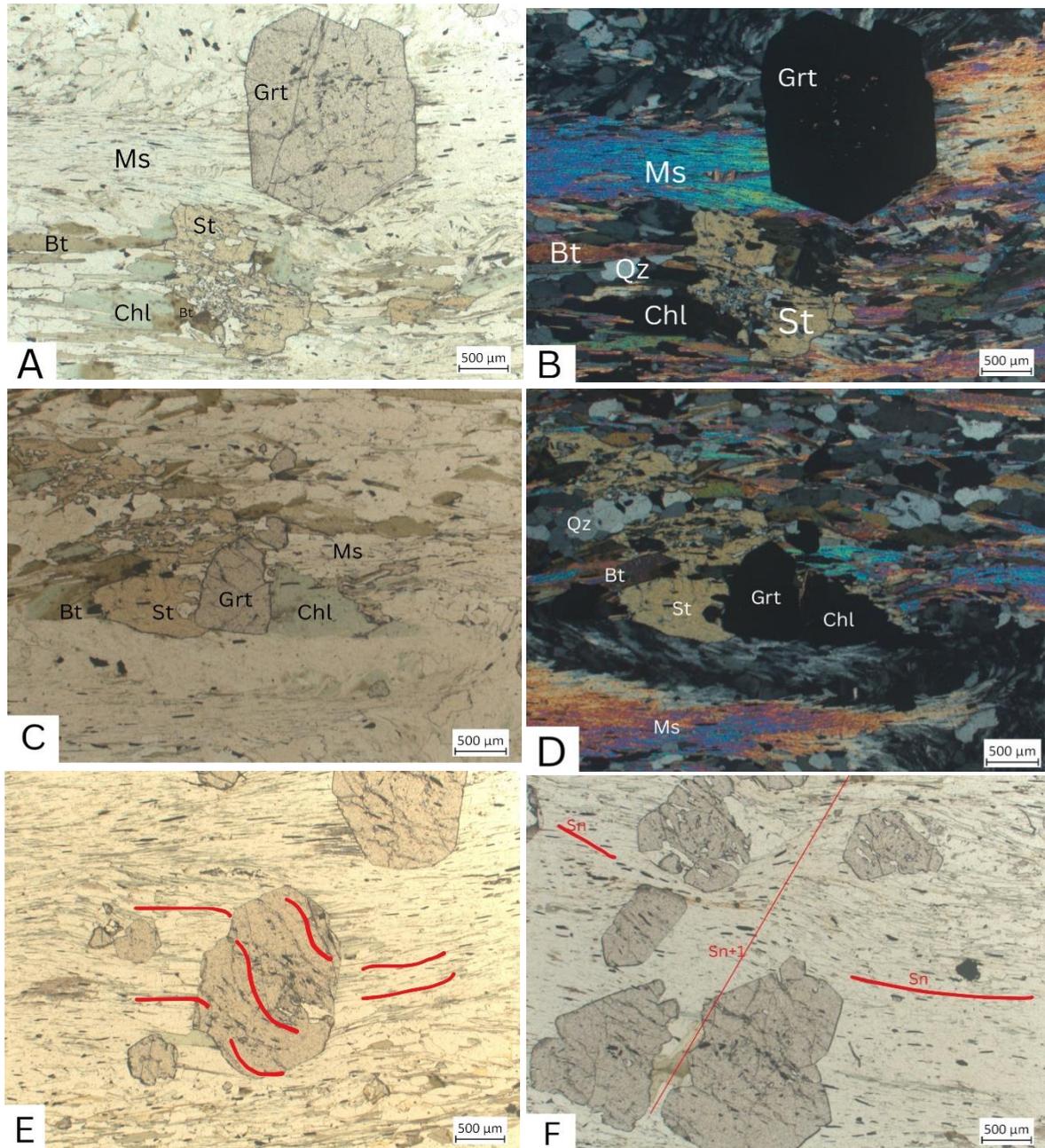


Figura 3.3: Fotomicrografias do xisto pelítico (lâmina PS-02). (A) Porfiroblasto de granada sobre a foliação, porfiroblasto de estaurolita esqueletiforme associado à biotita e Fe-Mg clorita, matriz rica em muscovita e quartzo. (B) Idem A, sob luz polarizada cruzada. (C) Associação de porfiroblastos de granada e estaurolita com biotita e Fe-Mg clorita. (D) Idem B, sob luz polarizada cruzada. (E) Granada em padrão rotacional. (F) Folheação (Sn) cortada por segunda fase deformacional insipiente (Sn+1). Bt = biotita, Chl = clorita, St = estaurolita, Grt = granada, Ms = muscovita, Pl = plagioclásio, Qz = quartzo.

3.2 QUÍMICA MINERAL

Os dados de química mineral foram obtidos a partir da lâmina (PS-02) confeccionada a partir de uma das amostras de estaurólita-clorita-biotita-granada-muscovita-xisto coletada no município de Monsenhor Horta. O item 1.5.3 descreve a metodologia e as especificações da microsonda eletrônica utilizada para a aquisição das porcentagens dos elementos químicos. As análises foram feitas em pontos distribuídos das bordas ao centro dos cristais de granada, estaurólita, biotita, muscovita, plagioclásio e clorita. A Figura 3.4 mostra os três campos selecionados que englobam os minerais onde foram realizados os pontos de análise de microsonda. A Tabela 3.1 sumariza a relação entre os campos, minerais analisados e pontos marcados na microsonda eletrônica.

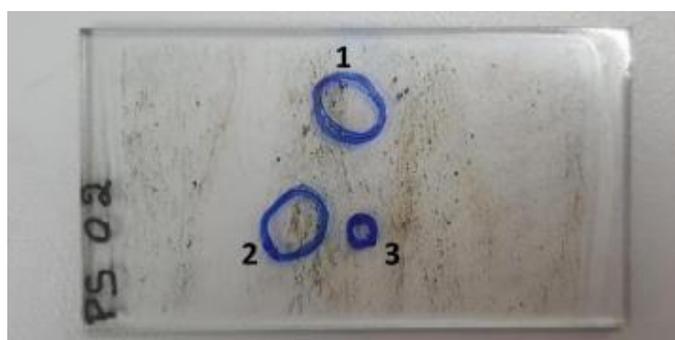


Figura 3.4: Lâmina delgada PS-02 de xisto pelítico evidenciando as marcações dos campos para análise.

Tabela 3.1: Relação entre campos, minerais e pontos de análise de microsonda eletrônica.

PS-02	Mineral	Pontos*
Campo 1	Grt	1-12
	St	13-18
	Chl	19-23
	Bt	24-29
	Ms	30-33
Campo 2	Grt 1	35-46
	Grt 2	73-83
	Bt 1	47-53
	Bt 2	92-96
	Pl 1	54-63
	Pl 2	101-107
	Ms 1	64-72
	Ms 2	97-100
	St	84-91
	Ilm	110
Campo 3	Pl	111-119;121-124

Grt - Granada
 Bt – Biotita
 Pl – Plagioclásio
 Ms – Muscovita
 St – Estaurólita
 Ilm – Ilmenita

3.2.1 Granada

Três porfiroblastos de granada foram analisados, sendo o primeiro encontrado no campo 1 (12 pontos, Figura 3.5) e os outros dois presentes no campo 2 (pontos 35 a 46 no grão dois e 73 a 83 no grão 3).

Na Figura 3.6 é representado o perfil composicional com os dados das 4 principais moléculas de granada (almandina, piropo, grossulária e espessartita) *versus os* pontos analíticos para o cristal de granada 1 mostrado na imagem de elétrons retro-espalhados da Figura 3.5. O gráfico mostra uma clara predominância de almandina, molécula rica em Fe, sendo que tal composição tende a diminuir à medida que se avança para os pontos centrais do porfiroblasto, local em que os teores de espessartita, granada rica em Mn, aumentam consideravelmente.

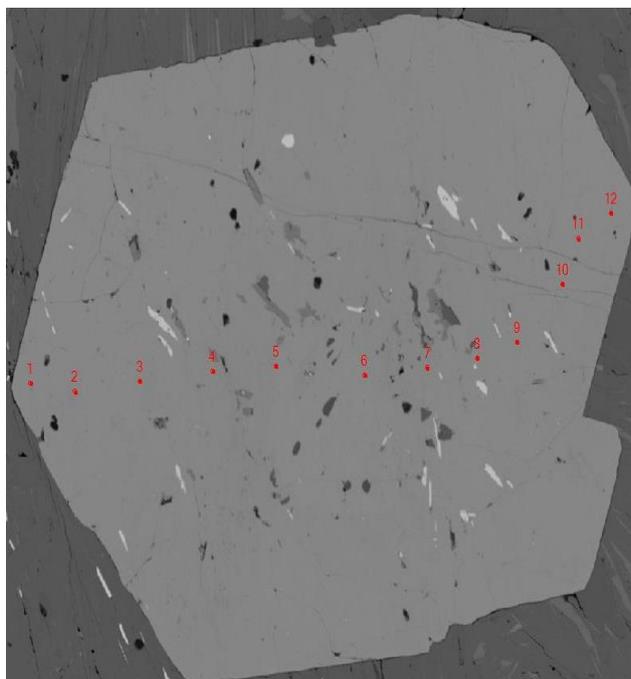


Figura 3.5: Imagem de elétrons retro-espalhados com a localização dos pontos 1 a 12 realizados no cristal de granada 1 presente no campo 1.

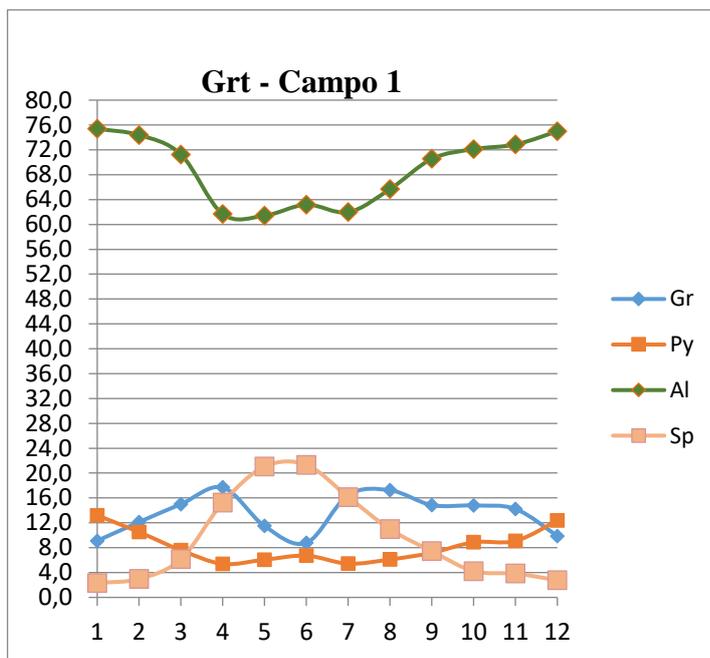


Figura 3.6: Perfil composicional mostrando os teores das moléculas de grossulária (Gr), piropo (Py), almandina (Al) e espessartita (Sp) da Grt do campo 1.

Ainda com auxílio da microsonda eletrônica foram criados mapas composicionais quantitativos de raios-x (Figura 3.7), baseados na variação entre núcleo e borda dos teores de Fe e Mn em um porfiroblasto de granada do campo 1. Os mapas composicionais confirmam que a rocha sofreu metamorfismo barroviano progressivo, visto que os índices maiores de Fe encontram-se na borda enquanto o núcleo é enriquecido no elemento Mn (assim como já estava evidenciado no gráfico binário da Figura 3.6).

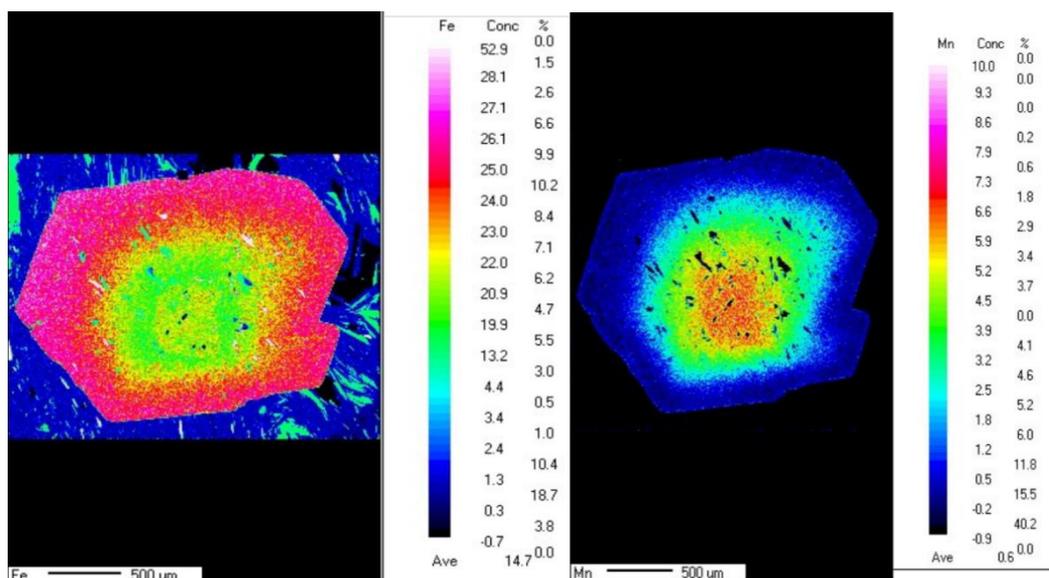


Figura 3.7: Mapas químicos composicionais de raios-x da Grt do campo 1, mostrando aumento na concentração de Fe (rosa) no sentido das bordas e diminuição na concentração de Mn (coloração azulada) no mesmo sentido.

Apresentando fórmula geral $(\text{Fe}_{1,83-2,28}\text{Mn}_{0,07-0,64}\text{Ca}_{0,26-0,54}\text{Mg}_{0,16-0,39})\text{Al}_{1,94-2,02}\text{Si}_{2,98-3,06}\text{O}_{12}$, a granada é formada predominantemente pela molécula de almandina (61,42% a 75,40%), seguida de espessartita (2,30% a 21,33%), grossulária (8,77% a 18,56%) e piropro (5,40% a 13,19%). A Tabela 3.2 apresenta os dados químicos para cada um dos pontos realizados nas granadas.

Tabela 3.2: Resultado de análise de química mineral em granadas da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microscopia e Microanálises, setor de microsonda eletrônica. Al = almandina, Sp = espessartita, Gr = grossulária, Py = piropro.

Amostra	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02
Campo	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ponto	35	36	37	38	40	41	42	43	44	45	46
Posição	Borda	Intermed.	Intermed.	Intermed.	Centro	Intermed.	Intermed.	Intermed.	Borda	Borda	Borda
SiO ₂	37,251	37,493	37,867	37,823	37,376	37,06	37,383	37,245	37,536	37,339	37,234
Al ₂ O ₃	20,903	20,739	20,681	20,704	20,809	20,563	20,473	20,699	20,618	20,984	21,175
MgO	2,929	3,011	2,963	2,854	2,49	2,198	1,797	1,902	2,073	2,444	3,055
CaO	3,92	4,188	4,126	3,717	5,294	5,614	6,574	5,439	5,095	5,023	4,017
MnO	1,312	1,421	1,434	1,921	2,796	4,005	4,216	3,578	2,363	1,532	1,138
FeO	33,512	33,163	32,71	32,86	30,594	30,362	29,46	30,971	31,373	32,969	33,021
Total	99,83	100,02	99,78	99,88	99,36	99,80	99,90	99,83	99,06	100,29	99,64
Si	3,00	3,01	3,03	3,03	3,01	2,99	3,01	3,01	3,04	2,99	2,99
Al _{IV}	0,00	-0,01	-0,03	-0,03	-0,01	0,01	-0,01	-0,01	-0,04	0,01	0,01
Al _{VI}	1,98	1,97	1,99	1,99	1,99	1,95	1,96	1,97	2,00	1,98	2,00
Fe ²⁺	2,26	2,23	2,19	2,21	2,06	2,05	1,99	2,09	2,12	2,21	2,22
Mg	0,35	0,36	0,35	0,34	0,30	0,26	0,22	0,23	0,25	0,29	0,37
Mn	0,09	0,10	0,10	0,13	0,19	0,27	0,29	0,24	0,16	0,10	0,08
Ca	0,34	0,36	0,35	0,32	0,46	0,49	0,57	0,47	0,44	0,43	0,35
Py	11,57	11,83	11,80	11,38	9,93	8,60	7,06	7,54	8,39	9,61	12,16
Al	74,35	73,17	73,14	73,60	68,54	66,70	64,97	68,91	71,34	72,77	73,78
Sp	2,95	3,17	3,25	4,35	6,34	8,91	9,41	8,06	5,44	3,42	2,57
Gr	11,13	11,83	11,81	10,66	15,19	15,79	18,56	15,49	14,83	14,20	11,49

(Continuação) Tabela 3.2: Resultado de análise de química mineral em granadas da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microscopia e Microanálises, setor de microsonda eletrônica. Al = almandina, Sp = espessartita, Gr = grossulária, Py = piropo.

Amostra	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02
Campo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Posição	Borda	Borda	Intermed.	Intermed.	Centro	Centro	Intermed.	Intermed.	Intermed.	Borda	Borda	Borda
SiO₂	37,855	37,789	37,799	37,058	37,538	37,077	37,119	37,659	37,337	37,819	37,955	37,471
Al₂O₃	21,095	20,956	19,798	20,45	20,373	20,511	20,093	20,172	20,387	20,389	20,183	20,792
MgO	3,301	2,63	1,927	1,357	1,495	1,666	1,371	1,54	1,808	2,232	2,296	3,126
CaO	3,169	4,216	5,297	6,188	3,936	3,029	5,79	6,046	5,206	5,175	4,997	3,47
MnO	1,014	1,313	2,747	6,741	9,128	9,314	7,18	4,871	3,293	1,867	1,699	1,23
FeO	33,59	33,138	32,217	27,62	26,968	27,928	27,905	29,509	31,677	32,317	32,78	33,763
Total	100,02	100,04	99,79	99,41	99,44	99,53	99,46	99,80	99,71	99,80	99,91	99,85
Si	3,02	3,02	3,06	3,01	3,05	3,02	3,02	3,04	3,02	3,04	3,05	3,01
Al_{IV}	-0,02	-0,02	-0,06	-0,01	-0,05	-0,02	-0,02	-0,04	-0,02	-0,04	-0,05	-0,01
Al_{VI}	2,01	2,00	1,94	1,97	2,00	1,99	1,95	1,96	1,97	1,98	1,96	1,98
Fe²⁺	2,24	2,22	2,18	1,88	1,83	1,90	1,90	1,99	2,15	2,18	2,21	2,27
Mg	0,39	0,31	0,23	0,16	0,18	0,20	0,17	0,19	0,22	0,27	0,28	0,37
Mn	0,07	0,09	0,19	0,46	0,63	0,64	0,49	0,33	0,23	0,13	0,12	0,08
Ca	0,27	0,36	0,46	0,54	0,34	0,26	0,50	0,52	0,45	0,45	0,43	0,30
Py	13,19	10,51	7,59	5,40	6,06	6,71	5,42	6,10	7,17	8,87	9,09	12,37
Al	75,40	74,39	71,26	61,68	61,42	63,19	61,97	65,69	70,56	72,13	72,87	75,00
Sp	2,30	2,98	6,15	15,24	21,04	21,33	16,14	10,97	7,42	4,22	3,82	2,77
Gr	9,11	12,12	15,00	17,69	11,48	8,77	16,46	17,23	14,85	14,79	14,22	9,87

(Continuação) Tabela 3.2: Resultado de análise de química mineral em granadas da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microscopia e Microanálises, setor de microsonda eletrônica. Al = almandina, Sp = espessartita, Gr = grossulária, Py = piropo.

Amostra	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02
Campo	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ponto	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	83
Posição	Borda	Borda	Intermed.	Intermed.	Intermed.	Centro	Centro	Intermed.	Intermed.	Borda	Borda	Borda
SiO₂	37,293	37,241	37,452	38,033	37,027	37,086	37,244	37,633	37,051	37,655	37,922	37,922
Al₂O₃	20,869	20,827	20,617	20,796	20,978	21,067	20,647	19,92	21,074	20,857	20,176	20,176
MgO	2,949	2,435	2,196	2,327	2,481	2,41	2,44	2,537	2,517	2,656	2,879	2,879
CaO	3,946	5,27	4,859	4,679	4,415	4,608	4,774	4,577	4,655	3,866	3,401	3,401
MnO	1,118	1,428	1,559	1,581	1,579	1,457	1,322	1,395	1,468	1,162	1,759	1,759
FeO	32,866	32,788	32,732	32,565	33,534	33,34	33,375	33,564	32,95	32,749	33,822	33,822
Total	99,04	99,99	99,42	99,98	100,01	99,97	99,80	99,63	99,72	98,95	99,96	99,96
Si	3,01	2,99	3,03	3,04	2,98	2,98	3,00	3,04	2,99	3,04	3,05	3,05
Al_{IV}	-0,01	0,01	-0,03	-0,04	0,02	0,02	0,00	-0,04	0,01	-0,04	-0,05	-0,05
Al_{VI}	2,00	1,97	1,99	2,01	1,97	1,98	1,97	1,94	1,99	2,02	1,96	1,96
Fe²⁺	2,22	2,21	2,21	2,18	2,26	2,25	2,25	2,27	2,22	2,21	2,28	2,28
Mg	0,35	0,29	0,26	0,28	0,30	0,29	0,29	0,31	0,30	0,32	0,34	0,34
Mn	0,08	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,10	0,10	0,08	0,12	0,12
Ca	0,34	0,45	0,42	0,40	0,38	0,40	0,41	0,40	0,40	0,33	0,29	0,29
Py	11,85	9,57	8,80	9,35	9,77	9,54	9,62	9,96	9,99	10,85	11,37	11,37
Al	74,19	72,35	73,65	73,51	74,19	74,08	73,89	74,01	73,42	75,10	75,02	75,02
Sp	2,55	3,19	3,55	3,61	3,54	3,28	2,96	3,11	3,31	2,70	3,95	3,95
Gr	11,40	14,89	14,00	13,52	12,50	13,11	13,53	12,92	13,28	11,35	9,66	9,66

3.2.2 Plagioclásio

Foram analisados 3 cristais de plagioclásio da lâmina, sendo os dois primeiros presentes no campo 2 e o último presente no campo 3. No primeiro cristal foram realizados os pontos 54 a 63, no segundo os pontos 101 a 107 e, no último, foram realizados os pontos 111 a 124 (Tabela 3.3), sendo descartado o ponto 120 devido ao baixo fechamento da análise.

No diagrama ternário Or x Ab x An (Deer *et al.* 1966) (Figura 3.6), os plagioclásios classificam-se como oligoclásio a andesina, mostrando um caráter homogêneo e sem zoneamento químico aparente.

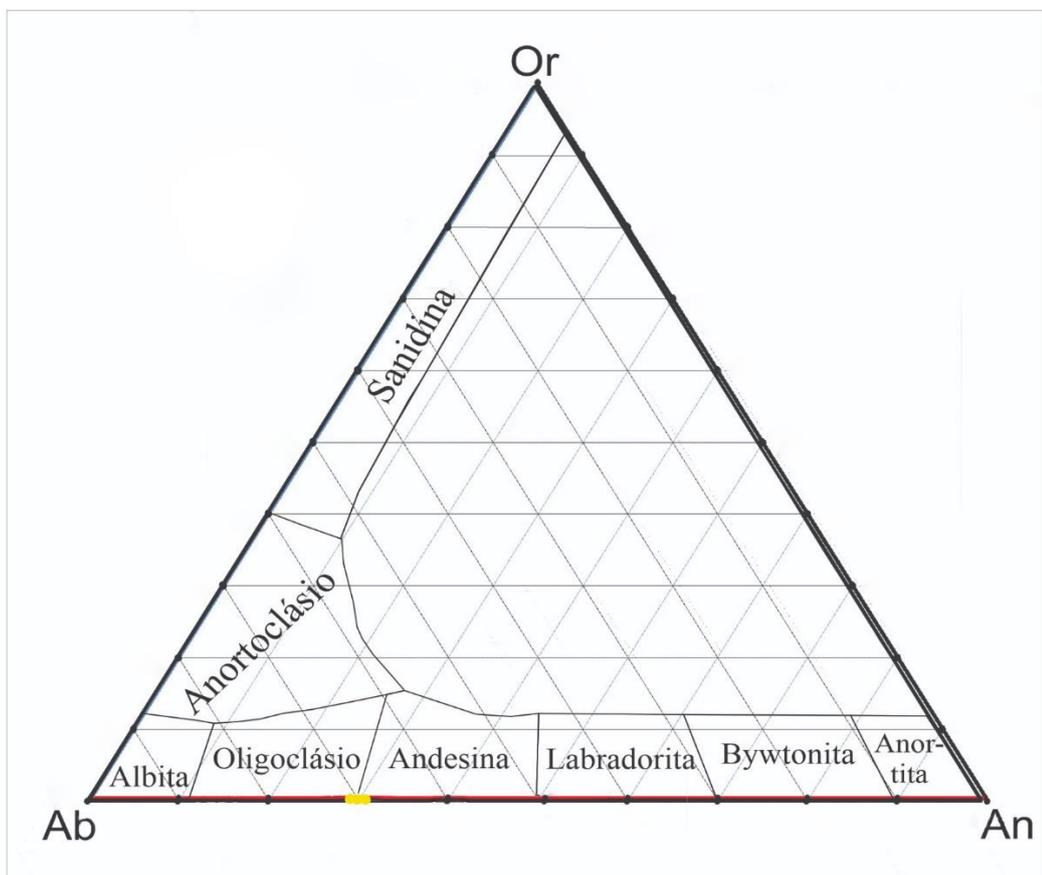


Figura 3.8: Diagrama ternário para a classificação de plagioclásio da amostra PS-02 (em amarelo) de acordo com Deer *et al.* (1966)

Tabela 3.3: Resultado de análise de química mineral em plagioclásios da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microscopia e Microanálises, setor de microsonda eletrônica. Ano = anortita, Ab = albita, Or = ortoclásio.

Amostra	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02
Campo	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ponto	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Posição	borda	borda	intermed	núcleo	intermed	borda	borda	intermed	núcleo	borda
SiO ₂	60,551	61,029	61,265	61,468	61,718	61,328	61,265	61,084	61,037	61,491
Al ₂ O ₃	24,99	24,762	24,381	24,668	24,394	24,129	24,14	24,419	24,283	23,709
FeO	0,092	0,038	0,374	0,01	0,034	0,052	0,089	0,029	0,049	0,023
CaO	6,366	6,285	5,865	5,661	5,664	6,315	6,467	6,023	5,814	5,655
Na ₂ O	8,041	8,01	6,973	8,344	8,484	8,071	7,958	8,23	8,663	8,324
K ₂ O	0,055	0,048	0,442	0,051	0,065	0,061	0,071	0,106	0,105	0,14
BaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	100,10	100,17	99,30	100,20	100,36	99,96	99,99	99,89	99,95	99,34
Si	2,69	2,71	2,73	2,72	2,73	2,73	2,72	2,72	2,72	2,75
Al	1,31	1,29	1,28	1,29	1,27	1,26	1,26	1,28	1,27	1,25
Fe	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,30	0,30	0,28	0,27	0,27	0,30	0,31	0,29	0,28	0,27
Na	0,69	0,69	0,60	0,72	0,73	0,70	0,69	0,71	0,75	0,72
K	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ano	30,3	30,2	30,9	27,2	26,9	30,1	30,9	28,6	26,9	27,1
Ab	69,3	69,6	66,4	72,5	72,8	69,6	68,7	70,8	72,5	72,1
Or	0,3	0,3	2,8	0,3	0,4	0,3	0,4	0,6	0,6	0,8

(Continuação) Tabela 3.3: Resultado de análise de química mineral em plagioclásios da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microsonda, setor de microsonda eletrônica. Ano = anortita, Ab = albita, Or = ortoclásio.

Amostra	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02
Campo	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
Ponto	101	102	103	104	105	106	107	111	112	113
Posição	borda	borda	intermed	núcleo	núcleo	intermed	borda	borda	intermed	núcleo
SiO ₂	61,204	60,675	61,212	61,046	61,33	61,203	68,537	61,691	60,624	61,08
Al ₂ O ₃	24,035	24,768	24,167	24,099	24,011	24,127	18,02	24,515	24,83	24,749
FeO	0,134	0,073	0,043	0,01	0,032	0,073	0,103	0,013	0,013	0,019
CaO	6,174	6,208	6,666	6,573	6,323	5,456	4,823	5,854	6,098	6,066
Na ₂ O	8,224	8	7,861	8,137	8,275	8,598	7,902	8,329	8,327	8,271
K ₂ O	0,079	0,087	0,08	0,103	0,078	0,091	0,269	0,062	0,053	0,063
BaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	99,85	99,81	100,03	99,97	100,05	99,55	99,65	100,46	99,95	100,25
Si	2,73	2,70	2,72	2,72	2,73	2,73	3,01	2,72	2,70	2,71
Al	1,26	1,30	1,27	1,26	1,26	1,27	0,93	1,28	1,30	1,29
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,29	0,30	0,32	0,31	0,30	0,26	0,23	0,28	0,29	0,29
Na	0,71	0,69	0,68	0,70	0,71	0,74	0,67	0,71	0,72	0,71
K	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ano	29,2	29,9	31,8	30,7	29,6	25,8	24,8	27,9	28,7	28,7
Ab	70,4	69,6	67,8	68,7	70,0	73,7	73,5	71,8	71,0	70,9
Or	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	1,6	0,4	0,3	0,4

(Continuação) Tabela 3.3: Resultado de análise de química mineral em plagioclásios da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microscopia e Microanálises, setor de microsonda eletrônica. Ano = anortita, Ab = albita, Or = ortoclásio.

PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
114	115	116	117	118	119	121	122	123	124
intermed	borda	borda	intermed	núcleo	intermed	borda	intermed	núcleo	intermed
61,322	62,17	61,249	60,969	60,745	61,065	61,042	61,459	62,052	61,373
24,325	24	24,164	24,996	24,846	24,147	24,823	24,15	23,907	24,089
0,015	0,004	0,028	0,039	0,029	0,093	0,042	0,019	0,03	0,062
6,206	5,408	6,483	6,482	6,091	6,494	6,359	6,171	5,381	6,633
8,063	8,446	7,993	7,996	8,248	8,021	8,137	8,091	8,62	7,8
0,062	0,049	0,062	0,066	0,06	0,045	0,043	0,048	0,072	0,054
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
99,99	100,08	99,98	100,55	100,02	99,87	100,45	99,94	100,06	100,01
2,72	2,75	2,72	2,70	2,70	2,72	2,70	2,73	2,75	2,73
1,27	1,25	1,27	1,30	1,30	1,27	1,30	1,26	1,25	1,26
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,30	0,26	0,31	0,31	0,29	0,31	0,30	0,29	0,26	0,32
0,69	0,72	0,69	0,69	0,71	0,69	0,70	0,70	0,74	0,67
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29,7	26,1	30,8	30,8	28,9	30,8	30,1	29,6	25,5	31,9
69,9	73,7	68,8	68,8	70,8	68,9	69,7	70,2	74,0	67,8
0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3

óxidos (% peso)

a.p.f.u

endmembers

3.2.3 Estauroлита

Dois porfiroblastos de estauroлита foram analisados, sendo o primeiro encontrado no campo 1 e segundo no campo 2. Nestes foram realizados, respectivamente, os pontos de 13 a 18 – sendo o ponto 15 descartado em decorrência de baixo fechamento - e os pontos 84 a 91. Os teores de SiO₂, Al₂O₃, FeO, MgO, Na₂O, MnO, K₂O, Ti₂O e CaO encontrados tiveram variações de 27,31-28,40%, 52,26-53,98%, 13,32-14,08%, 1,20-1,94%, 0,08-1,41%, 0,07-0,18%, 0,00-0,53%, 0,36-0,51% e 0,00-0,22%, respectivamente (Tabela 3.4).

A fórmula unitária calculada para a estauroлита é $(\text{Fe}_{1,55-1,63}\text{Mg}_{0,25-0,40})\text{Al}_{8,68-8,81}(\text{Si}_{3,86-3,94}\text{Ti}_{0,04-0,05})\text{O}_{23}\text{OH}$, e nota-se o caráter homogêneo dos grãos, pois os teores de X_{Mg} encontrados foram de 0,19-0,20.

Tabela 3.4: Resultado de análise de química mineral em estaurolitas da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microscopia e Microanálises, setor de microsonda eletrônica.

Amostra	PS-02												
Campo	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
Ponto	13	14	16	17	18	84	85	86	87	88	89	90	91
Posição	Borda	Intermed	Núcleo	Intermed	Borda	Borda	Intermed	Núcleo	Intermed	Borda	Borda	Núcleo	Borda
SiO ₂	27,52	27,31	27,88	28,05	27,83	28,39	28,23	28,22	28,18	28,32	28,18	28,06	28,06
TiO ₂	0,41	0,36	0,45	0,50	0,41	0,50	0,46	0,44	0,49	0,51	0,42	0,45	0,49
Al ₂ O ₃	52,62	52,26	53,78	53,43	53,97	53,09	53,98	53,46	53,44	53,06	53,48	53,34	53,34
FeO	13,70	13,49	13,70	13,39	13,50	13,64	13,59	13,33	14,08	13,38	13,69	13,58	13,62
MnO	0,10	0,11	0,11	0,10	0,18	0,07	0,10	0,10	0,12	0,07	0,12	0,13	0,15
MgO	1,75	1,20	1,78	1,86	1,82	1,82	1,94	1,88	1,81	1,87	1,85	1,84	1,89
CaO	0,02	0,22	0,02	0,02	0,03	0,00	0,00	0,04	0,02	0,00	0,06	0,02	0,00
Na ₂ O	1,08	1,41	0,13	0,13	0,11	0,12	0,13	0,12	0,08	0,16	0,11	0,18	0,09
ZnO	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
K ₂ O	0,16	0,53	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00
Total	97,36	96,88	97,86	97,47	97,85	97,64	98,44	97,60	98,23	97,39	97,92	97,61	97,64
Si	7,72	7,73	7,73	7,80	7,71	7,88	7,77	7,83	7,80	7,88	7,81	7,80	7,80
Ti	0,09	0,08	0,09	0,11	0,09	0,10	0,10	0,09	0,10	0,11	0,09	0,09	0,10
Al	17,39	17,42	17,58	17,50	17,63	17,37	17,52	17,48	17,43	17,39	17,46	17,47	17,46
Fe(ii)	3,21	3,19	3,18	3,11	3,13	3,17	3,13	3,09	3,26	3,11	3,17	3,16	3,16
Mn	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04
Mg	0,73	0,51	0,74	0,77	0,75	0,75	0,80	0,78	0,75	0,78	0,76	0,76	0,78
Ca	0,01	0,07	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00
Na	0,59	0,77	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,04	0,09	0,06	0,10	0,05
K	0,06	0,19	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00

óxidos (% peso)

a.p.f.u

3.2.4 Biotita

Foi realizada a análise de química mineral em três cristais de biotita, sendo o primeiro presente no campo 1 e os outros dois presentes no campo 2 da lâmina. No primeiro foram realizados os pontos 24 a 29, enquanto nos cristais do campo 2 foram realizados os pontos 47 a 53, tendo sido descartados os pontos 50 e 51, e os pontos 92 a 96.

A fórmula unitária encontrada para as biotitas da lâmina foi $\text{K}_{0,79-0,94}\text{Na}_{0,05-0,12}(\text{Mg}_{1,23-1,31}\text{Fe}_{1,05-1,17}\text{Al}_{0,35-0,45}\text{Ti}_{0,02-0,08})\text{Al}_{1,18-1,26}\text{Si}_{2,74-2,82}\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$. A partir dos dados microquímicos obtidos pela microsonda (Tabela 3.5), foi possível calcular os valores de X_{Mg} , que variam de 0,43 a 0,46, indicando que as palhetas possuem caráter homogêneo.

Tabela 3.5: Resultado de análise de química mineral em biotitas da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microscopia e Microanálises, setor de microsonda eletrônica.

Amostra	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02	PS-02
Campo	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ponto	24	25	26	27	28	48	49	52	53	92	93	94	95	96
Posição	Borda	Intermed.	Núcleo	Núcleo	Borda	Intermed.	Núcleo	Borda	Borda	Borda	Intermed.	Núcleo	Intermed.	Borda
Na₂O	0,64	0,39	0,82	0,46	0,37	0,48	0,75	0,41	0,46	0,43	0,51	0,45	0,79	0,67
SiO₂	36,44	36,55	36,12	36,76	37,17	36,90	37,87	37,79	37,60	37,16	37,36	37,16	37,25	36,27
MgO	11,30	11,16	11,08	11,51	11,53	11,49	11,63	11,28	11,02	11,77	11,78	11,76	11,55	13,10
Al₂O₃	17,99	18,21	18,03	17,90	18,42	18,60	18,98	18,42	18,23	18,60	18,37	18,38	18,12	18,78
K₂O	9,59	9,59	9,76	9,60	9,53	8,58	8,35	8,43	8,53	8,73	9,71	8,64	9,36	8,57
CaO	0,00	0,00	0,04	0,00	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,06	0,01	0,00	0,03	0,01
TiO₂	1,38	1,39	1,33	1,36	1,36	1,35	1,31	1,40	1,41	1,35	1,35	1,39	1,37	1,46
Cr₂O₃	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03	0,05	0,02	0,03	0,05
MnO	0,09	0,06	0,03	0,05	0,05	0,06	0,01	0,05	0,04	0,00	0,03	0,03	0,03	0,04
FeO	17,37	17,75	18,40	17,38	17,93	17,73	17,08	17,47	17,41	17,62	17,40	17,31	16,69	17,00
Total	94,84	95,14	95,62	95,05	96,42	95,23	96,03	95,33	94,77	95,74	96,57	95,14	95,21	95,94
Na(A)	0,09	0,06	0,12	0,07	0,05	0,07	0,11	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,12	0,10
Si(T)	2,76	2,76	2,74	2,78	2,77	2,77	2,80	2,82	2,77	2,77	2,77	2,78	2,80	2,70
Mg(M1,2)	1,28	1,26	1,25	1,30	1,28	1,28	1,28	1,25	1,23	1,31	1,30	1,31	1,29	1,45
Al(T)	1,24	1,24	1,26	1,22	1,23	1,23	1,20	1,18	1,18	1,23	1,23	1,22	1,20	1,30
Al VI(M1,2)	0,37	0,39	0,35	0,37	0,39	0,41	0,45	0,43	0,44	0,40	0,38	0,40	0,40	0,34
K(A)	0,93	0,93	0,94	0,93	0,91	0,82	0,79	0,80	0,82	0,83	0,92	0,83	0,90	0,81
Ca	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
Ti(M1,2)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Cr	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
Mn(M1,2)	0,01	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
Fe(M1,2)	1,10	1,12	1,17	1,10	1,12	1,11	1,05	1,09	1,09	1,10	1,08	1,08	1,05	1,06

óxidos (% peso)

a.p.f.u

3.2.5 Muscovita

Foram analisados um cristal de muscovita no primeiro e dois no segundo campo da lâmina. No cristal do campo 1 foram realizados os pontos numerados de 30 a 33, enquanto nos cristais do campo 2 foram realizados os pontos 64 a 72 e 97 a 100, respectivamente.

A fórmula unitária encontrada a partir dos dados de química mineral obtidos foi $\text{K}_{0,49-0,82}\text{Al}_{1,80-1,93}(\text{Si}_{3,09-3,17}\text{Al}_{0,83-0,91})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$. Os valores de X_{Mg} encontrados a partir dos dados microquímicos (Tabela 3.6) não mostram variações significativas (0,03-0,04), enfatizando o caráter homogêneo dos grãos.

Tabela 3.6: Resultado de análise de química mineral em muscovita da amostra de xisto pelítico (PS-02). Numeração original fornecida pelo Laboratório de Microscopia e Microanálises, setor de microsonda eletrônica.

Amostra	PS-02																
Campo	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ponto	30	31	32	33	64	65	66	67	68	69	70	71	72	97	98	99	100
Na ₂ O	1,78	1,32	1,93	1,37	1,57	1,74	1,55	1,74	1,58	0,86	1,44	1,89	1,43	1,50	1,57	1,61	1,75
SiO ₂	45,94	45,76	46,70	46,52	46,54	46,51	46,45	46,18	46,64	48,86	47,16	46,94	46,38	46,90	46,28	47,00	46,85
MgO	0,63	0,63	0,58	0,52	0,62	0,58	0,64	0,61	0,73	0,74	0,62	0,70	0,61	0,64	0,69	0,68	0,70
Al ₂ O ₃	34,20	34,32	35,12	34,79	34,40	34,56	34,79	34,10	34,70	36,10	34,77	34,87	34,64	34,62	34,13	35,21	34,44
K ₂ O	9,36	9,14	8,44	8,79	8,63	8,44	8,75	9,51	8,48	5,94	8,77	8,17	8,69	8,99	9,38	8,75	8,51
CaO	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
TiO ₂	0,24	0,24	0,19	0,25	0,23	0,19	0,24	0,18	0,21	0,26	0,25	0,20	0,17	0,19	0,26	0,18	0,22
Cr ₂ O ₃	0,09	0,04	0,06	0,04	0,01	0,03	0,07	0,02	0,03	0,05	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
FeO	2,42	2,13	2,30	2,17	2,04	2,19	2,13	2,36	2,31	2,30	2,18	2,42	2,22	2,20	2,11	2,36	2,49
Total	94,67	93,58	95,34	94,46	94,06	94,31	94,63	94,74	94,72	95,12	95,26	95,24	94,21	95,11	94,47	95,83	95,00
Na(A)	0,23	0,17	0,25	0,18	0,20	0,23	0,20	0,23	0,20	0,11	0,18	0,24	0,19	0,19	0,20	0,21	0,23
Si(T)	3,09	3,10	3,10	3,11	3,12	3,11	3,10	3,10	3,11	3,17	3,13	3,11	3,11	3,12	3,11	3,10	3,12
Mg(M1,2)	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07
Al(T)	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,89	0,90	0,90	0,89	0,83	0,87	0,89	0,89	0,88	0,89	0,90	0,88
Al V(M1,2)	1,80	1,84	1,84	1,85	1,84	1,84	1,84	1,81	1,84	1,93	1,84	1,83	1,85	1,83	1,81	1,84	1,82
K(A)	0,80	0,79	0,71	0,75	0,74	0,72	0,75	0,82	0,72	0,49	0,74	0,69	0,74	0,76	0,80	0,74	0,72
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti(M1,2)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn(M1,2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe(M1,2)	0,14	0,12	0,13	0,12	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14

óxidos (% peso)

a.p.f.u

3.2.6 Clorita

Apenas um cristal de clorita (presente no campo 1) foi analisado na microsonda eletrônica, sendo neste realizados os pontos enumerados de 19 a 23. Obteve-se para este mineral a seguinte fórmula unitária: $(Al_{1,46-1,47}Mg_{2,44-2,50}Fe_{1,72-1,79})(Si_{2,69-2,75}Al_{1,25-1,31})O_{10}(OH)_8$.

3.3 GEOTERMOBAROMETRIA

Com base nos dados químicos composicionais mostrados no item anterior é possível, a partir do método convencional que leva em conta as reações de troca catiônica entre íons de mesmo tamanho e valência em minerais ferromagnesianos (por exemplo, par granada-biotita), e de um banco de dados internamente consistentes, calcular valores de P e T para o pico metamórfico no qual a paragênese principal da amostra foi estabilizada.

O par granada-biotita forneceu valores de estabilização da paragênese entre 539-589°C (Tabela 3.7), com erros médios de 30°C. Para a termometria, a pressão estimada foi de 6,0 Kbar, típica do metamorfismo de P média.

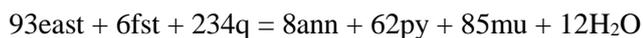
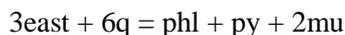
Tabela 3.7: Geotermometria do xisto pelítico (PS-02) com base em métodos convencionais. B92-GS= Bhattacharya *et al.* (1992), HS82=Hodges & Spear (1982), PL83=Perchuk & Lavrent'eva (1983) e T76=Thompson (1976). Grt = granada, Bt = biotita.

Posição	Campo	Ponto (grt)	Ponto(bt)	Temperatura (°C)			
				B92-GS	HS82	PL83	T76
Bordas	1	1	28	589	568	558	564
Bordas	2	46	53	584	568	553	556
Bordas	2	35	53	570	545	540	539

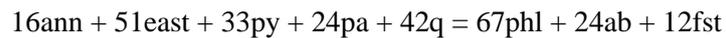
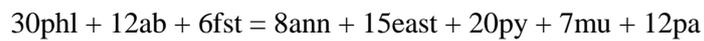
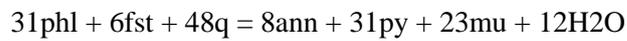
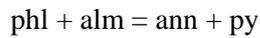
O outro método utilizado neste trabalho se dá a partir do *software* THERMOCALC, que tem como base um amplo e consistente acervo de dados termodinâmicos (Holland & Powell 1990). Informando-se as concentrações microquímicas obtidas através da microsonda eletrônica o *software*, a partir de equações das reações dos membros finais das fases minerais (*endmembers*), é capaz de calcular os valores de pressão e temperatura correspondentemente às concentrações informadas. Os dados foram obtidos para as bordas dos minerais, já que esta região registra o pico metamórfico atingido pelo litotipo. A paragênese mineral inserida no programa é composta por biotita, granada, plagioclásio, muscovita e estaurolita, com quartzo e água em excesso.

Foram utilizados os três modos do *software* (*average P*, *average T* e *average PT*) sendo que os valores considerados adequados são os que apresentam menores valores de “s.d” (desvio padrão) e “fit” (indicativo do quão próximo de uma reta a equação se mostra em um diagrama PxT). Para os três modos os valores absolutos de “e*” dos *endmembers gr, fcel, cel e mst* mostravam-se muito maiores que aqueles recomendados pelo programa e, por isso, foram excluídos. Tais *endmembers* são representados, respectivamente, por grossulária, Fe-celadonita, celadonita e Mg-estaurolita.

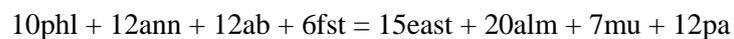
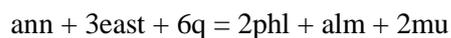
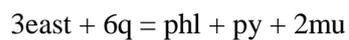
No modo *average P* foi encontrado valor de pressão igual a 5,88 Kbar, com valor de desvio padrão de 0,56 Kbar e valor de “fit” de 0,73, número menor que o valor recomendado pelo programa (1,61). As equações de reações independentes usadas para a obtenção da pressão para este modo são apresentadas a seguir:



No modo *average* T o valor de temperatura obtido foi de 603°C, com desvio padrão de 10°C e valor de “fit” de 0,71, menor que o recomendado pelo programa. Abaixo são apresentadas as reações independentes deste modo:



Já no modo *average* PT o valor de pressão obtido foi de 6,1 Kbar, com desvio padrão de 1,0 Kbar enquanto o valor de temperatura encontrado foi de 605°C com desvio padrão de 19°C. O valor de “fit” foi de 0,81, também menor que o recomendado pelo programa. Abaixo são apresentadas as reações independentes para o modo *average* PT:



CAPÍTULO 4

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A caracterização petrográfica da amostra estudada indica um xisto cuja a paragênese mineral já permite determinar a fácies metamórfica à qual o litotipo pertence, tendo em vista a presença da estauroлита, mineral índice de fácies anfíbolito. A paragênese completa encontrada foi: *granada*+*estauroлита* + *clorita* + *biotita* + *muscovita* + *quartzo* + *plagioclásio*, associação esta que também permite constatar o protólito que deu origem à rocha metamórfica, sendo este de caráter sedimentar pelítico (Yardley 2004).

A partir dos mapas composicionais quantitativos dos porfiroblastos de granada observaram-se um aumento da concentração de Fe em direção às bordas, e uma diminuição da concentração de Mn na mesma direção, mostrando crescimento do grão com o incremento da temperatura no sentido do metamorfismo progressivo do tipo barroviiano, zona da estauroлита.

O método convencional do par biotita-granada aplicado às bordas destes minerais indicou temperaturas entre $539\pm 30^{\circ}\text{C}$ e $590\pm 30^{\circ}\text{C}$, enquanto os valores calculados pelo Thermocalc foram de $605^{\circ}\text{C}\pm 19^{\circ}\text{C}$ e $603^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$. Os valores correspondentes a 539°C , 540°C e 545°C , obtidos pelo método convencional, foram os únicos dentre os 12 valores encontrados que são não concordantes com as temperaturas obtidas pelo Thermocalc. Tratando-se de um método mais antigo é esperado que algumas calibrações dos pares biotita-granada indiquem temperaturas um pouco menores, o que não deve ser considerado grande problema, visto que outros 9 valores de temperatura, assim como a temperatura média dos 12 valores obtidos por este método, são concordantes com os resultados do Thermocalc. Ressalta-se, também, que granadas ricas em Mn, como é o caso dos porfiroblastos aqui estudados, tendem a puxar as temperaturas para baixo, mostrando valores menores do que outros métodos. Ademais, sob o valor de 5,88 Kbar de pressão obtido pelo modo *average P* do Thermocalc, todos os valores encontrados enquadram-se no campo da fácies anfíbolito (Figura 4.1), além de todos os valores de temperatura também estarem de acordo com as temperaturas da zona da estauroлита de Yardley (2004).

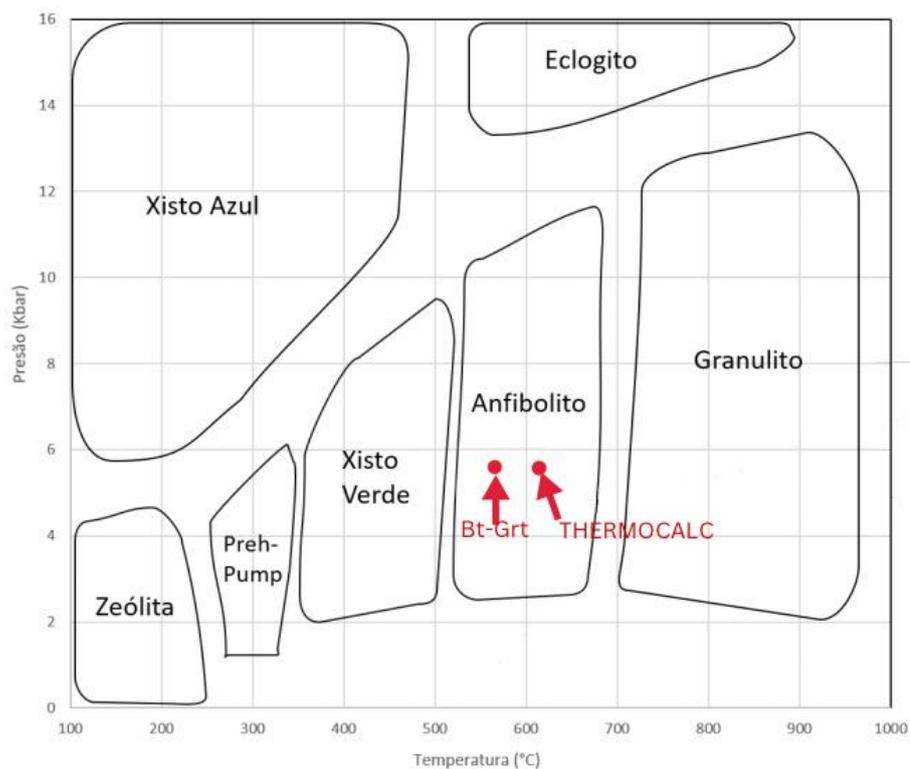


Figura 4.1: Gráfico com as temperaturas médias obtidas pelo método convencional do par Bt-Grt (561 °C). E pelos modos *average P* e *average PT* do THERMOCALC (604 °C). Sob valor de pressão de 5,88 Kbar, obtido pelo modo *average P* do THERMOCALC. Todos os valores indicando metamorfismo de fácies anfibolito. Grt = granada, Bt = biotita.

Xistos pelíticos com condições de metamorfismo e assembleias minerais semelhantes às de estaurolita-clorita-biotita-granada-muscovita-xisto analisado nesta monografia já foram caracterizados em estudos anteriores na região do Quadrilátero Ferrífero. Trabalhos como o de Rezende (2018) obteve valores de temperaturas referente às bordas dos cristais variando entre 539 a 657 °C a partir do geotermômetro biotita-granada. Valores de 634 ± 10 °C foram obtidos para a mesma amostra através do Thermocalc. Queiroz (2014), em seu trabalho de conclusão de curso, utiliza o método convencional do par biotita-granada, obtendo valores de temperatura entre 550 e 604 °C para as bordas dos cristais.

Idades de metamorfismo do xisto pelítico estudado nesta monografia foram obtidas por Paiva-Silva (2023). O valor encontrado utilizando o método U-Pb *in situ* em granadas sin-cinemáticas à Sn indicam idades de 511 ± 24 Ma. A partir desta informação e como resultado deste TCC, correlaciona-se a época do metamorfismo da amostra PS-02, de fácies anfibolito, zona da estaurolita, ao Cambriano, trazendo uma nova abordagem às discussões do metamorfismo do QF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Cráton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29-58.
- Almeida F. F. M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7** (4): 349-364.
- Almeida, F.F.M.1981. O Cráton do Paramirim e Suas Relações com o do São Francisco. Simpósio Sobre o Cráton do São Francisco e Suas Faixas Marginais. Salvador, 1981. SBG-Núcleo Bahia, Salvador, *Anais*, p. 1–10.
- Almeida, L.G., Castro, P.T.A., Endo, I., Fonseca, M.A. 2005. O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: uma revisão estratigráfica. *Brazilian Journal of Geology*, v. 35, n. 2, p. 177-186.
- Baltazar, O. F., Raposo, F. O. 1993. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Folha SF.23-X-B-I – Mariana, Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Brasília, DNPM/CPRM, 183p.
- Baltazar O. F. & Silva S. L. 1996. Projeto Rio das Velhas: Mapa geológico Integrado ao Supergrupo Rio das Velhas, escala 1:100.000. Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte.
- Barrow G. 1893. On an intrusion of muscovite biotite gneiss in the SE Highlands of Scotland and its accompanying metamorphism, *Quarterly Journal of the Geological Society*, **49**: 330-358.
- Barrow G. 1912. On the geology of lower Deeside and the southern highland border. *Proceedings of the Geologists' Associations*, **23**: 268-284.
- Bhattacharya A.; Mohanty L.; Maji A.; Sen S.K.; Raith M. 1992. Non-ideal mixing in the phogopite annite boundary: constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and reformulation of the biotite-garnet geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **111**: 87-93.
- Bucher K. & Grapes R. 2011. *Petrogenesis of Metamorphic rocks*. Springer, Berlin, 8th ed. 428p.
- Carneiro, M. A. 1992. *O Complexo metamórfico Bonfim setentrional (Quadrilátero Ferrífero, MG): litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental arqueano*. Tese de doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Dasgupta S., Sengupta P., Guha D., Fukupka M. 1991. A refined garnet - biotite Fe–Mg exchange geothermometer and its application in amphibolites and granulites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **109** (1): 130–137.
- De Capitani C., Petrakakis K. 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist*.
- Deer, Howie & Zussman. 1966 – *An Introduction to the Forming Minerals*.
- Dorr J. V. N. II. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. *Professional Paper*, **641**(4): 1-110.
- Endo, I., Castro, P.T.A., Gandini, A.L. 2020. *Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte. 3i Editora. 480 p. 70-113.
- Eskola P. 1915. On the relations between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orijarvi region. *Comm. geol. Finlande Bull*, **44**: 109-145.
- Eskola P. 1920. The mineral facies of rocks. *Norsk. Geol. Tidsskr*, **6**: 143-194.
- Eskola P. 1939. Die metamorphen Gesteine. In: Barth T.F.W., Correns C.W., Eskola P. Die Entstehung der Gesteine. Springer, Berlin, 422 pp.
- Farina, F., Albert, C., Martínez Dopico, C., Aguilar Gil, C., Moreira, H., Hippert, J., Cutts, K., Alkimim, F., Lana, C., 2016. The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): current models and open questions. *J. South Am. Earth Sci.*

- Freitas, F. M. 2019. *Geocronologia em U-PB em zircões detríticos e caracterização litoestratigráfica das rochas metassedimentares da unidade Catarina Mendes: implicações quanto a evolução geotectônica do Quadrilátero Ferrífero*. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 87f.
- Herz N. 1970. Gneissic and igneous rocks of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, U. S. Geol. Surv. Prof. Pp., 641B: 58p.
- Hodges K.V & Spear F.S. 1982. Geothermometry, geobarometry and the Al₂SiO₅ triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *American Mineralogist*, **67**: 1118-1134.
- Holdway M.J., Lee S.M. 1977. Fe-Mg cordierite stability in high-grade polytic rocks based on experimental, theoretical and natural observations. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **63**(2): 175-198.
- Holland T.J.B. & Powell R. 1990. An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system K₂O-Na₂O-CaO-MgO-MnO- FeO- Fe₂O₃ Al₂O₃-TiO₂-SiO₂-H₂O. *Journal of Metamorphic Geology*, **8**: 89-124.
- Jordt-Evangelista, H. 1992. O Grupo Dom Silvério, SE de Minas Gerais: petrografia, metamorfismo, geoquímica e geologia econômica. *Rev Esc Minas*, **45**: 140-142.
- Jordt-Evangelista H. 1984. Petrologische Untersuchungeng im Gebiete zwischen Mariana und Ponte Nova, Minas Gerais, Brasilien. PhD thesis. Technische Universität Clausthal, Clausthal, Alemanha, 183p.
- Jordt-Evangelista H. 1985. Petrologia de fases, geotermometria e geobarometria do Complexo Granulítico de Acaiaca, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: Simpósio Geologia Minas Gerais, Belo Horizonte, Anais, **3**:165-178.
- Jordt-Evangelista H. 1988. Minerais petrográficos de rochas ígneas e metamórficas das propriedades ópticas e ocorrências. Apostila de aula de Petrologia Ígnea e Metamórfica, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 125 p.
- Ladeira E. A. 1980. Metallogenesis of Gold at the Morro Velho Mine, and in Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. University of Western Ontario, Ontario, Canada, Ph.D Thesis, 272p.
- Lana, C., Alkmim, F. F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini, H. A., 2013. The ancestry and magmatic evolution of the Archean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brasil. *Precambrian Res.*, **231**: 157-173.
- Paiva-Silva, P.A. 2023. *Petrocronologia e evolução metamórfica da porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG: Estudos P-T-t-d a partir de xistos pelíticos*. Dissertação de mestrado. Departamento de Geologia, Ouro Preto.
- Paiva-Silva, P. A. de ., Queiroga, G. ., Moraes, R. de. (2023). Petrocronologia de rochas metapelíticas: uma revisão de conceitos-chave. *Geologia USP. Série Científica*, **23**(1), 43-68.
- Perchuk, L.L & Lavrent'eva, I.V. 1983. Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. In: S.K. Saxena (ed). *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions, Advances in Physical Geochemistry*. New York, Springer-Verlag, 199-239.
- Queiroz, Y. D. S. 2014. *Petrografia e geotermobarometria dos xistos pelíticos correlatos ao Supergrupo Rio das Velhas na região de Santo Antônio do Pirapetinga-Piranga, MG*. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Queiroz, Y. D. S., Queiroga, G., Moraes, R. D., Fernandes, V. M. T., Medeiros-Júnior, E., Jordt-Evangelista, H., Schulz, B. Schmiedel, J., Martins, M., Castro M. P. D. & Lana, C. 2019. Pseudosection

modeling and U-Pb geochronology on Piranga schists: role of Brasiliano Orogeny in the Southeastern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 49.

Raposo F. O. 1998. Mapa geológico da Folha Ponte Nova 1:250.000. In: XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, sessão pôster.

Renger F. E., Noce C. M., Romano A. W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos* 2(1): 1-11.

Rezende, L. O. 2018. *Petrografia e geotermobarometria dos xistos pelíticos e anfíbolitos associados da região de Pinheiros Altos-Piranga, Minas Gerais*. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Schmiedel, J. 2014. *Monazite dating and geothermobarometry in metamorphic rocks of Piranga region, Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil*. Doctoral dissertation, MS Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 111p.

Thompson A. B. 1976. Mineral reactions in pelitic rocks: II. Calculation of some P-T-X (Fe-Mg) phase relations. *American Journal of Science*, **276**: 401-454.

Whitney D. L. & Evans B. W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **95**: 185-187.

Winkler H. G. F. 1979. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. New York, Springer Verlag, 348p.

Yardley B.W.D. 2004. *Introdução à petrologia metamórfica* (Tradução Reinhardt A. Fuck). Editora UnB, 434p.