



**ASPECTOS DE CAMPO E PETROGRÁFICOS DAS INTRUSÕES
MÁFICAS E FÉLSICAS NOS MÁRMORES MATARAZZO,
SUDESTE DO CINTURÃO DOM FELICIANO, RS**

Nicoli Pozzebon Gerhard

Porto Alegre, 2015

NICOLI POZZEBON GERHARD

**ASPECTOS DE CAMPO E PETROGRÁFICOS DAS INTRUSÕES
MÁFICAS E FÉLSICAS NOS MÁRMORES MATARAZZO,
SUDESTE DO CINTURÃO DOM FELICIANO, RS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores: Prof. Dr. Edinei Koester

Prof^a. Dr^a. Carla Cristine Porcher

Supervisor: Prof. Dr. Roberto Ferrez Weinberg

Porto Alegre, 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Gerhard, Nicoli Pozzebon

Aspectos de campo e petrográficos das intrusões máficas e félsicas nos mármores Matarazzo, sudeste do Cinturão Dom Feliciano, RS. / Nicoli Pozzebon Gerhard. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015. [63 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador(es): Edinei Koester
Coorientador(es): Carla Cristine Porcher

1. Escudo Sul-Rio-Grandense 2. Petrologia 3. Metassomatismo 4. Fusão parcial I. Título.

CDU 55

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Veleida Ana Blank

CRB 10/571

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6329 Fax: +55 51 3308-6337

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso **ASPECTOS DE CAMPO E PETROGRÁFICOS DAS INTRUSÕES MÁFICAS E FÉLSICAS NOS MÁRMORES MATARAZZO, SUDESTE DO CINTURÃO DOM FELICIANO, RS**, elaborado por Nicoli Pozzebon Gerhard, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora

MSc. Luiz Alberto Vedana

Prof^a. Dr^a. Maria de Fátima Aparecida Saraiva Bitencourt

MSc. Tiago Luis Reis Jalowitzki

*Aos meus pais,
Com muito amor*

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Cláudia, por tanto zelo e dedicação, por todas as conversas e carinhos; ao meu pai Luís, por toda confiança e por, incansavelmente, ajudar-me sempre. Obrigada pelos abraços e sorrisos. Obrigada por acreditarem em mim. Obrigada por terem me ensinado os valores mais preciosos desta vida. E por serem exemplos lindos de seres humanos.

À minha tia-avó Maria, pelo incrível incentivo, por toda energia positiva, por todos os domingos adoráveis, por ser uma grande amiga. E por ser minha segunda mãe.

Aos meus professores, pelos conhecimentos de geologia ensinados nas salas de aula da UFRGS, de Caçapava, Bagé, São Gabriel, Encruzilhada e tantas outras cidades desse RS estudadas e mapeadas.

Aos meus amigos, Alice, Ana Julia, Andreas, Mariana e Raquel, por terem feito esta Geologia mais feliz.

Aos companheiros do Centro de Investigação do Continente Arroio Grande: Daniel, Fernando, Laércio, Matheus, Paula, Rafael e Rodrigo, pelas discussões geológicas e momentos de descontração, sempre acompanhados de bons mates.

Aos meus orientadores Edinei, Carla e Roberto, por toda geologia vivida nos últimos semestres e por ampliarem imensuravelmente os meus conhecimentos geológicos. Em especial, um agradecimento ao professor Edinei, por esses três anos de iniciação científica e por sempre acreditar neste projeto.

À UFRGS e ao Instituto de Geociências, por proporcionarem-me a oportunidade de me construir como profissional estudando algo tão encantador.

E o mais sincero agradecimento é para a mais linda das ciências.

Obrigada Geologia.

Por me fazer admirar este sistema tão complexo e perfeito, chamado Terra.

Por modificar completamente a minha vida nestes últimos cinco anos.

Por tornar do mundo, o meu trabalho.

E a minha paixão.

A natureza é a fonte de todo o
conhecimento verdadeiro.
Ela tem sua própria lógica,
suas próprias leis,
ela não tem efeito sem causa
nem invenção sem necessidade.

Leonardo da Vinci

RESUMO

A interação de mármore e magmas e as intensas reações que levam a *skarns*, têm sido assunto de interesse científico e econômico. Este projeto relata um número de características inesperadas com a intrusão de rochas máficas e félsicas neoproterozoicas nos mármore Matarazzo, que ocorrem na porção sul do Domínio Leste do Cinturão Dom Feliciano, a norte da cidade de Arroio Grande, Rio Grande do Sul. Eles são expostos em duas pedreiras (Brasileira e Matarazzo), circundados pelos granitoides do Complexo Pinheiro Machado. Os mármore estudados, aflorantes na pedreira Brasileira, são predominantemente calcíticos, com um percentual modal pequeno de diopsídio, wollastonita, plagioclásio, quartzo e pirita, em uma textura granoblástica poligonal grossa, sugerindo um alto grau metamórfico. Localmente, eles apresentam intercalação centimétrica com camadas de biotita xisto, expostas na porção SE da pedreira. São identificadas diferentes rochas máficas e intrusões na pedreira. As rochas máficas mais antigas são os anfíbolitos e são encontrados como blocos angulares rompidos, com *skarns* centimétricos. Há também os metadiabásios, que diferem dos anfíbolitos pela sua estrutura, textura e mineralogia. Estes têm contatos retos com o mármore e textura afanítica microcristalina metamorfizada. As rochas intrusivas tardias são os biotita quartzo dioritos, que têm contatos altamente irregulares com o mármore e são circundados por *skarns* centimétricos a decimétricos, caracterizados por concentrações de titanita, grossulária e uma massa silicática verde. As intrusões félsicas são os diopsídio quartzo sienitos, que têm megacristais de K-feldspato e titanita centimétrica em uma matriz grossa de diopsídio, plagioclásio e quartzo. Eles intrudem o mármore como diques que carregam blocos de rochas máficas, com leucossomas que têm diopsídio peritético, que são contínuos com a rocha quartzo sienítica, sugerindo que estes são formados a partir da fusão parcial das rochas máficas. Estes diques são irregulares, têm contatos lobados com o mármore e formam *skarns* com grossulária e wollastonita. Os contatos lobados são similares às feições desenvolvidas durante um processo de *magma mingling*, como *pillows* e *back-veining*. Isso sugere que o mármore tenha sido parcialmente fundido no contato com os quartzo sienitos, de acordo como mostrado por experimentos laboratoriais recém publicados. A fusão do mármore, é também consistente com a presença de estruturas de fluxo com o desenvolvimento de *skarns* e com a presença de wollastonita, um mineral produto de reação de descarbonatação. As fusões, tanto das rochas máficas, para gerar os quartzo sienitos, quanto do mármore, são explicadas pela presença de fluidos hidrotermais, com baixa atividade de água e alta atividade de CO₂, devido à dissolução do mármore, provenientes, provavelmente, do posicionamento do Complexo Pinheiro Machado na região. Assim, interpreta-se que as primeiras intrusões máficas ocorreram antes do evento metamórfico. Este metamorfismo foi seguido pelas intrusões máficas mais novas, as quais foram refundidas como um resultado do influxo de fluidos em altas temperaturas relacionadas ao posicionamento do Complexo Pinheiro Machado. Estes fluidos deram origem ao diopsídio quartzo sienito e também causaram a fusão do mármore.

Palavras-Chave: Escudo Sul-Rio-Grandense, petrologia, metassomatismo, fusão parcial.

ABSTRACT

The interaction of marbles and magmas and the intense reactions that lead to skarns, have long been a subject of scientific and economic interest. This project report a number of unexpected features related to the intrusion of Neoproterozoic mafic and felsic rocks into the Matarazzo marble, in the Eastern Domain of Dom Feliciano Belt, north of Arroio Grande city, Rio Grande do Sul. These are exposed in two quarries (Brasileira and Matarazzo), surrounded by granitoids of the Pinheiro Machado Complex. The studied marbles outcrop at Brasileira quarry, are dominantly calcitic, with typically less than a few modal percent of diopside, wollastonite, plagioclase, quartz and pyrite in a coarse granoblastic polygonal texture, suggesting a high metamorphic grade. Locally, they present centimetric intercalation with biotite schist layers exposed in the SE part of the quarry. Different mafic rocks and intrusions are identified at the quarry. The oldest mafic rocks are amphibolites and are found as broken angular blocks, with a narrow skarn. There are also the metadiabase, which differ from the amphibolites by their structure, texture and mineralogy. These have straight contacts with the marble and an aphanitic microcrystalline metamorphosed texture. The late mafic intrusions are biotite quartz diorites, that have highly irregular contacts with the marble and are surrounded by centimetric to decimetric skarns, characterized by titanites and grossular concentrations and a green silicatic mass. The felsic intrusions are diopside quartz syenites, has K-feldspar megacrysts, centimetric titanite in a coarse matrix of diopside, plagioclase and quartz. They intrude the marble as dykes that carry blocks of mafic rocks, with leucosomes that have peritectic diopside and that are continuous with the quartz syenitic rock, suggesting that these are sourced from the partial melting of the mafic rocks. These dykes are irregular, with lobate-cuspate contacts with the marble and form skarns with grossular and wollastonite. The lobate contacts are similar to the features developed during a magma mingling process such as pillows and back-veining. This suggests that the marble had been partially melted at the quartz syenite contact as is in accordance with newly published laboratory findings. The melting of the marble is also consistent with the presence of flow structures with the development of skarns and with the presence of wollastonite, a mineral product of decarbonation reaction. The melting, of both the mafic rocks, to generate the quartz syenites, and the marble, are explained by the presence of hydrothermal fluids low water activity and high CO₂ activity due to marble dissolution, probably coming from the emplacement of Pinheiro Machado Complex in the region. So, it is interpreted that the first mafic intrusions took place before the metamorphism. This metamorphic event was followed by younger mafic intrusions, which were remelted as a result of the influx of fluids at high temperature related to the emplacement of the Pinheiro Machado Complex. This fluid influx the diopside quartz syenite and also caused marble melting.

Key-words: Sul-Rio-Grandense Shield, petrology, metasomatism, partial melting.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.** Mapa de localização da área de trabalho com uma imagem de satélite do *Google Earth*, que mostra o acesso à Vila Matarazzo, a partir do entroncamento das BR's 116 e 473 e um mapa simplificado do estado do RS, na porção superior esquerda. 23
- Figura 2.** Mapa litotectônico dos escudos Sul-Rio-Grandense e Uruguaio; a) Configuração do Gondwana com as principais áreas cratônicas e cinturões relacionados ao Cinturão Dom Feliciano; b) Localização do Cinturão Dom Feliciano e cinturões africanos adjacentes na configuração do Gondwana; c) Mapa geológico do Cinturão Dom Feliciano e do cráton Río de La Plata no sul do Brasil e no Uruguai. A porção indicada pelo quadrado em preto indica a região de estudo deste projeto. Fonte: Adaptado de Lenz *et al.* (2013). 25
- Figura 3.** a) Mapa geológico da porção sul do DL-CDF e localização da área de estudo, circundada pelo retângulo branco. b) Mapa da pedreira Brasileira com as foliações do mármore. Fonte: Modificado de Ramos e Koester (2015). 33
- Figura 4.** Estereograma produzido através do *software* Stereo32, mostrando os polos dos planos de foliações do mármore. A foliação principal é para NE (19 medidas), com mergulho principal para SE. 34
- Figura 5.** Localização das amostras coletadas na pedreira Brasileira em imagem de satélite do *Google Earth*. 35
- Figura 6.** Mármore bandado característico da pedreira. O bandamento é irregular e descontínuo, com intercalação de bandas milimétricas máficas e centimétricas félsicas. 36
- Figura 7.** a) Aspecto geral da lâmina PMM-35 em LP; b) Textura granoblástica grossa na lâmina PMM-02 (em LP), com os grãos de calcita apresentando maclas curvas. c) Lâmina PMM-35, com detalhe para o diopsídio geminado e para os grãos de quartzo, que se apresentam em um agregado e com extinção ondulante; d) Orientação preferencial dos minerais máficos (diopsídio e wollastonita) na lâmina MAT-05, em LP. Abreviações: Cal-calcita, Di-diopsídio, Pl-plagioclásio, Py-pirita, Qz-quartzo, Ttn-titanita, Wo-wollastonita. 37
- Figura 8.** Imagens de MEV, da lâmina PMM-35. a) quartzo (01) e wollastonita (02); b) diopsídio (03), quartzo (04) e calcita (05). 38
- Figura 9.** Mármore em contato com dois blocos de rochas máficas, em estrutura de fluxo (indicada pelos traços em vermelho) e com textura granoblástica muito grossa, com calcitas de até 1 cm. 39

Figura 10. a) Lâmina PMM-13 em LP, mostrando o contato do mármore com a zona de reação formada com o sienito; b) Detalhe da porção de mármore da figura 10a. Abreviações: Cal-calcita. 39

Figura 11. Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-13, em calcita (06), antofilita (07 e 08), diopsídio (09) e titanita (10). 39

Figura 12. a) Lente de xisto em campo, de direção NE-SW (concordante com bandamento do mármore); b) Detalhe para a intercalação entre o xisto e o mármore. 40

Figura 13. Fotomicrografias das lâminas PMM-01 e PMM-32 em LP. a) Aspecto geral da amostra PMM-01; b) Orientação das biotitas e dos litoclastos, compostos de quartzo e calcita, segundo a foliação, e aspecto da clivagem de crenulação bem marcada, na amostra PMM-01; c) Detalhe da mineralogia acessória da amostra PMM-01, com as titanitas fraturadas, com fratura preenchida por biotita; d) Aspecto geral da amostra PMM-32, com a intercalação do mármore com o xisto. Abreviações: Bt-biotita, Cal-calcita, Qz-quartzo, Py-pirita, Ttn-titanita. 41

Figura 14. a) Bloco angular de anfibolito circundado pelo mármore. Detalhe para a borda de reação cinza escura presente entre o bloco e a encaixante. b) Bloco de anfibolito rompido, como mostrado pela flecha branca, circundado pelo mármore. 42

Figura 15. Fotomicrografias do anfibolito em LP. a) Aspecto geral do anfibolito na amostra MAT-22; b) Assembleia mineralógica na amostra VOT-01E. Abreviações: Di-diopsídio, Hbl-hornblenda, Pl-plagioclásio, Py-pirita, Tr-tremolita, 42

Figura 16. Fotomosaico da amostra VOT-01E em LN (a) e LP (b), mostrando o anfibolito (à esquerda), o mármore (à direita) e a zona de reação entre eles (ao centro). 43

Figura 17. Fotomicrografias da lâmina VOT-01E em LP. a) Zona de reação desenvolvida entre o anfibolito e o mármore, mais próximo ao contato com o anfibolito; b) Zona de reação desenvolvida entre o anfibolito e o mármore, mais próximo ao contato com o mármore. Abreviações: Cal-calcita, Di-diopsídio, Hbl-hornblenda, Pl-plagioclásio, Py-pirita, Tr-tremolita, Ttn-titanita. 44

Figura 18. a) Dique de metadiabásio (PMM-05), de aproximadamente 1 m de comprimento, circundado pelo mármore. b) Bloco rolado de metadiabásio (PMM-07), apresentando contatos retos e nenhuma reação com o mármore. 45

Figura 19. a) Fotomicrografia em LP da amostra PMM-05, mostrando os porfiroblastos de biotita, quartzo e pirita circundados pela matriz, composta por tremolita e quartzo; b) Detalhe da matriz da amostra PMM-05, em LP; c) Aspecto geral da amostra PMM-07, em LP. Em detalhe, os grãos de quartzo indicados pelas flechas em branco, que se apresentam xenoblásticos e angulares; d)

Amostra PMM-07 em LP, com cristal de pirita subédrico, envolto pela matriz da rocha, composta por tremolita, biotita e quartzo. Abreviações: Bt-biotita, Qz-quartzo, Py-pirita, Tr-tremolita. 45

Figura 20. a) Intrusões quartzo dioríticas, indicadas pelas flechas em preto, no mármore, com contatos irregulares e interlobados; b) Dique quartzo diorítico, rompido; c) Dique quartzo diorítico desagregado (como pode ser observado pelas porções máficas retangulares, separadas). 47

Figura 21. Detalhe do contato irregular do quartzo diorito com o mármore, com o desenvolvimento de reações metassomáticas – uma massa silicática verde próximo à rocha máfica e uma borda avermelhada, com titanitas e grossulárias. 47

Figura 22. Fotomicrografias da lâmina MAT-06. a) Aspecto geral da amostra em LP; b) Plagioclásio prismático, anédrico, com maclas polissintéticas em duas direções; c) Foto em LN, onde é possível observar a sericitização no núcleo do plagioclásio e o pleocroísmo forte da biotita, que varia de marrom-esverdeado a amarelo claro; d) Em LP, pode-se identificar as maclas polissintéticas, a dupla macla e a zonação do plagioclásio. Abreviações: Bt-biotita, Di-diopsídio, Pl-plagioclásio, Qz-quartzo, Ttn-titanita. 48

Figura 23. a) Bolsões de leucossomas com diopsídio peritético e veios de quartzo sienito percolando pela rocha máfica; b) Detalhe dos leucossomas com diopsídio peritético da amostra PMM-11; c) Relação da intrusão quartzo sienítica no mármore, com dois blocos de rochas máficas angulares rompidos, apresentando bolsões de leucossomas com diopsídio peritético; d) Intrusão do quartzo sienito no mármore, com contatos interlobados; e) Quartzo sienito em contato com o mármore, carregando blocos de rocha máfica; f) Interação do quartzo sienito com blocos de rocha máfica. Detalhe para a maior concentração de leucossomas de diopsídio peritético no contato com a rocha máfica. 49

Figura 24. a) Fotomicrografia em LN da amostra PMM-11, com destaque para o mineral peritético, diopsídio. Em detalhe, a pirita, na porção inferior direita, com coroas de titanita; b) Mesma feição mostrada na fotomicrografia 24a, mas em LP. Nesta imagem, é evidenciada a borda de alteração que o diopsídio apresenta, quando é substituído pela actinolita; c) Detalhe do centro da fotomicrografia 24b, mostrando o desenvolvimento de titanita e K-feldspato entre dois grãos de diopsídio; d) Aspecto da matriz da amostra PMM-11, em LP, com o predomínio de cristais de plagioclásio, actinolita e biotita. O quartzo ocorre apenas como material intersticial. Abreviações: Act-actinolita, Bt-biotita, Di-diopsídio, Kfs-K-feldspato, Pl-plagioclásio, Py-pirita, Qz-quartzo, Ttn-titanita. 51

Figura 25. Imagens de MEV da lâmina PMM-11. a) Centro do grão de diopsídio (cinza claro) com a substituição por actinolita (cinza escuro); b) Borda do grão de diopsídio (cinza claro) e actinolita (cinza escuro). 51

Figura 26. Fotomicrografias em LP do diopsídio quartzo sienito (amostra PMM-15). a) Aspecto geral da amostra; b) K-feldspatos poiquiliticos; c) K-feldspato poiquilítico, com macla *tartan* e textura de exsolução descontínua e irregular; d) Detalhe do diopsídio sendo alterado para hornblenda e da interação com a

calcita, que preenche espaços intragranulares do cristal. Abreviações: Ap-apatita, Cal-calcita, Di-diopsídio, Hbl-hornblenda, Kfs-feldspato potássico, Or-ortoclásio, Pl-plagioclásio, Qz-quartzo, Zrn-zircão.....53

Figura 27. Imagem de MEV do diopsídio (15), com inclusões de K-feldspato (16), quartzo (17) e titanita (18), na lâmina PMM-15.....53

Figura 28. Quartzo sienito (rocha marrom clara) intrudindo no mármore (rocha branco-acinzentada). Detalhe para o contato irregular entre estas rochas.....54

Figura 29. Fotomicrografias da lâmina PMM-12, em LN e LP. a) Aspecto geral da lâmina em LN, com a concentração de wollastonita á direita, a granada ao centro e a porção feldspática à esquerda; b) Fotomicrografia 29a em LP; c) Detalhe em LN da borda irregular da granada; d) Fotomicrografia 29c em LP; e) Diopsídio preenchido por calcita, circundado por grãos de ortoclásio, em LP; f) Titanita e pirita subédricas em contato com diopsídio preenchido por calcita, circundados por grãos de K-feldspato, em LP. Abreviações: Cal-calcita, Di-diopsídio, Kfs-feldspato potássico, Qz-quartzo, Or-ortoclásio, Ttn-titanita, Wo-wollastonita.....55

Figura 30. Imagens de MEV da lâmina PMM-12. a) Imagem da granada (19) em contato com o quartzo (20). Detalhe para o contato irregular e interlobado entre esses minerais; b) Imagens das wollastonitas (21 e 22) com quartzo intersticial (23).56

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-35, referentes aos pontos na figura 8 (01-quartzo, 02-wollastonita, 03-diopsídio, 04-quartzo e 05-calcita). 38
- Tabela 2** – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-13, referentes aos pontos na figura 11 (06-calcita, 07-antofilita, 08-antofilita, 09-diopsídio e 10-titanita)..... 40
- Tabela 3** – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-11, referentes aos pontos na figura 25 (11-actinolita, 12-diopsídio, 13-actinolita e 14-diopsídio)..... 52
- Tabela 4** – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-15, referentes aos pontos na figura 27 (15- diopsídio, 16-K-feldspato, 17-quartzo e 18-titanita). 54
- Tabela 5** – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-12, referentes aos pontos na figura 30 (19-grossulária, 20-quartzo, 21-wollastonita, 22-wollastonita, 23-quartzo). 57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Act	Actinolita
Ap	Apatita
Bt	Biotita
Cal	Calcita
CDF	Cinturão Dom Feliciano
CPM	Complexo Pinheiro Machado
DL-CDF	Domínio Leste do Cinturão Dom Feliciano
Di	Diopsídio
EDS	Espectrometria de energia dispersiva de raios-X
ESRG	Escudo Sul-Rio-Grandense
GPS	Sistema de Posicionamento Global
Grt	Granada
Hbl	Hornblenda
K_D	Coefficiente de partição
Kfs	Feldspato Potássico
MAT	Nomenclatura utilizada nas amostras coletadas no Projeto Matarazzo
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Or	Ortoclásio
Pl	Plagioclásio
PMM	Nomenclatura utilizada nas amostras coletadas no Projeto Mármore Matarazzo
Py	Pirita
Qz	Quartzo
Tr	Tremolita
Ttn	Titanita
VOT	Nomenclatura utilizada nas amostras coletadas no Projeto Votorantin

Wo	Wollastonita
Zrn	Zircão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Problema, premissas, hipóteses e técnicas de solução.....	21
1.2	Objetivos	22
1.3	Localização da área de estudo.....	23
1.4	Contexto geológico.....	24
2	METODOLOGIA	28
3	RESULTADOS	32
3.1	Relações de campo.....	32
3.2	Mármore.....	35
3.2.1	Mármore em contato com as rochas intrusivas	38
3.3	Biotita Xisto	40
3.4	Anfibolito	41
3.5	Metadiabásio.....	44
3.6	Biotita Quartzo Diorito	46
3.7	Diopsídio Quartzo Sienito.....	48
4	DISCUSSÕES	58
5	CONCLUSÕES	60
6	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Mármore são rochas carbonáticas metamorfizadas, nas quais os minerais mais abundantes são os carbonatos. Muitos são compostos apenas por calcita (CaCO_3), com minerais de origem detrítica em menores quantidades, como quartzo, filossilicatos e pirita (Yardley, 1994).

A calcita é um mineral que permanece estável de pressões baixas a altas e, portanto, são poucos os indícios que ficam preservados nesses minerais relacionados às condições de formação do mármore. Algumas reações que envolvem a formação de novos minerais, auxiliam na identificação da formação destas rochas, como a reação entre calcita e quartzo, que forma a wollastonita (CaSiO_3). Esta é uma reação de descarbonatação, característica de condições de temperaturas muito elevadas e baixas pressões (Yardley, 1994).

Muitas ocorrências de mármore apresentam interações com rochas ígneas, que envolvem principalmente o desenvolvimento de auréolas de contato a partir de reações metassomáticas (*skarn*), como na intrusão gabroica Panzhihua, na China, que intruiu em dolomitos e margas proterozoicas, aproximadamente há 263 Ma (Ganino *et al.*, 2013). Estes dolomitos foram transformados em mármore brucíticos (compostos por hidróxido de magnésio) e houve o desenvolvimento de diversos *skarns*, com forsterita, diopsídio e granada.

Através de estudos de elementos traços, Ganino *et al.* (2013) afirmam que pode-se observar algumas características bem diferentes entre o mármore brucítico, que está na auréola de contato, e o protólito dolomítico. O

mármore brucítico apresentou-se altamente enriquecido em elementos terras raras, mas com níveis muito baixos de Nb-Ta, Zr-Hf e Ti. Estas características dos mármore são semelhantes às dos líquidos carbonáticos que estão em equilíbrio com os minerais silicáticos no caso da intrusão Panzhihua, o que indica que estes mármore brucíticos sofreram fusão parcial.

A fusão parcial de carbonatos é muito discutida no mundo geológico, pois os relatos dessas fusões são ainda raros e ambíguos, muito por conta da intensa recristalização que ocorre nos mármore e também pela falta de critérios claros para identificação dessas fusões (Floess *et al.*, 2015).

Floess *et al.* (2015) e Durand *et al.* (2015) demonstram experimentalmente, que as fusões carbonáticas podem ocorrer em metamorfismo de contato e que esta situação pode ser muito comum.

Características microestruturais, texturais e geoquímicas são apresentadas por Floess *et al.* (2015) como evidências de fusão parcial de mármore calcários-dolomíticos, na auréola de contato com o batólito tonalítico Adamelo, localizado no norte da Itália. Observações petrográficas e tomografias microcomputadorizadas de raios-X, mostraram que as calcitas cristalizaram como bolsões de fusões centimétricos a decimétricos e como uma fase intersticial formando uma rede interconectada entre os grãos dolomíticos. Os valores de coeficientes de partição (K_D) variaram de 9 a 35 para as calcitas e as dolomitas, o que é de 3 a 10 vezes maior que os valores de equilíbrio reportados na literatura, sugerindo uma partição de elementos incompatíveis em uma fase fundida. As orientações cristalográficas mostraram um agrupamento de eixos-C para a dolomita e a calcita intersticial, segundo o plano de foliação, uma feição típica de deformação compressional, enquanto que a calcita cristalizada em bolsões mostrou um forte agrupamento de eixos-C paralelos às paredes dos bolsões, indicando que a sua cristalização ocorreu depois que a deformação parou. Todas essas evidências sugerem a formação de fusão parcial nestes carbonatos (Floess *et al.*, 2015).

Os estudos experimentais de fusões de calcita de Durand *et al.* (2015), foram desenvolvidos no sistema $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ em pressões de 1 kbar. Os resultados mostraram que a fusão parcial de calcita começa em temperaturas relativamente baixas, em torno de 650 °C, onde pequenos agregados de

cristais de calcita foram observados no experimento. Também foi verificado que, ao adicionar água, uma fase de vapor é liberada durante a perfuração das cápsulas dos experimentos, provando a presença de um vapor enriquecido em CO₂ e, portanto, a ocorrência de reações de descarbonatação durante a fusão parcial das calcitas. Essas reações de descarbonatação ocorrem em auréolas de contato, como na intrusão gabroica Panzhihua (Ganino *et al.*, 2013), associadas à fusão parcial e transformação de carbonatos em minerais cálcio-silicáticos, liberando grandes quantidades de CO₂ (Durand *et al.*, 2015).

Todos os autores, Ganino *et al.* (2013), Floess *et al.* (2015) e Durand *et al.* (2015), afirmam que a presença de fusão parcial em carbonatos crustais tem importantes implicações nos parâmetros físicos e químicos, como na viscosidade e permeabilidade das auréolas de contato, significantes mudanças na dinâmica de distribuição de fluidos entre a auréola de contato e o corpo intrusivo e, além disso, na liberação de quantidades massivas de CO₂, com poder de impacto potencial no clima global.

Uma das dificuldades de distinguir visualmente a ocorrência de fusão carbonática em campo, está no fato de um líquido carbonático ser resultado de uma fusão parcial de carbonatos e de se tornar um carbonato após a cristalização (Durand *et al.*, 2015).

Assim, neste projeto, o enfoque de estudo são as ocorrências dos mármore Matarazzo, restritos à parte sul do Domínio Leste do Cinturão Dom Feliciano (DL-CDF) (*sensu* Fernandes *et al.*, 1995 a;b), as suas relações com as intrusões de rochas máficas e félsicas, e a discussão sobre a existência de fusão nessas rochas.

1.1 Problema, premissas, hipóteses e técnicas de solução

Os mármore Matarazzo afloram em duas pedreiras localizadas na Vila Matarazzo, interior da cidade de Arroio Grande, Rio Grande do Sul (RS). Neles são encontradas associações com rochas máficas, como biotita xistos,

anfíbolitos e metadiabásios e intrusões de quartzo dioritos e quartzo sienitos, que envolveram importantes trocas de calor e de fluidos com o mármore, registradas em diferentes zonas de reações entre esses litotipos, que despertaram interesse de estudo para esclarecer seu significado e entender como ocorreram e evoluíram essas relações entre as diferentes rochas.

Partindo das premissas de que os mármore foram depositados em uma bacia sedimentar, deformados e metamorfizados em alto grau e que as rochas máficas e as intrusões presentes geram diferentes reações, as hipóteses que serão testadas nesse estudo são de que diferentes intrusões ocorreram em diferentes tempos, de que houve rompimento de diques máficos durante um evento deformacional imposto à essa região e que ocorreu a alta deformação do mármore, fusão de rochas máficas e fusão do próprio mármore.

As técnicas utilizadas para resolver o problema e corroborar as hipóteses são as revisões bibliográficas, o trabalho de campo e a petrografia (envolvendo microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura – MEV). Essas técnicas são descritas em maior detalhe no item 2 (Metodologia).

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste projeto é contribuir com o conhecimento sobre a evolução geológica do DL-CDF, a partir do desenvolvimento de trabalhos de campo detalhados, com a descrição das diferentes rochas e reações desenvolvidas entre os mármore Matarazzo e as rochas intrusivas, levantamento de dados estruturais, além de descrição de texturas, paragêneses e composições minerais com microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

1.3 Localização da área de estudo

A área de estudo localiza-se na região da Vila Matarazzo, interior da cidade de Arroio Grande, RS (Figura 1). Arroio Grande distancia-se 345 km para sul da capital do estado, Porto Alegre, e é limitada a norte pelas cidades de Pedro Osório e Capão do Leão, a leste pela cidade de Rio Grande e pela Lagoa Mirim, a sul pela cidade de Jaguarão e a oeste pela cidade de Herval. As principais rodovias de acesso à Vila Matarazzo são a BR-116, seguida pela BR-473.

Os mármores Matarazzo são explorados em duas pedreiras (Matarazzo e Brasileira), localizadas na região da Vila Matarazzo, distantes entre si em 5 km. Estas pedreiras são os principais pontos de afloramento dos mármores. O trabalho foi desenvolvido na pedreira Brasileira (pertencente ao Grupo Votorantim Cimentos), já que a pedreira Matarazzo (pertencente ao Grupo Camargo Corrêa) não permitiu acesso à lavra. Hoje, as duas pedreiras encontram-se em processos de exploração, visando a produção de calcário agrícola.



Figura 1. Mapa de localização da área de trabalho com uma imagem de satélite do *Google Earth*, que mostra o acesso à Vila Matarazzo, a partir do entroncamento das BR's 116 e 473 e um mapa simplificado do estado do RS, na porção superior esquerda.

1.4 Contexto geológico

No Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG), o Cinturão Dom Feliciano (CDF) representa a faixa orogênica Província Mantiqueira, desenvolvida no Ciclo Orogrênico Brasileiro no Neoproterozoico/Eopaleozoico (Silva *et al.*, 2005), apresentando associações de rochas alongadas segundo a direção NE-SW, de acordo com Fernandes *et al.* (1995 a;b).

O ESRG é compartimentado em quatro grandes associações petrotectônicas, por Fernandes *et al.* (1995 a;b): Domínios Leste, Central e Oeste do Cinturão Dom Feliciano e Cráton Río de La Plata. Chemale Jr. (2000) e Hartmann *et al.* (2007) apresentam outra nomenclatura para esta compartimentação: Cinturão Dom Feliciano – para Chemale Jr. (2000) – e Batólito Pelotas – para Hartmann *et al.* (2007) –, equivalentes ao Domínio Leste; Terreno Tijucas, representando o Domínio Central; Terreno São Gabriel, que representa o Domínio Oeste; e Bloco Taquarembó, representando o Cráton Río de La Plata (Figura 2). Neste trabalho a compartimentação adotada será a de Fernandes *et al.* (1995 a;b).

O DL-CDF apresenta, no Rio Grande do Sul, uma área aflorante de 23.000 km² (Philipp e Machado, 2002) e é definido originalmente por Fragoso-Cesar *et al.* (1980) como um complexo plutônico multi-intrusivo e polifásico, resultante de uma longa evolução e da adição de distintos processos tectônicos.

Com base em informações petrográficas, estruturais, geoquímicas e geocronológicas, Philipp (1998) e Philipp *et al.* (2002 a) compartimentam o DL-CDF em seis suítes graníticas: Pinheiro Machado, Erval, Viamão, Encruzilhada do Sul, Cordilheira e Dom Feliciano, incluindo a presença de septos do embasamento, representados por rochas metamórficas de baixo a alto grau, como os mármore Matarazzo, e xenólitos de dimensões centimétricas a decamétricas nos segmentos central e sul do DL-CDF (Philipp e Machado, 2002).

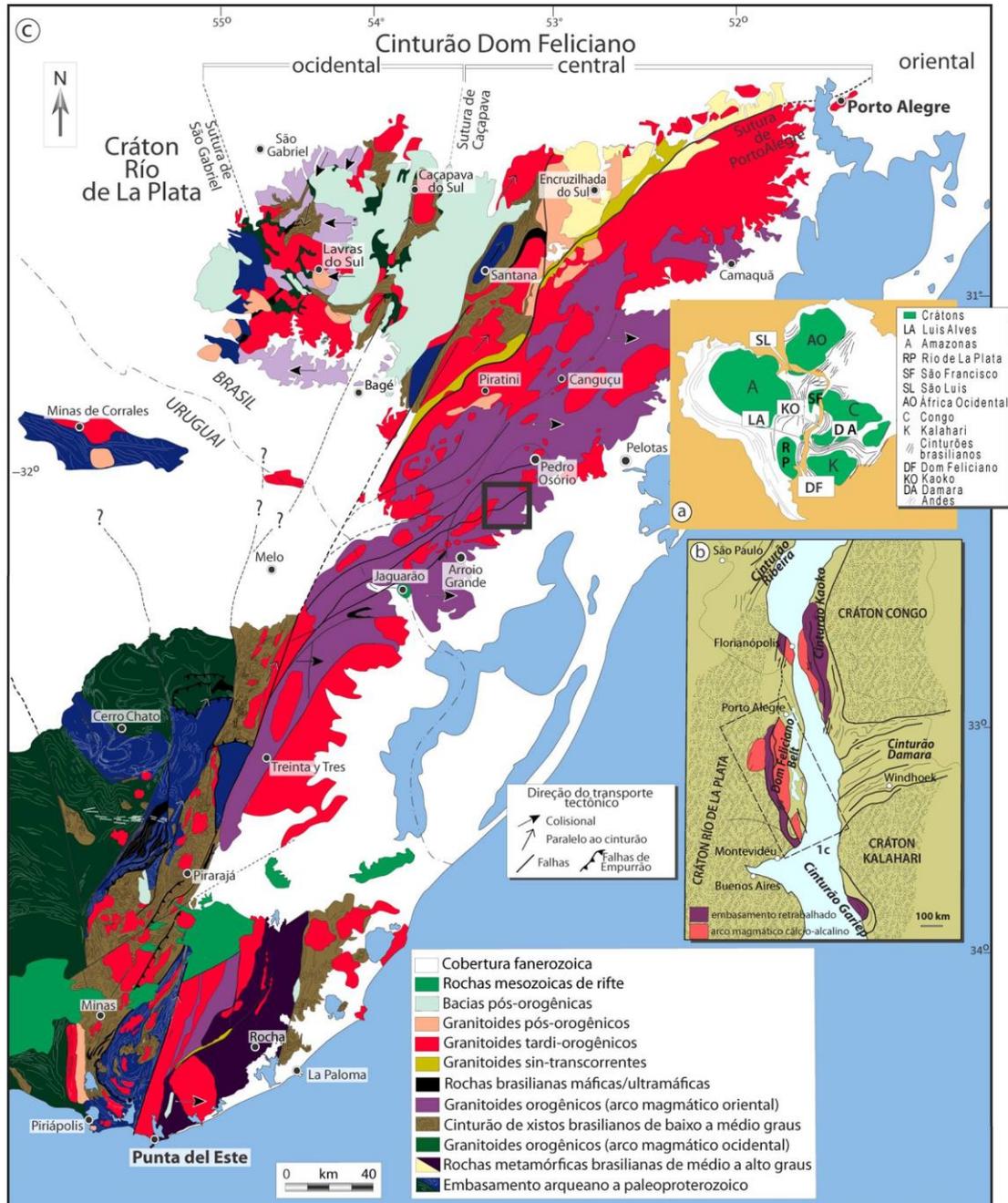


Figura 2. Mapa litotectônico dos escudos Sul-Rio-Grandense e Uruguaio; a) Configuração do Gondwana com as principais áreas cratônicas e cinturões relacionados ao Cinturão Dom Feliciano; b) Localização do Cinturão Dom Feliciano e cinturões africanos adjacentes na configuração do Gondwana; c) Mapa geológico do Cinturão Dom Feliciano e do cráton Rio de La Plata no sul do Brasil e no Uruguai. A porção indicada pelo quadrado em preto indica a região de estudo deste projeto. Fonte: Adaptado de Lenz *et al.* (2013).

Os Mármore Matarazzo constituem a Janela Estrutural Conde Matarazzo e apresentam intrusões de pequenos diques e soleiras de dois complexos ígneos (um mais antigo, de natureza básica e outro, mais novo, de natureza sienítica) (Sallet *et al.*, 1989). Para estes autores, a interação dos

dois complexos ígneos com os mármore originou três complexas reações metassomáticas do tipo *skarn*: uma no contato dos sienitos com os mármore, outra no contato de xenólitos de forma elipsoidal de carbonato grosso no interior dos sienitos e uma terceira, no contato das rochas básicas com os mármore, sob a forma de sulfetos maciços e distalmente aos contatos, com sulfetos disseminados.

Fragoso-Cesar (1991) descreve a ocorrência dos mármore no DL-CDF, identificando a sua interação com sienitos e rochas básicas pré-orogênicas e intercalações métricas com níveis de meta-margas.

De acordo com este autor, os mármore constituem escamas tectônicas de espessuras decamétricas imbricadas entre granitoides porfiríticos do Complexo Pinheiro Machado, estes que, nas zonas de contato, apresentam-se milonitizados e imbricando escamas centimétricas. Os mármore apresentam, também, deformação, que está associada aos eventos de estruturação no CDF: E₁ (referente ao estágio sin-colisional, com consequente encurtamento e espessamento crustais sob condições metamórficas de fácies xisto verde a anfibolito superior, onde formaram-se zonas de cisalhamento sub-horizontais com transportes de *nappes* e dobramentos apertados a isoclinais, com eixos sub-horizontais NE-SW) e E₂ (referente ao estágio tardi-colisional, com estabelecimento de zonas de cisalhamento sub-verticais transpressionais NE-SW), que também são observadas nos granitoides porfiríticos.

Para Fragoso-Cesar (1991) estes mármore representam a cobertura de uma margem continental passiva relacionada à abertura de um oceano proterozóico (Oceano Adamastor), na fase inicial de evolução do CDF, que teria sido cavalgada pelos restos de um arco magmático (Complexo Pinheiro Machado) durante uma colisão continental.

Philipp e Machado (2002) interpretam os mármore Matarazzo como septos do embasamento, descrevendo-os como lentes de extensão de 300 a 700 metros e largura de 100 a 250 metros, onde há intercalações métricas de mármore puros, rochas calcissilicáticas e metamargas (anfibolitos).

Conforme esses autores, as rochas carbonáticas são invadidas por corpos tabulares de espessuras métricas a decamétricas, discordantes, de

contatos definidos por limites curvos e retilíneos, de granitos da Suíte Erval. A reação do magma granítico com os mármore e anfibolitos ocasiona modificações texturais e estruturais, formando cornubianitos com a presença de porfiroblastos de grossulária, diopsídio, zoisita e titanita, além de plagioclásio, microclínio, carbonato e sulfetos.

Recentemente, Neis (2013), em análises isotópicas, identificou que os mármore Matarazzo apresentam razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,706, compatíveis com idade deposicional estimada entre 820 Ma e 870 Ma. Através da geoquímica de elementos maiores, os teores médios de CaO são de 52,29 % e MgO de 0,51 % (Neis, 2013), indicando que este é um mármore calcítico. Neis (2013) também reconhece a presença de inúmeros corpos máficos (interpretados como anfibolitos) e a presença de um dique métrico de composição tonalítica.

Assim, são poucos os estudos que têm sido realizados nos mármore do DL-CDF. Os novos dados dos mármore e das rochas ígneas relacionadas, obtidos com o desenvolvimento desse projeto, serão integrados às discussões e interpretações desse domínio.

2 METODOLOGIA

Neste capítulo, será detalhada a metodologia de trabalho utilizada e as técnicas necessárias para aplicá-la, com a finalidade de atingir os objetivos traçados e resolver o problema de pesquisa.

A metodologia adotada neste trabalho envolve a revisão e compilação bibliográfica, o trabalho de campo e a petrografia.

A revisão e compilação bibliográfica, foram elaboradas através de artigos científicos e periódicos, cartas topográficas do exército (folha Matarazzo e folha Arroio Grande), mapas geológicos e imagens de satélite do *Google Earth*, sites especializados, monografias, dissertações de mestrado e teses de doutorado. Esta foi a primeira de todas as etapas iniciadas e uma das últimas finalizadas, devido à constante evolução e discussão de ideias referentes ao tema estudado, sendo, portanto, de fundamental importância para o projeto, no momento em que forneceu os dados já existentes e quais aspectos já foram abordados sobre os objetos de estudo e, também, porque subsidiou as demais técnicas de trabalho.

O trabalho de campo, realizado em três etapas (27 e 28 de setembro de 2014, 23 a 26 de fevereiro de 2015 e 12 e 13 de setembro de 2015), teve como objetivos principais coletar amostras das principais associações de interesse para serem analisadas em laboratório, descrever as relações entre as principais rochas em afloramento, levantar dados estruturais e documentar com croquis e fotografias, a localização das amostras coletadas e das estruturas medidas, que auxiliaram na interpretação das informações.

As amostras coletadas em campo apresentam as seguintes siglas:

MAT – Projeto Matarazzo;

PMM – Projeto Mármore Matarazzo; e

VOT – Projeto Votorantin.

Os dados estruturais das unidades geológicas presentes na área de estudo foram medidos utilizando bússolas *Brunton*® equipadas com clinômetro e com declinação magnética corrigida conforme instruções das cartas topográficas do exército. As medidas foram feitas com a notação de “mão esquerda” (onde são medidas a direção e o mergulho dos planos).

Um perfil em uma drenagem entre a pedreira Brasileira e a pedreira Matarazzo foi elaborado durante a segunda etapa de campo, com o objetivo de identificar quais eram as litologias presentes entre as pedreiras. O perfil foi realizado a pé, sendo coletadas amostras com a finalidade de manter um controle litológico e estrutural dessa região. Nos pontos visitados fora das pedreiras efetuou-se a coleta das coordenadas geográficas através de equipamentos de Sistema de Posicionamento Global (GPS) da marca *Garmin*® *HGX*, além da tomada de fotografias e croquis dos afloramentos e dos locais de amostragem. Todas as coordenadas foram georreferenciadas na Projeção Universal Transversal de Mercator (UTM), *datum* Córrego Alegre.

A relevância da técnica de trabalho de campo para a resolução do problema está na observação das relações de campo e, assim, na possibilidade de entender as relações estratigráficas entre os diferentes litotipos e da representatividade das diferentes estruturas e reações em escala de afloramento. O controle de campo foi, neste trabalho, um critério essencial para a interpretação correta dos resultados.

Para que o trabalho fosse satisfatório, foram tomados cuidados na coleta das amostras, observando-se que estas fossem frescas e não estivessem em zonas de alterações. Também foi dada atenção para a correta identificação destas amostras, que evitou, assim, confusões posteriores em laboratório, considerando-se o grande número (58) de amostras coletadas em campo.

A etapa seguinte ao trabalho de campo foi a de caracterização petrográfica, com a descrição e interpretação de assembleias mineralógicas,

texturas e estruturas em mesoescala e microscópicas, onde tornou-se possível a interpretação petrogenética das rochas de estudo. Por meio da petrografia, foi possível determinar e quantificar a composição mineralógica das amostras e realizar plotagens em diagramas, como o diagrama QAPF de Streckeisen (1976), utilizado para a classificação das rochas ígneas investigadas.

Para o estudo da petrografia foram utilizados, primeiramente, o Laboratório de Preparação de Amostras (pertencente ao Centro de Estudos em Geoquímica e Petrologia – CPGq), onde foram confeccionadas 39 lâminas delgadas, após o Laboratório de Microscopia Óptica (pertencente ao Departamento de Mineralogia e Petrologia – DEMIPE) para a descrição petrográfica dessas lâminas e, por fim, o Laboratório de Geologia Isotópica (LGI-CPGq) para a caracterização e conclusão das análises petrográficas, através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). O CPGq e o DEMIPE pertencem ao Instituto de Geociências (IGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O estudo petrográfico das lâminas delgadas foi realizado utilizando um microscópio polarizador de luz transmitida da marca Meiji Techno®, série ML9000, modelo ML9720, equipado com lentes binoculares reticuladas com aumento de 10x e três opções de objetivas de 2,5x, 10x e 40x. Com este estudo foram identificados os minerais constituintes, as paragêneses, as texturas, as estruturas e as transformações causadas por processos metamórficos e de reação. Junto com as descrições foram adquiridas fotomicrografias através de uma câmera fotográfica acoplada a um microscópio petrográfico de luz transmitida e a um computador.

Foram utilizadas como apoio para a descrição, interpretação e classificação das amostras laminadas, as recomendações da IUGS – União Internacional das Ciências Geológicas e de livros tradicionais de petrologia ígnea e metamórfica.

A petrografia óptica é limitada quanto ao seu alcance, pois alguns constituintes podem ser de difícil identificação, de modo que sejam necessárias análises por métodos adequados à escala que se deseja

observar, como a microscopia eletrônica de varredura com a espectrometria de energia dispersiva de raios-X (MEV/EDS).

O MEV/EDS é utilizado para a determinação qualitativa e semi-quantitativa das amostras, com a emissão de raios-X. Neste trabalho, foi feita a identificação dos minerais opacos, a caracterização química dos minerais essenciais e outros minerais acessórios, além da caracterização das texturas.

Para as análises em MEV/EDS, foram utilizadas as laminas delgadas descritas na microscopia óptica, metalizadas com ouro. O equipamento de microscopia eletrônica de varredura utilizado foi o JEOL 6610LV, pertencente ao laboratório LGI-CPGq, da UFRGS.

3 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento das investigações de campo e petrográficas.

3.1 Relações de campo

A pedra Brasileira ocorre como um corpo alongado de mármore de direção NE, com foliação interna acompanhando o alongamento do corpo (Figura 3a). Está em contato com o CPM (Loureiro, 2013), que separa esta lente daquela da pedra Matarazzo. Não foi possível identificar diretamente o contato entre os mármores e o CPM.

Entre as duas pedreiras, dentro do CPM, verificou-se a presença de uma lente métrica de mármore.

A figura 3b traz as informações estruturais de foliações (bandamento e xistosidade) medidas em campo. Pode ser observado através do estereograma (Figura 4), que a orientação principal das estruturas é para NE, com duas medidas para SW. O mergulho principal das camadas é para SE, variando entre 35° e 80°.

Foram identificados quatro diferentes intrusões nos mármores Matarazzo: anfibolitos, metadiabásios, biotita quartzo dioritos e diopsídio quartzo sienitos.

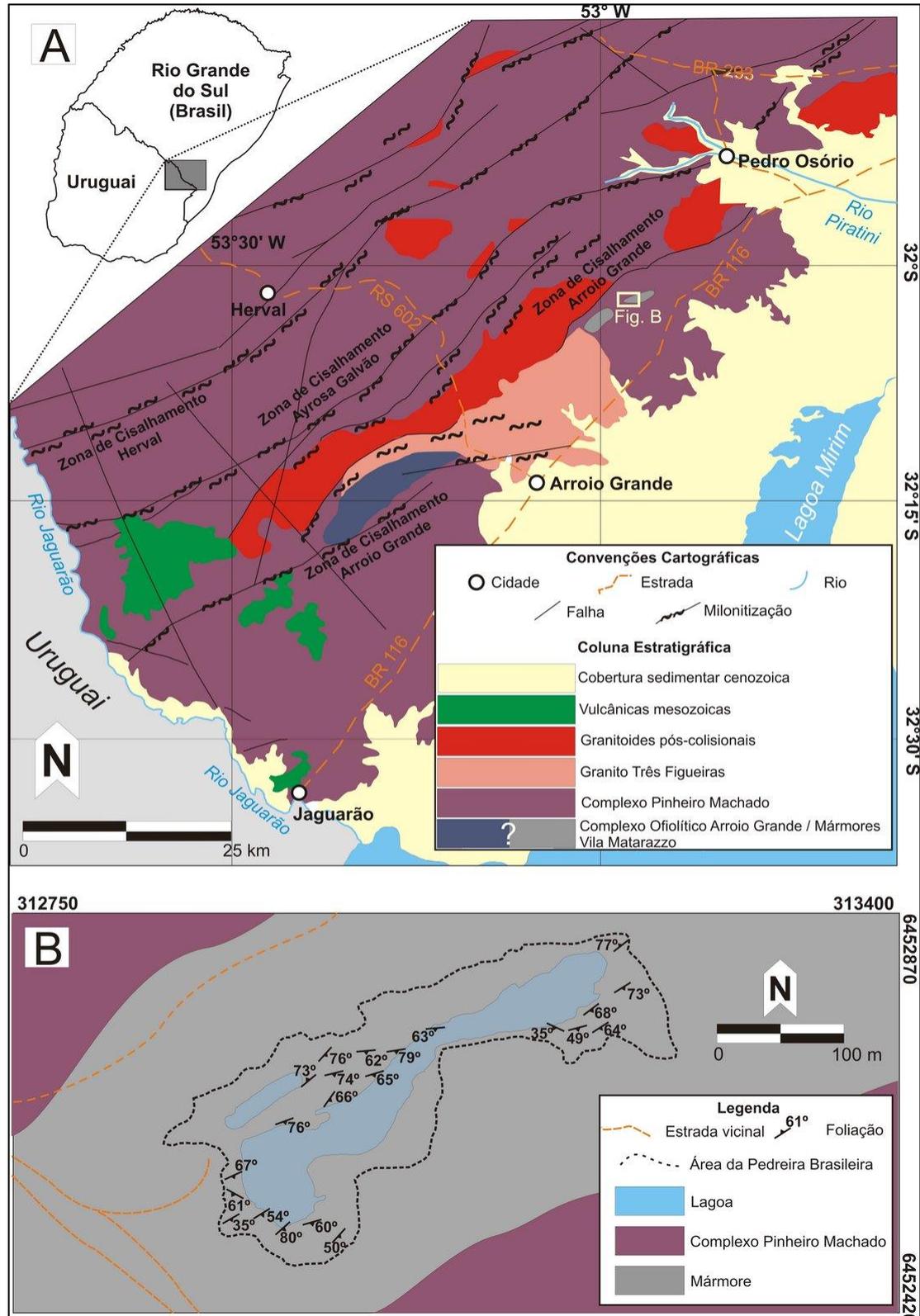


Figura 3. a) Mapa geológico da porção sul do DL-CDF e localização da área de estudo, circundada pelo retângulo branco. b) Mapa da pedreira Brasileira com as foliações do mármore. Fonte: Modificado de Ramos e Koester (2015).

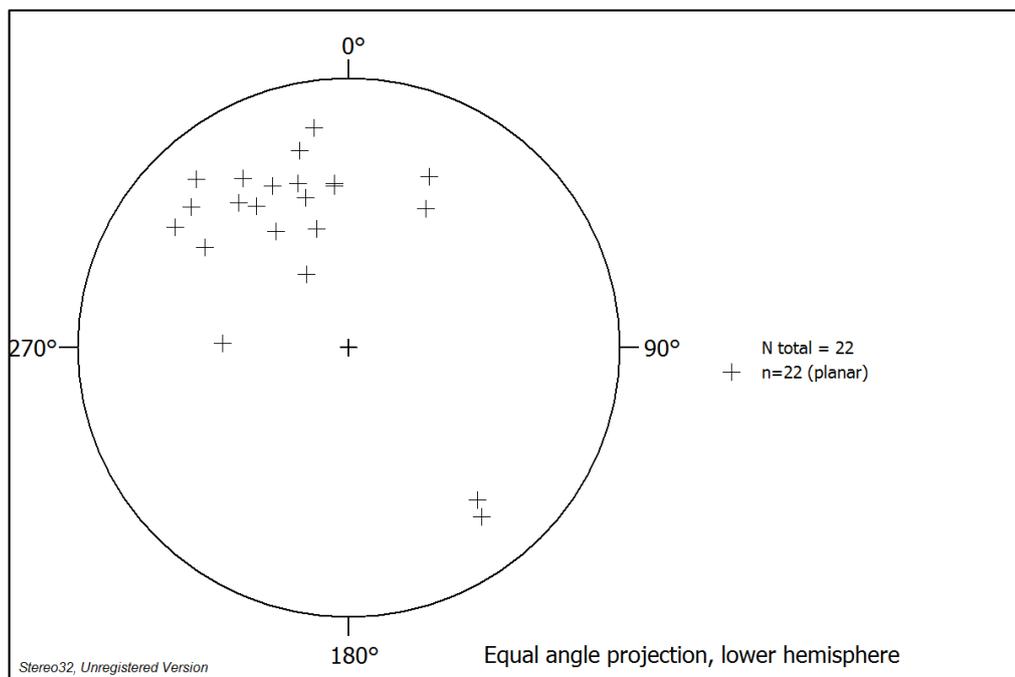


Figura 4. Estereograma produzido através do *software Stereo32*, mostrando os polos dos planos de foliações do mármore. A foliação principal é para NE (19 medidas), com mergulho principal para SE.

Os anfibolitos são blocos métricos, angulares, rompidos e *boudinados* e desenvolvem *skarns* centimétricos em contato com o mármore. Os metadiabásios apresentam contatos retos com o mármore e não desenvolvem reações. Os biotita quartzo dioritos são diques métricos (chegando a 30 m de comprimento), irregulares, que apresentam contatos lobados e reações metassomáticas centimétricas a decimétricas com o mármore. A orientação desses diques coincide com a orientação das foliações medidas na pedreira (NE). Os diopsídio quartzo sienitos são encontrados em três diferentes formas: como bolsões de leucossomas com diopsídio peritético, como veios que cortam as rochas máficas e como rocha intrusiva no mármore. Têm contatos irregulares e desenvolvem *skarns* centimétricos com o mármore.

O mapa apresentado na figura 5, mostra a localização das principais amostras coletadas na pedreira Brasileira.

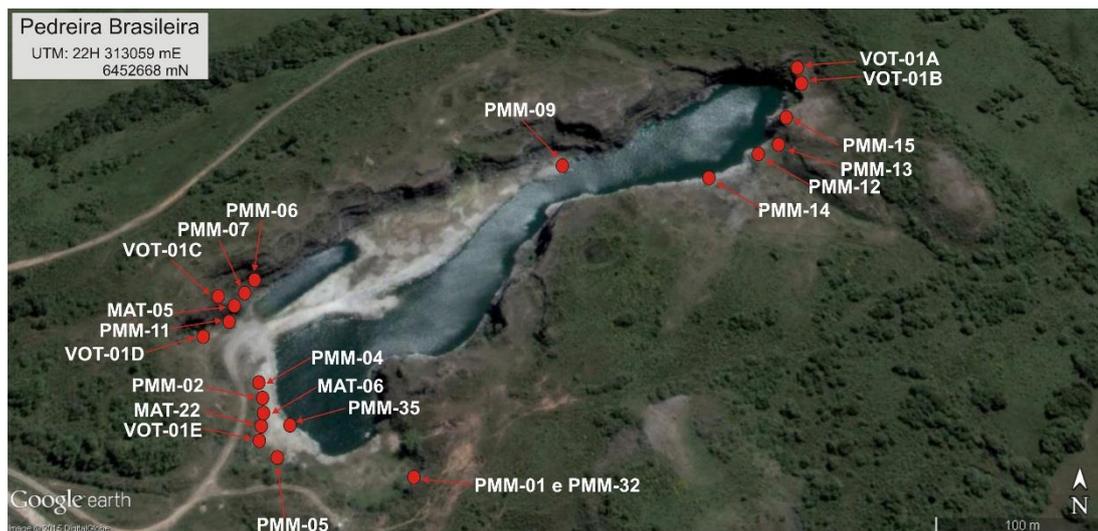


Figura 5. Localização das amostras coletadas na pedreira Brasileira em imagem de satélite do *Google Earth*.

3.2 Mármore

Os mármore Matarazzo apresentam cor esbranquiçada, quando em amostras sãs, e cor cinza escura, quando alterados. São compostos essencialmente por calcita, com bandamento irregular e descontínuo (Figura 6) marcado por intercalações de bandas centimétricas claras, com calcitas em granulometria grossa e poucos minerais máficos, e bandas milimétricas máficas, irregulares e descontínuas, onde há maior concentração de minerais máficos e diminuição no tamanho de grão da calcita.



Figura 6. Mármore bandado característico da pedraira. O bandamento é irregular e descontínuo, com intercalação de bandas milimétricas máficas e centimétricas félsicas.

Ao microscópio é possível identificar que o mármore tem textura granoblástica poligonal média a grossa, com junções tríplices nos contatos entre os grãos de calcita. Por vezes, os contatos entre os cristais de calcita são interlobados.

Além da calcita, o mármore é composto por diopsídio, wollastonita, plagioclásio (anortita/albita), pirita, quartzo, titanita e apatita, como observado na figura 7a.

A calcita apresenta maclas, por vezes, em duas direções e muitas estão curvas, como pode ser observado na figura 7b.

A wollastonita é xenoblástica (Figuras 7a e 7d), tem tamanhos entre 0,2 mm e 0,6 mm de comprimento e distribui-se aleatoriamente na rocha. Devido à forma arredondada característica, os contatos com os outros grãos são sempre interlobados. A química mineral, obtida com MEV/EDS, ilustrada na figura 8a, é demonstrada na tabela 1.

O diopsídio é xenoblástico, incolor, com tamanhos variando entre 0,2 mm e 0,5 mm, têm as duas direções de clivagens e, como na figura 7c, alguns estão geminados. Concentra-se, preferencialmente, nas bandas máficas (Figura 7d), mas também está presente em menor quantidade nas bandas félsicas do mármore, distribuindo-se aleatoriamente. A composição química do diopsídio (Figura 8b) pode ser observada na tabela 1.

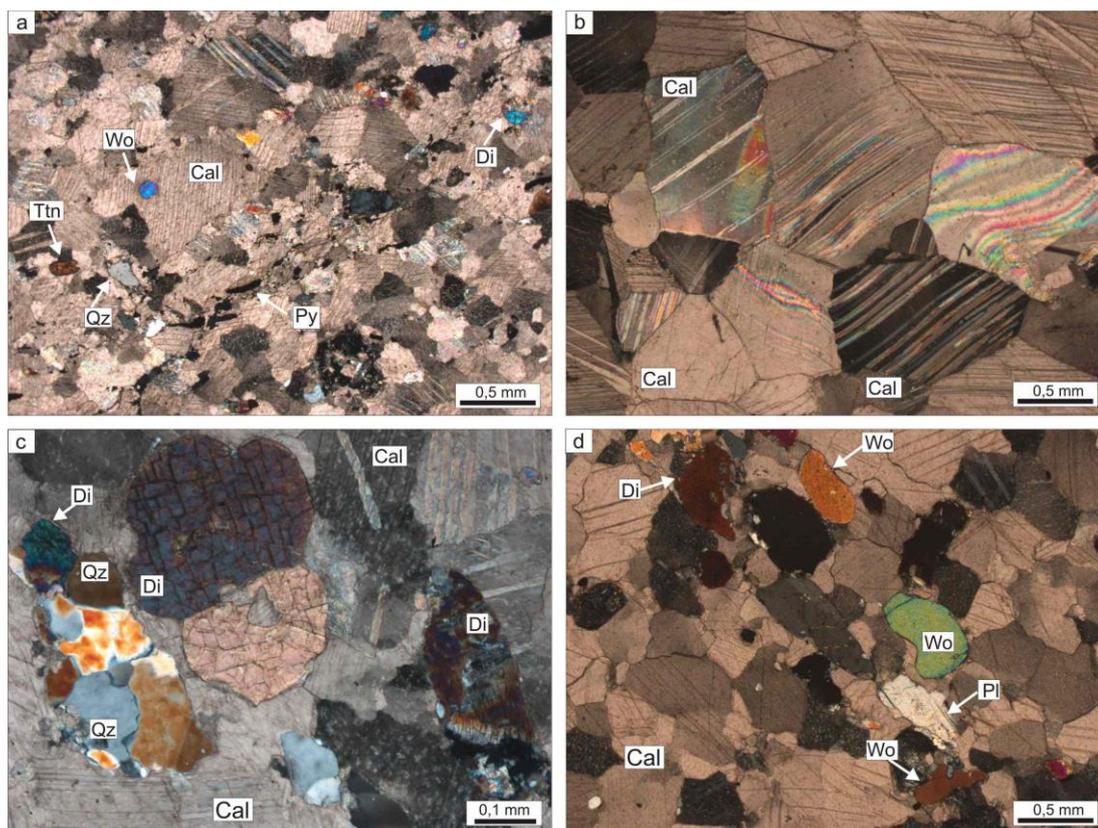


Figura 7. a) Aspecto geral da lâmina PMM-35 em LP; b) Textura granoblástica grossa na lâmina PMM-02 (em LP), com os cristais de calcita apresentando maclas curvas. c) Lâmina PMM-35, com detalhe para o diopsídio geminado e para os cristais de quartzo, que se apresentam em um agregado e com extinção ondulante; d) Orientação preferencial dos minerais máficos (diopsídio e wollastonita) na lâmina MAT-05, em LP. Abreviações: Cal-calcita, Di-diopsídio, Pl-plagioclásio, Py-pirita, Qz-quartzo, Ttn-titanita, Wo-wollastonita.

O quartzo é xenoblástico, tem tamanho de no máximo 0,4 mm e contatos interlobados com as calcitas. É distribuído aleatoriamente, mas por vezes ocorre em porfiroblastos, com extinção ondulante, como mostrado na figura 7c.

O plagioclásio (tanto albita quanto anortita) (Figura 7d) é xenoblástico, tem contatos retos com as calcitas, tem até 0,4 mm, concentra-se nas bandas máficas e não mostra orientação preferencial.

A pirita é xenoblástica, varia de 0,1 mm a 0,3 mm e ocorre em maiores concentrações nas bandas máficas.

Uma orientação cristalográfica preferencial dos cristais de calcita é sugerida em algumas lâminas, conforme pode ser visto na figura 7a, na qual a maioria dos grãos de calcita aparecem iluminados em luz polarizada,

indicando a mesma orientação dos eixos ópticos dos grãos, apesar de sua textura granoblástica.

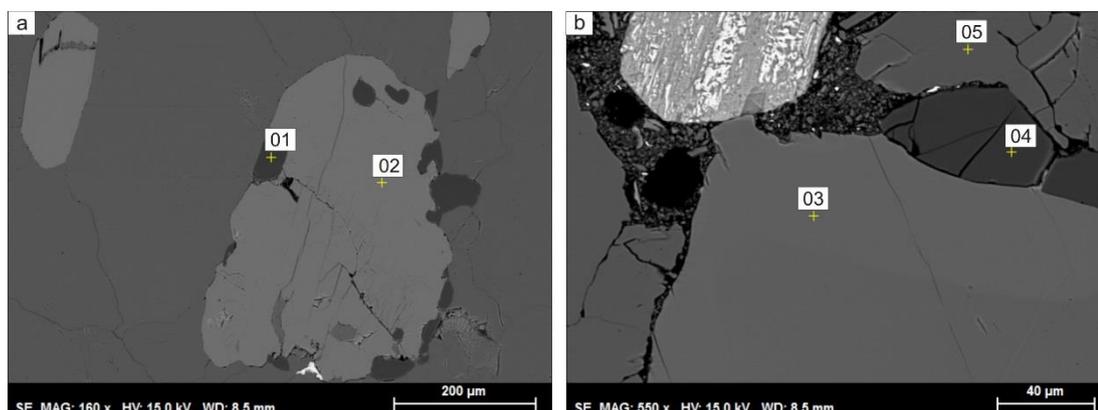


Figura 8. Imagens de MEV, da lâmina PMM-35. a) quartzo (01) e wollastonita (02); b) diopsídio (03), quartzo (04) e calcita (05).

Tabela 1 – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-35, referentes aos pontos na figura 8 (01-quartzo, 02-wollastonita, 03-diopsídio, 04-quartzo e 05-calcita).

Análise	SiO ₂	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	Sn
01	61,98	-	-	-	-	-	1,46
02	34,61	-	-	34,73	-	0,84	-
03	32,13	5,51	7,97	16,00	-	-	-
04	62,40	-	-	-	0,33	-	1,44
05	-	-	-	58,70	-	-	-

3.2.1 Mármore em contato com as rochas máficas e intrusivas

Quando em contato com o anfibolito, o quartzo diorito e o quartzo sienito (rochas descritas nos itens 3.4, 3.6 e 3.7, respectivamente), o mármore apresenta uma estrutura de fluxo (Figura 9), textura granoblástica muito grossa, com cristais de calcita bem desenvolvidos, chegando a 1 cm (observado em campo), em junções tríplices (Figuras 10a e 10b). Além de minerais como diopsídio, wollastonita, titanita e quartzo, há também anfibólio (Figura 11) como mineral acessório. A química mineral, em MEV/EDS (Tabela 2, análises 07 e 08), sugere que o anfibólio é antofilita.



Figura 9. Mármore em contato com dois blocos de rochas máficas, em estrutura de fluxo (indicada pelos traços em vermelho) e com textura granoblástica muito grossa, com calcita de até 1 cm.

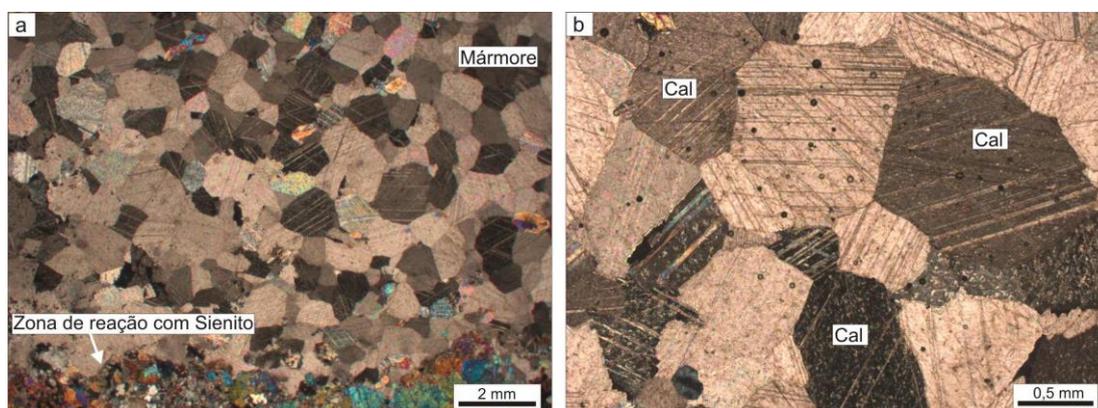


Figura 10. a) Lâmina PMM-13 em LP, mostrando o contato do mármore com a zona de reação formada com o sienito; b) Detalhe da porção de mármore da figura 10a. Abreviações: Cal-calcita.

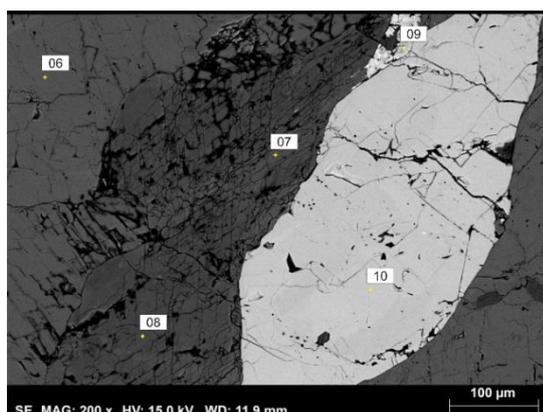


Figura 11. Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-13, em calcita (06), antofilita (07 e 08), diopsídio (09) e titanita (10).

Tabela 2 – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-13, referentes aos pontos na figura 11 (06-calcita, 07-antofilita, 08-antofilita, 09-diopsídio e 10-titanita).

Análise	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	TiO ₂	Ce ₂ O ₃
06	-	-	-	-	58,32	-	-
07	41,34	1,19	6,20	14,77	10,19	-	-
08	41,41	1,14	4,99	15,45	10,14	-	-
09	23,44	-	4,21	17,03	13,84	-	2,11
10	22,66	2,39	-	-	22,46	28,95	

3.3 Biotita Xisto

O biotita xisto, de coloração cinza escuro, em amostra fresca, e cinza-esverdeado escuro, em amostra alterada, ocorre em uma lente de 3 m de altura, 10 m de comprimento e 2 m de espessura (Figura 12a), na porção SE da pedreira (amostras PMM-01 e PMM-32), apresentando xistosidade com orientação de (042;50). São observadas intercalações centimétricas entre o xisto e o mármore, como na Figura 12b.

O biotita xisto apresenta uma matriz microcristalina (Figura 13a), composta por biotita, quartzo e calcita como minerais principais e titanita e pirita como minerais acessórios (Figuras 13b e 13c). Há também porfiroclastos, compostos por agregados de quartzo e calcita, de aproximadamente 0,5 mm de comprimento (Figura 13b).

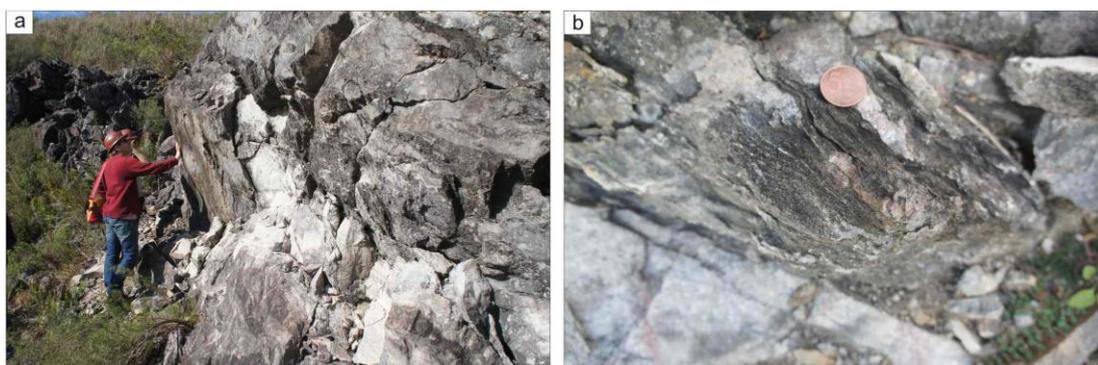


Figura 12. a) Lente de xisto em campo, de direção NE-SW (concordante com bandamento do mármore); b) Detalhe para a intercalação entre o xisto e o mármore.

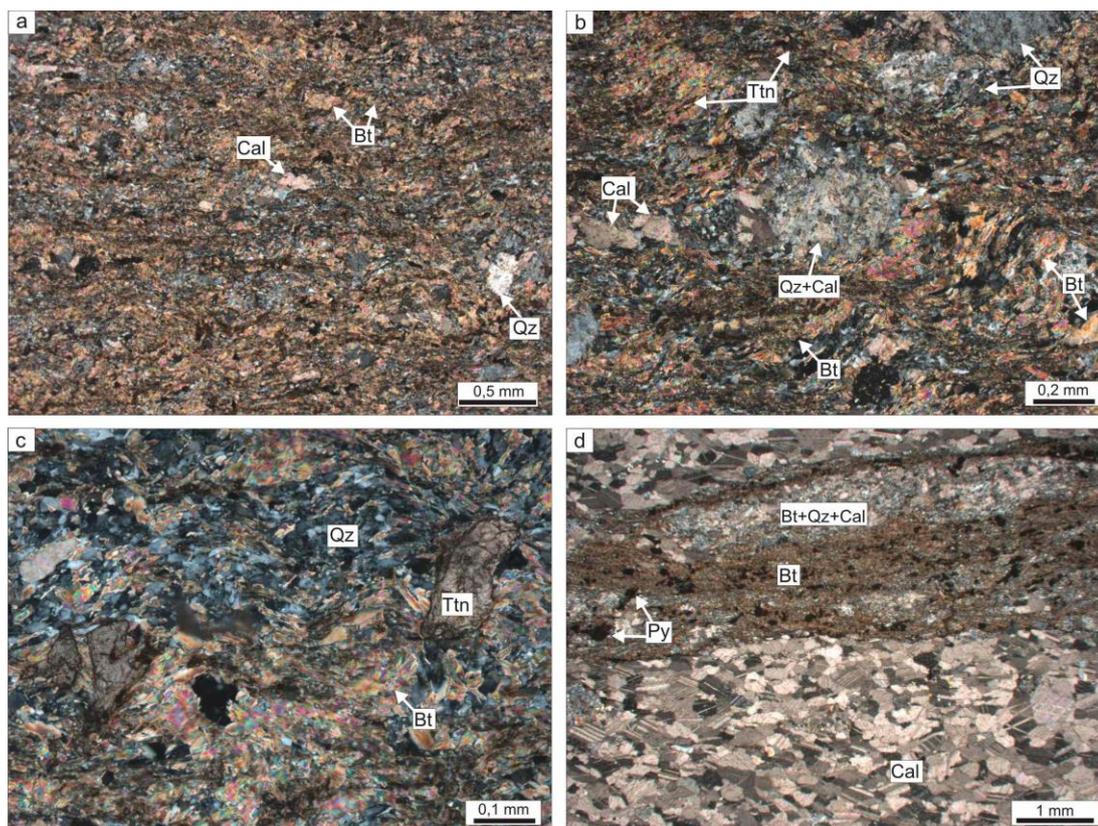


Figura 13. Fotomicrografias das lâminas PMM-01 e PMM-32 em LP. a) Aspecto geral da amostra PMM-01; b) Orientação das biotitas e dos litoclastos, compostos de quartzo e calcita, segundo a foliação, e aspecto da clivagem de crenulação bem marcada, na amostra PMM-01; c) Detalhe da mineralogia acessória da amostra PMM-01, com as titanitas fraturadas, com fratura preenchida por biotita; d) Aspecto geral da amostra PMM-32, com a intercalação do mármore com o xisto. Abreviações: Bt-biotita, Cal-calcita, Qz-quartzo, Py-pirita, Ttn-titanita.

A xistosidade, bem marcada macroscopicamente, é definida em lâmina, pela orientação, predominantemente, dos agregados de biotita com textura lepidoblástica. Também foi identificada clivagem de crenulação, como pode ser observado na figura 13b.

Na figura 13d, da amostra PMM-32, é possível observar a intercalação, ao microscópio, do xisto e do mármore.

3.4 Anfibolito

Os anfibolitos ocorrem na pedreira como blocos centimétricos a métricos, angulosos, de coloração preta, quando em amostra sã, e marrom-avermelhado, quando alterados. São identificadas bordas de reação com o

mármore de, no máximo, 10 cm de largura (Figura 14a). Por vezes estão *boudinados* ou rompidos, como mostrado na figura 14b.

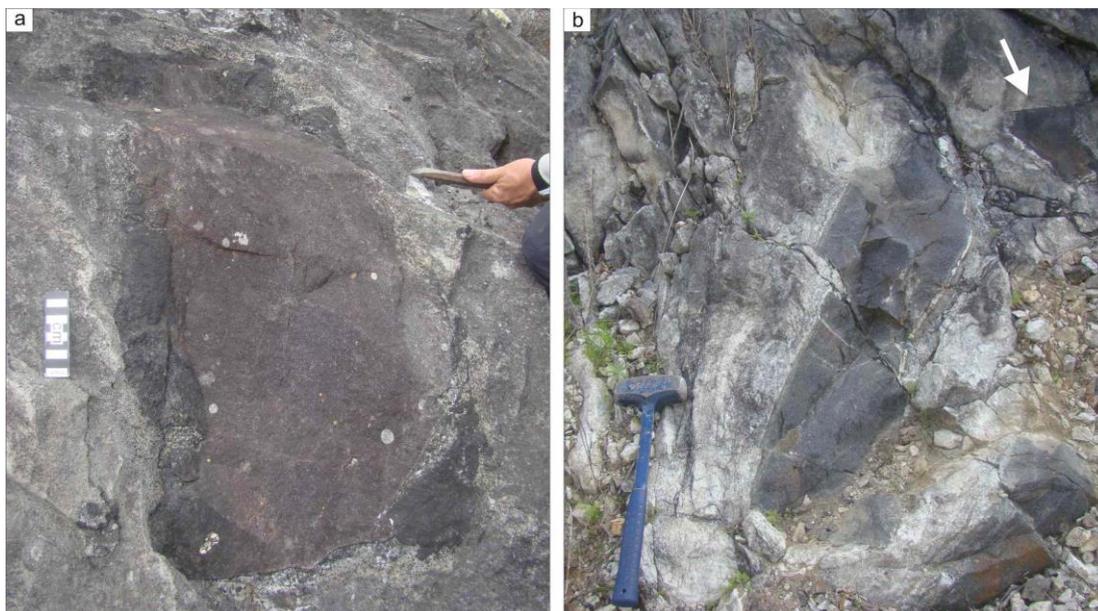


Figura 14. a) Bloco angular de anfibolito circundado pelo mármore. Detalhe para a borda de reação cinza escura presente entre o bloco e a encaixante. b) Bloco de anfibolito rompido, como mostrado pela flecha branca, circundado pelo mármore.

Ao microscópio óptico, pode-se identificar a textura granoblástica poligonal grossa (Figura 15a) e a assembleia mineralógica, composta de diopsídio, hornblenda-marrom, plagioclásio e tremolita. Pirita ocorre como mineral acessório (Figura 15b).

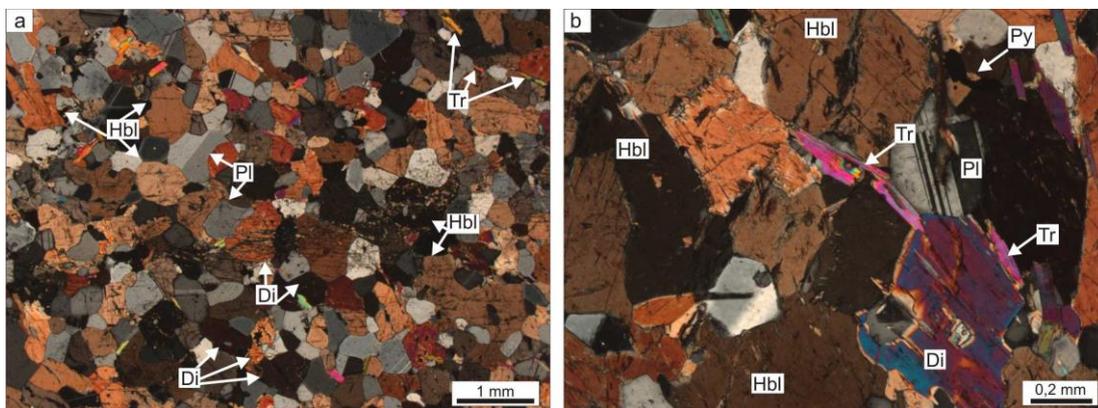


Figura 15. Fotomicrografias do anfibolito em LP. a) Aspecto geral do anfibolito na amostra MAT-22; b) Assembleia mineralógica na amostra VOT-01E. Abreviações: Di-diopsídio, Hbl-hornblenda, Pl-plagioclásio, Py-pirita, Tr-tremolita.

A hornblenda-marrom é pleocróica, variando de marrom-avermelhado a marrom claro, tem tamanhos entre 0,2 mm e 1 mm e apresenta contatos retos com o diopsídio e a tremolita e contatos interlobados com o plagioclásio.

O diopsídio varia entre 0,2 mm e 0,5 mm de tamanho e tem contatos retos com os outros cristais.

O plagioclásio, com macla polissintética, tem tamanhos entre 0,1 mm e 0,7 mm, contatos interlobados com a hornblenda e retos com o diopsídio.

No contato do anfibolito com o mármore, há o desenvolvimento de zona de reação, como mostrado pelos fotomosaicos (Figuras 16a e 16b).

Identificou-se diminuição no tamanho de grão do anfibolito quando próximo à zona de reação, bem como uma mudança na assembleia mineralógica, com o desenvolvimento de diopsídio e plagioclásio apenas, como observado na figura 17a. Conforme a zona de reação aproxima-se do contato com o mármore, o tamanho dos grãos de diopsídio aumenta, até um contato abrupto e irregular com uma banda composta por plagioclásio anédrico, de contatos lobados, titanita euédrica, calcita anédrica e intersticial e diopsídio, anédrico, de contatos retos, em pequena quantidade (Figura 17b). O contato desta banda com o mármore é irregular, como pode ser observado nas porções superior e inferior direita, dos fotomosaicos.

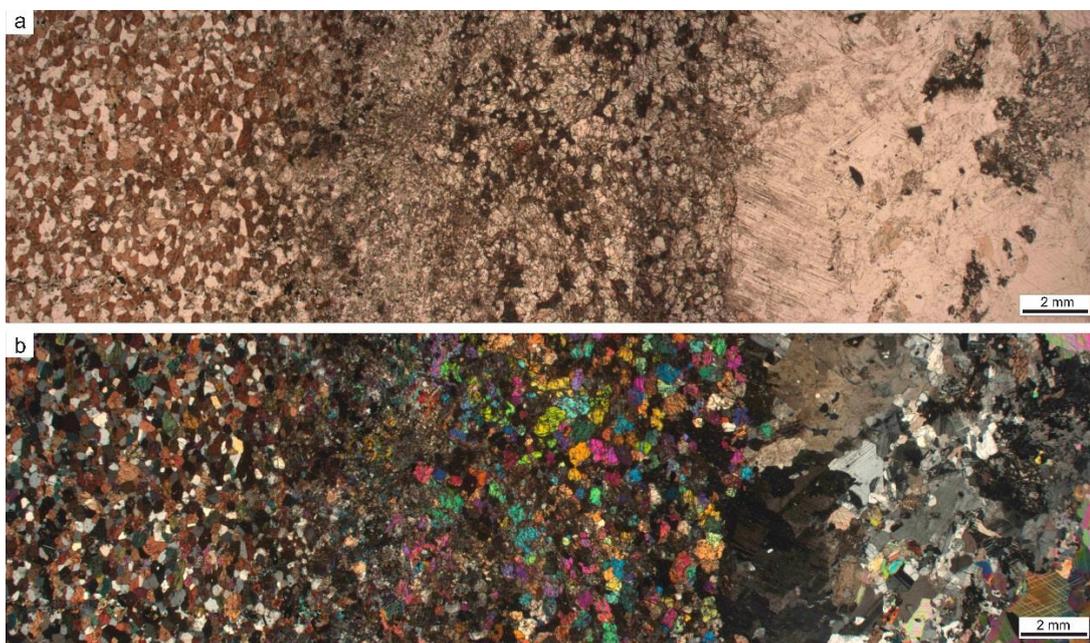


Figura 16. Fotomosaico da amostra VOT-01E em LN (a) e LP (b), mostrando o anfibolito (à esquerda), o mármore (à direita) e a zona de reação entre eles (ao centro).

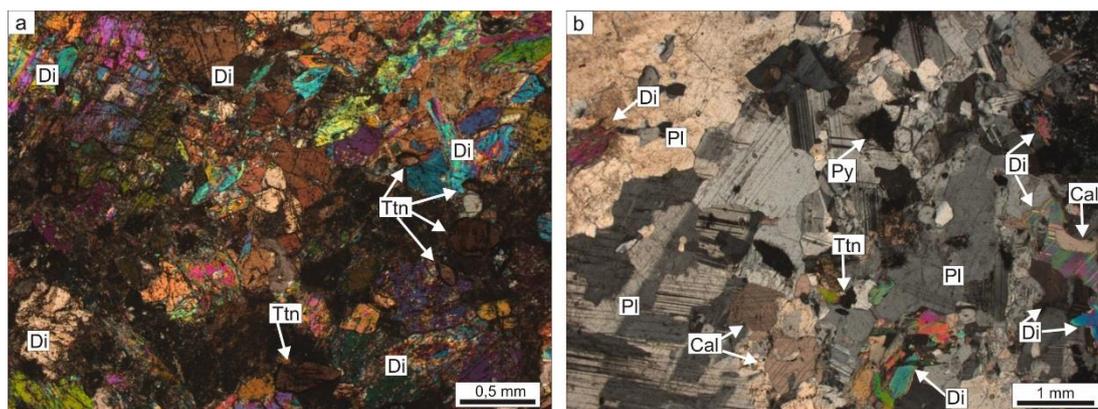


Figura 17. Fotomicrografias da lâmina VOT-01E em LP. a) Zona de reação desenvolvida entre o anfibolito e o mármore, mais próximo ao contato com o anfibolito; b) Zona de reação desenvolvida entre o anfibolito e o mármore, mais próximo ao contato com o mármore. Abreviações: Cal-calcita, Di-diopsídio, Hbl-hornblenda, Pl-plagioclásio, Py-pirita, Tr-tremolita, Ttn-titanita.

3.5 Metadiabásio

Os metadiabásios afloram como rochas centimétricas a métricas, com contatos retos com o mármore, como representados nas imagens das figuras 18a e 18b, pontos PMM-05 e PMM-07, respectivamente.

Macroscopicamente apresentam coloração cinza escuro, quando em amostras sãs, e cinza avermelhado, quando alteradas. Não é possível a identificação a olho nu dos minerais constituintes desta rocha, constituindo uma textura afanítica microcristalina metamorfizada.

Ao microscópio, a amostra PMM-05 mostra porfiroblastos de até 0,8 mm, compostos por biotita, quartzo e pirita (Figura 19a), envoltos por uma matriz de tremolita e quartzo (Figura 19b). Na matriz, a tremolita é acicular, com comprimento variando entre 0,01 mm e 0,02 mm, é subédrica e alongada em uma direção preferencial. O quartzo é anédrico e preenche os espaços entre os cristais de tremolita.

A amostra PMM-07 apresenta grãos de quartzo e pirita (Figuras 19c e 19d), xenoblásticos e angulares, de 0,2 mm a 0,3 mm de comprimento, em uma matriz muito fina e orientada, composta por tremolita, biotita e quartzo.

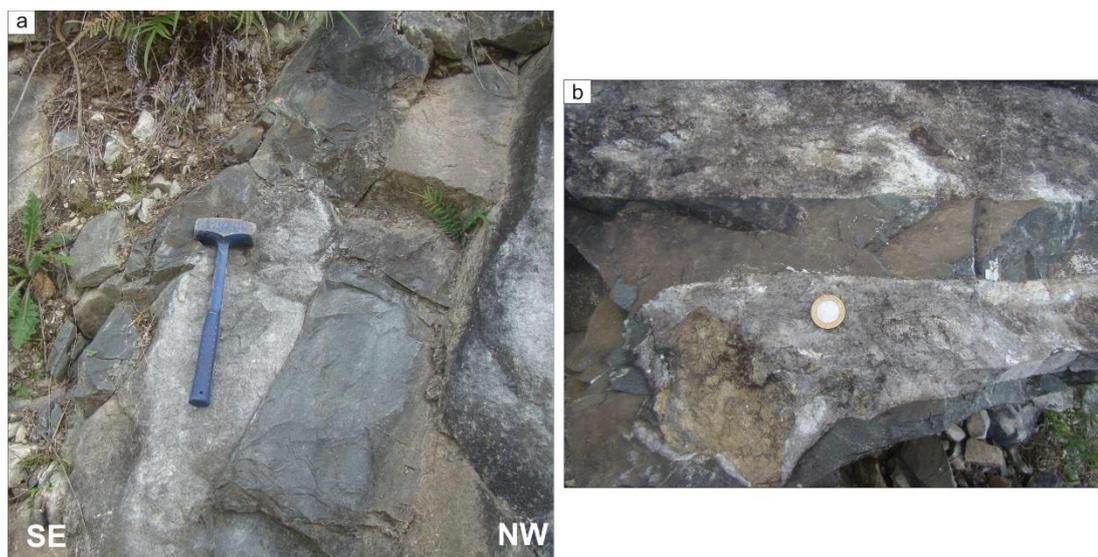


Figura 18. a) Metadiabásio (PMM-05), com aproximadamente 1 m de comprimento, circundado pelo mármore. b) Bloco rolado de metadiabásio (PMM-07), apresentando contatos retos e nenhuma reação com o mármore.

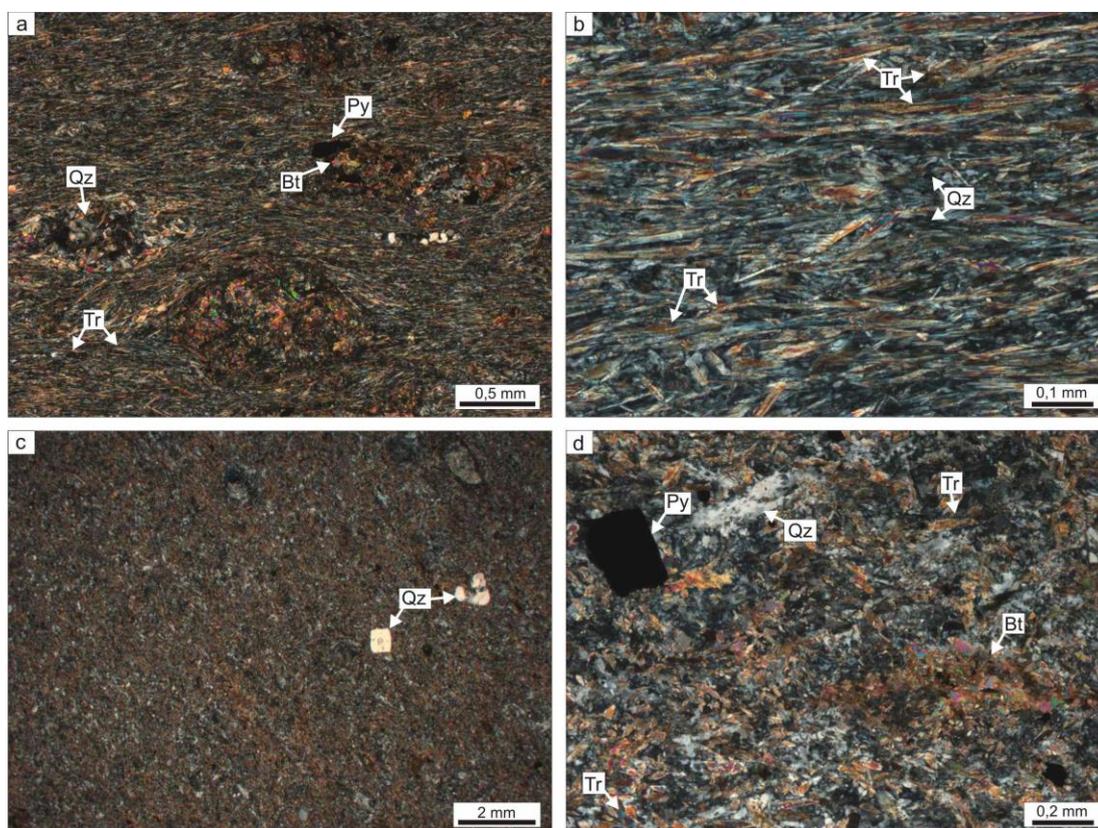


Figura 19. a) Fotomicrografia em LP da amostra PMM-05, mostrando os porfiroblastos de biotita, quartzo e pirita circundados pela matriz, composta por tremolita e quartzo; b) Detalhe da matriz da amostra PMM-05, em LP; c) Aspecto geral da amostra PMM-07, em LP. Em detalhe, os grãos de quartzo indicados pelas flechas em branco, que se apresentam xenoblásticos e angulares; d) Amostra PMM-07 em LP, com cristal de pirita subédrico, envolto pela matriz da rocha, composta por tremolita, biotita e quartzo. Abreviações: Bt-biotita, Qz-quartzo, Py-pirita, Tr-tremolita.

3.6 Biotita Quartzo Diorito

Os biotita quartzo dioritos são identificados em campo como rochas de colocação cinza clara, quando em amostras sãs, e preta, quando alteradas. Ocorrem como diques métricos, chegando a, aproximadamente, 30 m de comprimento (Figura 20a), são irregulares (Figura 20b) e muitas vezes curvos, com porções rompidas e desagregadas, como na figura 20c. Não foi possível observar em campo a espessura dos diques. Apresentam contatos interlobados com o mármore, que é a rocha encaixante, com *skarns* centimétricos, que têm concentrações de titanitas euédricas, grossulária anédricas e uma massa silicática verde (Figura 21).

Ao microscópio, o quartzo diorito apresenta textura inequigranular alotriomórfica, com assembleia mineralógica composta por plagioclásio, quartzo, biotita, diopsídio e titanita (esta última, como mineral acessório) (Figura 22a). Como os teores de quartzo variam em torno de 20 %, são considerados termos quartzo dioríticos a tonalíticos, presentes na pedreira.

O plagioclásio, de até 1 mm de comprimento, tem hábito prismático, varia de anédrico a subédrico e apresenta macla polissintética em duas direções (Figura 22b), além de ter dupla macla e ser zonado. Os contatos com os outros grãos são irregulares. Apresenta sericitização no núcleo, como mostrado nas figuras 22c e 22d.

O quartzo é anédrico, tem até 0,3 mm, extinção ondulante e é intersticial. Apresenta contatos interlobados com o plagioclásio e preenche os espaços entre os grãos de plagioclásio e biotita.

O diopsídio é anédrico, tem até 0,5 mm, apresenta contatos retos com os cristais de plagioclásio e biotita e é distribuído aleatoriamente na amostra.

A biotita tem hábito lamelar, pleocroísmo variando de verde médio a marrom-amarelado, tem entre 0,1 mm e 0,5 mm de comprimento e ocorre entre os cristais de plagioclásio, com contatos retos.

A titanita é euédrica a subédrica, com contatos retos com os cristais de plagioclásio e biotita, têm até 0,5 mm e está distribuída aleatoriamente na rocha (Figura 22c).

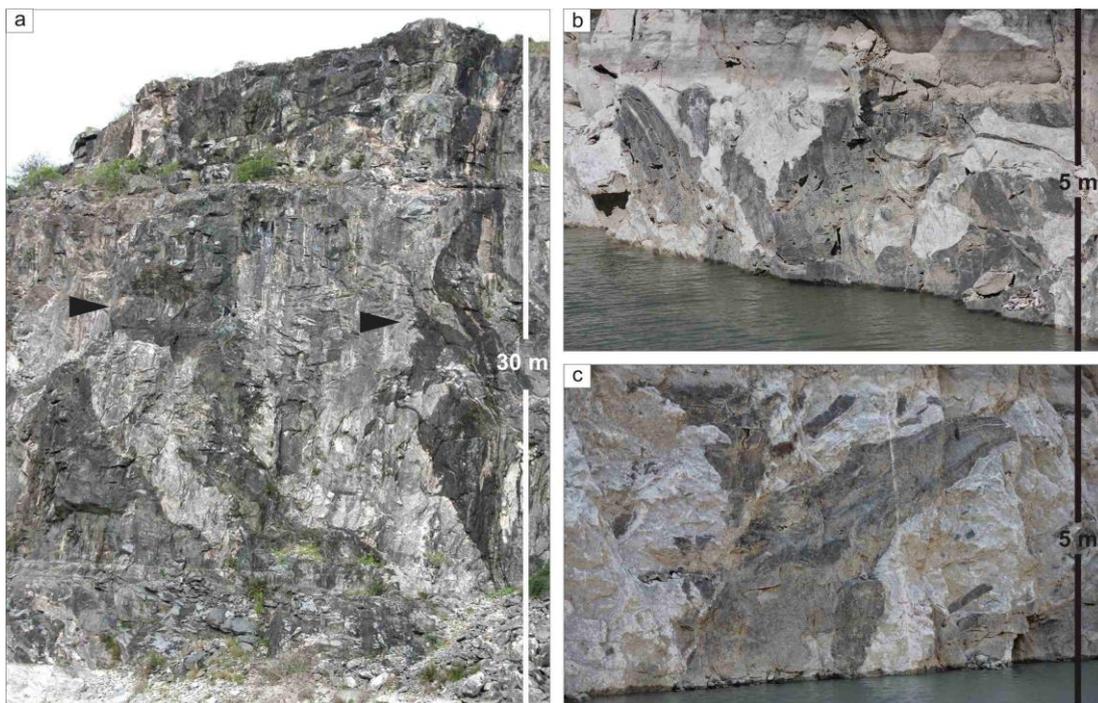


Figura 20. a) Intrusões quartzo dioríticas, indicadas pelas flechas em preto, no mármore, com contatos irregulares e interlobados; b) Dique quartzo diorítico, rompido; c) Dique quartzo diorítico desagregado (como pode ser observado pelas porções máficas retangulares, separadas).

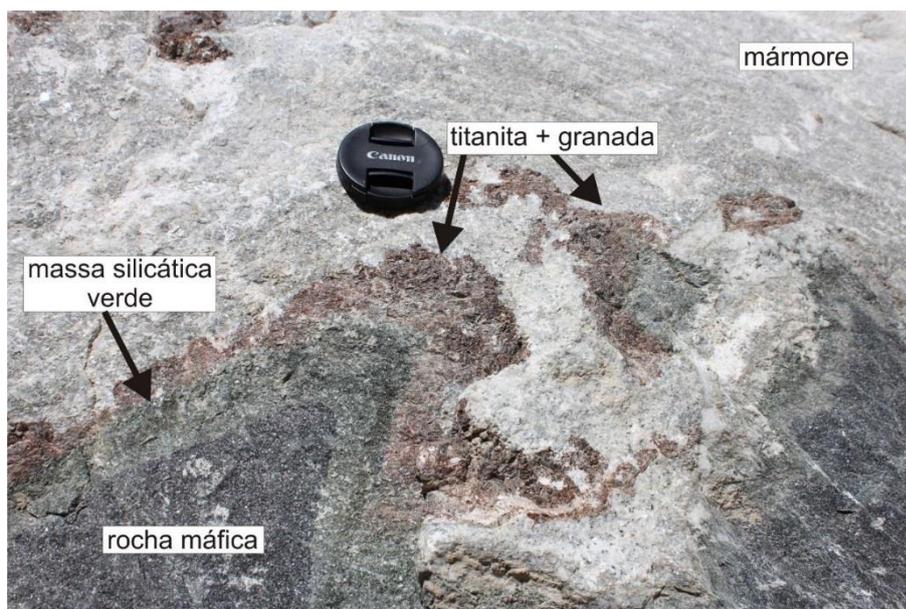


Figura 21. Detalhe do contato irregular do quartzo diorito com o mármore, com o desenvolvimento de reações metassomáticas – uma massa silicática verde próximo à rocha máfica e uma borda avermelhada, com cristais de titanita e grossulária.

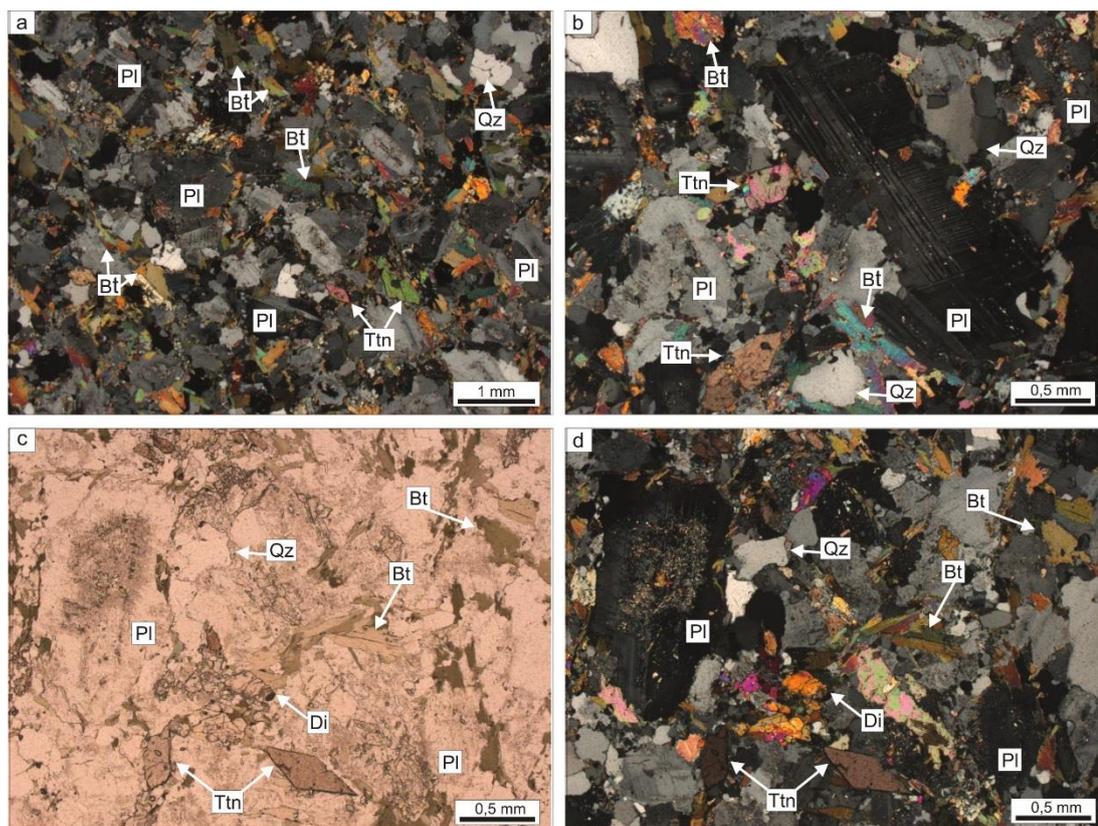


Figura 22. Fotomicrografias da lâmina MAT-06. a) Aspecto geral da amostra em LP; b) Plagioclásio prismático, anédrico, com maclas polissintéticas em duas direções; c) Foto em LN, onde é possível observar a sericitização no núcleo do plagioclásio e o pleocroísmo forte da biotita, que varia de marrom-esverdeado a amarelo claro; d) Em LP, pode-se identificar as maclas polissintéticas, a dupla macla e a zonação do plagioclásio. Abreviações: Bt-biotita, Di-diopsídio, Pl-plagioclásio, Qz-quartzo, Ttn-titanita.

3.7 Diopsídio Quartzo Sienito

Identificado em campo como uma rocha de cor branca, quando em amostra sã, e cinza escuro, quando alterada, o diopsídio quartzo sienito é encontrado em três diferentes feições: em bolsões de leucossomas com grandes concentrações de minerais máficos (Figuras 23a, 23b e 23c), como veios centimétricos que cortam as rochas máficas (Figura 23a) e como rochas intrusivas, centimétricas a métricas, no mármore (Figuras 23d e 23e), onde apresenta contatos irregulares e interlobados (Figuras 23d), desenvolve zonas de reações metassomáticas (*skarns*) e é encontrado carregando blocos de rochas máficas (Figuras 23e e 23f).

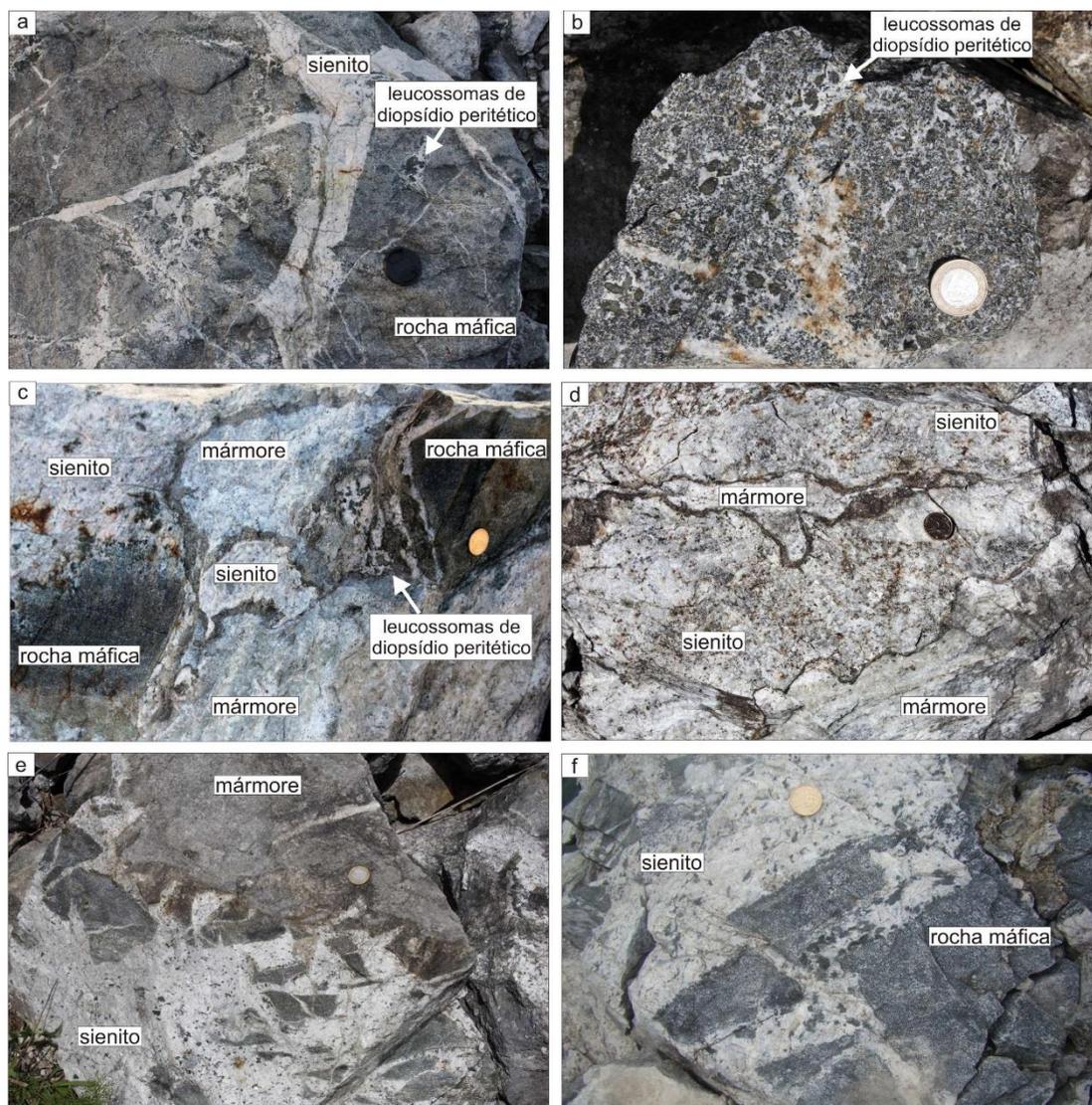


Figura 23. a) Bolsões de leucossomas com diopsídio peritético e veios de quartzo sienito percolando pela rocha máfica; b) Detalhe dos leucossomas com diopsídio peritético da amostra PMM-11; c) Relação da intrusão quartzo sienítica no mármore, com dois blocos de rochas máficas angulares rompidos, apresentando bolsões de leucossomas com diopsídio peritético; d) Intrusão do quartzo sienito no mármore, com contatos interlobados; e) Quartzo sienito em contato com o mármore, carregando blocos de rocha máfica; f) Interação do quartzo sienito com blocos de rocha máfica. Detalhe para a maior concentração de leucossomas de diopsídio peritético no contato com a rocha máfica.

As análises petrográficas na rocha que contém esses leucossomas (amostra PMM-11, figura 23b), mostram que estes são compostos por diopsídio e actinolita e a matriz da rocha é composta por plagioclásio, actinolita, biotita, K-feldspato, quartzo, titanita, pirita e clorita, em uma textura inequigranular alotriomórfica.

O mineral peritético identificado nesses leucossomas é o diopsídio, que pode ser observado nas figuras 24a, 24b e 24c. Ele encontra-se quase

totalmente substituído por actinolita, que por sua vez encontra-se substituída por biotita em muitas porções. O diopsídio é anédrico, com contatos interlobados com os cristais de plagioclásio e pirita, tem até 5 mm de comprimento e apresenta inclusões de pirita.

A actinolita é identificada como material de alteração do diopsídio, mas também como mineral prismático, anédrico, de contatos interlobados com o plagioclásio e retos com a biotita, tem até 0,3 mm e é distribuída aleatoriamente na matriz da rocha.

O plagioclásio é prismático, anédrico, tem até 1 mm de comprimento, apresenta macla polissintética e tem inclusões de apatita. É encontrado somente na matriz, apresentando contatos irregulares e interlobados.

A biotita ocorre como alteração da actinolita, mas também como mineral prismático, na matriz da rocha onde é anédrica, apresenta contatos retos com o plagioclásio e a actinolita, tem entre 0,1 mm e 0,2 mm e distribui-se aleatoriamente. Apresenta-se, por vezes, substituída por clorita.

O quartzo é anédrico, tem, aproximadamente, 0,1 mm e ocorre entre os grãos de plagioclásio, como mineral intersticial (Figura 24d).

O K-feldspato é encontrado somente entre os dois grãos de diopsídio mostrados na figura 24c, como um material de exsolução.

A pirita é anédrica, tem entre 0,3 e 0,7 mm de comprimento, está inclusa no diopsídio e também ocorre com contato interlobado na borda do mesmo, onde apresenta coroas de titanita (Figura 24a). É identificada também na matriz da rocha, onde é distribuída aleatoriamente.

As imagens 25a e 25b, mostram o diopsídio peritético em MEV, com detalhe para a textura de substituição para actinolita. A foto 25a foi tirada no centro do grão de diopsídio e a 25b, na borda do mesmo. A tabela 3, mostra as composições químicas destes minerais, em MEV/EDS.

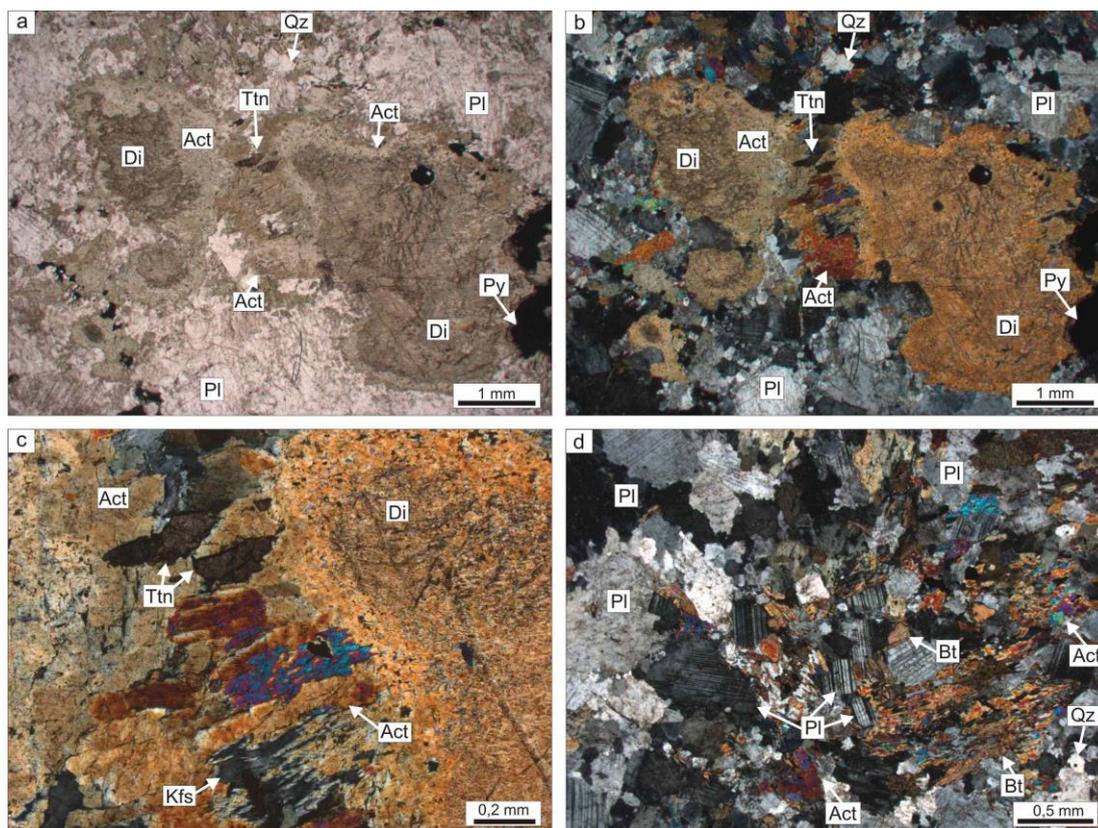


Figura 24. a) Fotomicrografia em LN da amostra PMM-11, com destaque para o mineral peritético, diopsídio. Em detalhe, a pirita, na porção inferior direita, com coroas de titanita; b) Mesma feição mostrada na fotomicrografia 24a, mas em LP. Nesta imagem, é evidenciada a borda de alteração que o diopsídio apresenta, quando é substituído pela actinolita; c) Detalhe do centro da fotomicrografia 24b, mostrando o desenvolvimento de titanita e K-feldspato entre dois grãos de diopsídio; d) Aspecto da matriz da amostra PMM-11, em LP, com o predomínio de cristais de plagioclásio, actinolita e biotita. O quartzo ocorre apenas como material intersticial. Abreviações: Act-actinolita, Bt-biotita, Di-diopsídio, Kfs-K-feldspato, Pl-plagioclásio, Py-pirita, Qz-quartzo, Ttn-titanita.

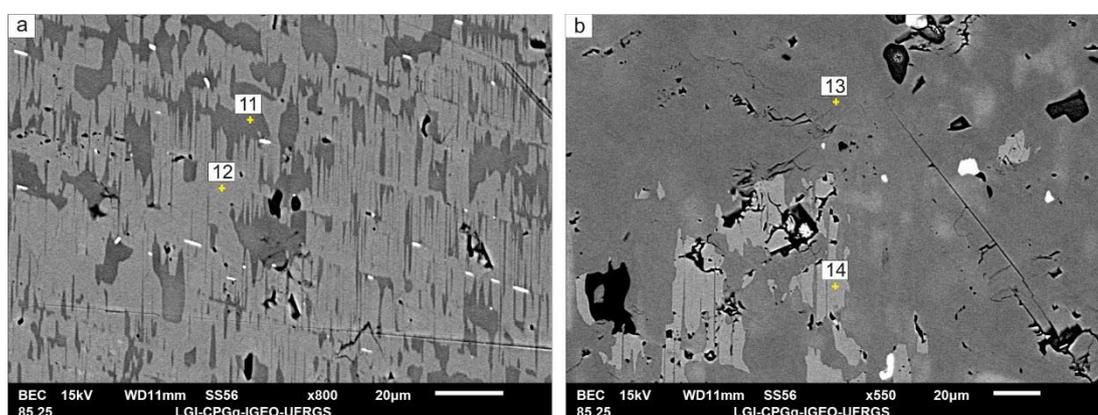


Figura 25. Imagens de MEV da lâmina PMM-11. a) Centro do grão de diopsídio (cinza claro) com a substituição por actinolita (cinza escuro); b) Borda do grão de diopsídio (cinza claro) e actinolita (cinza escuro).

Tabela 3 – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-11, referentes aos pontos na figura 25 (11-actinolita, 12-diopsídio, 13-actinolita e 14-diopsídio).

Análise	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O
11	45,06	2,56	14,34	12,86	11,36	0,64
12	45,69	-	10,73	11,07	22,12	-
13	46,54	1,33	14,72	12,78	11,50	-
14	44,86	-	10,82	10,40	21,69	-

A análise petrográfica do quartzo sienito que encontra-se como rocha intrusiva no mármore, mostra que a mineralogia principal é composta por feldspato alcalino, quartzo, plagioclásio e diopsídio e a mineralogia acessória por apatita, epidoto, calcita, titanita e zircão (Figura 26a), em uma textura inequigranular alotriomórfica. O feldspato alcalino compõe 65,9 % do total da rocha, o quartzo, 11,5 %, o diopsídio, 11,7 %, o plagioclásio, 7,4 % e os outros 3,5 % são compostos pelos minerais acessórios – apatita, calcita, epidoto, titanita e pirita. A concentração de minerais máficos, principalmente de diopsídio, é menor que a encontrada nos bolsões de leucossomas.

O feldspato alcalino apresenta-se em duas formas: poiquilítico e intersticial. O feldspato alcalino poiquilítico, de até 1 cm de comprimento, tem macla *tartan*, é anédrico e tem contatos irregulares com os outros minerais da rocha. A macla *tartan* é por vezes bem desenvolvida e outras vezes difusa, como exemplificado na figura 26b. Tem inclusões de plagioclásio, quartzo e apatita. Apresenta textura de exsolução descontínua e irregular, que não se desenvolve em todo o grão (Figura 26c). Foi identificada, também, a presença de alteração para sericita.

O feldspato alcalino intersticial, de até 1 mm de comprimento, não tem macla *tartan*, é anédrico, os contatos com os outros minerais são irregulares e há sericitização nos grãos. Este mineral foi classificado como ortoclásio.

O quartzo tem extinção ondulante, é anédrico e apresenta inclusões de apatita. Ocorre como inclusões no feldspato alcalino e como material intergranular, como pode ser observado na figura 26b.

O diopsídio é anédrico, tem até 2,2 mm, apresenta-se substituído por hornblenda em algumas porções e tem calcita como mineral intersertal (Figura

26d). São encontradas inclusões de titanita, quartzo e K-feldspato, como pode ser visto na figura 27. A análise química (Figura 27 e tabela 4) mostra que o diopsídio tem em sua composição o ferro, além do magnésio, do cálcio e da sílica.

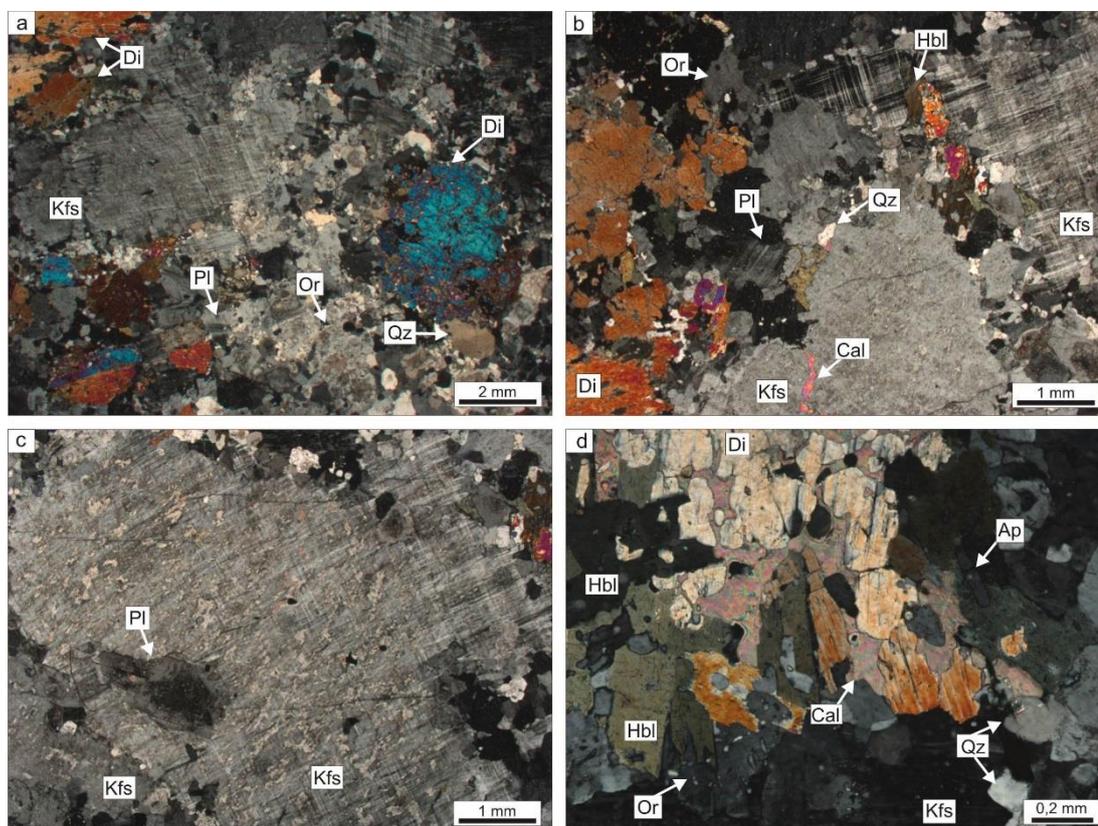


Figura 26. Fotomicrografias em LP do diopsídio quartzo sienito (amostra PMM-15). a) Aspecto geral da amostra; b) K-feldspatos poiquilíticos; c) K-feldspato poiquilítico, com macla *tartan* e textura de exsolução descontínua e irregular; d) Detalhe do diopsídio sendo alterado para hornblenda e da interação com a calcita, que preenche espaços intragranulares do cristal. Abreviações: Ap-apatita, Cal-calcita, Di-diopsídio, Hbl-hornblenda, Kfs-feldspato potássico, Or-ortoclásio, Pl-plagioclásio, Qz-quartzo, Zrn-zircão.

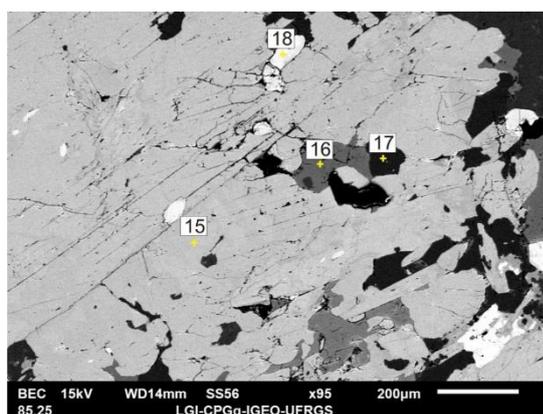


Figura 27. Imagem de MEV do diopsídio (15), com inclusões de K-feldspato (16), quartzo (17) e titanita (18), na lâmina PMM-15.

Tabela 4 – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-15, referentes aos pontos na figura 27 (15- diopsídio, 16-K-feldspato, 17-quartzo e 18-titanita).

Análise	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	Sn	F
15	36,22	-	13,14	5,84	17,09	-	-	-	-
16	43,14	12,48	-	-	-	10,22	-	-	-
17	70,00	-	-	-	-	-	-	0,30	-
18	21,03	1,34	-	-	20,29	-	27,95	-	0,76

Nas figuras 23d e 23e é observado o contato do sienito com o mármore. A interação entre esses dois litotipos é também exemplificada pela figura 28.

Neste contato irregular e interlobado, é possível observar uma reação metassomática (*skarn*) entre essas rochas, com o desenvolvimento de cristais de granada e wollastonita, além de quartzo, diopsídio, feldspato potássico, plagioclásio, calcita, titanita e pirita (Figura 29).



Figura 28. Quartzo sienito (rocha marrom clara) intrudindo no mármore (rocha branco-acinzentada). Detalhe para o contato irregular entre estas rochas.

As imagens ilustradas nas figuras 29a e 29b, mostram que a wollastonita e a granada ocorrem próximas ao contato do mármore. Quanto mais perto do contato com o quartzo sienito, há mais minerais como feldspato alcalino e plagioclásio e menos wollastonita e granada ocorrem.

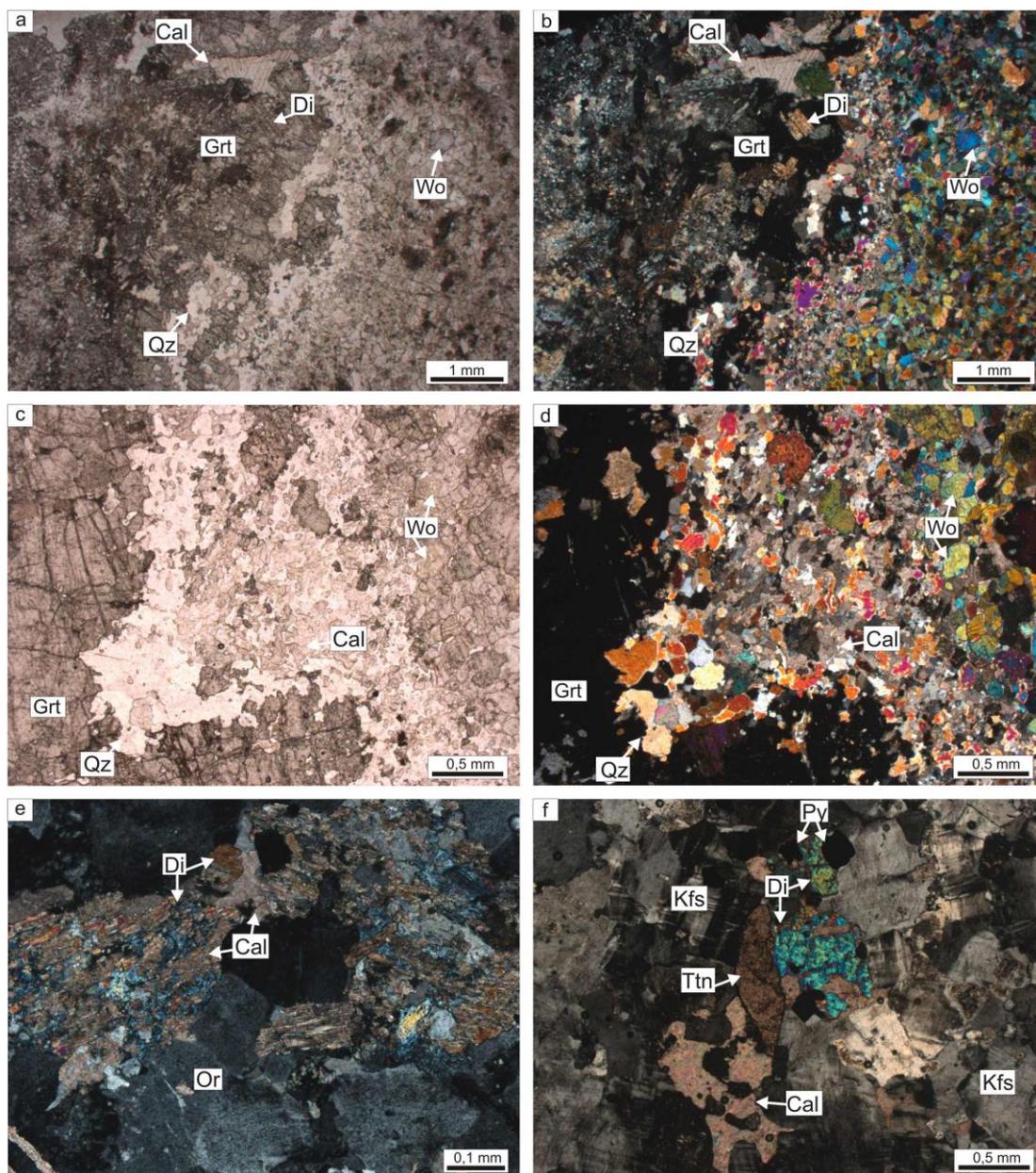


Figura 29. Fotomicrografias da lâmina PMM-12, em LN e LP. a) Aspecto geral da lâmina em LN, com a concentração de wollastonita à direita, a granada ao centro e a porção feldspática à esquerda; b) Fotomicrografia 29a em LP; c) Detalhe em LN da borda irregular da granada; d) Fotomicrografia 29c em LP; e) Diopsídio preenchido por calcita, circundado por grãos de ortoclásio, em LP; f) Titanita e pirita subédricas em contato com diopsídio preenchido por calcita, circundados por grãos de K-feldspato, em LP. Abreviações: Cal-calcita, Di-diopsídio, Kfs-feldspato potássico, Qz-quartzo, Or-ortoclásio, Ttn-titanita, Wo-wollastonita.

A wollastonita é anédrica, tem em torno de 0,2 mm e ocorre concentrada, em uma porção da lâmina, mais próxima ao contato com o mármore.

O quartzo é intersticial entre os cristais de wollastonita e também ocorre como mineral prismático próximo à granada (Figuras 29c e 29d).

A granada, classificada como grossulária, é incolor, anédrica, tem contatos irregulares e apresenta muitas fraturas (Figuras 29a e 29c).

O diopsídio é anédrico, varia entre 0,1 mm e 0,4 mm no comprimento. Na porção mais próxima à intrusão do quartzo sienítico, ocorre com até 1 mm de tamanho e em sua maior parte está com as suas clivagens e fraturas preenchidas por calcita, como observado na figura 29e.

O ortoclásio é anédrico, apresenta contatos interlobados com o diopsídio e com o plagioclásio, que também é anédrico, tem até 0,3 mm, está sericitizado e desenvolve mirmequitos.

Na imagem 29f pode-se identificar grãos de feldspato alcalino, anédricos, circundando irregularmente um grão de diopsídio e uma titanita, subédrica, de contatos retos com os outros minerais. Há também pirita, subédrica, de contatos retos com os K-feldspatos e diopsídio e calcita, preenchendo alguns espaços intergranulares.

A imagem de MEV da figura 30a, mostra o contato interlobado entre a granada e o quartzo. A figura 30b mostra em detalhe as wollastonitas, com junções tríplices e quartzo intersticial.

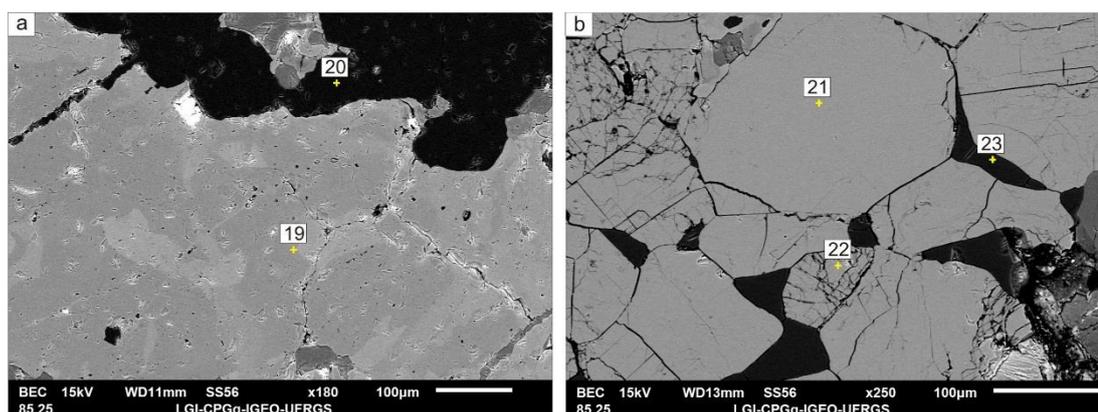


Figura 30. Imagens de MEV da lâmina PMM-12. a) Imagem da granada (19) em contato com o quartzo (20). Detalhe para o contato irregular e interlobado entre esses minerais; b) Imagens das wollastonitas (21 e 22) com quartzo intersticial (23).

A tabela 5 traz a análise química em MEV/EDS da granada, rica em cálcio e alumínio, caracterizando uma grossulária, da wollastonita e do quartzo, intersticial.

Tabela 5 – Análises de química mineral obtidas com MEV/EDS na lâmina PMM-12, referentes aos pontos na figura 30 (19-grossulária, 20-quartzo, 21-wollastonita, 22-wollastonita, 23-quartzo).

Análise	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Sn
19	26,74	13,45	3,99	26,15	-
20	74,25	-	-	-	0,43
21	37,23	-	-	36,95	-
22	37,15	-	-	36,83	-
23	74,84	-	-	-	-

4 DISCUSSÕES

Os mármore são considerados produto de metamorfismo de uma rocha carbonática depositada em uma bacia sedimentar. Os xistos, encontrados em uma lente, que intercalam-se com o mármore, são indicativos de uma margá, evidenciando um protólito sedimentar.

A orientação cristalográfica da calcita e as estruturas bandadas do mármore observadas em campo e em laboratório, marcada pela diminuição do tamanho de grãos da calcita, corroboram a hipótese de que o mármore sofreu deformação intensa.

Outra evidência da deformação intensa destas rochas está na presença dos blocos máficos de anfíbolitos, rompidos. Como os anfíbolitos apresentam textura granoblástica poligonal e pequenas bordas de reação, acredita-se que os protólitos sejam diques máficos, que intrudiram antes do evento metamórfico ocorrer. Como já estavam solidificados, comportaram-se de forma rúptil durante o metamorfismo e o evento deformacional, rompendo-se e separando-se em blocos angulares.

Os contatos retos com a encaixante, sem bordas de reação e a presença de grãos de quartzo e pirita angulares, inseridos em uma matriz muito fina, de cristais de tremolita e quartzo orientados, indicam que o metadiabásio tem como protólito intrusões tardias de diabásio. Porém, ela apresenta-se metamorfizada, como observado na figura 19, e, assim, é provável que tenha intrudido durante o evento metamórfico, já que os diques são encontrados contínuos, sem apresentar *boudinagem*.

A intrusão dos diques quartzo dioríticos e quartzo sieníticos, ocorreu após o evento metamórfico, pois estas rochas apresentam textura ígnea. A presença de estruturas irregulares e dobradas, como mostradas na figura 20, indica a presença de um evento deformacional na região.

Como foi proposto no item 1.1, uma das hipóteses de trabalho seria testar se houve fusão do mármore e das rochas máficas. As estruturas de fluxo e os contatos lobados com a rocha sienítica (Figura 9 e figura 23d, respectivamente) evidenciam a fusão do mármore. Estas feições, que mostram como se o mármore estivesse intrudindo entre as rochas, são diferentes do comportamento estrutural do mármore que é bandado. Como mencionado na introdução, uma das dificuldades de se demonstrar a fusão é que a cristalização de um magma carbonático gera carbonatos novamente, de difícil distinção do carbonato original. A presença de reações envolvendo o crescimento de granada e wollastonita, também fortalecem a hipótese da fusão, pois a wollastonita é produto de uma reação de descarbonatação (Yardley, 1994), que ocorre na quebra da estrutura mineral das calcitas, onde há liberação de CO₂. Os estudos de Floess *et al.* (2015) e Durand *et al.* (2015), mostram que há liberação de CO₂ durante a fusão de calcitas.

Sobre a fusão das rochas máficas, a identificação em campo dos leucossomas sieníticos com diopsídio, indicam que a sua rocha hospedeira sofreu fusão parcial e que esse diopsídio é o mineral peritético, que permaneceu em equilíbrio com o líquido. Como este é um clinopiroxênio anidro, rico em Ca, a maior probabilidade é que esta fusão tenha sido desencadeada por um fluido de CO₂-H₂O, com baixa atividade de água. Este fluido hidrotermal pode ter origem na intrusão do Complexo Pinheiro Machado e conforme foi percolando pelas rochas calcíticas provocou reações de descarbonatação no mármore e enriqueceu-se em CO₂. Esta composição de fluido facilitaria em parte a fusão das rochas máficas intrusivas. Acredita-se que esta fusão ocorreu em proporções maiores que as observadas dentro da pedreira, possivelmente nos arredores, e geraram volumes de magmas sieníticos que intrudiram o mármore.

5 CONCLUSÕES

As primeiras intrusões máficas (diques máficos, protólitos dos anfibólitos), ocorreram antes do evento metamórfico. A segunda intrusão que ocorreu, já durante este evento, foi dos diques subvulcânicos, protólitos dos metadiabásios. Após o pico metamórfico e durante um evento deformacional, houve a intrusão dos diques quartzo dioríticos, possivelmente cogenéticos com o posicionamento do Complexo Pinheiro Machado. A intrusão deste complexo, possibilitou o influxo de fluidos aquosos e estes, provavelmente, interagiram com o mármore e as rochas máficas já posicionadas. Como o ambiente ainda estava aquecido e passando por um evento deformacional, a percolação dos fluidos hidrotermais causou a fusão de algumas rochas máficas e do próprio mármore. A rocha quartzo sienítica foi então gerada, a partir da fusão das rochas máficas. O mármore fundido proporcionou uma grande gama de reações complexas com as rochas intrusivas, e também um posicionamento estrutural destas rochas de muita irregularidade.

Para que a fusão do mármore seja definitivamente comprovada, são ainda necessárias análises laboratoriais, como a análise de microsonda eletrônica, complementada com a catodoluminescência, para a identificação de possíveis diferenças composicionais entre os cristais de calcita que estão no mármore bandado e no mármore com estrutura de fluxo, interpretado como sendo o produto da fusão.

6 REFERÊNCIAS

Chemale Jr., F. 2000. *Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense*. In: Holz, M. & De Ros, L. F. (Eds). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, p.13-52.

Durand, C., Baumgartner, L. P., Marquer, D. 2015. Low melting temperature for calcite at 1000 bars on the join $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ – some geological implications. *Terra Nova*, 27(5): 364-369.

Fernandes, L. A. D., Menegat, R., Costa, A. F. U., Koester, E., Porcher, C. C., Tommasi, A., Kraemer, G., Ramgrab, G. E., Camozzato, E. 1995a. Evolução tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-Rio-Grandense: parte I – uma contribuição a partir do registro geológico. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4): 351-374.

Fernandes, L. A. D., Menegat, R., Costa, A. F. U., Koester, E., Porcher, C. C., Tommasi, A., Kraemer, G., Ramgrab, G. E., Camozzato, E. 1995b. Evolução tectônica do Cinturão Dom Feliciano no Escudo Sul-Rio-Grandense: parte II – uma contribuição a partir das assinaturas geofísicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4): 375-390.

Floess, D., Baumgartner, L. P., Vonlanthen, P. 2015. An observational and thermodynamic investigation of carbonate partial melting. *Earth and Planetary Science Letters*, 409: 147-156.

Fragoso César A. R. S. 1980. O Cráton do Río de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio-Sul Riograndense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Camboriú: SBG, *Anais*, vol. 5, p. 2879-2892.

Fragoso-Cesar, A. R. S. 1991. *Tectônica de placas no Ciclo Brasileiro: As orogenias dos cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul*. São Paulo, 362p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Ganino, C., Arndt, N., Chauvel, C., Jean, A., Athurion C. 2013. Melting of carbonate wall rocks and formation of the heterogeneous aureole of the Panzihua intrusion, China. *Geoscience Frontiers*, 04: 535-546.

Hartmann, L. A., Chemale Jr., F., Philipp, R. P. 2007. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. *In: Roberto Ianuzzi & José Carlos Frantz. 50 Anos de geologia no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Editora Comunicação e Identidade, CIGO e IG-UFRGS, p. 97-123.

Lenz, C., Porcher, C. C., Fernandes, L. A. D., Masquelin, H., Koester, E., Conceição, R. V. 2013. Geochemistry of the Neoproterozoic (800-767 Ma) Cerro Bori orthogneisses, Dom Feliciano Belt in Uruguay: tectonic evolution of an ancient continental arc. *Mineralogy and Petrology*, 107 (5): 785-806.

Loureiro, P. O. 2013. *Evolução magmática do Complexo Pinheiro Machado na região de Monte Bonito, Pelotas, RS*. Porto Alegre, 75 p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Neis, L. P. 2013. *Geoquímica de metacarbonatos do Escudo Sul-rio-grandense na região de Caçapava do Sul e Arroio Grande, RS*. Porto Alegre, 61 p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Philipp, R. P. 1998. *A Evolução Geológica e Tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul*. São Paulo, 255 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Philipp, R. P., Machado, R., Nardi, L. V. S., Lafon, J. M. 2002. O magmatismo granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(2): 277-290.

Philipp, R. P., Machado, R. 2002. Ocorrência e Significado dos Septos do Embasamento encontrados nas Suítes Graníticas do Batólito Pelotas, RS. *Pesquisas em Geociências*, 29(1):43-60.

Ramos, R. C., Koester, E. 2015. Litogeochemistry of the meta-igneous units from Arroio Grande Ophiolitic Complex, Southernmost Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 45(1): 65-78.

Sallet, R., Monteiro, R., Machado, R., Fragoso-César, A. R. S. 1989. Rochas sieníticas e básicas pré-orogênicas intrusivas na plataforma carbonática da Janela Estrutural Conde Matarazzo no Cinturão Dom Feliciano, RS. *Acta Geologica Leopoldensia*, 13(12): 161-170.

Silva, L. C., Mcnaughton, N. J., Armstrong, R., Hartmann, L. A., Fletcher, I. R. 2005. The neoproterozoic mantiqueira province and its african connections: a zircon-based U-Pb geochronologic subdivision for the Brasilliano/Pan-African systems of orogens. *Precambrian Research*, 136(3-4): 203-240.

Streckeisen, A. L. 1976. Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: a provisional attempt. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 1: 1-15.

Yardley, B. W. D. 1994. *Introdução à petrologia metamórfica*. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 340p.