



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Centro de Ciências da Matemática e da Natureza  
Instituto de Geociências  
Departamento de Geologia

**Trabalho Final de Curso (IGL-UO8)**

**MINERALOGIA E PETROGRAFIA DO ORTOGNAISSE RESENDE COSTA,  
ESTADO DE MINAS GERAS.**

**TAÍS PROENÇA CIDADE**

Orientador: Prof. Dr. Ciro Alexandre Ávila  
(Departamento de Geologia e Paleontologia – Museu Nacional – UFRJ)

Co-orientador: Dr. Reiner Neumann  
(Centro de Tecnologia Mineral)

**FEVEREIRO, 2017  
RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Centro de Ciências da Matemática e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia

**Trabalho Final de Curso (IGL-UO8)**

**MINERALOGIA E PETROGRAFIA DO ORTOGNAISSE RESENDE COSTA,  
ESTADO DE MINAS GERAS.**

**TAÍS PROENÇA CIDADE**

APROVADA POR:

---

Dr. Ciro Alexandre Ávila

---

Dr. Fabiano Richard Leite Faulstich

---

M.Sc. Sarah Siqueira da Cruz Guimarães Sousa,

**FEVEREIRO, 2017  
RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL**

## FICHA CATALOGRÁFICA

CIDADE, Taís Proença

**MINERALOGIA E PETROGRAFIA DO ORTOGNAISSE RESENDE COSTA, ESTADO DE MINAS GERAIS.**

XI, 90 p., 29,7 cm (Instituto de Geociências – Departamento de Geologia – UFRJ, Trabalho Final de Curso, 2016)

Trabalho Final de Curso: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia.

- 1- Ortognaisse Resende Costa
- 2- Mineralogia
- 3- Petrografia
- 4- Química mineral
- 5- Cinturão Mineiro
- 6- Cráton São Francisco

I-IGEO/UFRJ

II- Título (série)

## RESUMO

Cidade, T. P. 2016. *Caracterização petrográfica e mineralógica do ortognaisse Resende Costa, estado de Minas Gerais*. Trabalho Final de Curso, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 90p.

O ortognaisse Resende Costa possui cerca de 200 km<sup>2</sup> e está situado no centro sul do estado de Minas Gerais, entre as cidades de Resende Costa, São Tiago, Coronel Xavier Chaves e Lagoa Dourada. Este corpo destaca-se por ser cortado por um enxame de pegmatitos mineralizados em minerais de Sn-Nb-Ta, tendo sido estudado anteriormente quanto à sua caracterização petrográfica, geoquímica e geocronológica, sendo que sua idade de cristalização varia entre  $2351 \pm 48$  e  $2317 \pm 16$  Ma. Amostras de saprólitos desse corpo foram coletadas em diversos pontos e os estudos mineralógicos foram realizados por estereomicroscopia, microsonda Raman e microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS). Lâminas confeccionadas em trabalhos préteritos foram estudadas por microscopia ótica em luz transmitida, catodoluminescência e microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS).

O ortognaisse Resende Costa é composto principalmente por oligoclásio e quartzo, sendo que sua mineralogia acessória é representada por biotita, ilmenita, zircão, epidoto, óxidos de Fe (magnetita e/ou hematita), titanita, microclinio, zoisita/clinozoisita, moscovita, carbonato e sericita. Granada, monazita-(Ce), xenotímio-(Y), fluorapatita e allanita-(Ce) ocorrem como minerais traços, enquanto columbita-(Fe), microlita e turmalina são muito raros. Cassiterita, galena, minerais de Th e U e uma possível samarskita (niobo-tantalato com Y, Ce, La, Fe) foram identificados como inclusões nos minerais das lâminas petrográficas e dos concentrados de minerais pesados. Óxido de Ti, limonita, piritita limonitizada e óxido/hidróxido de Mn são minerais intempéricos e só foram observados nos concentrados de minerais pesados dos saprólitos do ortognaisse Resende Costa.

Propõem-se que a evolução mineralógica do protólito do ortognaisse Resende Costa tenha transcorrido da seguinte maneira: zircão, apatita, granada, ilmenita, óxidos de Fe, titanita<sub>1</sub> e allanita cristalizaram no início do processo, pois a maioria desses minerais ocorrem como inclusões nos minerais essenciais; em seguida formaram-se plagioclásio, biotita<sub>1</sub> e quartzo, pois esses representam cerca de 99% da mineralogia do corpo, enquanto o microclínio foi um dos últimos minerais a se formar, pois ocupa os espaços entre os demais. Epidoto<sub>1</sub>, epidoto<sub>2</sub>, epidoto<sub>3</sub>, titanita<sub>2</sub>, titanita<sub>3</sub>, zoisita/clinozoisita, biotita<sub>2</sub>, sericita e carbonato constituem uma paragênese metamórfica.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Márcia Proença da Costa Cidade e Alan Garrido Cidade, por sempre acreditarem em mim e por me apoiar incondicionalmente em todos os momentos da minha vida.

Ao meu namorado Luis Eduardo Santelli, por seu amor, carinho e paciência, bem como compreensão e ajuda durante as várias etapas da realização desta monografia.

Aos meus orientadores e amigos, Ciro Alexandre Ávila e Reiner Neumann, pelo enorme conhecimento adquirido durante esses anos, bem como atenção, paciência, incentivo, apoio, discussões e questionamentos que me fizeram refletir muito e me tornar uma profissional melhor.

Aos meus grandes e melhores amigos Carla Corrêa Felix e Salomão Alencar Serra Nunes por estarem sempre presentes nos bons e maus momentos, por terem sempre me apoiado e terem tornado esses cinco anos de geologia mais divertidos, leves e inesquecíveis.

Agradeço a todos os meus grandes amigos feitos ao longo da faculdade, Bianca Saraiva, João Benfeita, Victor Menezes e Matheus Cabral por tornarem esse um dos melhores períodos da minha vida.

Ao Felipe Emerson André Alves, Fabiano Faulstich e Fabiana Franco por toda ajuda e paciência ao longo das várias dúvidas que surgiram na realização desta monografia.

A toda equipe do Projeto Volta Grande, pela amizade e companheirismo ao longo desses 2 anos de projeto.

À equipe do SCT, em especial aos técnicos Josimar e Nininho, por tudo que me ensinaram e por toda ajuda e paciência que tiveram ao longo desta monografia.

A todos que convivi e conheci durante esta trajetória que mudou a minha vida e o modo de encará-la.

A todos aqueles que colaboraram, ajudaram e incentivaram que não foram citados nesta lista, mas que estão com certeza no meu coração.

<b>SUMÁRIO</b>	<b>PÁG.</b>
<b>I – CAPA</b>	<b>I</b>
<b>II - CONTRA CAPA</b>	<b>II</b>
<b>III – FICHA CATALOGRÁFICA</b>	<b>III</b>
<b>IV – RESUMO</b>	<b>IV</b>
<b>V – AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>VI – SUMÁRIO</b>	<b>VI</b>
<b>VII - ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>VIII</b>
<b>VIII - ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>X</b>
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVO	3
3 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	3
4 - MATERIAIS E MÉTODOS DE TRABALHO	5
4.1 - ETAPA PRÉ-CAMPO	5
4.2 - ETAPA DE CAMPO	6
4.3 - ETAPA DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	8
4.4 - ETAPA DE ANÁLISE LABORATORIAL	11
4.4.1 – ESTEREOMICROSCÓPIO E ESPECTROSCOPIA RAMAN	12
4.4.2 – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	13
4.4.3 –MICROSCOPIA ÓPTICA	14
4.4.4 –CATODOLUMINESCÊNCIA	14
4.5 - ETAPA DE ESCRITÓRIO	15
5- NOMENCLATURA ADOTADA PARA OS LITÓTIPOS	16
6 – CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	19
6.1 CRÁTON SÃO FRANCISCO	19
6.2 QUADRILÁTERO FERRÍFERO	21
6.2.1 SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS	21
6.2.2 GRANITOS POTÁSSICOS TARDIOS	22
6.2.3 SUPERGRUPO MINAS	23
6.3 CINTURÃO MINEIRO	23
6.3.1 ARCO RESENDE COSTA	25
6.3.2 ARCO SERRINHA	26
6.3.3 FAIXAS METAVULCANO-SEDIMENTARES PALEOPROTEROZÓICAS	27
7 - ORTOGNAISSE RESENDE COSTA	28
7.1 INTRODUÇÃO	28
7.2 CARACTERÍSTICAS DE CAMPO	28
7.3 PETROGRAFIA, CATODOLUMINESCÊNCIA E MEV	32
7.3.1 ORDEM DE CRISTALIZAÇÃO E TRANSFORMAÇÕES	50
7.4 ESTEREOMICROSCOPIA DE GRÃOS	52
7.4.1 - AMOSTRA LE-01A	52
7.4.2 - AMOSTRA LE-03A	55
7.4.3 - AMOSTRA LE-04	58
7.4.5 - AMOSTRA VH-48	61
7.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS MINERAIS PESADOS DOS SAPRÓLITOS	65
7.5.1 - ILMENITA	65
7.5.2 - GRANADA	69

7.5.3 - XENOTÍMIO	74
7.5.4 - MONAZITA	77
7.5.5 - ZIRCÃO	79
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
10. ANEXOS	
ANEXO I – MAPA GEOLÓGICO	

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Lista das lâminas petrográficas de campanhas anteriores que foram estudadas.	5
<b>Tabela 2</b> - Lista de pontos de coletas de amostras de concentrado de minerais pesados por parte da equipe do projeto e que foram estudados por estereomicroscopia.	5
<b>Tabela 3</b> – Roteiro para descrição das lâminas petrográficas.	15
<b>Tabela 4</b> – Lâminas separadas para estudo por catodoluminescência.	15
<b>Tabela 5</b> – Granulação adotada a partir do tamanho dos cristais (Williams <i>et al.</i> ,1970).	16
<b>Tabela 6</b> – Subdivisão textural de rochas ígneas segundo a proposta de Williams <i>et al.</i> (1970).	16
<b>Tabela 7</b> – Índices de cor segundo a classificação de Le Maitre (2002) para rochas ígneas.	16
<b>Tabela 8</b> – Abreviaturas dos minerais.	18
<b>Tabela 9</b> - Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de plagioclásio do ortognaisse Resende Costa.	38
<b>Tabela 10</b> - Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de biotita, primária e secundária, do ortognaisse Resende Costa.	42
<b>Tabela 11</b> – Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de apatita do ortognaisse Resende Costa.	45
<b>Tabela 12</b> – Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de allanita do ortognaisse Resende Costa.	46
<b>Tabela 13</b> - Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de K-feldspato do ortognaisse Resende Costa.	49
<b>Tabela 14</b> - Resultado da análise em estereomicroscopia do concentrado de minerais pesados do ponto LE-1A referente ao ortognaisse Resende Costa.	52
<b>Tabela 15</b> - Resultado da análise em estereomicroscópio do concentrado de minerais pesados do ponto LE-3A referente ao ortognaisse Resende Costa.	56
<b>Tabela 16</b> - Resultado da análise em estereomicroscópio do concentrado de minerais pesados do ponto LE-4 referente ao ortognaisse Resende Costa.	59
<b>Tabela 17</b> - Resultado da análise em estereomicroscópio do concentrado de minerais pesados do ponto VH-48 referente ao ortognaisse Resende Costa.	62
<b>Tabela 18</b> - Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de ilmenita dos pontos amostrados no ortognaisse Resende Costa.	70



**Tabela 19** - Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de granada dos pontos amostrados no ortognaisse Resende Costa. 73

**Tabela 20** - Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de xenotímio dos pontos amostrados no ortognaisse Resende Costa. 76

**Tabela 21**– Análises químicas semiquantitativa por EDS dos grãos de monazita dos pontos amostrados no ortognaisse Resende Costa. 79

**Tabela 22**- Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de zircão dos pontos amostrados no ortognaisse Resende Costa. 83

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1** – Mapa geológico do cinturão Mineiro com a localização da Província Pegmatítica de São João del Rei (Ávila *et al.*, 2014). 2
- Figura 2** - Localização das folhas topográficas do IBGE na escala de 1:50.000 em relação ao estado de Minas Gerais, destacando em vermelho a área aproximada de amostragem do ortognaisse Resende Costa. 3
- Figura 3** - Imagem mostrando as principais vias de acesso (estradas com diferentes cores) à área de estudo em Resende Costa (B). Utilizou-se como ponto de partida a cidade do Rio de Janeiro (Fonte: *Google Earth*). 4
- Figura 4** – Fluxograma simplificado das etapas de campo referentes a amostragem, obtenção do concentrado e seu encaminhamento para laboratório. 6
- Figura 5** – Etapas de coleta da amostra de saprólito em campo. **a**– Limpeza do afloramento; **b** – Coleta de cerca de 20 kg de saprólito. 6
- Figura 6** –Deslamagem do saprólito em uma drenagem ativa. **a** – Desagregação da amostra com a mão; **b** – Eliminação da argila e do silte em suspensão a partir da retirada da água. 7
- Figura 7** – Separação granulométrica com peneira com abertura de 2 mm. **a** - Processo de peneiramento para a retirada do material maior que 2 mm; **b** - Resíduo maior que 2 mm. 7
- Figura 8** – Utilização da bateia para concentração gravítica dos minerais pesados. **a** – Início do processo com o material menor que 2 mm separado com o uso da peneira; **b** – Concentrado parcial com resíduos compostos dos minerais pesados no fundo da bateia. 8
- Figura 9** – Concentrado final acondicionado em um recipiente plástico (cerca de 10 g) que será em seguida estudado no laboratório. 8
- Figura 10** - Fluxograma simplificado das etapas de preparação das amostras no laboratório para estudo em lupa binocular. 9
- Figura 11:** **a** – Limpeza da amostra com uso do ultrassom, extraindo o material argiloso dos grãos; **b** – Separação dos minerais pesados por densidade com bromofórmio. 10
- Figura 12:** **a** – Separação magnética com imã de mão; **b** – Separador magnético isodinâmico Frantz. 10
- Figura 13:** Frações finais do separador magnético isodinâmico *Frantz* nas amperagens utilizadas. 11
- Figura 14** - Fluxograma simplificado das etapas de análises dos concentrados de minerais pesados e das lâminas petrográficas. 12
- Figura 15:** **a**- Porta amostra para os grãos.**b**-Seções polidas preparadas a partir dos grãos separados. 13

- Figura16** – Diagrama QAP de Streckeisen (1976) utilizado para a classificação das rochas ígneas plutônicas com índice de cor inferior a 90%. 1a– Quartzolito (silexito); 1b– Granitoide rico em quartzo; 2– Álcali-feldspato granito; 3a– Sienogranito; 3b– Monzogranito; 4– Granodiorito; 5– Tonalito; 6\*- Quartzo álcali-feldspato sienito; 7\*- Quartzo sienito; 8\*- Quartzo monzonito; 9\*- Quartzo monzodiorito/Quartzo monzogabro; 10\*- Quartzo diorito/Quartzo gabro/Quartzo anortosito; 6- Álcali-feldspato sienito; 7- Sienito; 8- Monzonito; 9- Monzodiorito/Monzogabro; 10- Diorito/Gabro/Anortosito. 17
- Figura17** – Diagrama ternário (Anortita-Albita-Ortoclásio) de elevada temperatura utilizado para classificação de feldspatos (modificado de Deer *et al.*, 1992). 18
- Figura 18** – Forma atual do cráton São Francisco e suas faixas marginais (Alkmim, 2004). 19
- Figura 19** – Divisão dos setores do cráton São Francisco (Souza *et al.*, 2013). 20
- Figura 20** – Coluna estratigráfica simplificada do Supergrupo Rio das Velhas (Alkmin & Noce, 2006). 21
- Figura 21** – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero com idades U-Pb de ortognaisse e de rochas granitóides relevantes (Lana *et al.*, 2013). 22
- Figura 22** – Evolução esquemática da borda meridional do cráton São Francisco no Neoarqueano (Romano *et al.*, 2013). (A) Deposição do Supergrupo Rio das Velhas concomitantemente ao *emplacement* de corpos mais novos entre 2780-2770 Ma. (B) *Emplacement* de granitos potássicos entre 2750-2700 Ma. Deformação do Supergrupo Rio das Velhas e diferenciação da crosta. (C) erosão da crosta superior e deposição do Supergrupo Minas. 22
- Figura 23** - Coluna estratigráfica dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas (Alkmin & Noce, 2006). 24
- Figura 24** – Modelo de evolução por acreção de arcos para o Cinturão Mineiro segundo Ávila *et al.*, (2010). Arco M – Arco Mantiqueira. 25
- Figura 25** – Mapa da região de Resende Costa individualizando os corpos plutônicos Paleoproterozoicos do Cinturão Mineiro e a crosta Arqueana (Teixeira *et al.*, 2015). 26
- Figura 26** - Lajedo do ortognaisse Resende Costa (Foto: Ciro Ávila). 28
- Figura 27** - Saprólito branco avermelhado decorrente da alteração intempérica de rochas do ortognaisse Resende Costa (Foto: Ciro Ávila). 29
- Figura 28** - Aspecto geral de amostra do ortognaisse Resende Costa em um corte paralelo a foliação, onde se destacam os aglomerados de biotita (Foto: Victor Hugo Souza). 29
- Figura 29** - *Tension gash* preenchido por quartzo e orientado perpendicularmente a foliação (Foto: Victor Hugo Souza). 30
- Figura 30** – Corpo pegmatítico métrico intrusivo em saprólito do ortognaisse Resende Costa. Legenda: gn – ortognaisse Resende Costa; peg – pegmatito (Foto: Ciro Ávila). 31

- Figura 31** - Bloco mostrando dique aplítico centimétrico e hololeucocrático em contato com rocha leucocrática do ortognaise Resende Costa. Legenda: apl – aplito; gn – ortognaise Resende Costa (Foto: Victor Hugo Souza). 31
- Figura 32** – Aplitos quartzo-feldspáticos (delineados em branco) concordantes e discordantes à foliação do ortognaise Resende Costa (Foto: Victor Hugo Souza). 32
- Figura 33** - Lâmina do ortognaise Resende Costa, onde é possível observar sua granulação fina e a textura inequigranular seriada xenoblástica. Destaca-se o elevado grau de epidotização e sericitização do plagioclásio (Amostra RF- 46B – nicóis cruzados). 32
- Figura 34** - Lâmina do ortognaise Resende Costa com índice de cor de 12%, representado principalmente pela biotita (Amostra VH-53 – nicóis paralelos). 33
- Figura 35** – Cristais de quartzo com contatos poligonizados (Amostra RF-25 – MEV/BSD). 34
- Figura 36** – Cristal de quartzo com inclusão de zircão (Zrn) (Amostra RF-20 – MEV/BSD). 34
- Figura 37** – Cristal de quartzo (Qz) com inclusão de apatita (Ap) (Amostra RF-20 – catodoluminescência). 34
- Figura 38** – Cristais de quartzo dispostos sob a forma de agregado monominerálico exibindo contatos poligonizados e extinção ondulante (Amostra RF-255 C1 – nicóis cruzados). 35
- Figura 39** – Cristal de Plagioclásio (Pl) com inclusões de zircão (Zrn) que apresenta zoneamento (Amostra RF-20 – MEV/BSD). 35
- Figura 40** – Cristal de Plagioclásio (Pl) com inclusão de apatita (Ap) e alteração para carbonato que apresenta luminescência laranja (Amostra RF-20 – catodoluminescência). 35
- Figura 41** – Grão de plagioclásio (Pl) fortemente alterado mostrando o sobrecrecimento de sericita (Ser) (Amostra RF-02 – nicóis cruzados). 36
- Figura 42** – Grão tabular de plagioclásio com geminação polissintética parcialmente “apagada” e levemente saussuritizado (Amostra RF-02 – nicóis cruzados). 36
- Figura 43** – Grão de plagioclásio (Pl) alterado para carbonato (Cal) com luminescência laranja (Amostra EL256 – catodoluminescência). 36
- Figura 44** – Grão de plagioclásio (Pl) com geminação polissintética “apagada” e substituído parcialmente por microclina (Mc) (Amostra EL-163-A – nicóis cruzados). 37
- Figura 45** – Grão de plagioclásio (Pl) fortemente alterado com o crescimento (Bt) (Amostra EL256 – MEV/BSD). 37
- Figura 46** – Grão de plagioclásio com duas direções de geminação (círculo amarelo), em parte corroído devido ao processo de alteração. (Amostra EL-163-A – nicóis cruzados). 37
- Figura 47** – Diagrama ternário de classificação de feldspatos. 39

- Figura 48** – Grão de óxido de Fe (Ox) envolto por epidoto (Ep), estando ambos inclusos em um grão de plagioclásio (Pl) (Amostra EL256 – MEV/BSD). 40
- Figura 49** – Grão de biotita em paragênese com mineral opaco (Amostra VH-53 – nicóis paralelos). 40
- Figura 50** – Grão de ilmenita (Ilm) bordejado por titanita (Ttn) com inclusão de samarskita (Smk) e incluso em um grão de plagioclásio (Pl) (Amostra RF-25– MEV/BSD). 41
- Figura 51** – Grão de biotita primária (Bt<sub>1</sub>), subédrica, com hábito tabular e com inclusões de zircão (Amostra RF-25– MEV/BSD). 41
- Figura 52** – Grão de plagioclásio (Pl) com sobrecrecimento de biotita secundária (Bt<sub>2</sub>) de aspecto irregular e sob a forma de um agregado de pequenos grãos (Amostra VH-53 – nicóis cruzados). 41
- Figura 53** – Grãos de biotita secundários (Bt<sub>2</sub>), subédricos, sobrecrecidos no grão de plagioclásio (Pl), juntamente com epidoto (Ep). O plagioclásio (Pl) apresenta inclusão de zircão (Zrn) e alteração para epidoto (Ep) (Amostra RF-20 – MEV/BSD). 43
- Figura 54** – Grão de biotita primária (Bt<sub>1</sub>) com aspecto tabular e grão de biotita secundária (Bt<sub>2</sub>) anédrica e em grãos pequenos. Essa última ocorre associada ao epidoto (Ep) e zoisita/clinozoisita (Zo/Czo) (Amostra RF – 46B – nicóis paralelos). 43
- Figura 55** – Grão de zircão zonado e com possível núcleo herdado (Amostra RF – 08 – nicóis cruzados). 44
- Figura 56**– Grão de apatita com formato prismático e alongado em paragênese com biotita. Presença de pequenos grãos subédricos de epidoto substituindo o plagioclásio (círculo amarelo) e agregados (círculo vermelho) em contato com biotita (Amostra RF – 46B – nicóis paralelos). 44
- Figura 57**– Grão de apatita (Ap) com inclusões de zircão (Zrn) e titanita (Ttn) e em contato com epidoto (Ep). Observa-se, ainda, a presença de vários grãos de zircão (Zrn) (Amostra RF-20 – MEV/BSD). 45
- Figura 58** – Grão de allanita (All) subédrico com borda de alteração de epidoto (Ep) e incluso no plagioclásio (Pl) (Amostra EL-256 – MEV/BSD). 46
- Figura 59** – Pseudomorfo da allanita, envolto de epidoto (Ep) e associado a um mineral de óxido de Fe (Ox). A alteração da allanita é representada pela formação de um argilomineral e por cerianita (Ce) (Amostra RF-20 – MEV/BSD). 46
- Figura 60** – Grão de titanita primária (Ttn<sub>1</sub>) com formato losangular, cerca de 1 mm de tamanho e sobrecrecimento de biotita secundária na sua borda (Amostra RF-02 – nicóis cruzados). 47
- Figura 61** – Grão de ilmenita (Ilm) envolto por titanita (Ttn) e com inclusões de zircão (Amostra RF-20 – MEV/BSD). 47

- Figura 62** – Grãos de titanita ( $Ttn_3$ ) anédrica preenchendo fraturas ao longo da região do contato entre dois grãos de plagioclásio conjuntamente com biotita e sericita (Amostra RF-02 – nicóis cruzados). 47
- Figura 63** – Grão de microlina anédrica preenchendo os espaços entre grãos de plagioclásio, bem como penetrando a face do mesmo (Amostra VH-53 – nicóis cruzados). 48
- Figura 64** – Grão de microlina (Mc) anédrico e com luminescência azulada forte penetrando na face do plagioclásio (Pl) com luminescência azulada mais fraca (Amostra RF-25 – catodoluminescência). 48
- Figura 65** – Grão de granada subédrico e límpido (Amostra EL-256 – nicóis paralelos). 49
- Figura 66** – Epidoto anédrico e radial envolvendo grão de allanita e gerando a textura “ovo frito” (Amostra VH-53 – nicóis cruzados). 50
- Figura 67** – Grãos de carbonato com forma anédrica e substituindo o plagioclásio (Amostra EL-255-C2– nicóis cruzados). 50
- Figura 68** – Imagem representativa para a ordem de cristalização onde zircão (Zrn) está incluso na apatita (Ap) e ilmenita (Il). Destaca-se, ainda, a transformação da ilmenita (Il) para titanita (Ttn) (Amostra RF-20 – MEV/BSD). 51
- Figura 69** – Alguns dos principais minerais da amostra LE-1A em estereomicroscópio: (a) ilmenita; (b) pirita limonitizada; (c) epidoto; (d) monazita; (e) zircão; (f) limonita; (g) Óxido de Ti; (h) granada com capa de alteração. 54
- Figura 70** – Alguns dos principais minerais da amostra LE-3A em estereomicroscópio: (a) ilmenita; (b) pirita limonitizada; (c) zircão; (d) granada; (e) epidoto; (f) microlita. 57
- Figura 71** - Alguns dos principais minerais da amostra LE-4 em estereomicroscópio: (a) ilmenita; (b) limonita; (c) epidoto; (d) zircão; (e) pirita limonitizada; (f) óxido de Ti. 60
- Figura 72** - Alguns dos principais minerais da amostra R-01 em estereomicroscópio: (a) ilmenita; (b) limonita; (c) zircão; (d); granada (e) pirita limonitizada e (f) óxido de titânio. 63
- Figura 73** – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de grãos de ilmenita do ortognaisse Resende Costa.(a) grão límpido, sem inclusões ou alterações; (b), (c) e (d) exemplos dos principais tipos de inclusões. 65
- Figura 74** – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de inclusões encontradas nos grãos de ilmenita do ortognaisse Resende Costa. (a) monazita, (b) cassiterita, (c) biotita, (d) quartzo e moscovita, (e) columbita-(Fe), zircão e óxido de titânio e (f) possível samarskita. 66
- Figura 75** – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de inclusões ou exsoluções de óxido de ferro nos grãos de ilmenitado ortognaisse Resende Costa. (a) inclusões de óxido de ferro subarredondadas e orientadas no grão de ilmenita, (b) inclusões de óxido de ferro subarredondadas, com hábito tabular e orientadas no grão de ilmenita. Presença de buracos com forma tabular, orientados e que poderiam corresponder a

inclusões de óxido de ferro que foram removidas do grão de ilmenita, (c) inclusões de óxido de ferro dispostas de maneira irregular no grão de ilmenita e (d) buracos com forma tabular e orientados que poderiam corresponder a inclusões de óxido de ferro que foram removidas do grão de ilmenita. 67

**Figura 76** – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de alterações encontradas nos grãos de ilmenita do ortognaisse Resende Costa. (a) início da alteração ao longo de fraturas em um grão, (b) detalhe de fraturas radiais, (c) início da alteração nas bordas de um grão e (d) textura gráfica de alteração em um grão. 68

**Figura 77** – Gráfico Mn x Fe<sup>2+</sup> de substituição no sítio A nos grãos de ilmenita do ortognaisse Resende Costa. 69

**Figura 78** – Gráfico de ocupação dos sítios A e B (em *apfu* para 6 oxigênios) na ilmenita. 69

**Figura 79** – Diagrama ternário dos membros finais ilmenita (FeTiO<sub>3</sub>) – pirofanita (MnTiO<sub>3</sub>) – hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) do ortognaisse Resende Costa. 71

**Figura 80** – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de grãos de granada do ortognaisse Resende Costa. (a) grão limpo e com forma arredondada, (b) grão limpo, fraturado e com forma irregular, (c) e (d) grãos com inclusões. 71

**Figura 81** -Diagrama ternário dos membros finais grossulária – almandina – espessartita para granada. 72

**Figura 82** – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com exemplos de grãos de xenotímio do ortognaisse Resende Costa onde é possível de se observar as diversas microinclusões de minerais de Th e/ou U (pontos claros nas imagens a – c). (a) inclusão de biotita, (b) inclusão de apatita e associação com zircão e monazita, (c) inclusão de granada e (d) inclusão de óxido de Ti. 74

**Figura 83** – Distribuição em % em peso dos óxidos dos elementos terras raras leves (OTRL) e pesados (OTRP) nos grãos de xenotímio do ortognaisse Resende Costa. Dados obtidos por meio de análises semiquantitativas de MEV/EDS. 75

**Figura 84** – Diagrama ternário dos membros finais YPO<sub>4</sub> - (La-Gd)PO<sub>4</sub> - (Tb-Lu)PO<sub>4</sub> para os grãos de xenotímio do ortognaisse Resende Costa. 77

**Figura 85** – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de inclusões/associações presentes nos grãos de monazita do ortognaisse Resende Costa. (a) inclusões de moscovita e granada, além de várias pequenas inclusões cinzas e brancas de minerais de Th e/ou U, (b) presença de inclusão de xenotímio no grão de monazita e várias inclusões cinza/brancas de minerais de Th e/ou U, (c) associação de xenotímio no grão de monazita e várias inclusões cinza/brancas de minerais de Th e/ou U e (d) associação de zircão com o grão de monazita. 78

**Figura 86** – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com exemplos da morfologia dos grãos de zircão estudados no ortognaisse Resende Costa. (a) grão com zoneamento oscilatório, (b) grão fraturado e poroso, (c) grão com intercrescimento e (d) grão com buraco com a forma perfeita do que provavelmente teria sido um grão pretérito de zircão. 80

**Figura 87** – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de inclusões presentes nos grãos de zircão do ortogneisse Resende Costa. (a) inclusões de fluorapatita e biotita, além de zoneamento oscilatório; (b) inclusão de biotita e presença de zoneamento oscilatório; (c) inclusões de minerais de Th e/ou U; (d) inclusão de óxido de Fe; (e) inclusões de granada ao longo de uma fratura e de galena; (f) inclusões de quartzo e biotita.

81

**Figura 88** - Diagrama de classificação de zircão conforme proposta de Neves *et al.* (1974), com base na razão atômica  $100 * Hf / (Hf + Zr)$ .

82



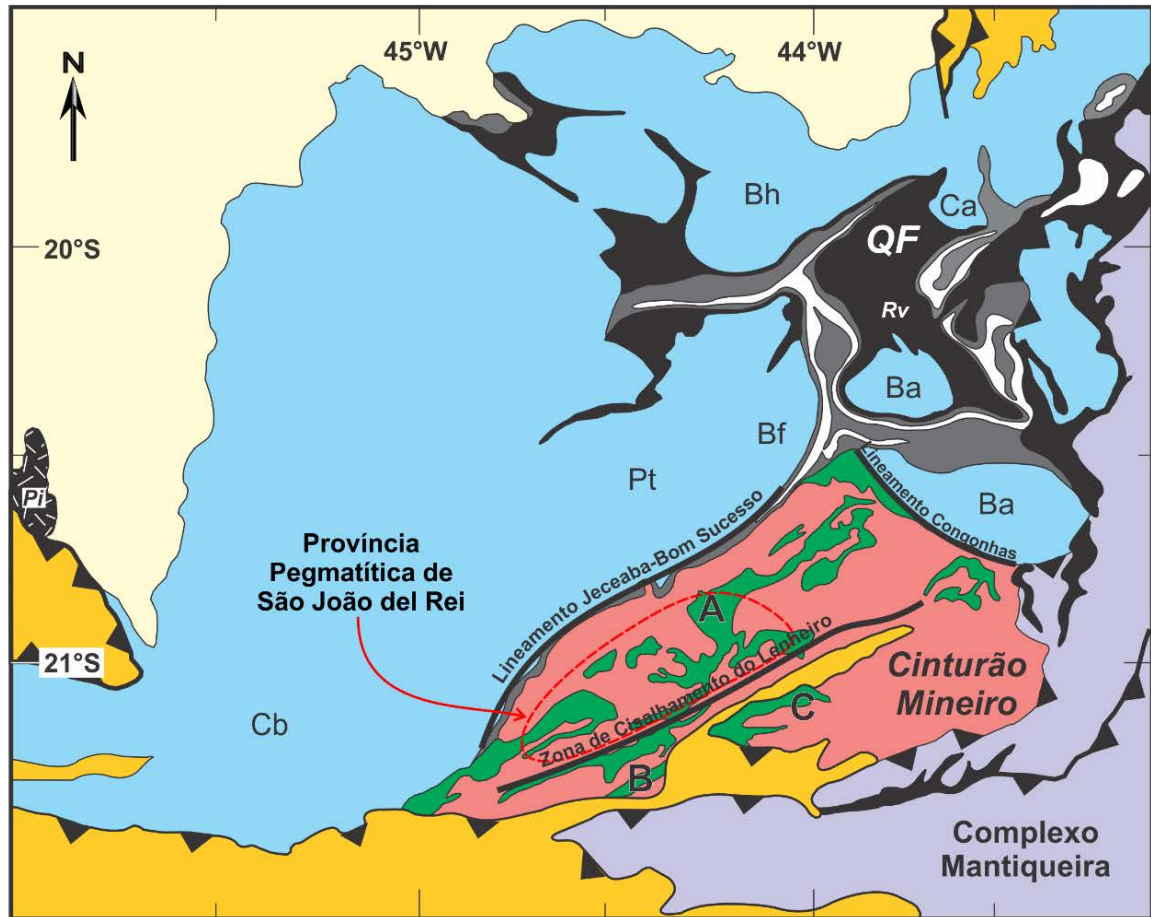
## 1 – INTRODUÇÃO

A borda meridional do cráton São Francisco se destaca por apresentar lado a lado rochas arqueanas, paleoproterozoicas e neoproterozoicas, cuja evolução geológica é bastante complexa (Figura 1). Dentre as rochas arqueanas são encontrados principalmente ortognaisses TTG dos complexos metamórficos, granitoides potássicos tardios e as rochas metavulcano-sedimentares do Supergrupo Rio das Velhas (Teixeira *et al.*, 2000; Lana *et al.*, 2013; Romano *et al.*, 2013), enquanto as rochas do Supergrupo Minas marcam a transição do Arqueano para o Paleoproterozoico (Figura 1). No Paleoproterozoico predominam as sequências metavulcano-sedimentares Rio das Mortes, Nazareno e Dores de Campos, bem como, ortognaisses e corpos plutônicos, que estão associados a evolução geológica do cinturão Mineiro (Ávila, 2000; Ávila *et al.*, 2010, 2014; Teixeira *et al.*, 2015; Barbosa *et al.*, 2015), que é considerado uma faixa móvel paleoproterozoica, que se desenvolveu ao redor do protocráton do São Francisco (Alkmin, 2004). A evolução geológica final do cinturão Mineiro é marcada pelo amplo desenvolvimento de um enxame de corpos pegmatíticos mineralizados em Sn-Nb-Ta, que foram reunidos na Província Pegmatítica de São João Del Rei por Pereira *et al.* (2003 e 2004) (Figura 1).

O estudo de corpos ígneos a partir da combinação de suas feições em campo com a caracterização petrográfica e geoquímica é aplicada na geologia para determinar a sequência de cristalização magmática, as transformações metamórficas e a definição do ambiente de formação dos principais corpos ígneos. Normalmente os estudos petrográficos envolvem, em primeiro plano, os minerais essenciais (quartzo, feldspatos, micas e anfibólios) e, mais raramente, alguns acessórios, com destaque para aqueles mais comumente encontrados como zircão, granada, allanita, apatita e titanita. Porém quase nunca se detalha a química mineral das fases acessórias, comuns ou não, incluindo neste contexto os minerais opacos. Esse é o caso da grande maioria dos corpos plutônicos do cinturão Mineiro, onde estudos petrográficos preliminares foram amplamente desenvolvidos (Vasquez, 2009; Souza, 2009; Guimarães, 2010; Oliveira, 2011; Stohler, 2011; Silva, 2012; Vasconcelos, 2013; Guerra, 2014), porém carecendo de uma caracterização mineralógica de maior detalhe, principalmente envolvendo a química mineral das fases essenciais e acessórias. Nesse contexto, o presente trabalho pretende contribuir para a caracterização mineralógica e a química mineral das fases essenciais e acessórias do ortogneisse Resende Costa, que corresponde a um dos principais corpos do cinturão Mineiro.

O ortogneisse Resende Costa foi selecionado para ser caracterizado mineralogicamente tendo em vista que esse corpo já foi estudado quanto a sua caracterização petrográfica (Souza, 2013), geoquímica e geocronologia (Teixeira *et al.*, 2015), porém nada

relativo à sua mineralogia e química mineral. Destaca-se também que o ortogneisse Resende Costa é cortado por um enxame de corpos pegmatitos mineralizados em minerais de Sn-Nb-Ta, sendo que esses corpos podem estar espacial e geneticamente relacionados ao referido ortogneisse ou ao metagranitoide Ritápolis e a Província Pegmatítica de São João Del Rei.



- Grupo Bambuí**
- Faixas Supracrustais (Meso- a Neoproterozoico):** Sequências metassedimentares São João del Rei, Carandaí e Andrelândia (xistos, filitos, mármore, quartzitos).
- Complexo Metamórfico Mantiqueira (Paleoproterozoico):** Ortogneisses de alto grau, anfibolitos, metaultramáficas, granulitos ácidos e básicos, kinzingitos e corpos plutônicos não deformados.
- Cinturão Mineiro (Paleoproterozoico):** Corpos plutônicos, incluindo ortogneisses (tonalítico, trondhjemítico, granodiorítico, granítico), gabro, diorito, quartzo-diorito, granodiorito, granito, vulcânicas félsicas e rochas subvulcânicas de fácies xisto verde a anfibolito.
- Sequências Metavulcanossedimentares (Paleoproterozoico):** A - Rio das Mortes (anfibolitos, filitos, gonditos); B - Nazareno (metakomatiitos, anfibolitos, filitos, quartzitos e gonditos) e C - Dores de Campos (anfibolitos, metaultramáficas vulcânicas e plutônicas, quartzitos, filitos e gonditos).
- Supergrupo Minas (Paleoproterozoico - Sideriano):** Rochas supracrustais de fácies xisto verde a anfibolito baixo. Rochas metassedimentares clásticas e químicas (cinza) e BIFs tipo Lago Superior (branco).
- Supergrupo Rio das Velhas (Rv - Neoarqueano):** *Greenstone belts* de fácies xisto verde a anfibolito baixo. Metavulcânicas komatiíticas, toleíticas e calcio-alcálicas, metavulcanoclásticas, rochas metassedimentares clásticas e químicas (QF: Quadrilátero Ferrífero, incluindo BIFs tipo Algoma).
- Complexos Gnáissico-migmatíticos (Meso- a Neoarqueano):** TTGs de alto grau, granulitos, intrusões máficas e ultramáficas metamorizadas, sequências metavulcanossedimentares, intrusões tonalíticas a graníticas e charnockitos. Cb - Campo Belo, Pt - Passatempo, Bf - Bonfim, Ba - Bação, Bh - Belo Horizonte, Ca-Caeté.
- Greenstone belt Piumhi (Pi - Mesoarqueano):** Metaultramáficas, metamáficas e metafélsicas plutônicas e vulcânicas e rochas metassedimentares.

Figura 1 – Mapa geológico do cinturão Mineiro com a localização da Província Pegmatítica de São João del Rei (Ávila *et al.*, 2014).

## 2 - OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo a caracterização mineralógica, petrográfica e de química mineral do ortognaisse Resende Costa visando comparar esses dados com a evolução geológica do referido corpo.

## 3 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área estudada situa-se no centro sul do estado de Minas Gerais (Figura 2), mais precisamente entre as cidades de Resende Costa, São Tiago, Coronel Xavier Chaves e Lagoa Dourada, englobando a parte oeste da folha Resende Costa (SF-23-X-A-V-4) e a porção leste da folha Jacarandira (SF-23-X-A-V-3).

A distância aproximada entre Rio de Janeiro e Resende Costa é de 371 km e o acesso à região é inicialmente realizado a partir da BR-040, que liga a cidade do Rio de Janeiro a de Belo Horizonte, passando nas proximidades de Juiz de Fora e Barbacena (Figura 3). Próximo a esta última, faz-se uso da entrada para a BR-265, que interliga as cidades de Barbacena e Lavras, passando por Barroso, Tiradentes e São João del Rei (Figura 3), que pode ser considerada como a principal cidade da região. A partir de São João del Rei, segue-se pela BR-383 por cerca de 18km até o trevo relativo ao início da LMG-839, que dá acesso à cidade de Resende Costa. A partir desta estrada foram utilizadas várias vias não asfaltadas para seleção e coleta do material do ortognaisse Resende Costa, bem como foram utilizadas estradas não asfaltadas que interligam a cidade de Resende Costa com as de São Tiago, Coronel Xavier Chaves e Ritópolis.

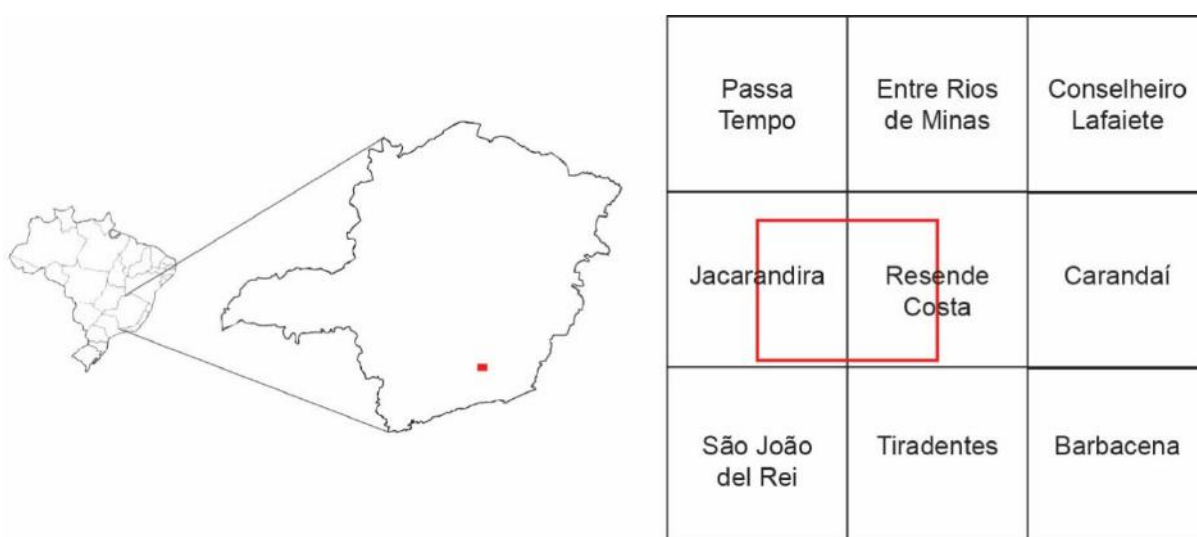


Figura 2 - Localização das folhas topográficas do IBGE na escala de 1:50.000 em relação ao estado de Minas Gerais, destacando em vermelho a área aproximada de amostragem do ortognaisse Resende Costa.



Figura 3 - Imagem mostrando as principais vias de acesso (estradas com diferentes cores) à área de estudo em Resende Costa (B). Utilizou-se como ponto de partida a cidade do Rio de Janeiro (Fonte: *Google Earth*).

## 4 - MATERIAIS E MÉTODOS DE TRABALHO

Esta seção é dedicada à descrição detalhada das fases envolvidas na preparação dessa monografia. Optou-se por dividir esse capítulo em várias etapas, como segue abaixo.

### 4.1 - ETAPA PRÉ-CAMPO

Na etapa pré-campo, buscou-se reestruturar o acervo bibliográfico referente à área de estudo a partir da leitura e arquivamento de teses, relatórios, monografias e artigos publicados.

Foi igualmente realizada a montagem da base cartográfica para o trabalho de campo, baseada nas cartas topográficas do IBGE Jacarandira (SF-23-X-A-V-3) e Resende Costa (SF-23-X-A-V-4) na escala de 1:50.000, que foram ampliadas para escala 1:12.500. Dessas cartas retirou-se a área de interesse, que se situa no entorno da cidade de Resende Costa e foram plotados os contatos geológicos compilados de Guimarães (2010) e Souza (2013), bem como os pontos de campanhas anteriores envolvendo as lâminas petrográficas já confeccionadas (Tabela 1) e os pontos de amostragem de saprólitos do ortognaisse Resende Costa (Tabela 2).

Tabela 1 - Lista das lâminas petrográficas de campanhas anteriores que foram estudadas por Souza, 2013 e Guimarães, 2010.

<b>Código do Ponto</b>	<b>Litologia</b>	<b>Coodenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>
<b>RF-02</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	579206	7686265
<b>RF-08</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	581348	7684222
<b>RF-20</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	580586	7682562
<b>RF-21</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	579982	7683050
<b>RF-25</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	579505	7684487
<b>RF-26</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	573522	7683976
<b>EL-163-A</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	576798	7685286
<b>EL-194-A</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	577950	7684713
<b>EL-255A</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	579182	7686211
<b>EL-255C1</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	579182	7686211
<b>EL-255C2</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	579182	7686211
<b>EL-256</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	578561	7684445
<b>EL-258A</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	579523	7683939
<b>EL-257</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	579527	7684403
<b>VH-53</b>	Ortognaisse Resende Costa facies grossa	583256	7683966

Tabela 2 – Lista de pontos de coletas de amostras de concentrado de minerais pesados por parte da equipe do projeto e que foram estudados por estereomicroscopia.

<b>Código do Ponto</b>	<b>Litologia</b>	<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>
<b>LE-1A</b>	Ortognaisse Resende Costa	0581524	7684135
<b>LE-3A</b>	Ortognaisse Resende Costa	0577403	7686488
<b>LE-4</b>	Ortognaisse Resende Costa	0578649	7682255
<b>VH-48</b>	Ortognaisse Resende Costa	0582937	7684190



## 4.2 - ETAPA DE CAMPO

A coleta do material saprolítico (Figura 4) baseou-se na escolha de locais de amostragem com feição homogênea, ou seja, sem a presença de diques, veios ou xenólitos que pudessem influenciar os resultados. Posteriormente foi realizada a limpeza da área, retirando-se com uma pá a parte superior de cobertura vegetal ou solo, para que não houvesse contaminação (Figura 5 a). Em seguida, o material foi acondicionado em um saco plástico até totalizar cerca de 20 kg (Figura 5 b). No total, foram coletadas 4 amostras do ortognaisse Resende Costa (Tabela 2).

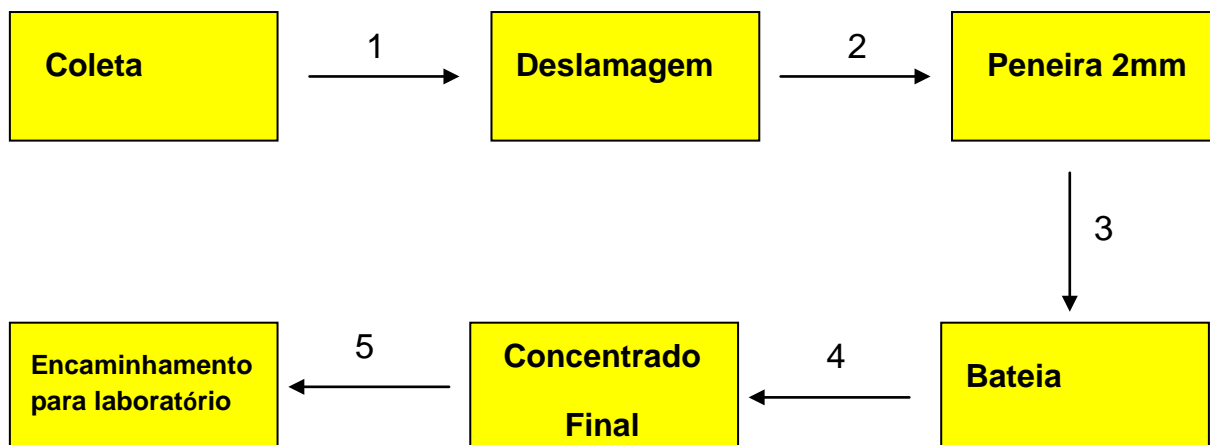


Figura 4 – Fluxograma simplificado das etapas de campo referentes a amostragem, obtenção do concentrado e seu encaminhamento para laboratório.



Figura 5 – Etapas de coleta da amostra de saprólito em campo. **a** – Limpeza do afloramento; **b** – Coleta de cerca de 20 kg de saprólito.

Em seguida, as amostras foram submetidas à deslamagem para a retirada da fração argilosa em uma drenagem próxima com água corrente e limpa (Figura 6a-b). Essa subetapa consiste em colocar o material saprolítico coletado em baldes, que são posteriormente preenchidos com água e remexidos com a mão no intuito de que os minerais argilosos entrem

em suspensão. Espera-se, então, a decantação dos minerais mais densos e retira-se a água turva, começando-se, em seguida, um novo ciclo (Figura 6a-b). A deslamagem só é considerada como finalizada quando a água descartada do balde estiver límpida ou próxima disso.



Figura 6 – Deslamagem do saprólito em uma drenagem ativa. **a** – Desagregação da amostra com a mão; **b** – Eliminação da argila e do silte em suspensão a partir da retirada da água.

Posteriormente, passa-se para o peneiramento a cerca de 2mm (Figura 7a-b), onde o material mais grosso é observado, catado (caso haja algum mineral de interesse) e em seguida descartado (Figura 7a-b). De forma oposta, o material mais fino é bateado com o intuito de se concentrar os minerais pesados, tendo em vista que grande parte dos minerais mais leves, representados pelo quartzo e feldspato, são eliminados durante o processo (Figura 8a-b). Ao fim, o concentrado de minerais pesados resultante da concentração em bateia é embalado em um saco plástico e etiquetado com o nome do ponto que lhe deu origem (Figura 9). Com o encerramento desta subetapa, os concentrados são encaminhados para o laboratório (Figura 4).



Figura 7 – Separação granulométrica com peneira com abertura de 2 mm. **a** - Processo de peneiramento para a retirada do material maior que 2 mm; **b** - Resíduo maior que 2 mm.





Figura 8 – Utilização da bateia para concentração gravítica dos minerais pesados. **a** – Início do processo com o material menor que 2 mm separado com o uso da peneira; **b** – Concentrado parcial com resíduos compostos dos minerais pesados no fundo da bateia.



Figura 9 – Concentrado final acondicionado em um recipiente plástico (cerca de 10 g) que será em seguida preparado no laboratório.

### 4.3 - ETAPA DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Esta etapa envolve uma série de subetapas que objetivam a preparação das amostras para serem analisadas em lupa binocular mais facilmente (Figura 10).

A primeira dessas subetapas é o processamento do concentrado no ultrassom (Figura 10) para a retirada do material argiloso presente sob a forma de agregados de grãos ou incrustado nas bordas dos minerais de interesse. Para a realização desta subetapa coloca-se as amostras em um *becher* com água e, em seguida, posiciona-se o material no ultrassom, que também é preenchido com água, até atingir um nível similar à água no bécher (Figura 11 a). O ultrassom é um aparelho que cria vórtex por cavitação, induzindo fortes vibrações que fazem liberar o material em agregados ou incrustado, inclusive argilas presentes nos minerais de interesse, em geral sem quebrar o mineral chave para o estudo. Depois de limpas no ultrassom, as amostras são levadas para a estufa a 40°C (Figura 10), a fim de que sequem através da evaporação da água.



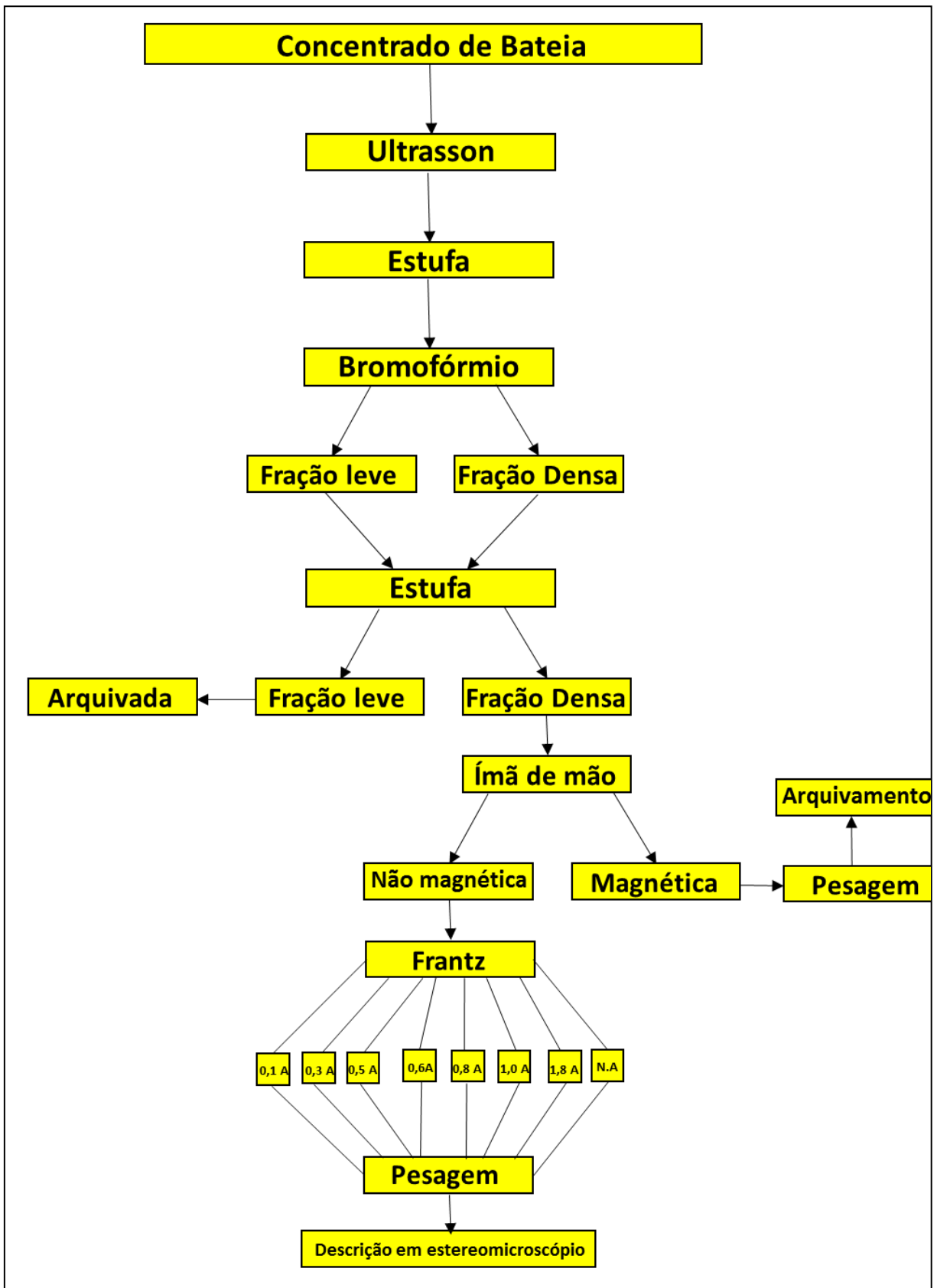


Figura 10 - Fluxograma simplificado das etapas de preparação das amostras no laboratório para estudo em lupa binocular.

Passa-se, então, para a próxima subetapa, onde foi utilizado o bromofórmio ( $d = 2,89$  kg/L) conjuntamente com um balão *Erlenmeyer*, funis, filtros de papel, haste de madeira e uma bomba de vácuo. Nessa subetapa executa-se a separação da amostra por densidade, sendo que o bromofórmio fica retido no funil de separação superior. O concentrado é colocado no bromofórmio e os minerais densos irão decantar e se concentrar no fundo do recipiente com o líquido denso (Figura 11 b), sendo possível de separá-los dos minerais leves a partir do recolhimento do material em filtros de papel. Ao final do processo a amostra é separada em minerais “leves” e em minerais “densos”. Posteriormente o bromofórmio é separado da amostra por filtração, e os minerais lavados com álcool e secos em estufa a  $60^{\circ}\text{C}$ .

O material "leve" é pesado e arquivado, enquanto o material "denso" é pesado e direcionado para a fase inicial de separação magnética.

Na separação magnética inicial é utilizado o ímã de mão de ferrite (Figura 12 a). O objetivo principal dessa fase é a separação da magnetita e da pirrotita (quando presentes) dos demais minerais do concentrado visando facilitar o processamento da amostra no separador magnético isodinâmico *Frantz*. O material não ferromagnético é direcionado para o processamento no separador magnético isodinâmico *Frantz* (Figura 12 b).



Figura 11: **a** – Limpeza da amostra com uso do ultrassom, extraíndo o material argiloso dos grãos; **b** – Separação dos minerais pesados por densidade com bromofórmio.

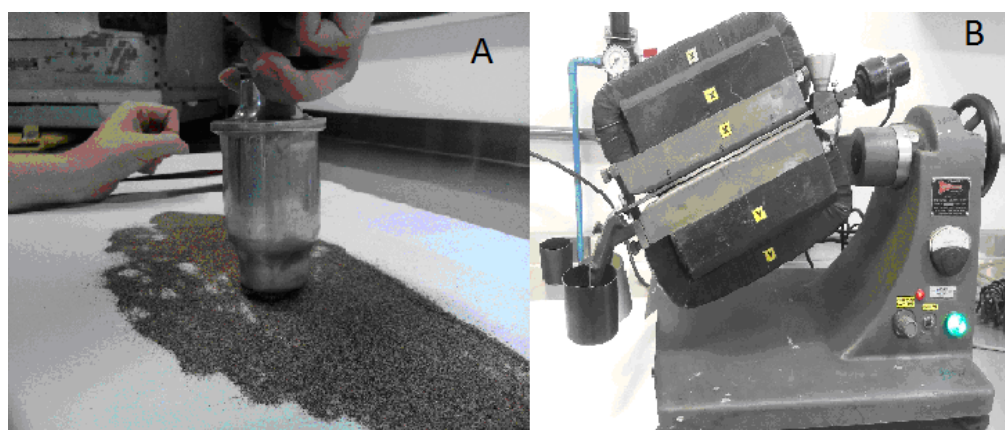


Figura 12: **a** – Separação magnética com ímã de mão; **b** – Separador magnético isodinâmico Frantz.

Basicamente, o separador magnético isodinâmico *Frantz* é um eletroímã com controle preciso de corrente nas bobinas (com relação linear entre corrente e densidade de campo magnético) e equipado com um funil em sua abertura e com uma calha que se subdivide em dois compartimentos, sendo um caminho para os minerais magnéticos e o outro para os minerais não magnéticos. Durante o processamento, as amostras são colocadas no alimentador e descem para a calha por intermédio de vibrações, que podem ser configuradas de acordo com a intensidade de interesse e são variáveis durante a separação. As inclinações da calha e do ímã também podem ser configuradas, visando uma separação mais eficiente dos minerais, tendo sido escolhida a inclinação frontal de 15° e lateral de 10°, as quais são adotadas como padrões. A combinação da inclinação com a corrente nas bobinas propicia uma melhor separação dos minerais da amostra nas amperagens escolhidas. A corrente máxima é de 1,8 ampères, sendo que em cada amperagem uma fase diamagnética é separada. As amperagens selecionadas para este trabalho foram: 0,1A (para separação de resquícios de magnetita não retirada na subetapa que utiliza o ímã de mão, pois esta pode entupir a calha do *Frantz*), 0,3, 0,5, 0,6, 0,8, 1,0 e 1,8A. As frações processadas foram, então, acondicionadas em pequenos potes com uma etiqueta que indica o código do ponto e a amperagem de sua separação (Figura 13) e pesadas antes de serem estudadas em estereomicroscópio.



Figura 13: Frações finais do separador magnético isodinâmico *Frantz* nas amperagens utilizadas.

#### 4.4 - ETAPA DE ANÁLISE LABORATORIAL

Esta etapa envolve uma série de métodos de análises que visam facilitar a descrição mineralógica e o estudo da química mineral tanto do material proveniente dos saprólitos,

quanto das lâminas confeccionadas a partir de amostras coletadas nas campanhas anteriores (Figura 14).

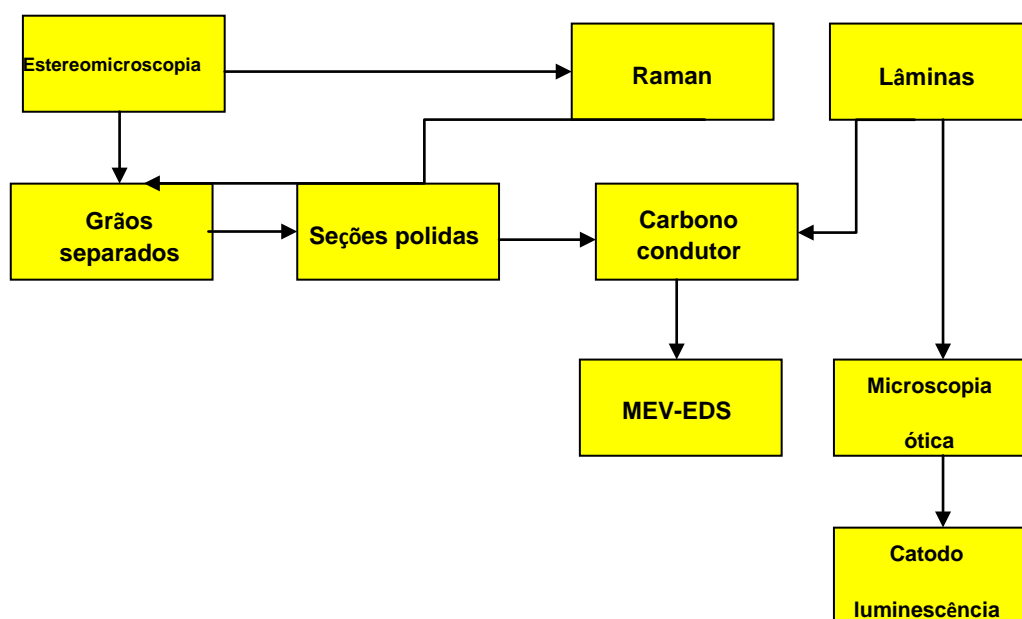


Figura 14 - Fluxograma simplificado das etapas de análises dos concentrados de minerais pesados e das lâminas petrográficas.

#### 4.4.1. Estereomicroscopia e espectroscopia Raman

Utilizando-se as amostras preparadas nas etapas anteriores, o passo seguinte foi o seu estudo em um microscópio estereoscópico ZEISS Discovery.V8, objetivando a descrição mineralógica detalhada (qualitativa e quantitativa estimada) de cada uma das frações oriundas do separador magnético isodinâmico *Frantz*. Para essa caracterização foram utilizadas algumas das propriedades dos minerais, dentre as quais sistema cristalino, cor, brilho, clivagem e fratura. Esta análise foi realizada colocando-se a amostra da amperagem selecionada em uma placa de *Petri*, que em seguida vai para o estereomicroscópio sobre um fundo branco ou preto. A quantificação do material foi realizada a partir da estimativa da porcentagem de cada um dos tipos de minerais encontrados no campo visual da amostra. Com a ajuda de uma pinça não magnética, minerais de importância para o trabalho foram removidos da amostra e guardados separadamente em um porta amostra (Figura 15 a) a fim de que fossem confeccionadas seções polidas para análise por MEV-EDS (Figura 15 b).

Quando é encontrado um mineral com dúvida em relação a sua identificação, procede-se à análise por um microespectrômetro Raman dispersivo modelo LabRAM800 HR da Horiba Jobin Yvon, equipado com um detector CCD refrigerado termoeletronicamente a -70°C (efeito Peltier), grade de difração de 1800 linhas/mm, com resolução espectral de aproximadamente  $0,5 \text{ cm}^{-1}$  e com microscópio petrográfico Olympus BX41 acoplado. No Raman ocorre uma interação entre radiação eletromagnética (luz monocromática) com um

meio físico (a amostra). Durante essa interação, a luz pode ser absorvida, refratada, refletida ou apresentar uma combinação entre esses efeitos físicos, sendo que, para a espectroscopia Raman, o espalhamento desta radiação é o processo mais importante.



Figura 15: **a** - Porta amostra para os grãos. **b** -Seções polidas preparadas a partir dos grãos separados.

#### 4.4.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A partir dos grãos minerais selecionados na estereomicroscopia foram preparadas diversas seções polidas (Figura 15 b) utilizando-se formas específicas para as amostras, sendo que na base do suporte é colado uma fita dupla face onde são grudados os grãos selecionados. Essa fase foi realizada com auxílio de uma lupa comum para uma melhor visualização da colagem dos grãos e para que nenhum grão seja perdido. Após essa fase é preparada a resina epóxi (composta de 5 g de resina Epofix e 0,6g de seu catalisador) para cada seção polida a ser confeccionada. Ambos são misturados e colocados em uma câmara a vácuo para retirada das bolhas que são formadas durante a mistura. Após esse procedimento o suporte da seção é preenchido com cerca de 5 g da resina e é colocado para curar em temperatura ambiente. Etiquetas são confeccionadas com a nomenclatura da amostra. Com a resina solidificada a etiqueta é colada no verso. Esse procedimento também utiliza preparo de mais resina com catalisador, na mesma medida anterior, só que desta vez a quantidade a ser preparada é de apenas 1 g para cada seção sendo utilizada uma estufa a 25°C após o vácuo, pois ela acelera o tempo de cura do material. Depois de todo esse procedimento as seções são levadas para a politriz Struers TegraPol 15, para serem desbastadas e polidas. As amostras polidas devem ser recobertas com carbono, com a finalidade de se tornarem condutoras e com isso permitindo a aquisição de imagens no MEV/EDS.

A análise por microscopia eletrônica de varredura com microanálise por energia dispersiva (MEV-EDS) dos grãos selecionados na fase por estereomicroscopia foi realizada no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) em um microscópio eletrônico de varredura modelo FEI Quanta 400, acoplado a espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDS – Bruker Nano Quantax 800).

O microscópio eletrônico de varredura foi operado em alto vácuo, tensão de aceleração de elétrons de 20kV e *spot size* 5. O equipamento foi calibrado com padrão de cobre de pureza 99,995% sendo que o tempo de aquisição do espectro para o padrão e para cada análise foi de 60 segundos.

As imagens do microscópio eletrônico de varredura foram geradas principalmente por detector de elétrons retro-espalhados (*backscatter electrons detector* - BSD), onde os níveis de cinza são proporcionais ao peso atômico médio dos elementos excitados pelo feixe de elétrons durante a varredura, resultando em imagens composicionais com tons mais claros e escuros representando, respectivamente, as fases de pesos atômicos médios mais e menos elevados.

#### **4.4.3 Microscopia Óptica**

Todas as lâminas do ortognaisse Resende Costa foram descritas e fotografadas em um microscópio óptico ZEISS AXIOSKOP 40 de luz transmitida com objetivas de 2,5, 5, 10, 20 e 50x de aumento, acoplado a uma câmera ZEISS Axio Cam MRc, no Departamento de Geologia e Paleontologia do Museu Nacional.

A descrição tem como objetivo detalhar a mineralogia primária, acessória e secundária, assim como texturas, índice de cor da rocha, feições reliquias e de alteração dos minerais, com intuito de se obter a classificação da amostra no diagrama QAP para descoberta do tipo de protólito ígneo. Para tal foi utilizado um roteiro de descrição de lâminas (Tabela 3).

#### **4.4.4 Catodoluminescência**

Três lâminas foram selecionadas para análise por catodoluminescência (Tabela 4). Foi utilizado um microscópio ótico de luz polarizada transmitida e refletida ZEISS Imager.M2m, uma câmara de vácuo com um tubo gerador de um feixe de elétrons e um sistema de captura de imagens AxioCam HRc, a corrente de emissão utilizada foi de 286  $\mu$ A e a voltagem de 15.8 kV por um tempo de exposição de 2 segundos e um equipamento que produz catodoluminescência Citl modelo MK5-2. Nesse equipamento a lâmina é bombardeada por um feixe de elétrons e a resposta é a emissão de luz em diferentes comprimentos de onda. O comprimento e a intensidade da emissão de luz caracterizam o mineral e a distribuição de certas impurezas presentes na sua estrutura. A caracterização da catodoluminescência é feita pelas respostas de intensidade, cor (análise espectral), fosforescência e polarização.

Tabela 3 – Roteiro para descrição das lâminas petrográficas.

Ordem de descrição	Feições a ser descritas
1	% de minerais máficos (índice de cor)
2	Granulação
3	Textura
4	Mineralogia global -Minerais essenciais -Minerais acessórios ou traços -Minerais secundários
5	Descrição de cada mineral -Forma dos grãos      -Tamanho -Inclusões              -Intercrescimento -Transformações      -Reações ígneas -Reações metamórficas -Borda de reações -Outras feições importantes
6	Ordem de cristalização
7	Classificação no QAP
8	Desenho da seção tipo -Mineralogia              -Textura da rocha -Granulação              -Inclusões

Tabela 4 – Lâminas separadas para estudo por catodoluminescência.

Código do ponto	Litologia estudada	Coordenada X	Coordenada Y
<b>RF-20</b>	Ortoogneiss Resende Costa fácies grossa	580586	7682562
<b>RF-26</b>	Ortoogneiss Resende Costa fácies grossa	573522	7683976
<b>EL-256</b>	Ortoogneiss Resende Costa fácies grossa	578561	7684445

#### 4.5. ETAPA DE ESCRITÓRIO

Esta etapa iniciou-se com a obtenção das folhas Resende Costa e Jacarandira no site do IBGE (em formatos raster e vetorial), que contém informações como curvas de nível, drenagem, estradas, etc. Posteriormente, utilizou-se o programa ArcGIS®10.3 para a compilação do mapa geológico e a inserção dos pontos de estudo. A camada de pontos foi inserida a partir de uma tabela do Excel e georreferenciada para que pudesse ser importada pelo ArcGIS®10.3.

No tratamento de imagens de petrografia e MEV foi utilizado o programa Corel Draw® X8, enquanto a confecção das tabelas, bem como a redação do texto foi realizada diretamente no Microsoft Office® Word 2007.

Com os resultados advindos da petrografia, catodoluminescência e MEV foi realizada a interpretação dos dados visando a elaboração final do texto.

## 5 – NOMENCLATURA ADOTADA PARA OS LITÓTIPOS

Na presente monografia foram utilizadas propostas de Williams *et al.* (1970) para a granulação (Tabela 5) e nomenclatura de texturas (Tabela 6), enquanto que para o índice de cor (Tabela 7) seguiu-se a proposição de La Maitre (2002).

Também foi utilizada a subdivisão dos litótipos em rochas félsicas (0-40% de minerais escuros), máficas (40-70% de minerais escuros) e ultramáficas (70-100% de minerais escuros).

Segundo a nomenclatura de Le Maitre (2002), o prefixo “orto” é utilizado para rochas metamórficas que possuem prótolito de natureza ígnea, enquanto que o prefixo “para” é adotado para as rochas de protólito de natureza sedimentar. Já o prefixo “meta” é utilizado para rochas que apresentam feições metamórficas e deformacionais, mas que preservam estruturas primárias. Em relação a corpos metamórficos, o termo gnaiss foi usado principalmente para rochas de granulação grossa, foliadas (com algum tipo de estrutura planar ou bandamento composicional) e composta preferencialmente de quartzo, feldspato e filossilicatos (Yardley *et al.*, 2004). Para a nomenclatura dos protólitos dos corpos foi utilizada a classificação petrográfica das rochas ígneas plutônicas (Figura 16), onde foram considerados os teores modais de quartzo, álcali-feldspato e plagioclásio.

Tabela 5 – Granulação adotada a partir do tamanho dos cristais (Williams *et al.*, 1970).

Granulação	Tamanho dos cristais
Fina	< 1 mm
Média	1 a 5 mm
Grossa	5 mm a 3 cm
Muito grossa	>3 cm

Tabela 6 – Subdivisão textural de rochas ígneas segundo a proposta de Williams *et al.* (1970).

Texturas	Descrição
Afanítica	Envolve minerais que não são reconhecíveis a olho nu ou com auxílio de lupa de 10x.
Fanerítica	Envolve minerais que são reconhecíveis a olho nu ou com lupa de 10x.
Equigranular	Minerais apresentam-se com tamanho semelhante.
Porfírica	Grãos maiores (fenocristais) envolvidos por uma matriz menor.
Seriada	Apresenta cristais com uma ampla variação de tamanho.

Tabela 7 – Índices de cor segundo a classificação de Le Maitre (2002) para rochas ígneas.

Índice de cor	% de minerais máficos
Hololeucocrática	0-5%
Leucocrática	5-35%
Mesocrática	35-65%
Melanocrática	65-90%
Holomelanocrática	90-100%



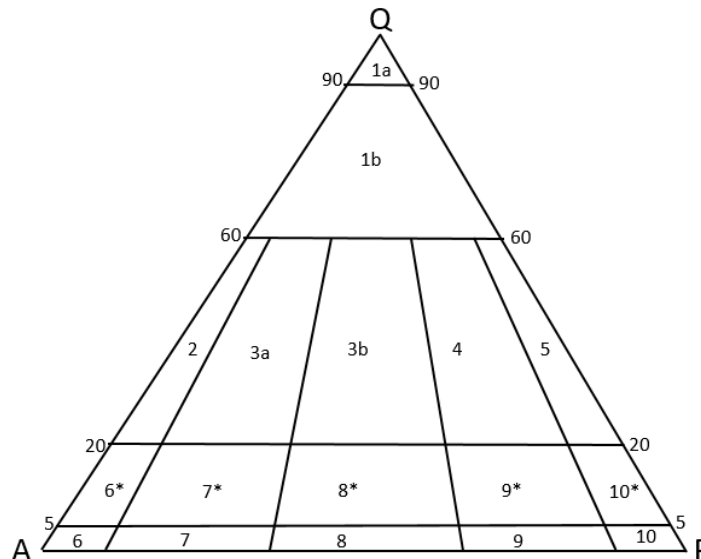


Figura16 – Diagrama QAP de Streckeisen (1976) utilizado para a classificação das rochas ígneas plutônicas com índice de cor inferior a 90%. 1a– Quartzolito (silexito); 1b– Granitoide rico em quartzo; 2– Álcali-feldspato granito; 3a– Sienogranito; 3b– Monzogranito; 4– Granodiorito; 5– Tonalito; 6\*- Quartzo álcali-feldspato sienito; 7\*- Quartzo sienito; 8\*- Quartzo monzonito; 9\*- Quartzo monzodiorito/Quartzo monzogabro; 10\*- Quartzo diorito/Quartzo gabro/Quartzo anortosito; 6- Álcali-feldspato sienito; 7- Sienito; 8- Monzonito; 9- Monzodiorito/Monzogabro; 10- Diorito/Gabro/Anortosito.

Para o grau de desenvolvimento dos grãos também foi utilizada a classificação de Williams *et al.* (1970), onde são diferenciados pelas características a seguir:

- i) Grão euédricos: possuem suas faces cristalinas bem desenvolvidas.
- ii) Grãos subédricos: suas faces cristalinas são desenvolvidas parcialmente.
- iii) Grãos anédricos: não apresentam faces cristalinas desenvolvidas.

Quanto a classificação metamórfica e textural, que envolve o tamanho dos grãos e as feições planares existentes, Yardley *et al.* (2004) propuseram as seguintes denominações:

- i) Filito - rocha com clivagem pronunciada, cujos filossilicatos não são identificados a olho nu;
- ii) Xisto - rocha caracterizada por alinhamento paralelo de filossilicatos, os quais são visíveis a olho nu;
- iii) Gnaisse - rocha com estrutura planar, tal como xistosidade ou bandamento composicional;
- iv) Anfibolito - utilizado para rochas constituídas essencialmente de hornblenda e plagioclásio, que apresentam foliação metamórfica.

Foi adotada uma nomenclatura padrão para a abreviação do nome dos minerais segundo Whitney e Evans (2010) (Tabela 8).

Para classificação do plagioclásio foi utilizado o diagrama ternário para feldspatos com proporções moleculares de Ab-An-Or (Figura 17) (Deer *et al.*, 1992).

Tabela 8 – Abreviaturas dos minerais (Whitney e Evans, 2010).

Nome	Simbologia	Nome	Simbologia	Nome	Simbologia
Apatita	Ap	Granada	Grt	Quartzo	Qz
Allanita	Aln	Ilmenita	Ilm	Samarskita	Smk
Biotita	Bt	Limonita	Lm	Sericita	Ser
Calcita	Cal	Microclina	Mc	Titanita	Ttn
Cassiterita	Cst	Mineral opaco	Opq	Torita	Th
Cerianita	Ce	Monazita	Mnz	Turmalina	Tur
Clinozoisita	Czo	Óxido de Fe	Ox	Xenotímio	Xtm
Epidoto	Ep	Pirita	Py	Zircão	Zrn
Galena	Gn	Plagioclásio	Pl	Zoisita	Zo

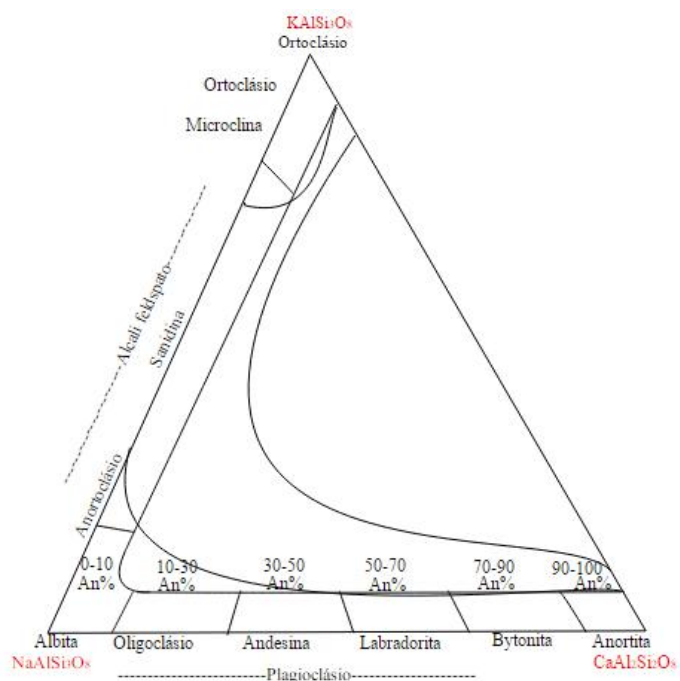


Figura17 – Diagrama ternário (Anortita-Albita-Ortoclásio) de elevada temperatura utilizado para classificação de feldspatos (modificado de Deer *et al.*, 1992).

## 6 – CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

### 6.1 CRÁTON SÃO FRANCISCO

O cráton São Francisco está localizado na porção centro-leste do Brasil abrangendo desde o litoral da Bahia até o Sul de Minas Gerais e é correlato ao setor ocidental do paleocontinente São Francisco – Congo (Silva *et al.*, 2015). Corresponde à área mais exposta do escudo Atlântico e sua configuração atual (Figura 18) é representada pela amalgamação de rochas arqueanas e paleoproterozoicas, que constituem seu embasamento, bem como é rodeado por faixas móveis brasilianas, sendo: a sudeste a faixa Araçuaí; a sul a faixa Ribeira; a oeste a faixa Brasília; a noroeste a faixa Rio Preto; a norte a faixa Riacho do Pontal; e a nordeste a faixa Sergipana.

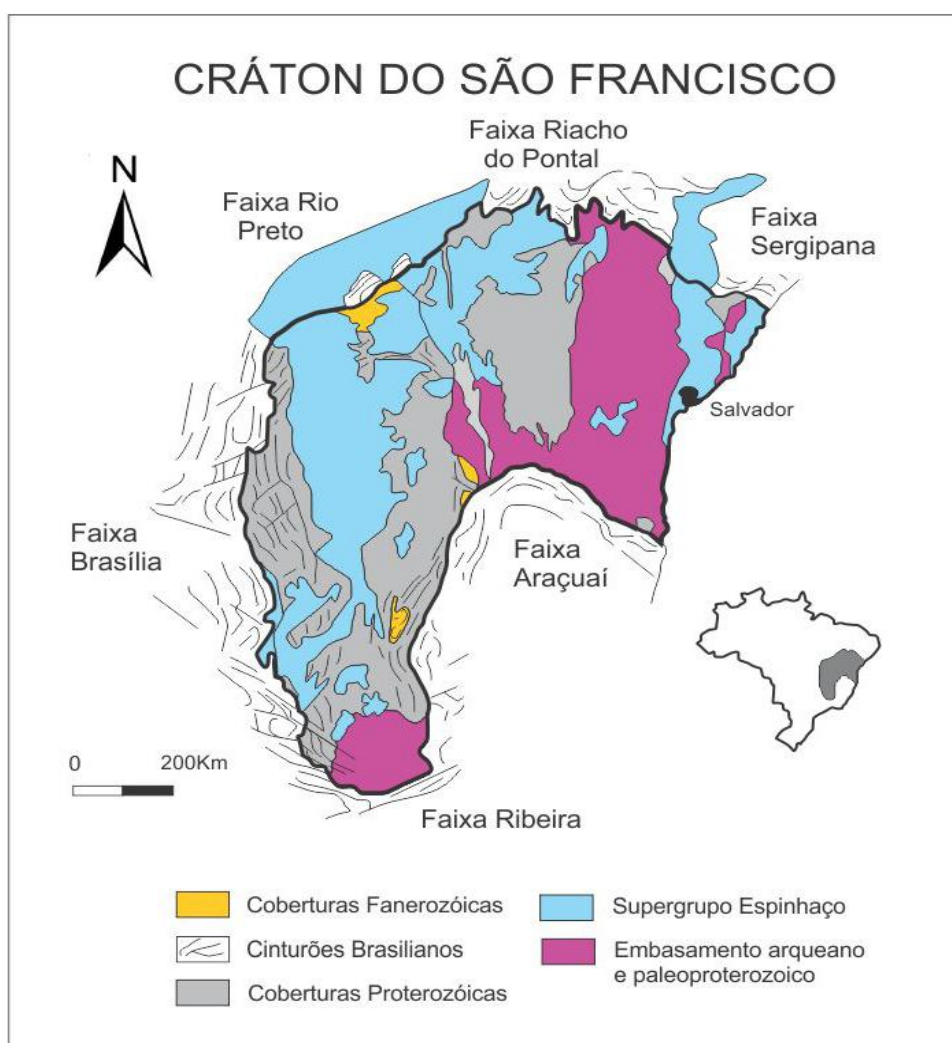


Figura 18 – Forma atual do cráton São Francisco e suas faixas marginais (Alkmim, 2004).

A evolução tectônica do cráton São Francisco envolveu a aglutinação e a amalgamação de blocos durante o Meso e Neoarqueano (3,2 - 2,7 Ga), seguido de um período de tafrogênia durante o fim do Neoarqueano e o Sideriano (2,6 - 2,3 Ga), onde teria ocorrido a

formação de bacias platformais e a deposição do Supergrupo Minas. Durante o Riáciano (2,35- 2,05 Ga), estas margens sofreram inversão tectônica, resultando em um grande evento amalgamador, com intensa geração de crosta continental e com o desenvolvimento de arcos magmáticos, que foram denominados de cinturão Mineiro e cinturão Bahia Oriental. Posteriormente um evento de tafrogênese do Estateriano ao Estoniano (1,8 – 1,0 Ga) formou a bacia do Espinhaço e um mais novo, do Toniano ao Criogeniano (1,0 – 0, 67 Ga) a bacia do São Francisco (Silva *et al.*, 2015).

O Cráton São Francisco foi subdividido em três setores (Figura 19), sendo eles: oriental onde se destacam rochas arqueanas e paleoproterozoicas; central onde predominam unidades Mesoproterozoicas do Supergrupo São Francisco; e ocidental onde destacam-se as rochas neoproterozoicas do Grupo Bambuí, as rochas arqueanas do Quadrilátero Ferrífero e as Paleoproterozoicas do Cinturão Mineiro (Silva *et al.*, 2015). O substrato Arqueano e Paleoproterozoico do cráton São Francisco aflora apenas nos setores oriental e ocidental, já que grande parte do interior do cráton é coberto por rochas sedimentares pertencente a bacia São Francisco.

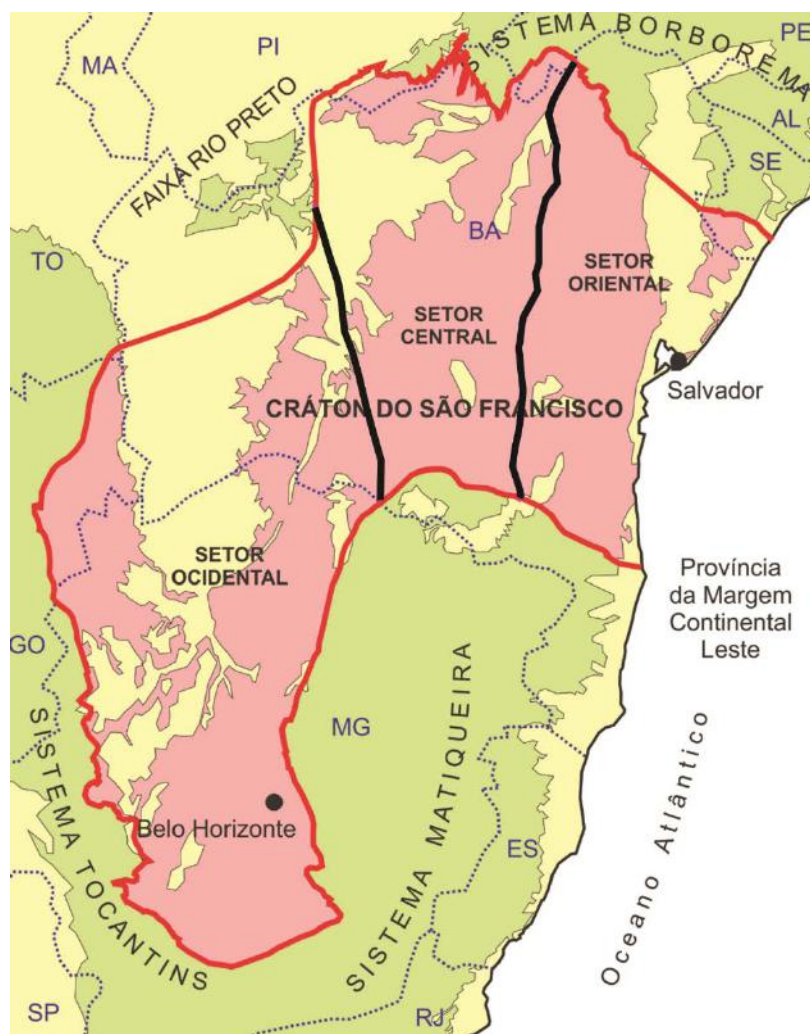


Figura 19 – Divisão dos setores do cráton São Francisco (Souza *et al.*, 2013).

A porção norte do cráton é formada por quatro principais segmentos crustais, os blocos Gavião, Jequié, Serrinha e Itabuna-Salvador-Curaça, enquanto a porção sul é representada pelos complexos graníticos gnáissicos dos complexos metamórficos, por sequências supracrustais arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas e paleoproterozoicas do Cinturão Mineiro (Farina *et al.*, 2015).

## 6.2 QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O Quadrilátero Ferrífero é a maior unidade geotectônica Precambriana do cráton São Francisco (Hartmann *et al.*, 2006) e pode ser subdividido em quatro principais unidades litoestratigráficas: i) complexos metamórficos compostos por gnaisses, migmatitos e granitoides Paleo, Meso e Neoarqueno; ii) Supergrupo Rio das Velhas que é formado por rochas metavulcânicas ultramáficas – máficas e metassedimentares arqueanas de baixo e médio grau e ii) Supergrupo Minas que é representado por rochas metassedimentares de baixo a médio grau do Neoarqueno ao Paleoproterozoico; e iii) rochas paleoproterozoicas do Grupo Itacolomi (metarenitos e metaconglomerados) (Farina *et al.*, 2015).

### 6.2.1 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas é caracterizado por uma sucessão de sequências tipo *greenstones belts*, constituídas principalmente por rochas metavulcânicas ultramáficas-máficas, carbonáticas, metapelíticas, metaconglomeráticas, metareníticas e BIF'S (Figura 20), que estão espacialmente associadas aos Complexos Metamórficos Arqueanos e aos granitoides potássicos tardios (Lana *et al.*, 2013 e Machado & Carneiro, 1992).

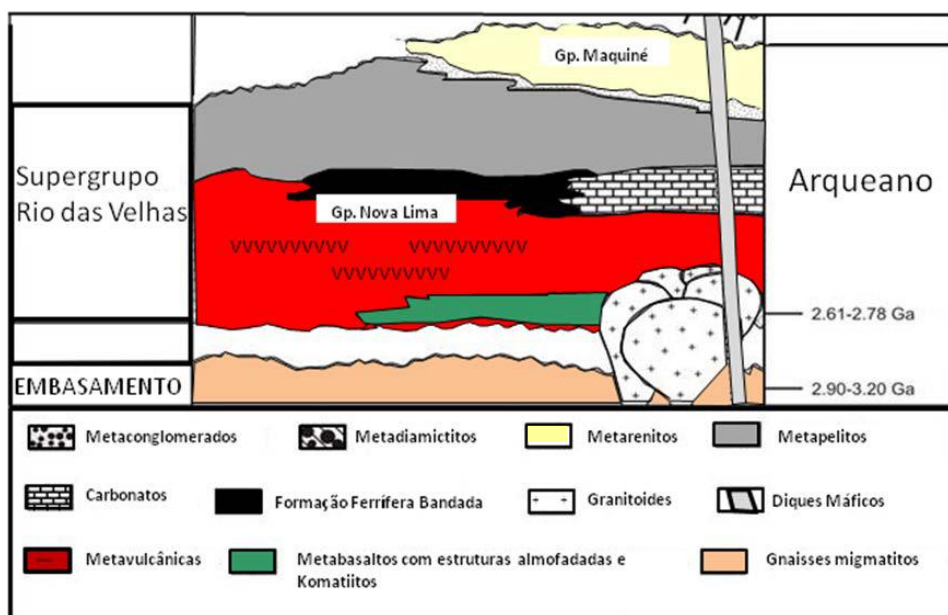


Figura 20 – Coluna estratigráfica simplificada do Supergrupo Rio das Velhas (Alkmin & Noce, 2006).



## 6.2.2 Granitos Potássicos Tardios

Os granitos potássicos tardios estão presentes em todos os Complexos Metamórficos Arqueanos do Quadrilátero Ferrífero (Figura 21) e compreendem cerca de 30% de crosta exposta nessa área. Eles intrudem os gnaisses TTG's sob forma de múltiplos *sheets* e batólitos. Dados geocronológicos U-Pb apontam que as referidas intrusões marcaram a estabilização da crosta arqueana (Figura 22), bem como apontam para o desenvolvimento de um núcleo cratônico rígido (Romano *et al.*, 2013). Estudos geoquímicos indicam que os granitóides potássicos variam de cálcio–alcalinos a shoshoníticos e de peraluminosos a metaluminosos (Noce *et al.*, 1998 e Romano *et al.*, 2013).

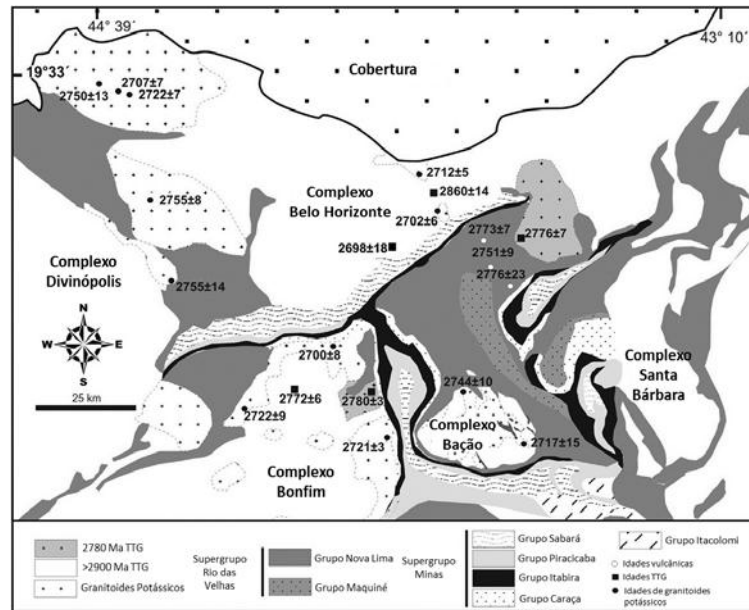


Figura 21 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero com idades U-Pb de ortogneisse e de rochas granitoides relevantes (Lana *et al.*, 2013).

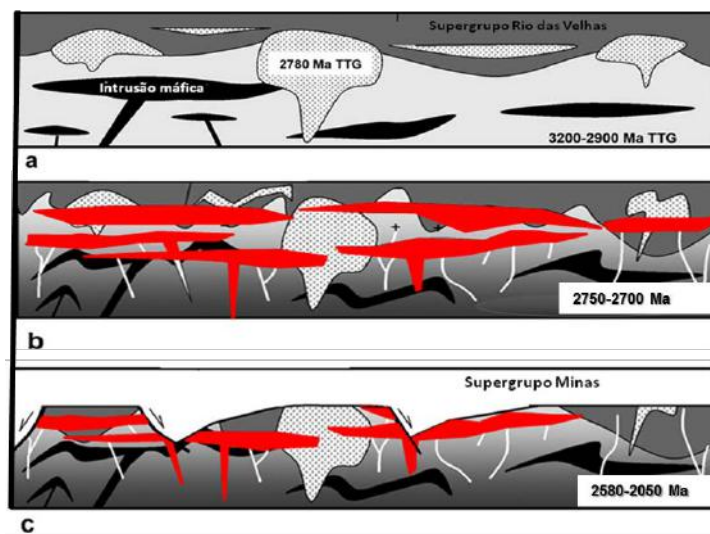


Figura 22 – Evolução esquemática da borda meridional do cráton São Francisco no Neoarqueano (Romano *et al.*, 2013). (A) Deposição do Supergrupo Rio das Velhas concomitantemente ao *emplacement* de corpos mais novos entre 2780-2770 Ma. (B) *Emplacement* de granitos potássicos entre 2750-2700 Ma. Deformação do Supergrupo Rio das Velhas e diferenciação da crosta. (C) erosão da crosta superior e deposição do Supergrupo Minas.

### 6.2.3 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas é interpretado como uma bacia deposicional intracratônica de margem passiva, que evoluiu para uma bacia sin-orogênica ao longo do evento Riaciano – Orosiriano. É representado por uma sequência metassedimentar com idade de deposição entre 2580 Ma e 2050 Ma, possui cerca de 8 km de espessura e é constituído por quartzitos, conglomerados, filitos, rochas carbonáticas e por formações ferríferas bandadas do tipo Lago Superior (Neri *et al.*, 2013; Alkmin, 2004). A sua distribuição define a forma geométrica do Quadrilátero Ferrífero e seus limites são balizados por megadobras sinclinais (Baltazar & Zucchetti, 2007). Sua estratigrafia é composta por 4 grupos, sendo eles: Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba (Figura 23).

Uma inversão tectônica no cráton São Francisco durante o Sideriano-Riaciano transformou a região em uma margem ativa, onde foram depositados sedimentos do grupo Sabará, que é caracterizado por espessa camada de turbiditos, tufos vulcânicos e diamictitos, bem como do grupo Itacolomi, que compreende uma pilha de sedimentos de aluvião de até 2000 m de espessura (Figura 23). Esses grupos estão em desconformidade com o Supergrupo Minas e são considerados sin- e pós-tectônicos em relação ao orógeno paleoproterozoico (Lana *et al.*, 2013).

### 6.3 CINTURÃO MINEIRO

Segundo Teixeira & Figueiredo (1991) o Cinturão Mineiro é interpretado como um extenso terreno granitoide-gnaissico-migmatítico transamazônico, gerado durante uma orogenia entre 2,1 e 2,0 Ga. Sua evolução teria se dado a partir de um núcleo arqueano parcialmente circundado por rochas proterozoicas (Teixeira, 1985). Também pode ser definido como associado a evolução de um cinturão na borda marginal da plataforma arqueana, fazendo parte de um arco plutônico próximo a margem cratônica (Noce *et al.*, 2000). Já para Alkmin (2004) o domínio geográfico do Cinturão Mineiro seria maior do que o postulado até então e sua denominação valeria para toda a porção do embasamento exposto no sul do cráton que experimentou deformação e ação termal no decorrer do Evento Transamazônico. A partir daí o Cinturão Mineiro englobaria um complexo metamórfico basal, as supracrustais do Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas, o Grupo Itacolomi, além de um substancial volume de granitoides arqueanos e paleoproterozoicos. No entanto para Ávila *et al.* (2010) o cinturão Mineiro é formado basicamente por rochas paleoproterozoicas, onde ocorreu a formação de sucessivas zonas de subducção e acreção de arcos intra-oceânicos, não incluindo desta maneira as rochas arqueanas como postulado por Alkmin (2004). Teixeira *et al.* (2015), seguem a mesma definição de Ávila *et al.* (2010) propondo que

o Cinturão Mineiro foi formado por sucessivas colisões de arcos oceânicos e continentais ativos durante o Paleoproterozoico. Suas rochas podem ser classificadas como ortognaisses (trondhjemiticos, tonalíticos, granodioríticos) e plutons não deformados (gabros, dioritos e granitos). Nele estão também presentes as sequências metavulcano-sedimentares Rio das Mortes e Nazareno.

Segundo os autores citados acima o Cinturão Mineiro é marcado pela formação de arcos magmáticos (oceânicos e continentais), que ao colidirem formaram zonas de cisalhamento e grandes estruturas regionais de orientação predominantemente NE-SW (Figura 24).

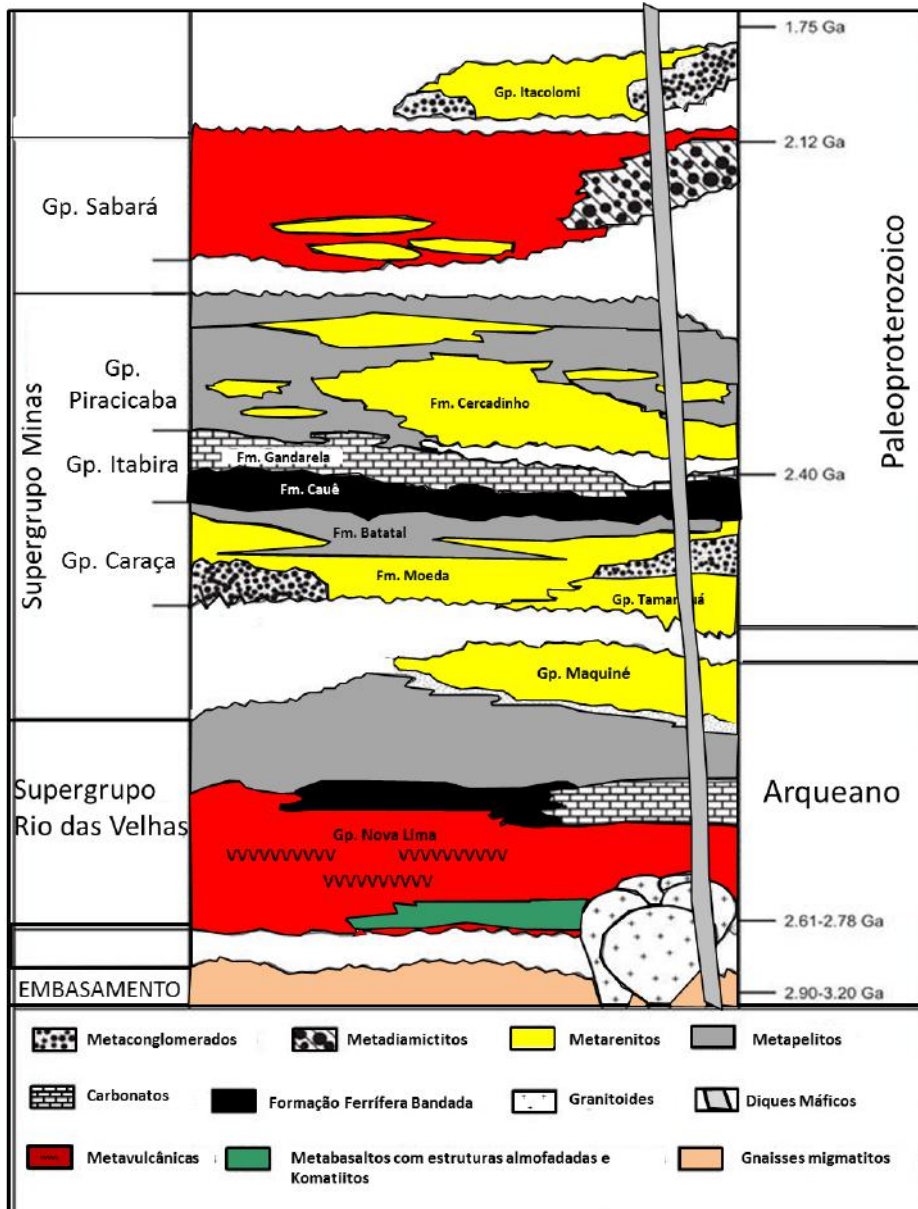


Figura 23 - Coluna estratigráfica dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas (Alkimin & Noce, 2006).



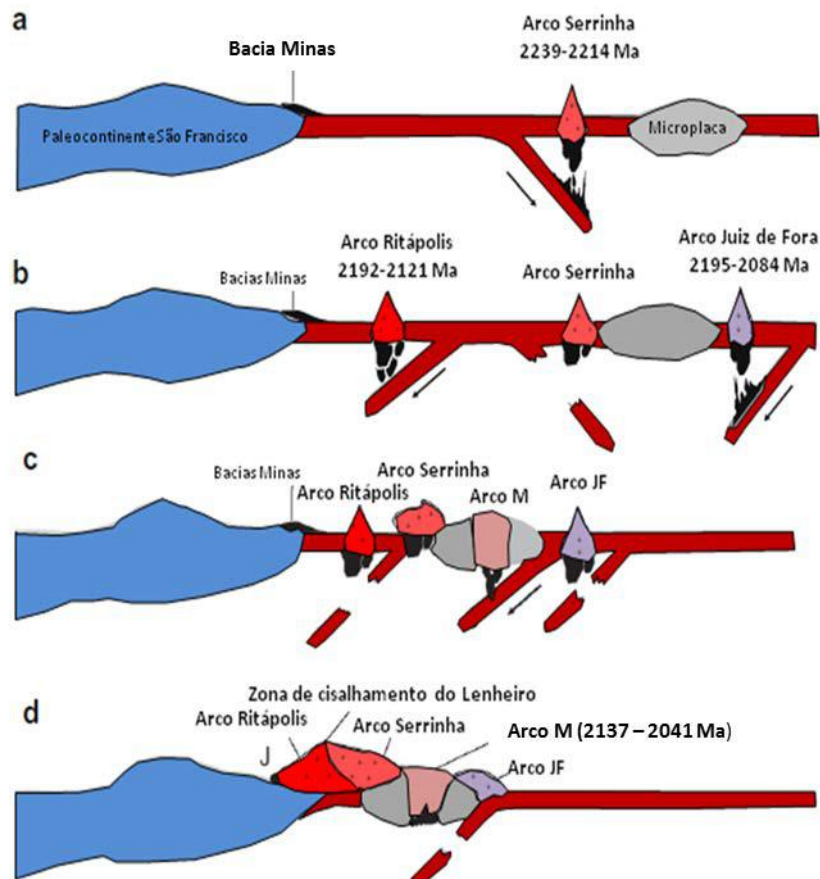


Figura 24 – Modelo de evolução por acreção de arcos para o Cinturão Mineiro segundo Ávila *et al.*, (2010). Arco M – Arco Mantiqueira.

### 6.3.1 Arco Resende Costa

O arco Resende Costa possui cerca de 200 km<sup>2</sup> está situado a sudeste do Quadrilátero Ferrífero, a sul do lineamento Jaceaba-Bom Sucesso e em contato tectônico com o metagranitoide Ritópolis (Figura 25).

O ortogneisse Resende Costa apresenta fácies variando desde média a grossa, podendo ter localmente uma variação de fina a média, sendo que essa subdivisão se baseia, principalmente, no tamanho dos grãos de quartzo e feldspato. Esse corpo é cortado por diques graníticos, aplitos e pegmatitos. Sua fácies média a grossa é hololeucocrática, pode variar de equigranular a seriada e seus minerais essenciais são andesina, quartzo e biotita, enquanto zircão, apatita, allanita e opacos aparecem como fases acessórias. A fácies de fina a média é leucocrática, sua textura é granoblástica e seus minerais essenciais e acessórios são os mesmos da fácies descrita anteriormente. Ambas as fácies apresentam recristalização de quartzo e plagioclásio, bem como minerais metamórficos (epidoto, titanita) e/ou hidrotermais (microclina, sericita e muscovita) (Teixeira *et al.*, 2015 e Souza, 2013).

Segundo Souza (2013) o ortogneisse Resende Costa está posicionado no campo trondjemítico no diagrama Ab-An-Or e no campo das rochas cálcio-alcalinas no diagrama

AFM, além de mostrar progressivo enriquecimento em Na<sub>2</sub>O durante os processos de diferenciação magmática. Em relação aos elementos incompatíveis possui enriquecimento dos LILE em relação aos HFSE e anomalias negativas de Nb, P e Ti. Segundo Seixas *et al.*, (2012) as rochas TTG's da suíte Lagoa Dourada teriam cristalizado em  $2356 \pm 3$  Ma, enquanto que para Teixeira *et al.*, (2015) o ortognaisse Resende Costa e corpos coevos possuem idades de cristalização variando de  $2351 \pm 48$  a  $2317 \pm 16$  Ma. Pode-se sugerir que ambos os corpos fariam parte de um mesmo evento, que seria o mais antigo episódio juvenil reconhecido até agora no Cinturão Mineiro.

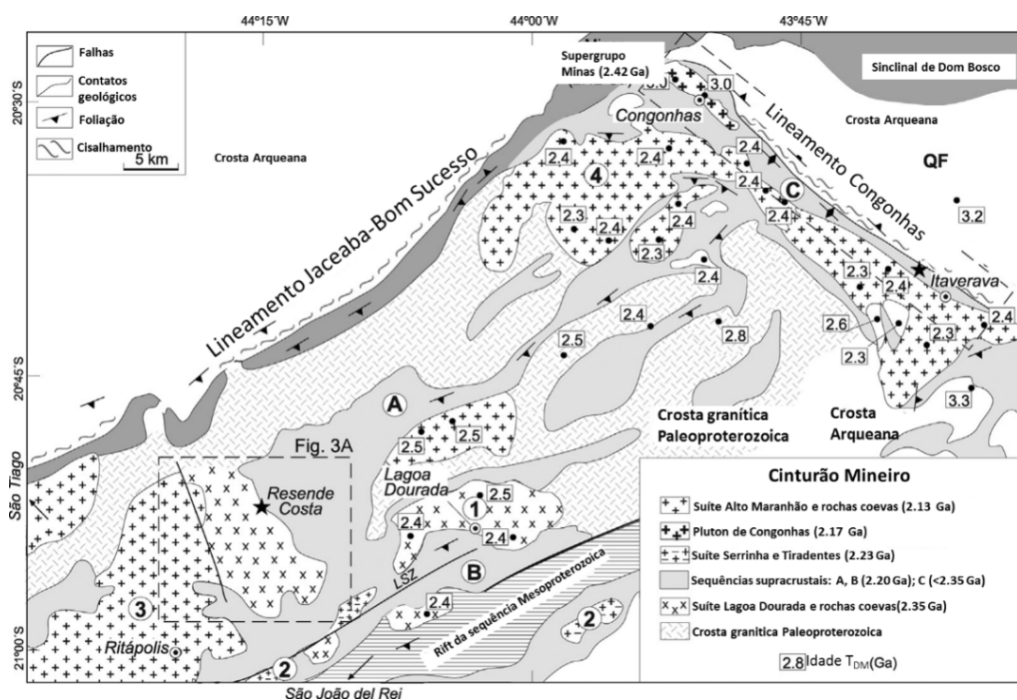


Figura 25 – Mapa da região de Resende Costa individualizando os corpos plutônicos Paleoproterozoicos do Cinturão Mineiro e a crosta Arqueana (Teixeira *et al.*, 2015).

### 6.3.2 Arco Serrinha

Segundo Ávila *et al.* (2014) o arco Serrinha envolve as rochas que compõem as suítes Serrinha e Tiradentes, sendo que a suíte Serrinha é representada pelos seguintes corpos: quartzo-diorito do Brito, granodioritos Brumado de Cima e Brumado de Baixo, corpos granofíricos e vulcânicos-subvulcânicos félsicos. Estes seriam temporalmente, espacialmente e geneticamente associados, sendo que os corpos plutônicos intrudem rochas anfibolíticas da faixa metavulcano-sedimentar Nazareno, e possuem idades de cristalização variando entre  $2239 \pm 22$  e  $2214 \pm 9$  Ma (Ávila *et al.*, 2010).

A suíte Tiradentes aflora ao longo de uma faixa a sul da serra de São José e é representada por andesitos máficos, dacitos, granófiros e tonalitos, que apresentam idades de cristalização U-Pb variando entre  $2217 \pm 23$  Ma e  $2204 \pm 11$  Ma (Ávila *et al.*, 2014).

### 6.3.3 Faixas metavulcano-sedimentares paleoproterozoicas

No cinturão Mineiro ocorrem três faixas metavulcano-sedimentares paleoproterozoicas que foram designadas por Ávila (2000), Toledo (2002) e Ávila *et al.* (2004, 2010, 2014) de Rio das Mortes, Nazareno e Dores de Campos (Figura 1).

A sequência Rio das Mortes está localizada a norte da zona de cisalhamento do Lenheiro e abrange anfibolitos, filitos, gonditos e raras rochas metaultramáficas (Ávila, 2000; Toledo, 2002). A sequência Nazareno está localizada a sul da zona de cisalhamento do Lenheiro e é constituída por metakomatiitos com textura spinifex, anfibolitos, filitos, gonditos e raros quartzitos (Ávila, 2000; Toledo, 2002; Ávila *et al.*, 2010; Barbosa *et al.*, 2015), enquanto a sequência Dores dos Campos aflora a sul da cidade de Tiradentes e é formada por anfibolitos e rochas metaultramáficas, com escassas rochas metassedimentares representadas por filitos, gonditos e quartzitos (Ávila *et al.*, 2014; Barbosa *et al.*, 2015).

Estudos isotópicos por LA-ICP-MS em grãos de zircão dos anfibolitos dessas faixas forneceram idades riacianas entre  $2231 \pm 5$  Ma e  $2202 \pm 11$  Ma para a faixa Rio das Mortes; de  $2267 \pm 14$  Ma a  $2223 \pm 4$  Ma para a faixa Nazareno; e de  $2255 \pm 51$  Ma para a faixa Dores de Campos (Ávila *et al.*, 2012).

## 7 – ORTOGNAISSE RESENDE COSTA

### 7.1 – INTRODUÇÃO

O ortognaisse Resende Costa, possui forma alongada, direção NNW-SSE, aflora ao redor da cidade de Resende Costa e suas rochas são observadas sob a forma de blocos “*in situ*”, boulders ou grandes lajedos (Figura 26). É circundado a leste e a sul pelas rochas anfibolíticas e por filitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (Guimarães, 2010; Souza, 2013), enquanto sua porção oeste é delimitada por um contato tectônico com o metagranitoide Ritópolis (Anexo I – Mapa Geológico).



Figura 26 - Lajedo do ortognaisse Resende Costa (Foto: Ciro Ávila).

### 7.2 - CARACTERÍSTICAS DE CAMPO

As características de campo foram compiladas de diversos trabalhos da equipe do projeto, bem como das monografias de Guimarães (2010) e Souza (2013), que realizaram o mapeamento geológico na área. Em geral as rochas do ortognaisse Resende Costa encontram-se bastante intemperizadas, o que ocasiona a formação de um solo e de um saprólito de coloração branco avermelhada (Figura 27), enquanto que a alteração das rochas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes proporcionam a formação de um solo e de um saprólito marrom escuro.



Figura 27 - Saprólito branco avermelhado decorrente da alteração intempérica de rochas do ortogneisse Resende Costa (Foto: Ciro Ávila).

As rochas do ortogneisse Resende Costa são holocristalinas, de coloração acinzentada, granulação variando de fina a grossa e compostas, principalmente, por quartzo, feldspato e biotita, enquanto epidoto, allanita e zircão são minerais acessórios. Os grãos de quartzo ocorrem na forma de fitas milimétricas, enquanto os cristais de feldspato apresentam forma desde subédrica até amendoada e, em alguns casos, estão substituídos parcialmente por epidoto e sericita, indicando que correspondem, na grande maioria, a grãos de plagioclásio. Além disso, observa-se uma foliação tipificada pela orientação de grãos e agregados de biotita ao longo do *strike* preferencial NE-SW (Figura 28).



Figura 28 - Aspecto geral de amostra do ortogneisse Resende Costa em um corte paralelo a foliação, onde se destacam os aglomerados de biotita (Foto: Victor Hugo Souza).

Souza (2013) subdividiu as rochas do ortogneisse Resende Costa em duas fácies de granulação distintas: média/grossa e fina/média. As rochas da fácies média/grossa são



predominantemente hololeucocráticas (I.C. entre 1 e 5%) e, mais raramente, leucocráticas (I.C. entre 10 e 13%), apresentam granulação desde média até grossa e estão expostas na porção centro-norte da área mapeada. Já as rochas da fácies fina/média também são hololeucocráticas (I.C. entre 3 e 7%), possuem granulação predominantemente fina e são encontradas a sul da fácies média/grossa, perfazendo o contato do referido corpo com as rochas anfibolíticas da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (Anexo I – Mapa geológico). Teixeira *et al.* (2015) dataram as duas fácies e obtiveram  $2317 \pm 15$  Ma para rochas da fácies média/grossa e  $2351 \pm 48$  Ma para a da fácies fina/média. Desta maneira caracterizaram que ambas seriam cogenéticas.

O ortogneisse Resende Costa apresenta veios de quartzo (Figura 29) e pegmatitos (Figura 30) discordantes e concordantes à sua foliação, que variam em espessura desde centimétricos até cerca de 2 metros, além de aplitos quartzo-feldspáticos que truncam sua foliação (Figuras 31 e 32).



Figura 29 - *Tension gash* preenchido por quartzo e orientado perpendicularmente a foliação (Foto: Victor Hugo Souza).

A falta de afloramentos com relações de corte entre as rochas do ortogneisse Resende Costa e os diferentes litótipos que o circundam, bem como a ausência de enclaves neste corpo ocasionaram uma grande dificuldade de se estabelecer seu posicionamento cronoestratigráfico, especialmente em relação ao gnaisse tonalítico Ramos, ao ortogneisse Ribeirão dos Mosquitos e a sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes. Porém idades de  $2351 \pm 48$  Ma e  $2334 \pm 5$  Ma para o ortogneisse Resende Costa e de  $2328 \pm 16$  Ma para o gnaisse tonalíticos Ramos permitiram que Teixeira *et al.* (2015) agrupassem os dois corpos na

suíte Resende Costa, enquanto a idade de  $2231 \pm 5$  Ma para anfibolitos da sequência metavulcano-sedimentar Rio das Mortes (Ávila *et al.*, 2012) e de  $2146 \pm 5$  Ma para o ortogneisse Ribeirão dos Mosquitos (Ávila *et al.*, 2013) caracterizam que o ortogneisse Resende Costa corresponderia, possivelmente, ao embasamento de ambos.

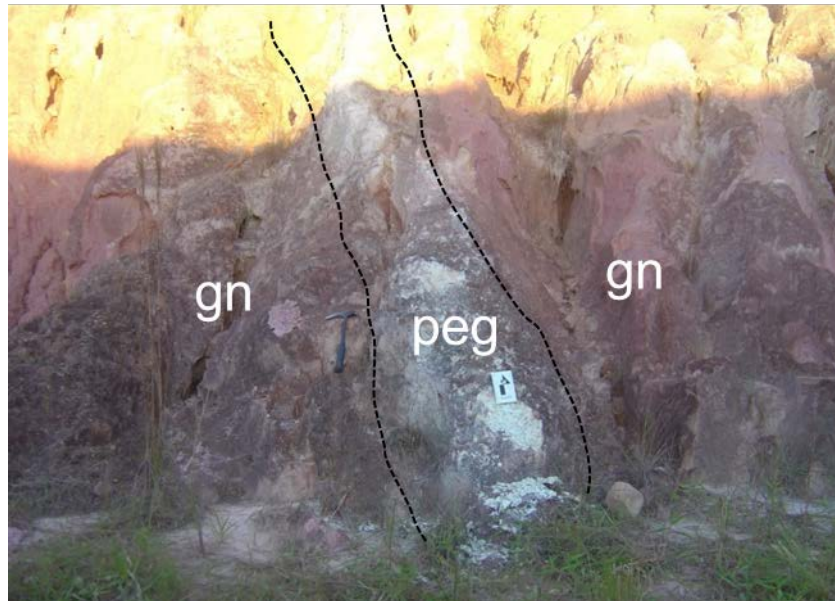


Figura 30 – Corpo pegmatítico métrico intrusivo em saprólito do ortogneisse Resende Costa. Legenda: gn – ortogneisse Resende Costa; peg – pegmatito (Foto: Ciro Ávila).

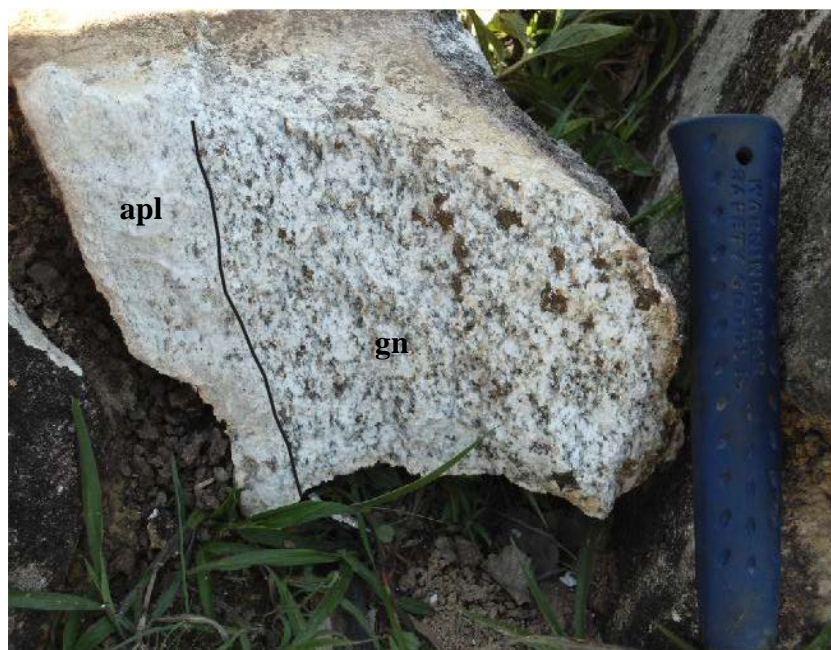


Figura 31 - Bloco mostrando dique aplítico centimétrico e hololeucocrático em contato com rocha leucocrática do ortogneisse Resende Costa. Legenda: apl – aplito; gn – ortogneisse Resende Costa (Foto: Victor Hugo Souza).





Figura 32 – Aplitos quartzo-feldspáticos (delineados em branco) concordantes e discordantes à foliação do ortogneisse Resende Costa (Foto: Victor Hugo Souza).

### 7.3. PETROGRAFIA, CATODOLUMINESCÊNCIA E MEV

As rochas do ortogneisse Resende Costa apresentam quartzo e plagioclásio como minerais essenciais, enquanto opacos, biotita, zircão, apatita, allanita, titanita, microclinio e granada são acessórios. Epidoto, clinozoisita/zoisita, biotita, titanita, sericita e carbonatos são minerais secundários.

Essas rochas variam de finas a médias, de hololeucocrática a leucocrática (índice de cor entre 3 e 13%), apresentam textura fanerítica equigranular xenoblástica, podendo ser localmente inequigranular seriada, com cristais variando de 0,5 a 2,0 mm (Figuras 33 e 34).

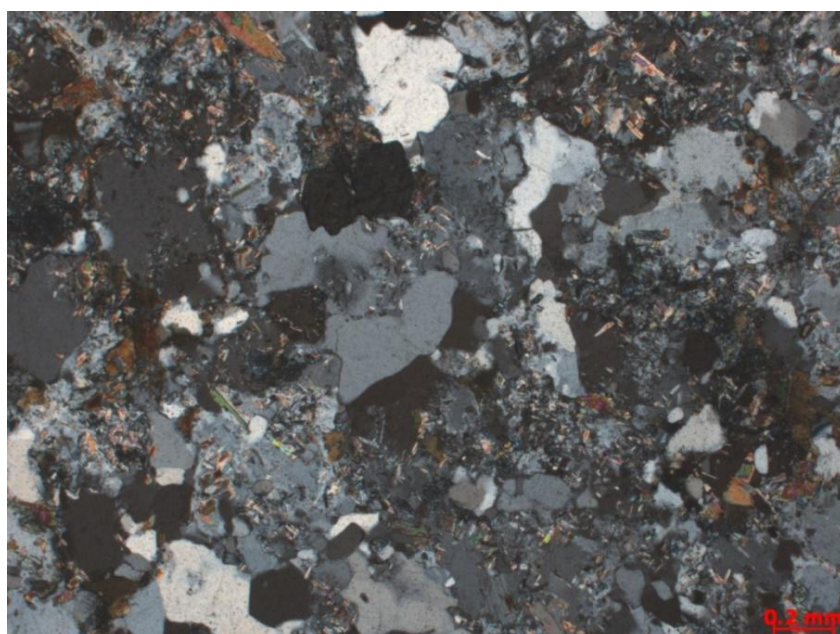


Figura 33 - Lâmina do ortogneisse Resende Costa, onde é possível observar sua granulação fina e a textura inequigranular seriada xenoblástica. Destaca-se o elevado grau de epidotização e sericitização do plagioclásio (Amostra RF- 46B – nicóis cruzados).





Figura 34 - Lâmina do ortogneisse Resende Costa com índice de cor de 12%, representado principalmente pela biotita (Amostra VH-53 – nicóis paralelos).

O quartzo varia desde 0,1 até 3,0 mm e ocorre, principalmente, como grãos anédricos, estando disposto localmente sob a forma de agregados monominerálicos com contatos entre os grãos desde lobados até poligonizados (Figura 35). Possui inclusões de zircão (Figura 36), apatita (Figura 37) e minerais opacos, além de exibir defeitos em sua rede cristalina, representados pela extinção ondulante (Figura 38).

Plagioclásio varia desde 0,1 até 2,3 mm e ocorre como grãos desde subédricos até euédricos. Possui inclusões de zircão (Figura 39), apatita (Figura 40), titanita e minerais opacos e encontra-se fortemente saussuritizado, com a formação de sericita (Figura 41) e, mais raramente, de epidoto e zoisita/clinozoisita. Essas alterações frequentemente mascaram parte da geminação polissintética (Figuras 41 e 42), o que dificulta a sua identificação. Localmente, o plagioclásio pode ser substituído por minerais como carbonato (Figuras 40 e 43), microclina (Figura 44) e biotita (Figura 45), além de mostrar duas direções de geminação (Figura 46).

Os grãos de plagioclásio são ricos em  $\text{Na}_2\text{O}$  (6,1 e 7,5 % de massa),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10,9 e 12,2 % de massa), em  $\text{SiO}_2$  (23,2 e 25,3 % de massa), tendo ainda teores de Ca e Sr consideráveis (média de 3,52 e 3,88 % de massa em óxido). O cálculo de membros finais para os grãos de plagioclásio indicou um enriquecimento em albita (74 e 84,7 % mol) tendo subordinadamente anortita (Tabela 9), possibilitando sua classificação como oligoclásio (Figura 47).

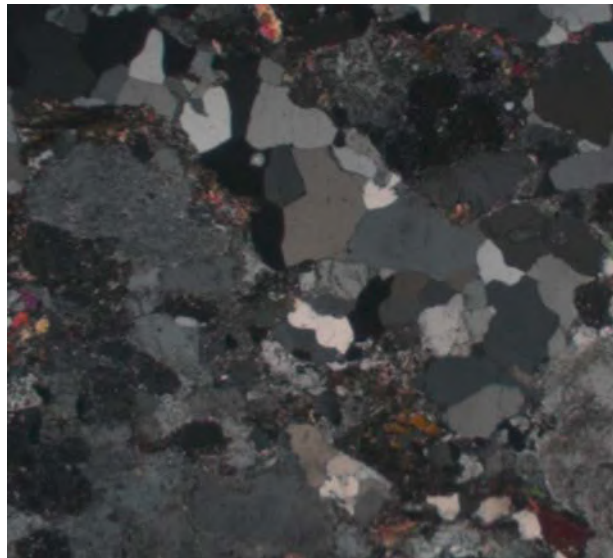


Figura 35 – Cristais de quartzo com contatos poligonizados (Amostra RF-25 – MEV/BSD).

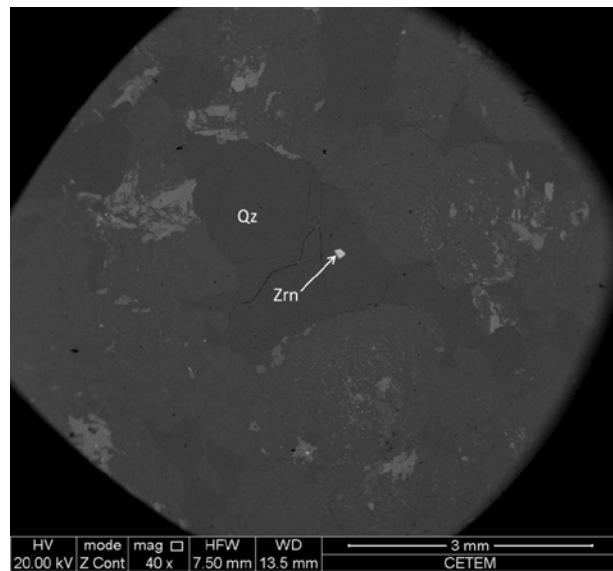


Figura 36 – Cristal de quartzo com inclusão de zircão (Zrn) (Amostra RF-20 – MEV/BSD).

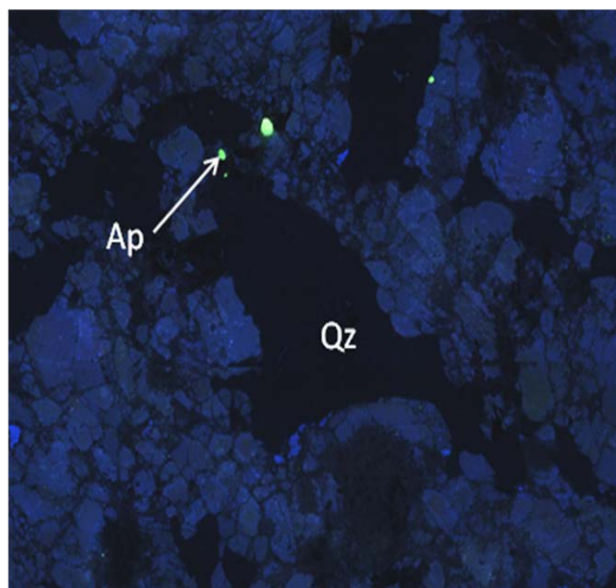


Figura 37 – Cristal de quartzo (Qz) com inclusão de apatita (Ap) (Amostra RF-20 – catadoluminescência).

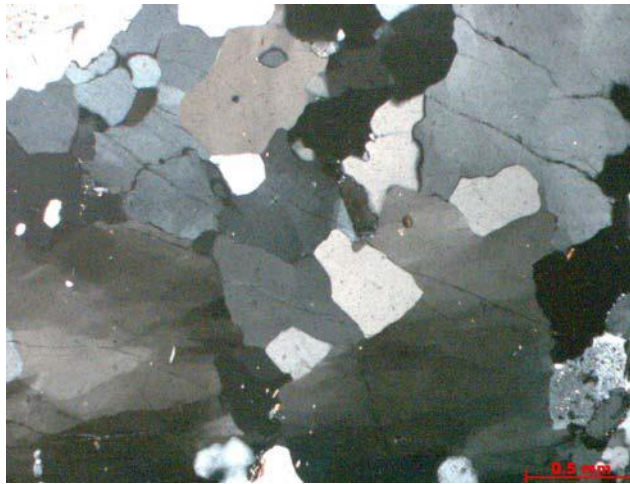


Figura 38 – Cristais de quartzo dispostos sob a forma de agregado monominerálico exibindo contatos poligonizados e extinção ondulante (Amostra RF-255 C1 – nicóis cruzados).

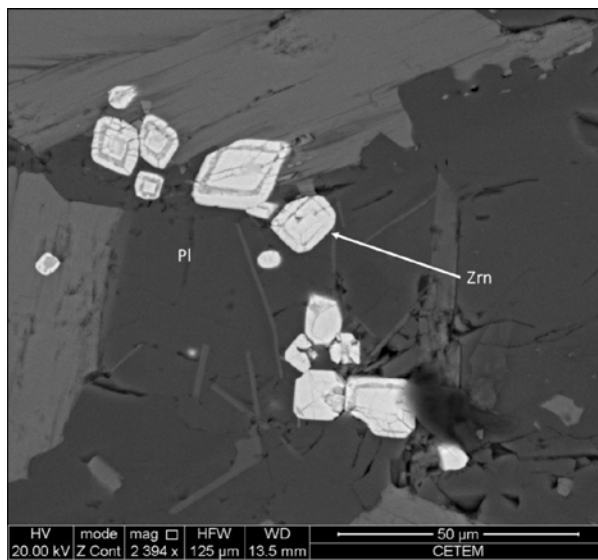


Figura 39 – Cristal de Plagioclásio (Pl) com inclusões de zircão (Zrn) que apresenta zoneamento (Amostra RF-20 – MEV/BSD).

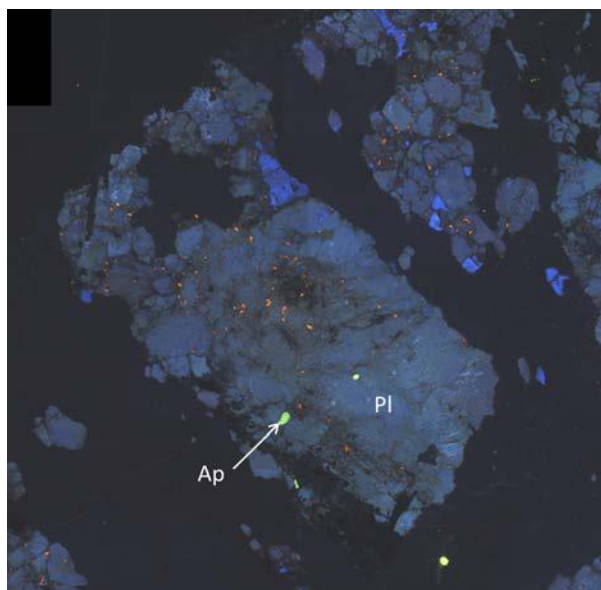


Figura 40 – Cristal de Plagioclásio (Pl) com inclusão de apatita (Ap) e alteração para carbonato que apresenta luminescência laranja (Amostra RF-20 – catodoluminescência).



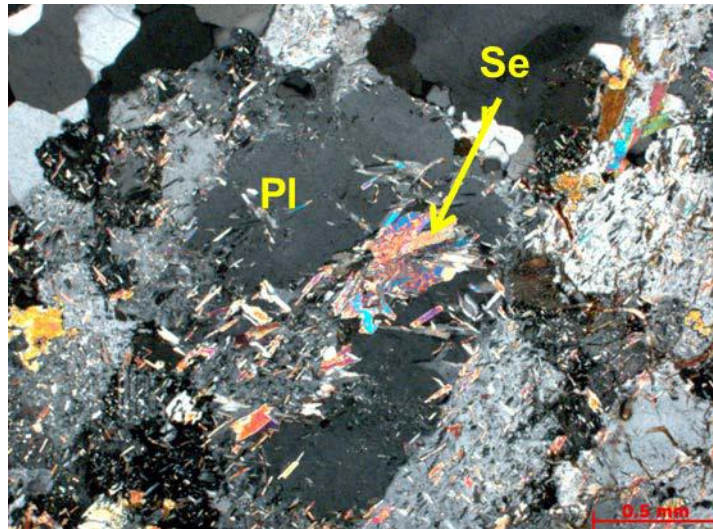


Figura 41 – Grão de plagioclásio (Pl) fortemente alterado mostrando o sobrecrecimento de sericita (Ser) (Amostra RF-02 – nicóis cruzados).

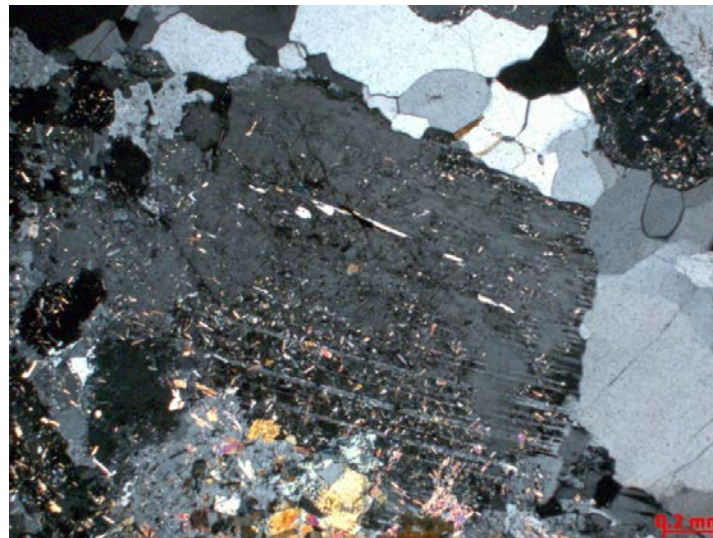


Figura 42 – Grão tabular de plagioclásio com geminação polissintética parcialmente “apagada” e levemente saussuritizado (Amostra RF-02 – nicóis cruzados).

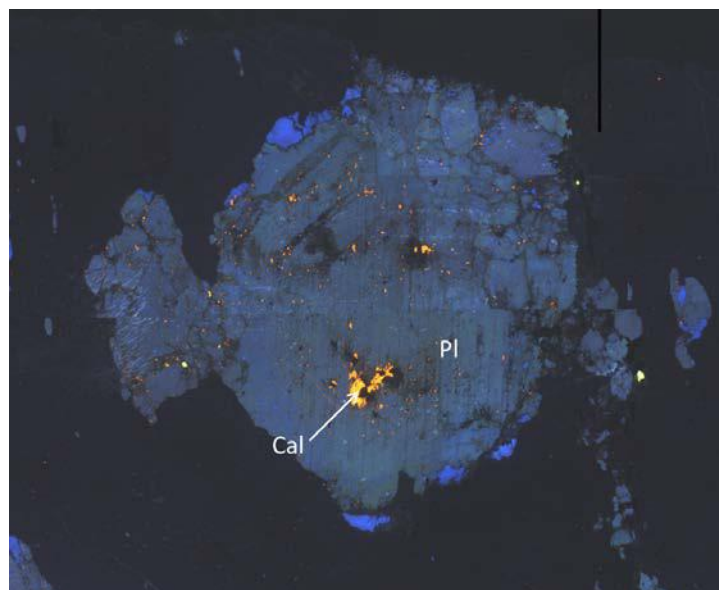


Figura 43 – Grão de plagioclásio (Pl) alterado para carbonato (Cal) com luminescência laranja (Amostra EL256 – catodoluminescência).

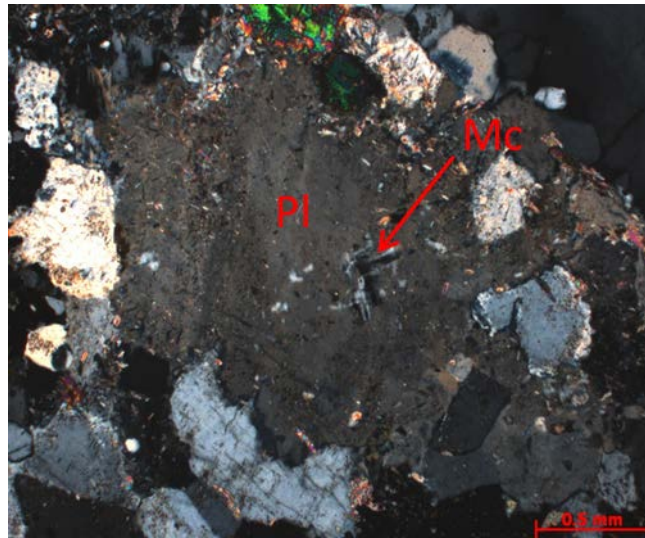


Figura 44 – Grão de plagioclásio (Pl) com geminação polissintética “apagada” e substituído parcialmente por microclina (Mc) (Amostra EL-163-A – nicóis cruzados).

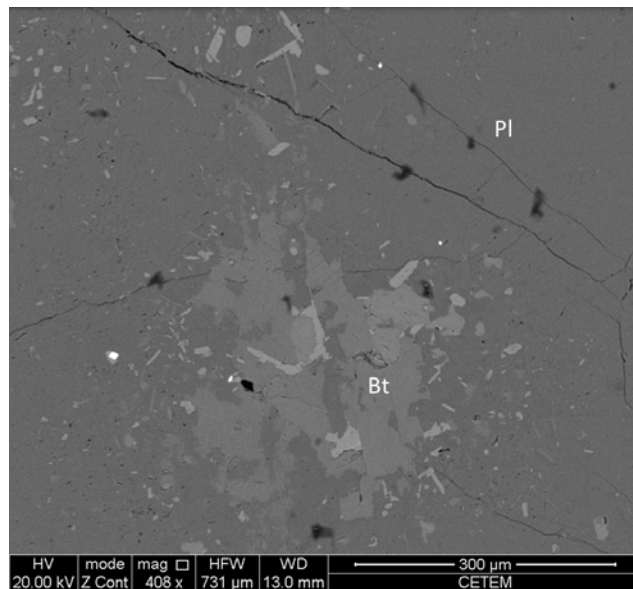


Figura 45 – Grão de plagioclásio (Pl) fortemente alterado com o crescimento (Bt) (Amostra EL256 – MEV/BSD).



Figura 46 – Grão de plagioclásio com duas direções de geminação (círculo amarelo), em parte corroído devido ao processo de alteração. (Amostra EL-163-A – nicóis cruzados).

Tabela 9- Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de plagioclásio do ortognaisse Resende Costa.

<i>Rocha hospedeira</i>										<b>Ortognaisse Resende Costa</b>												
<i>Amostra_analise</i>	RF - 25									EL-256												
	5	7	8	9	10	11	16	20	21	1	25	35	42	43	47	49	52	56	57	66	68	69
<i>Óxidos (% em peso)</i>																						
Na <sub>2</sub> O	7,2	6,9	6,6	6,2	6,8	6,8	7,2	7,1	6,3	6,3	6,9	7,4	7,0	6,4	6,8	6,1	6,7	6,6	6,5	6,5	7,2	6,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,0	11,5	11,9	10,9	11,6	11,8	11,7	10,9	11,5	11,3	11,4	11,4	12,1	11,2	11,3	11,7	11,5	11,4	11,6	12,0	11,7	11,9
SiO <sub>2</sub>	24,8	24,5	24,5	23,2	24,1	24,2	25,1	24,9	23,7	23,8	24,1	23,7	25,0	23,8	23,8	25,0	24,0	24,5	24,4	25,3	24,8	23,9
CaO	3,7	3,3	3,5	3,5	3,1	3,6	3,7	2,2	3,5	3,6	3,4	3,7	3,6	3,9	3,9	3,2	3,6	3,4	3,8	3,3	3,2	3,9
SrO	3,7	4,0	3,7	3,6	3,7	3,7	3,9	3,9	3,5	3,8	4,0	3,6	4,1	3,7	3,5	4,0	3,8	4,1	4,1	4,0	3,9	4,0
Total	95,5	93,0	93,4	88,1	91,9	92,9	95,5	91,6	90,4	90,5	92,2	92,0	96,1	90,8	91,3	93,2	92,1	92,7	93,4	95,5	94,2	93,0
<i>Proporção atômica (8 oxigênios)</i>																						
Na	0,914	0,901	0,863	0,858	0,905	0,892	0,924	0,938	0,844	0,842	0,909	0,989	0,893	0,856	0,905	0,794	0,887	0,862	0,847	0,830	0,935	0,861
Al	1,308	1,277	1,319	1,286	1,308	1,315	1,269	1,229	1,312	1,294	1,287	1,295	1,308	1,281	1,283	1,290	1,297	1,270	1,294	1,300	1,284	1,335
Si	2,586	2,619	2,598	2,614	2,603	2,588	2,613	2,686	2,600	2,609	2,605	2,573	2,592	2,605	2,596	2,642	2,597	2,627	2,599	2,625	2,612	2,561
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,275	0,250	0,260	0,275	0,240	0,269	0,270	0,170	0,275	0,278	0,258	0,283	0,264	0,301	0,299	0,240	0,274	0,258	0,288	0,242	0,242	0,299
Sr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
O	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
<i>Membros finais (proporção molar)</i>																						
Anortita	23,1	21,8	23,1	24,3	21,0	23,2	22,6	15,3	24,6	24,8	22,1	22,2	22,8	26,0	24,8	23,2	23,6	23,1	25,3	22,5	20,6	25,7
Albita	76,9	78,2	76,9	75,7	79,0	76,8	77,4	84,7	75,4	75,2	77,9	77,8	77,2	74,0	75,2	76,8	76,4	76,9	74,7	77,5	79,4	74,3
Ortoclásio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

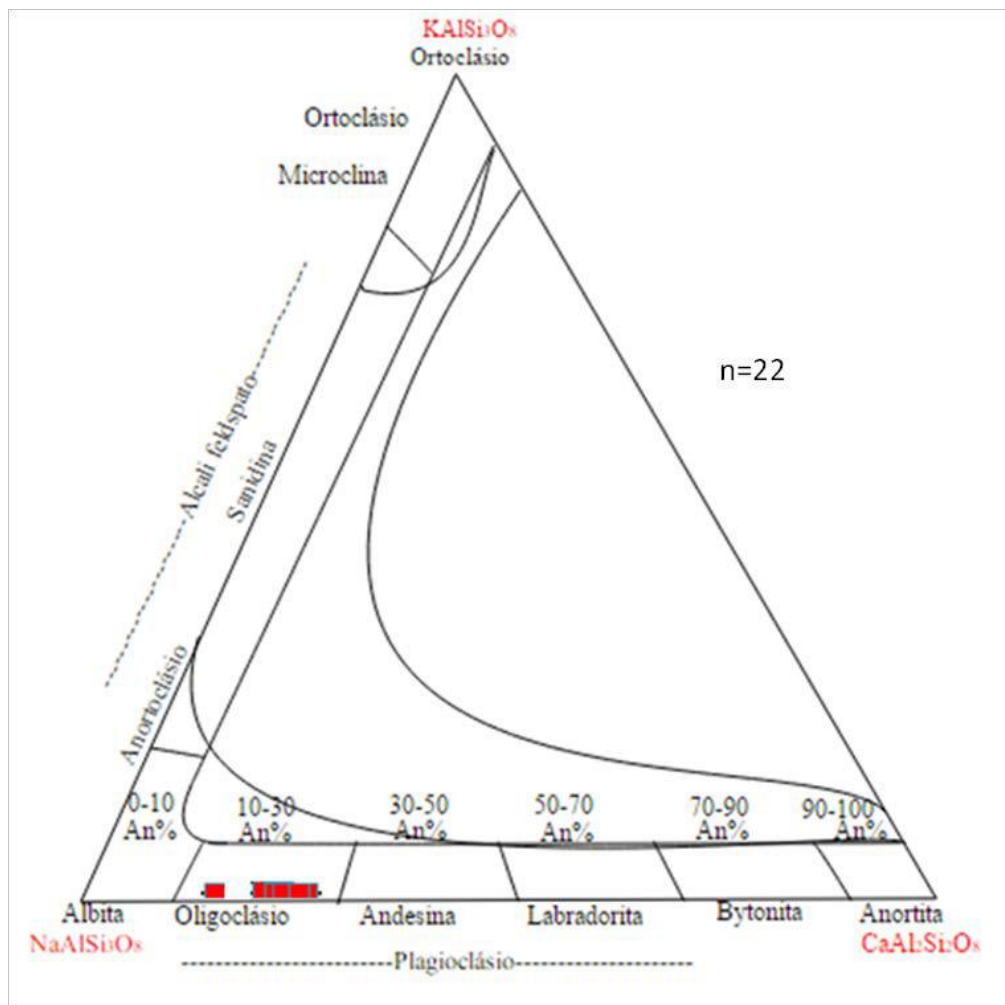


Figura 47 – Diagrama ternário de classificação de feldspatos.

Os minerais opacos, identificados no MEV como óxido de Fe e ilmenita, variam desde 0,1 até 0,7 mm, ocorrem como grãos anédricos a euédricos (Figura 48) e são observados como inclusões no quartzo, plagioclásio (Figura 48) e biotita. Encontram-se frequentemente associados a zircão, podem estar envoltos por titanita, epidoto (Figura 48) e zoisita/clinozoisita, ou então em paragênese com biotita (Figura 49). Foi observado que alguns grãos de ilmenita possuem inclusões de um mineral interpretado como samarskita (Figura 50).

A biotita varia desde 0,1 até 1,0 mm, ocorre em grãos anédricos a subédricos e pode ser observada de duas formas: (i) como grãos primários (Biotita<sub>1</sub>), com composição rica em FeO (21,7 a 25 % de massa), SiO<sub>2</sub> (29,3 a 36,3 % de massa), K<sub>2</sub>O (9 a 11,2 % de massa), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9,9 a 18 % de massa) e MgO (6,2 a 15,7 % de massa). Além de possuir Ti como elemento menor, podendo chegar a 2,7 % de massa em TiO<sub>2</sub>, e Mn como elemento traço (<0,1 % de peso em MnO) (Tabela 10). Estes grãos apresentam-se tabulares com inclusões de apatita, opacos e zircão (Figuras 51); e (ii) como grãos secundários (Biotita<sub>2</sub>), com composição rica em K<sub>2</sub>O (10,6 e 12,3 % de massa), SiO<sub>2</sub> (40,6 e 44,2 % de massa), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



(entre 31,9 e 36,1 % de massa). Em relação a  $Bt_1$ , ela aparece empobrecida em Fe e Mg, chegando a apenas 5,2 % e 2,1 % em massa de óxido, respectivamente, e tendo Sr como elemento menor na amostra RF-25, chegando a 3,5 % de SrO. Ainda possui como elementos traços Ti, Ca, Na e Ba (< 0,1 % em massa de óxido) (Tabela 10). Ela ocorre sobrecrecida no plagioclásio (Figura 51 e 52) e localmente associada a epidoto, zoisita/clinozoisita (Figura 53 e 54).

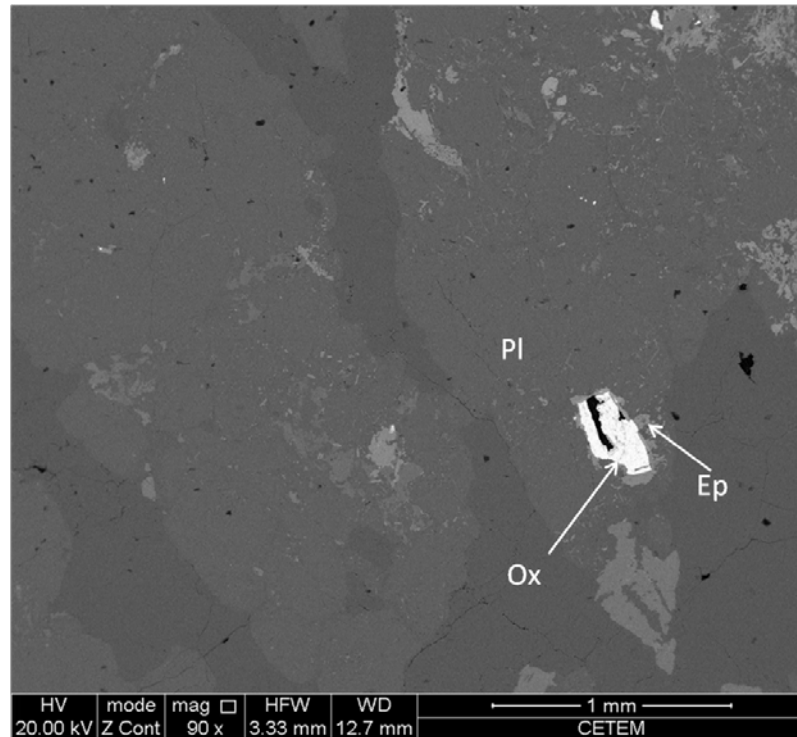


Figura 48 – Grão de óxido de Fe (Ox) envolto por epidoto (Ep), estando ambos inclusos em um grão de plagioclásio (PI) (Amostra EL256 – MEV/BSD).

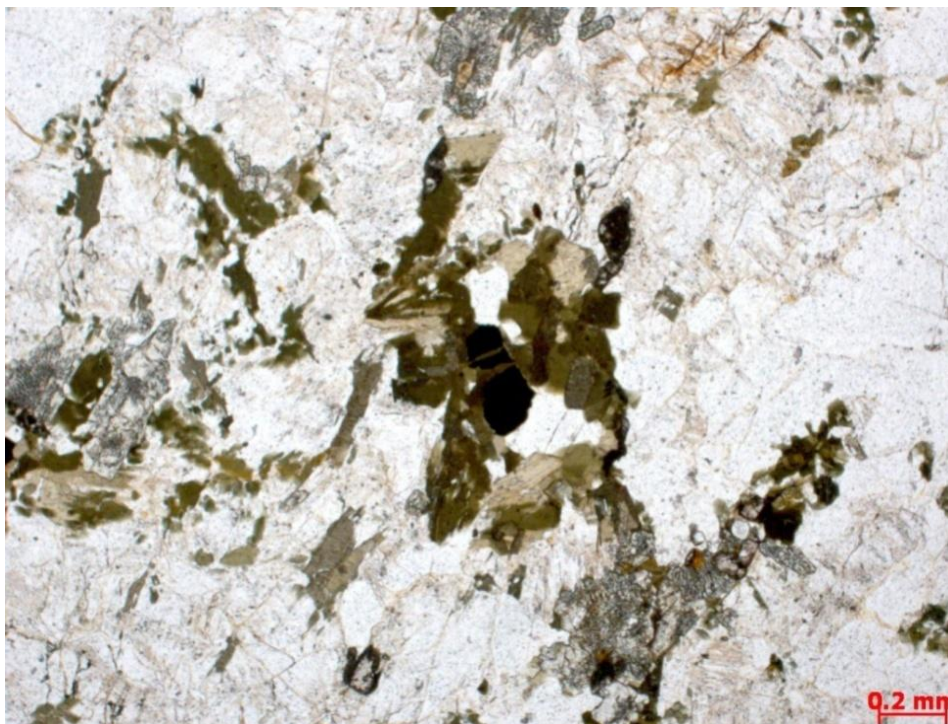


Figura 49 – Grão de biotita em paragênese com mineral opaco (Amostra VH-53 – nicóis paralelos).

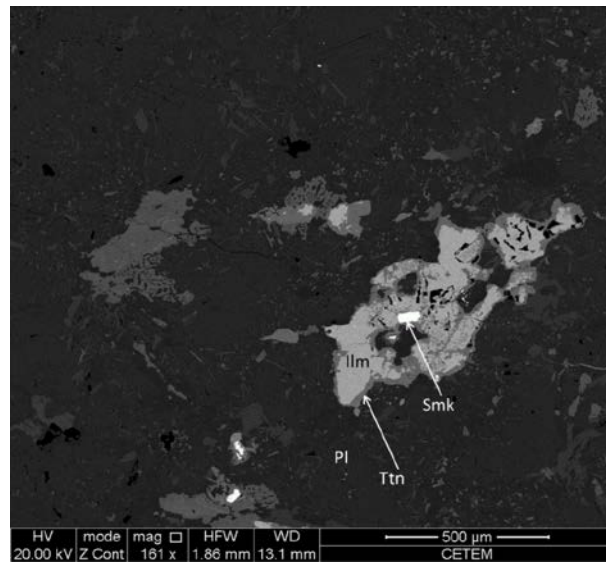


Figura 50 – Grão de ilmenita (Ilm) envolto por titanita (Ttn) com inclusão de samarskita (Smk) e incluso em um grão de plagioclásio (Pl) (Amostra RF-25– MEV/BSD).

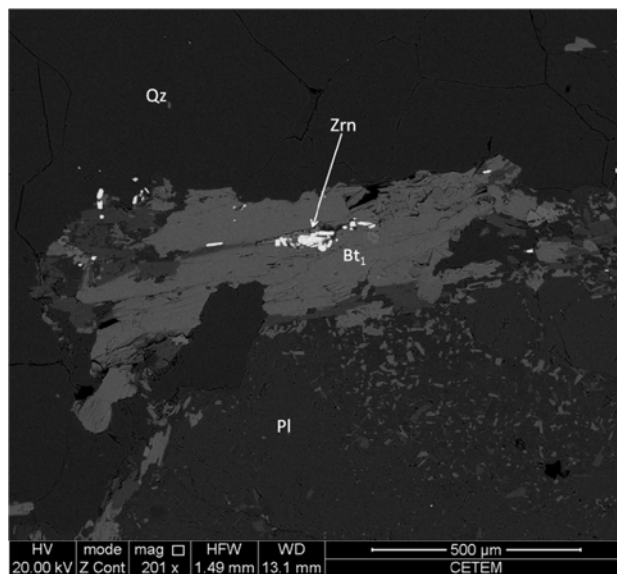


Figura 51 – Grão de biotita primária (Bt<sub>1</sub>), subédrica, com hábito tabular e com inclusões de zircão (Amostra RF-25– MEV/BSD).

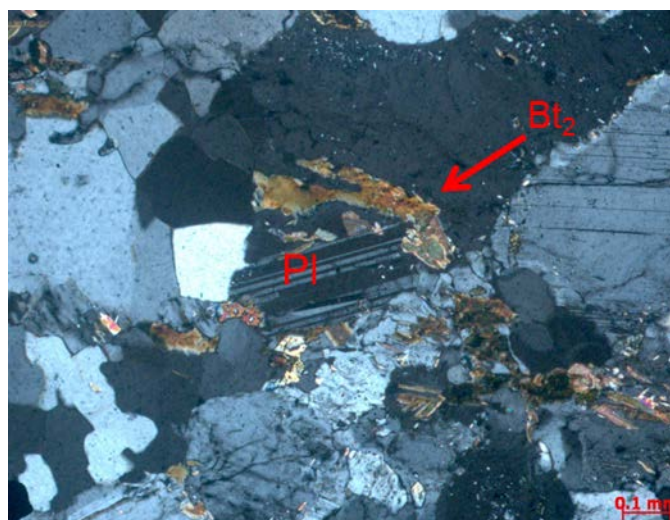


Figura 52 – Grão de plagioclásio (Pl) com sobrecrescimento de biotita secundária (Bt<sub>2</sub>) de aspecto irregular e sob a forma de um agregado de pequenos grãos (Amostra VH-53 – nicóis cruzados).

Tabela 10- Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de biotita, primária e secundária, do ortognaisse Resende Costa.

Amostra	Ortognaisse Resende Costa										
	Biotita primária (Bt <sub>1</sub> )										
	RF-25		5	7	28	36	37	44	45	53	65
Nº da análise	3	13									
Óxidos (% em peso)											
K <sub>2</sub> O	11,2	9,9	9,9	9,7	9,7	9,0	10,1	9,6	9,5	9,6	9,5
FeO	23,7	23,5	24,5	22,8	21,7	22,0	23,3	24,7	24,9	25,0	23,5
SiO <sub>2</sub>	36,3	29,3	30,1	30,9	30,6	31,9	32,2	33,1	32,5	30,1	32,1
MgO	10,1	7,1	6,2	7,3	8,5	9,3	15,7	7,5	8,2	6,3	8,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,0	15,3	15,0	15,9	15,8	17,6	9,9	18,0	18,0	15,8	17,7
TiO <sub>2</sub>	1,7	2,0	2,7	2,4	2,0	2,0	2,2	2,2	2,5	2,5	2,3
MnO	0,8	0,8	0,6	0,6	0,8	0,6	0,8	0,7	0,8	0,7	0,6
Total	102,1	88,2	89,2	90,0	89,4	92,7	94,3	96,1	96,6	90,1	94,3

Amostra	Biotita secundária (Bt <sub>2</sub> )							
	RF-2		EL-256					
	4	9	4	15	26	27	71	75
Nº da análise								
Óxidos (% em peso)								
K <sub>2</sub> O	11,9	12,3	10,6	11,1	10,6	11,2	11,3	10,7
FeO	4,2	5,2	3,4	4,5	4,0	3,5	4,6	5,0
SiO <sub>2</sub>	43,5	43,6	42,3	40,7	44,1	42,6	44,2	40,6
MgO	1,7	2,1	0,8	0,9	1,6	1,4	1,0	1,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,8	33,6	36,1	33,6	35,0	33,0	35,5	31,9
TiO <sub>2</sub>	0,4	0,9	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,7
MnO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CaO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SrO	3,3	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,0	0,0	0,3	0,3	0,6	0,2	0,0
BaO	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	100,4	101,4	94,5	92,2	95,7	92,4	97,0	90,3



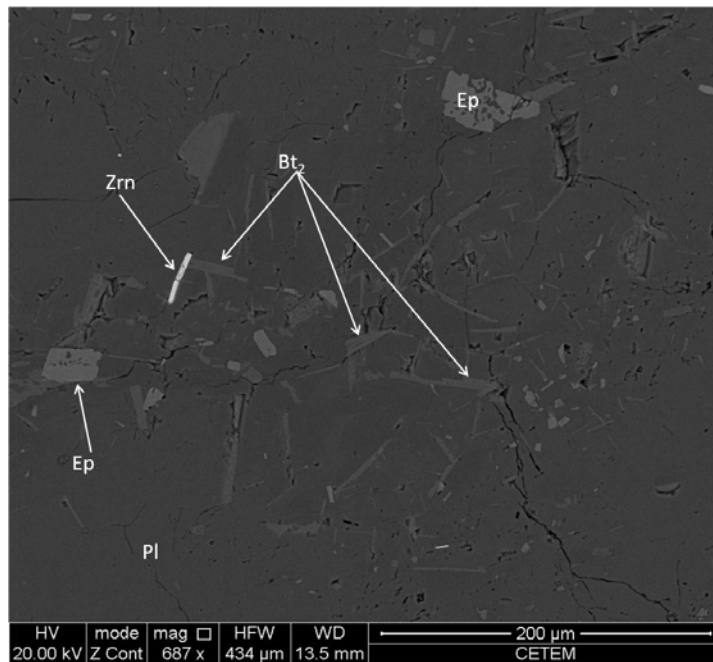


Figura 53 – Grãos de biotita secundários ( $Bt_2$ ), subédricos, sobrecrecidos no grão de plagioclásio (Pl), juntamente com epidoto (Ep). O plagioclásio (Pl) apresenta inclusão de zircão (Zrn) e alteração para epidoto (Ep) (Amostra RF-20 – MEV/BSD).

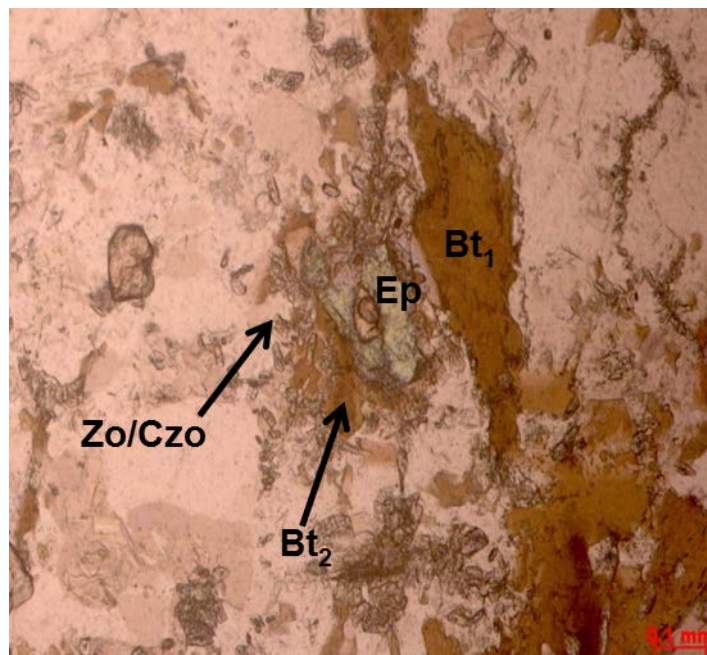


Figura 54 – Grão de biotita primária ( $Bt_1$ ) com aspecto tabular e grão de biotita secundária ( $Bt_2$ ) anédrica e em grãos pequenos. Essa última ocorre associada ao epidoto (Ep) e zoisita/clinozoisita (Zo/Czo) (Amostra RF – 46B – nicóis paralelos).

O zircão ocorre como grãos euédricos (Figuras 39 e 55), seu tamanho é inferior a 0,3 mm, encontra-se zonado e com porção central distinta do núcleo, o que indica um cristal possivelmente herdado (Figuras 39 e 55). Encontra-se incluso em quartzo (Figura 36), plagioclásio (Figura 39) e na biotita formando nesta halo pleocróico.

A apatita também ocorre como grãos euédricos, possui tamanho médio inferior a 0,1 mm, apresenta hábito granular ou prismático (Figuras 37, 40, 56 e 57) e ocorre como inclusão

nos grãos de quartzo e plagioclásio (Figuras 37, 40 e 57), além de possuir inclusões de zircão (Figura 57). Em catodoluminescência apresenta cor amarela bem típica (Figuras 37 e 40). Sua composição é predominantemente CaO (57,7 e 60,7 % de massa), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (37,3 e 39,8 % de massa) e F (2,5 a 4,2 % de massa). Pode possuir em alguns grãos Si e Na como elementos traços (<0,1 em massa de óxido) (Tabela 11). Devido à presença de F e ausência de Cl em sua composição, a apatita neste trabalho será designada como uma fluorapatita, mas não é possível estimar hidroxila, portanto a fração hidroxiapatita pelas análises por EDS.

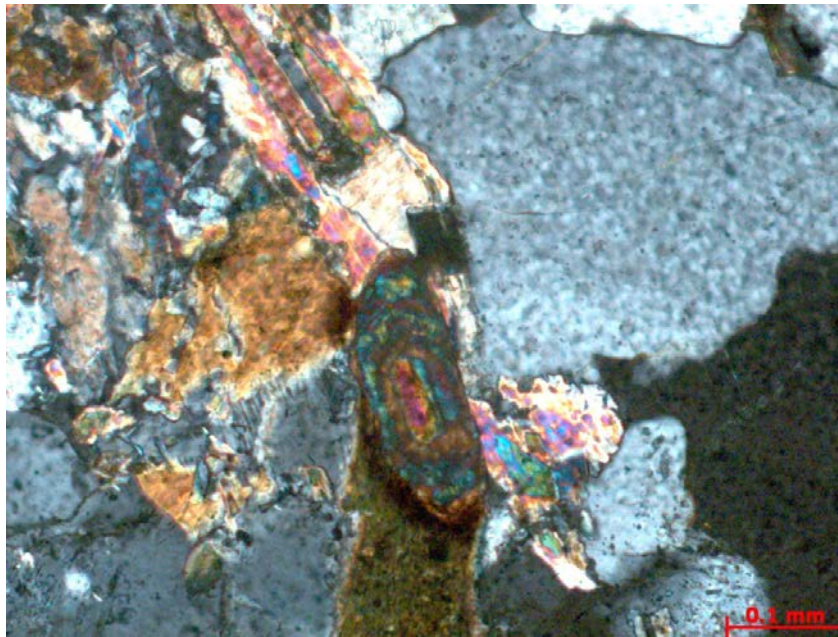


Figura 55 –Grão de zircão zonado e com possível núcleo herdado (Amostra RF – 08 – nicóis cruzados).

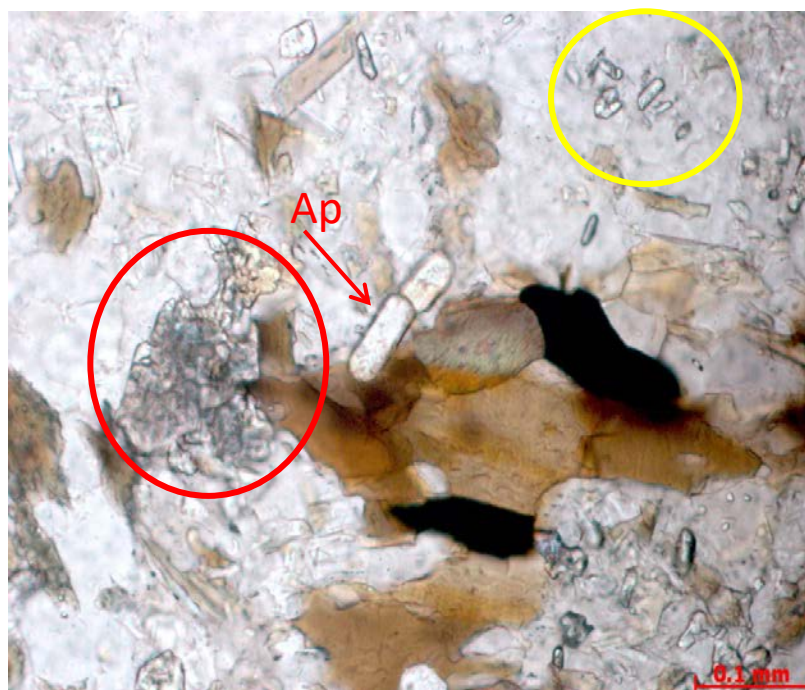


Figura 56–Grão de apatita com formato prismático e alongado em paragênese com biotita. Presença de pequenos grãos subédricos de epidoto substituindo o plagioclásio (círculo amarelo) e agregados (círculo vermelho) em contato com biotita (Amostra RF – 46B – nicóis paralelos).

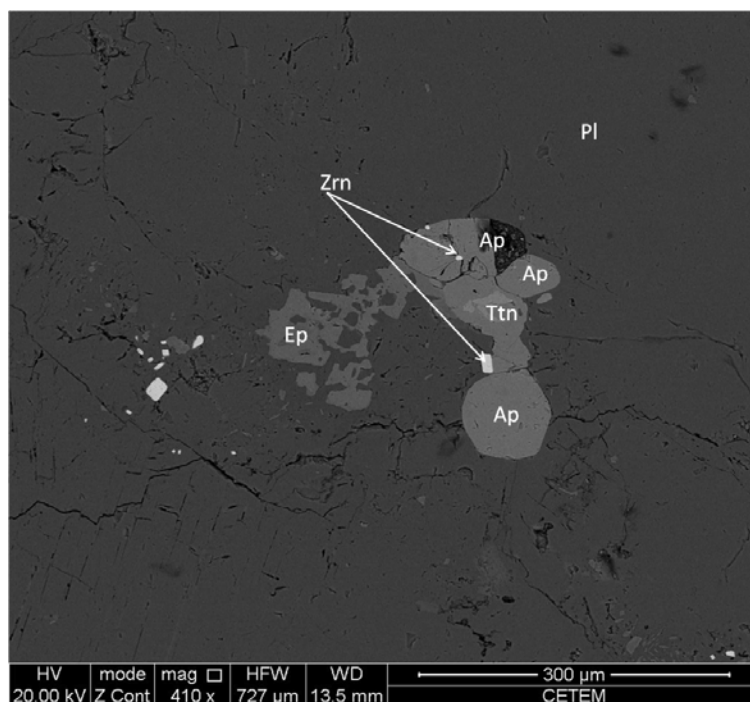


Figura 57– Grão de apatita (Ap) com inclusões de zircão (Zrn) e titanita (Ttn) e em contato com epidoto (Ep). Observa-se, ainda, a presença de vários grãos de zircão (Zrn) (Amostra RF-20 – MEV/BSD).

Tabela 11– Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de apatita do ortognaisse Resende Costa.

Amostra Nº da análise	Ortognaisse Resende Costa					
	EL-256					
	20	62	64	73	74	79
CaO	59,8	59,0	60,7	57,9	57,7	59,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	39,8	39,7	38,6	37,3	39,7	38,8
F	3,3	3,1	3,0	3,6	2,5	4,2
SiO <sub>2</sub>	0,2	0,0	0,3	0,2	0,3	0,2
Na <sub>2</sub> O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
F=O	-1,4	-1,3	-1,2	-1,5	-1,0	-1,8
Total	104,7	103,2	104,0	100,5	101,4	104,6

A allanita ocorre como grãos subédricos, exibe tamanho médio em torno de 0,2 mm, cor amarela, hábito granular, e ocorre inclusa em plagioclásio (Figura 58) e com feição metamáctica. Observada por imagens de MEV pode estar completamente alterada para cerianita e com argilominerais a substituindo pseudomorficamente (Figura 59). Sua composição é bem diversificada e pode ser observada na Tabela 12.

A titanita ocorre em grãos desde euédricos a anédricos, seu tamanho varia entre 0,1 e 1,5 mm e pode ser observada de três formas: (i) primária (titanita<sub>1</sub>), com contornos idiomórficos e formato losangular (Figura 60) com sobrecrescimento de biotita; (ii) anédrica (titanita<sub>2</sub>) envolvendo ilmenita (Figuras 50 e 61), e (iii) anédrica (titanita<sub>3</sub>) preenchendo fraturas ou ao longo do contato entre grãos (Figura 62).



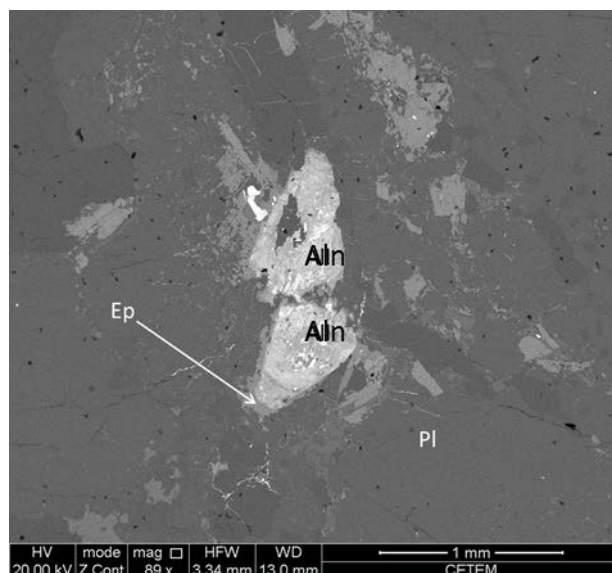


Figura 58 – Grão de allanita (Aln) subédrico com borda de alteração de epidoto (Ep) e incluso no plagioclásio (Pl) (Amostra EL-256 – MEV/BSD).

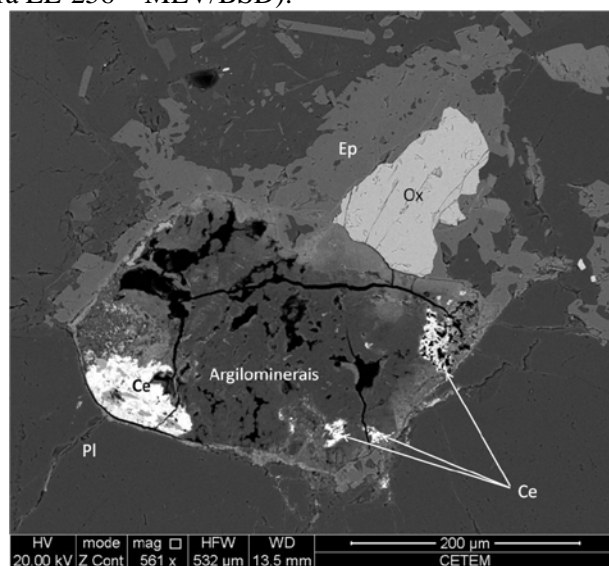


Figura 59 – Pseudormorfo da allanita, envolto de epidoto (Ep) e associado a um mineral de óxido de Fe (Ox). A alteração da allanita é representada pela formação de um argilomineral e por cerianita (Ce) (Amostra RF-20 – MEV/BSD).

Tabela 12– Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de allanita do ortognaisse Resende Costa.

<i>Rocha hospedeira</i>	Ortognaisse Resende Costa		
<i>Nº da análise</i>	EL-256		
<i>Óxidos (% em peso)</i>	30	31	55
SiO <sub>2</sub>	16,1	29,6	31,8
CaO	9,7	13,4	12,9
Al <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	9,0	18,0	17,8
FeO	4,9	11,4	10,2
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,7	8,8	9,0
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,5	4,3	4,5
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,0	2,4	2,5
ThO <sub>2</sub>	2,0	0,7	0,7
MgO	0,0	0,0	0,4
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	2,4	0,9	0,0
SrO	2,6	2,5	0,0
Na <sub>2</sub> O	1,0	0,3	0,0
Total	86,3	92,5	90,1



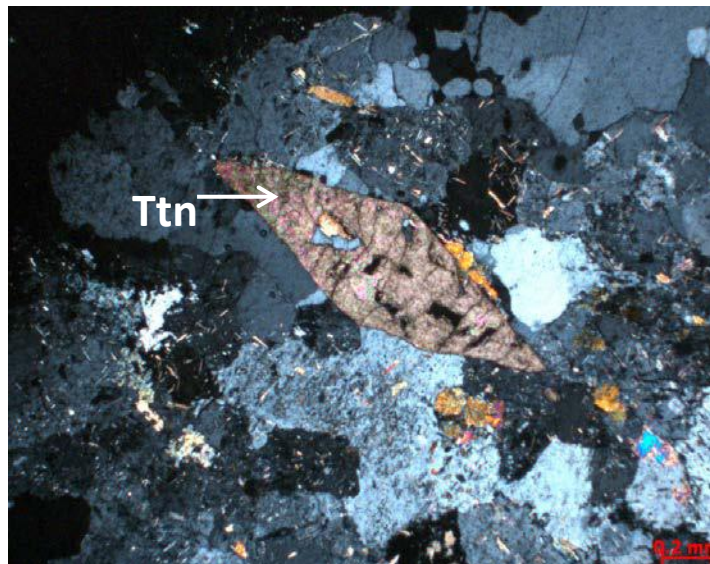


Figura 60 – Grão de titanita primária ( $Ttn_1$ ) com formato losangular, cerca de 1 mm de tamanho e sobrecrescimento de biotita secundária na sua borda (Amostra RF-02 – nicóis cruzados).

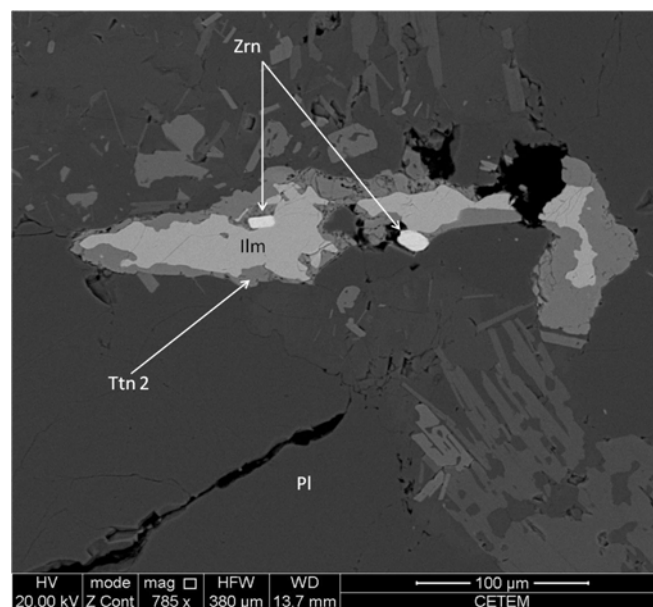


Figura 61 – Grão de ilmenita (Ilm) envolto por titanita ( $Ttn$ ) e com inclusões de zircão (Amostra RF-20 – MEV/BSD).

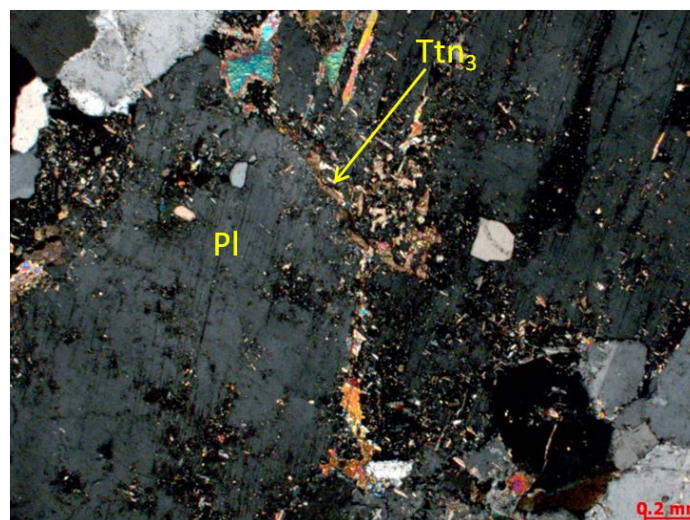


Figura 62 – Grãos de titanita ( $Ttn_3$ ) anédrica preenchendo fraturas ao longo da região do contato entre dois grãos de plagioclásio conjuntamente com biotita e sericita (Amostra RF-02 – nicóis cruzados).

O microclínio é muito raro, apresenta geminação tartan (Figura 63), varia de 0,2 até 0,8 cm e ocorre como grãos desde subédricos até anédricos, preenchendo os espaços entre os grãos de plagioclásio e quartzo. Muitas das vezes seus cristais parecem penetrar na face dos grãos de plagioclásio, indicando claramente seu caráter tardio (Figuras 63 e 64). Quando observada na catodoluminescência possui uma cor azul escuro bem distinta (Figura 64). Sua composição é basicamente  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (17,7 e 19 % de massa),  $\text{SiO}_2$  (50,5 a 53,4 % de massa),  $\text{K}_2\text{O}$  (14,7 a 17,1 % de massa). Sr e Ba aparecem como elementos menores, chegando a 4,8 e 1,9 % em massa de seu óxido. O Na ocorre como elemento traço (<0,1 % em peso de óxido) em apenas algumas análises (Tabela 13).

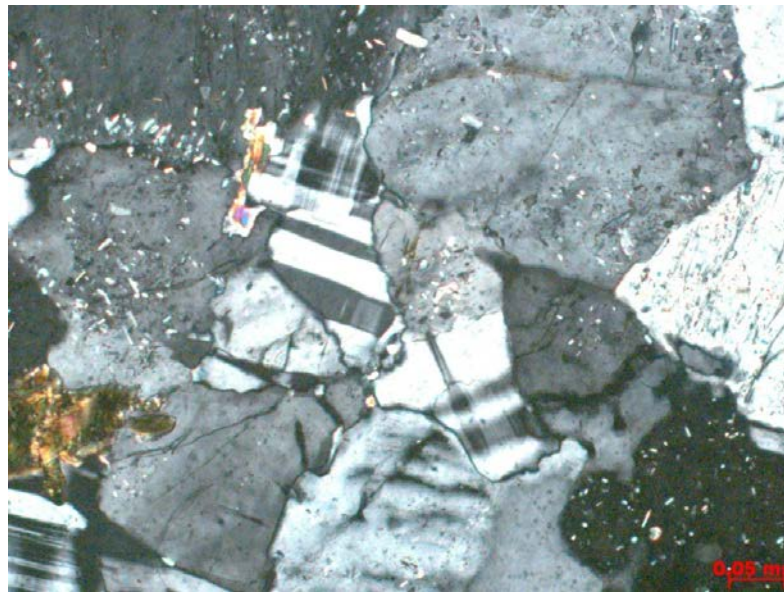


Figura 63 – Grão de microlina anédrica preenchendo os espaços entre grãos de plagioclásio, bem como penetrando a face do mesmo (Amostra VH-53 – nicóis cruzados).

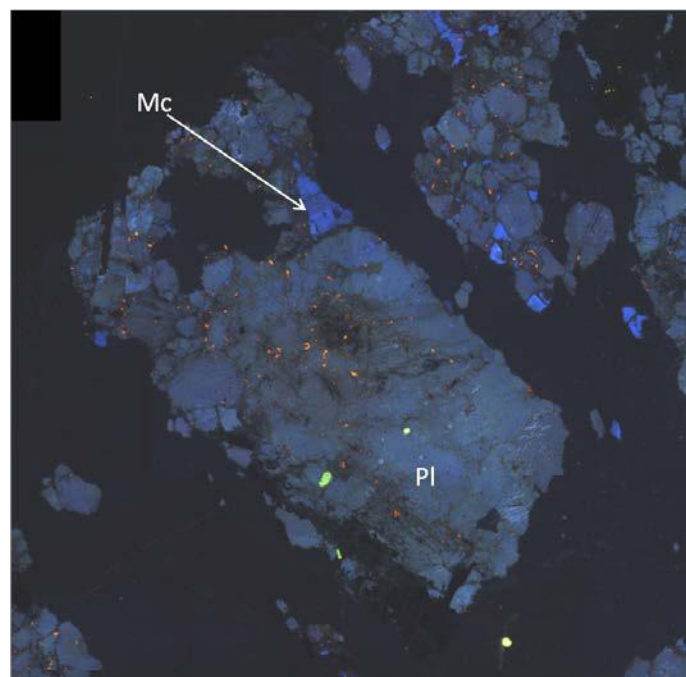


Figura 64 – Grão de microlina (Mc) anédrico e com luminescência azulada forte penetrando na face do plagioclásio (Pl) com luminescência azulada mais fraca (Amostra RF-25 – catodoluminescência).



Tabela 13- Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de K-feldspato do ortognaisse Resende Costa.

Rocha hospedeira Amostra_analise	Ortognaisse Resende Costa					
	19	23	EL-256 24	50	51	67
Na <sub>2</sub> O	1,1	0,0	0,6	0,0	0,6	0,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,3	18,5	17,4	19,0	17,8	17,7
SiO <sub>2</sub>	51,5	52,4	52,2	53,4	51,4	50,5
K <sub>2</sub> O	14,7	15,7	15,4	17,1	16,5	14,8
BaO	1,7	1,6	1,7	1,9	1,7	1,3
SrO	4,4	4,4	4,2	4,8	4,5	4,0
Total	91,8	92,8	91,8	96,5	92,7	88,5

A granada varia desde 0,1 até 0,3 mm, ocorre como grãos subédricos límpidos e apresenta hábito granular (Figura 65).

O epidoto ocorre como grãos desde subédricos até anédricos, seu tamanho é inferior a 0,4 mm e pode ser observado de três formas: (i) em grãos subédricos (epidoto<sub>1</sub>) substituindo grãos de plagioclásio (Figura 56); (ii) em grãos anédricos (epidoto<sub>2</sub>) envolvendo os minerais opacos (Figura 48 e 59) e; (iii) em grãos anédricos (epidoto<sub>3</sub>) que se desenvolvem ao redor de allanita ocasionando a formação da estrutura de “ovo frito” (Figura 59 e 66). Em alguns grãos, observou-se uma continua transformação de epidoto para zoisita/clinozoisita.

A zoisita/clinozoisita ocorre como um mineral anédrico, seu tamanho varia desde inferior a 0,1 mm até 0,4 mm, exibe cor de interferência azul e pode estar substituindo os cristais de plagioclásio ou ao redor dos grãos de epidoto (Figura 54).

A sericita varia desde 0,1 até 0,4 mm, ocorre como grãos desde anédricos até subédricos e encontra-se substituindo o plagioclásio (Figura 41).

O carbonato ocorre sobresscrescido aos grãos de plagioclásio, possui tamanho médio de 0,6 mm e apresenta forma anédrica (Figuras 40, 43 e 67).



Figura 65 – Grão de granada subédrico e límpido (Amostra EL-256 – nicóis paralelos).

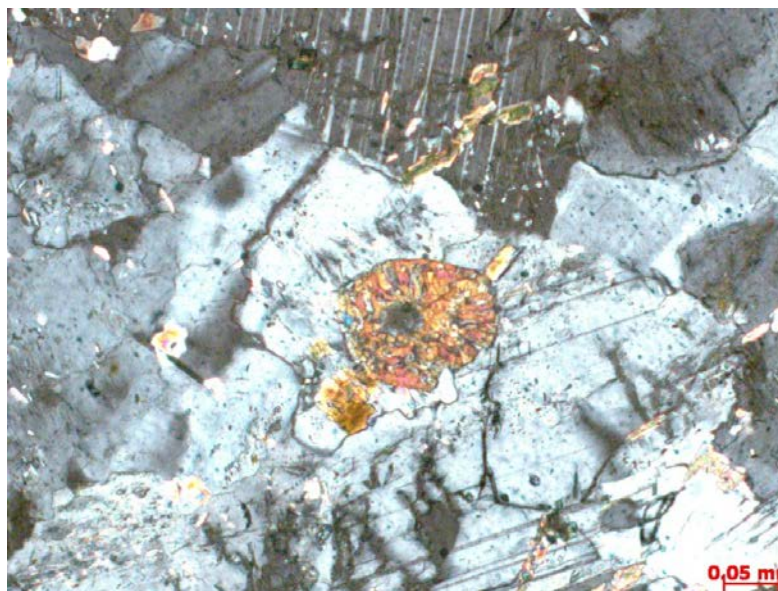


Figura 66 – Epidoto anédrico e radial envolvendo grão de allanita e gerando a textura “ovo frito” (Amostra VH-53 – nicóis cruzados).

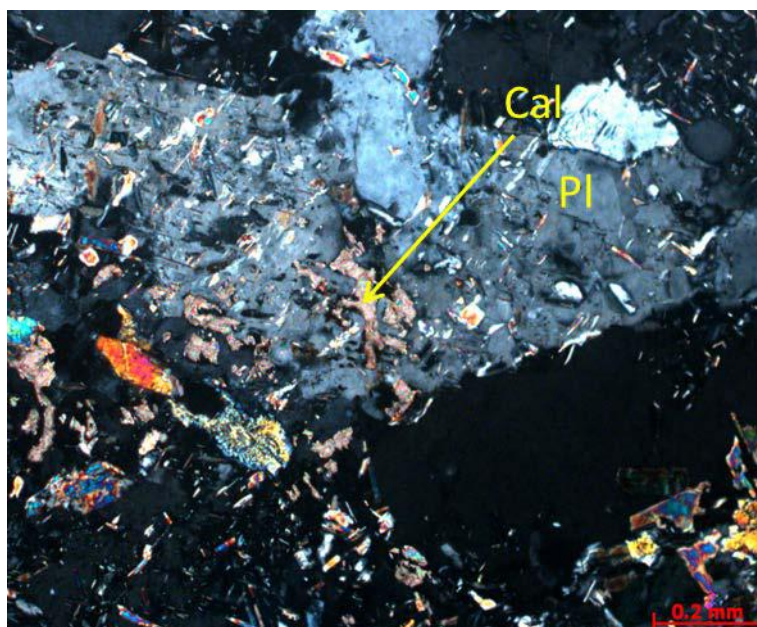


Figura 67 – Grãos de carbonato com forma anédrica e substituindo o plagioclásio (Amostra EL-255-C2– nicóis cruzados).

### 7.3.1 ORDEM DE CRISTALIZAÇÃO E TRANSFORMAÇÕES

Quanto à ordem de cristalização dos minerais acredita-se que: zircão, apatita, granada, minerais opacos (ilmenita e magnetita/hematita), titanita<sub>1</sub> e allanita foram os primeiros a cristalizarem, pois são euédricos, ocorrem na forma de inclusões em outros minerais essenciais da rocha. Caracterizou-se, ainda, que o zircão precede a formação da apatita e ilmenita, pois este está incluso em ambos (Figura 68).

Esses minerais foram sucedidos pela formação de plagioclásio, biotita<sub>1</sub> e quartzo, uma vez que estes englobam os minerais citados anteriormente. Ao final do processo de cristalização formou-se o microclinio que ocupa os espaços entre os grão de plagioclásio.

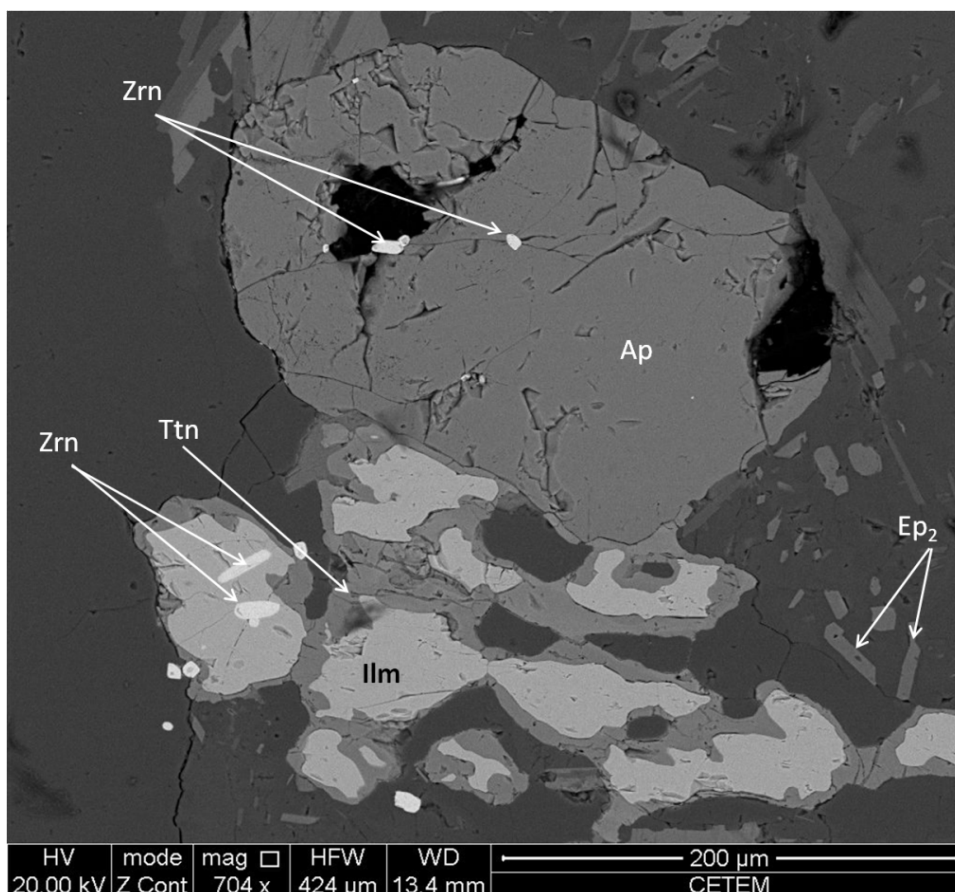


Figura 68 – Imagem representativa para a ordem de cristalização onde zircão (Zrn) está incluído na apatita (Ap) e ilmenita (Ilm). Destaca-se, ainda, a transformação da ilmenita (Ilm) para titanita (Ttn) (Amostra RF-20 – MEV/BSD).

A petrografia juntamente com o MEV apontaram que epidoto<sub>1</sub>, epidoto<sub>2</sub>, epidoto<sub>3</sub>, titanita<sub>2</sub>, titanita<sub>3</sub>, zoisita/clinozoisita, biotita<sub>2</sub>, sericita e carbonato constituem uma paragênese metamórfica, onde: o epidoto<sub>1</sub> advém de reação metamórfica envolvendo o plagioclásio; o epidoto<sub>2</sub> se formou a partir da desestabilização do óxido de Fe, crescendo ao redor dele; o epidoto<sub>3</sub> se formou a partir da desestabilização da allanita, crescendo ao seu redor; a titanita<sub>2</sub> provem de alteração da ilmenita envolvendo-a; a titanita<sub>3</sub> está relacionada ao fluido metamórfico que circula entre os grãos e nas fraturas destes, cristalizando a mesma juntamente com a biotita<sub>2</sub>; a zoisita/clinozoisita também advém de reação metamórfica envolvendo o plagioclásio; e a biotita<sub>2</sub> é formada pela desestabilização do plagioclásio e/ou perda de Fe de grãos da biotita<sub>1</sub> pois esta é mais empobrecida; carbonato e sericita estão associados a alteração do plagioclásio.

## 7.4. ESTEREOMICROSCOPIA DE GRÃOS

### 7.4.1 Amostra LE-1A (Ortognaisse Resende Costa)

No concentrado de minerais pesados da amostra LE-1A (Tabela 14), os minerais predominantes ou mais importantes são ilmenita (fração 0,3 A), pirita limonitizada (fração 0,5 A), epidoto (fração 0,6 A), monazita (fração 0,8 A) e zircão (frações 0,8 A - 1,0 A - 1,8 A - Não atraível). Foram ainda encontrados granada, columbita e zoisita, enquanto minerais secundários limonita, óxido de Ti e hidróxido de Mn são abundantes.

Tabela 14 - Resultado da análise em estereomicroscopia do concentrado de minerais pesados do ponto LE-1A referente ao ortognaisse Resende Costa.

<b>TABELA DE ANÁLISE DE MINERAIS PESADOS</b>								
TRABALHO FINAL DE CURSO								
UFRJ - Geologia-2016								
Analisador: Taís Proença Cidade				Amostra:LE-1A (Ortognaisse Resende Costa)				
Data:28/08/2016			Procedência: Ortognaisse Resende Costa					
0,3(0,54g)			0,4A (<0,01g)			0,5A (0,04g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Ilmenita	80					PiritaLimonitizada	40	
ÓxidodeTi	14					ÓxidodeTi	30	
Limonita	5		Sem material			Limonita	16	
Zircão	1					Epidoto	10	
Granada	Tr					Zircão	4	
						Monazita	Tr	
						Columbita	Tr	
						Granadaalterada	Tr	
						Hidroxido de Mn	Tr	
0,6A (<0,01g)			0,8A (<0,01g)			1,0A (<0,01g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Epidoto	40		Monazita	40		Zircão	100	
Limonita	30		Zircão	36				
ÓxidodeTi	13		Limonita	12				
Zircão	12		ÓxidodeTi	12				
Monazita	5		Epidoto	Tr				
Zoisita	Tr		Hidroxido de Mn	Tr				
Hidroxido de Mn	Tr							
1,5A (<0,01g)			1,8 A (<0,01g)			N.A.<0,12g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
			Zircão	100		Zircão	100	
Sem material								

A ilmenita foi encontrada na fração 0,3 A e apresenta-se como um mineral opaco, de brilho metálico, cor preta e com formas desde subédrica até anédrica (Figura 69 a). Possui faces sub-arredondadas e no geral mostra grau de esfericidade mediano, em contraste com a forma do cristal original (trigonal - formando cristais tabulares achatados). Na maioria dos

grãos possui superfícies alteradas para óxido de Ti, que forma uma massa branca leitosa, em um típico exemplo de substituição secundária. Essa alteração pode penetrar as faces dos grãos de ilmenita ao longo de pequenas fraturas.

A pirita limonitizada foi encontrada na fração 0,5 A e é o grão com maior tamanho no concentrado, apresentando-se como um mineral opaco, de brilho terroso, cor marrom escura a vermelha e, normalmente, apresenta forma euédrica (Figura 69 b). Está relacionada a substituição intempérica dos grãos de pirita e apresenta normalmente forma cúbica, contemplando um exemplo de isomorfismo. Sua esfericidade é baixa e deriva do sistema isométrico do mineral original (pirita), sendo desta forma um mineral com faces costumeiramente bem definidas. Apesar de se tratar de um mineral secundário, não é friável.

O epidoto foi encontrado nas frações 0,5 A e 0,6 A e ocorre como um mineral translúcido a transparente, de brilho vítreo a resinoso, cor verde a amarela e forma predominantemente subédrica com algumas faces preservadas (Figura 69 c). Não possui inclusões visíveis, sua esfericidade é baixa, assemelhando-se a forma original do cristal (grãos monoclinicos prismáticos) e segundo a petrografia corresponde a um mineral oriundo da transformação metamórfica - hidrotermal do plagioclásio ou então está associado a botita e allanita.

A monazita foi encontrada em três frações (0,5 A - 0,6 A - 0,8 A) e apresenta-se como um mineral translúcido, de brilho ceroso, cor amarela pálida a branca amarelada e forma anédrica (Figura 69 d). Já apresenta aspecto fortemente alterado, tendo em sua superfície um brilho mais leitoso, perdendo as características do mineral original.

O zircão foi encontrado nas frações 0,6 A - 0,8 A - 1,0 A - 1,8 A - N.A. e apresenta-se como um mineral desde translúcido até transparente, de brilho adamantino, cor branca a rosa (por vezes marrom claro) e apresenta raras inclusões de minerais escuros (Figura 69 e). Os cristais ocorrem predominantemente sob a forma de prismas bipiramidais, sua esfericidade é baixa, assim como seu arredondamento. A maioria dos grãos apresentam feição típica de metamictização, com a presença de um aspecto leitoso.

A granada foi encontrada nas frações 0,3 A e 0,5 A, ocorre como um mineral translúcido, possui cor avermelhada e forma subédrica. Sua esfericidade é boa, assim como seu arredondamento, que esconde algumas faces do cristal original. Encontra-se fortemente alterada para limonita (Figura 69 h). A columbita foi encontrada na fração 0,5 A e apresenta-se como um mineral opaco, de brilho metálico, cor preta e forma subédrica, ocorrendo em prismas curtos, achatados e com algumas faces estriadas. A zoisita foi encontrada na fração 0,6 A e ocorre como um mineral transparente, de cor branca, forma subédrica, com faces estriadas e um hábito losangular com um eixo alongado.



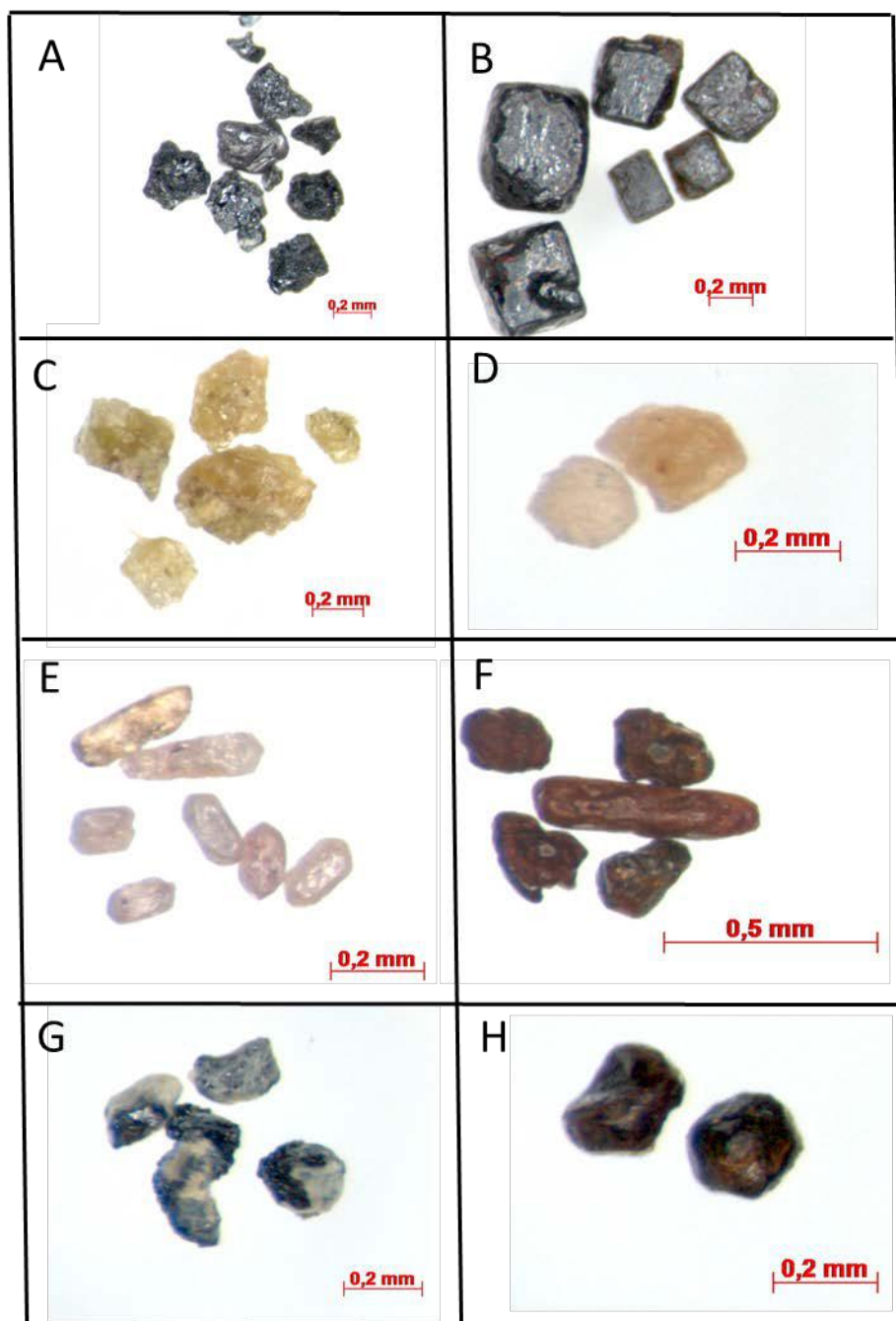


Figura 69– Alguns dos principais minerais da amostra LE-1A em estereomicroscópio: (a) ilmenita; (b) pirita limonitizada; (c) epidoto; (d) monazita; (e) zircão; (f) limonita; (g) Óxido de Ti; (h) granada com capa de alteração.

A limonita foi encontrada nas frações 0,3 A - 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A e apresenta-se como um mineral anédrico, opaco, de brilho terroso e com cor marrom escura a vermelha (Figura 69 f). Possui boa esfericidade com grãos geralmente bem arredondados e é fruto da alteração de minerais com ferro da rocha. É muito friável e quando se esfarela ocasiona a formação de um material de coloração avermelhada. Desagrega-se facilmente ao toque da pinça, bem como pode envolver outros grãos mascarando-os. Um bom exemplo é observado na figura 69 f onde envolve um grão de zircão.

O óxido de Ti foi encontrado nas frações 0,3 A - 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A e apresenta forma anédrica, brilho desde terroso até adamantino, cor branca a creme, é translúcido e corresponde ao produto da alteração secundária da ilmenita (Figura 69 g). No geral os grãos mostram elevada esfericidade, feição previsível de ser encontrada em agregados minerais de origem secundária. Apesar de se tratar de um conjunto de grãos, não é tão friável e impõe certa resistência ao ser pressionado pela pinça.

O hidróxido de manganês foi encontrado nas frações 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A e apresenta-se como um mineral opaco secundário, de brilho terroso, cor preta a cinza escura (por vezes, marrom claro) e forma anédrica.

#### **7.4.2 Amostra LE-3 A (Ortognaisse Resende Costa)**

No concentrado de minerais pesados da amostra LE-3A (Tabela 15) os minerais predominantes são ilmenita (fração 0,3 A), pirita limonitizada (frações 0,5 A - 0,6 A) e zircão (frações 0,8 A - 1,0 A - 1,8 A - Não atraível). Foram ainda observados granada, epidoto, xenotímio, turmalina, cassiterita, columbita - tantalita e microlita, enquanto pirita limonitizada, óxido de Ti, limonita e hidróxido de Mn são minerais tipicamente intempéricos.

A ilmenita foi encontrada na fração 0,3 A e apresenta-se como um mineral opaco, com brilho metálico, cor preta, formas irregulares, fratura conchoidal e encontra-se alterada para leucoxênio, onde forma uma massa branca leitosa, em um típico exemplo de substituição secundária (Figura 70 a). Essa alteração pode penetrar as faces dos grãos de ilmenita ao longo de pequenas fraturas. Seus grãos são muito pequenos e não possuem faces preservadas, apresentando desta maneira forma levemente subangulosa.

A pirita limonitizada foi encontrada nas frações 0,3 A - 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A - 1,0 A e apresenta-se como um mineral opaco, de brilho terroso, cor marrom escura a vermelha e forma euédrica (Figura 70 b). Essas formas derivam do hábito do cristal de pirita, que foi substituído isomorficamente pela limonita. Não possui arredondamento algum e todas as faces encontram-se preservadas.

O zircão foi encontrado nas frações 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A - 1,0 A - 1,8A - N.A. e apresenta-se como um mineral desde translúcido até transparente, de brilho vítreo, cor rosa a marrom e com formas bem definidas (Figura 70 c). Todas as fácies do cristal estão preservadas, formando prismas bipiramidais com uma pirâmide em cada ponta. Constitui mais de 90 % do concentrado.

A granada foi encontrada nas frações 0,3 A e 0,5 A e apresenta-se como um mineral translúcido a transparente, com brilho vítreo, cor laranja claro a vermelho escuro e formas

sub-arredondadas (Figura 70 d). Sua esfericidade é fruto do sistema cristalográfico (cúbico - dodecaédrico), destacando-se que algumas poucas faces ainda estão preservadas. Não foi possível observar a presença de inclusões ou associações minerais. Quando alterada intempericamente proporciona a formação de uma crosta opaca ao seu redor que dificulta muito a sua identificação. Porém quando apertada com a pinça, a casca superficial é liberada, destacando-se o aspecto inicial do grão.

Tabela 15 - Resultado da análise em estereomicroscópio do concentrado de minerais pesados do ponto LE-3A referente ao ortognaisse Resende Costa.

<b>TABELA DE ANÁLISE DEMINERAIS PESADOS</b>								
TRABALHO DE FINAL DE CURSO								
UFRJ-Geologia-2016								
Analisador Taís Proença Cidade			Amostra: LE-3A (Ortognaisse Resende Costa)					
Data:12/07/2016			Procedência: Ortognaisse Resende Costa/MG					
0,3A (0,04g)			0,4A (<0,01g)			0,5A (0,3g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Ilmenita	45		Sem material			Pirita limonitizada	88	
Pirita limonitizada	38					Zircão	3	
Granada alterada	10					Ilmenita	3	
Zircão	7					Epídoto	3	
Óxido de Ti	Tr					Columbita	2	
Columbita	Tr					Xenotímio	1	
						Granada alterada	Tr	
						Columbita alterada	Tr	
0,6A (0,01g)			0,8A (<0,01g)			1,0A (<0,01g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Pirita limonitizada	78		Zircão	70		Zircão	90	
Limonita	10		Pirita limonitizada	30		Pirita imonitizada	10	
Zircão	6		Microlita	Tr		Microlita	Tr	
Epídoto	4		Epídoto	Tr		Turmalina	Tr	
Columbita	2		Limonita	Tr				
Xenotímio	Tr		Columbita	Tr				
Hidroxido de Mn	Tr		Hidroxido de Mn	Tr				
1,5A (<0,01g)			1,8 A (<0,01g)			N.A.(0,17g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Sem material			Zircão	99		Zircão	99	
			Microlita	1		Cassiterita	1	

O epidoto foi encontrado nas frações 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A e apresenta-se como um mineral translúcido, de brilho vítreo, cor verde clara e forma anédrica (Figura 70 e). Encontra-se quebrado e em grãos muito pequenos.

O xenotímio foi encontrado nas frações 0,5 A e 0,6 A e a turmalina foi encontrada somente na fração 1,0 A. Ambos ocorrem de forma bastante restrita, onde o primeiro é translúcido, resinoso, branco leitoso e seus grãos correspondem a fragmentos de bipiramides

achatadas, com raras faces bem preservadas. A turmalina varia de transparente a translúcida, apresenta brilho vítreo, cor marrom e ocorre em um único grão com base típica e com faces estriadas ao longo do eixo C.

A cassiterita foi encontrada na fração N.A. e apresenta-se como um mineral translúcido, com brilho vítreo, cor preta a vermelha escura e forma desde subédrica até anédrica. Sua esfericidade é boa e os grãos assemelham-se a pequenas formas subarredondadas (devido ao seu sistema cristalino - tetragonal achatado), mas às vezes alguns grãos apresentam faces tipicamente primárias. Geralmente encontrada em grãos muito pequenos e em quantidades ínfimas. Quando os grãos são colocados em uma placa de zinco com o ácido clorídrico, observa-se uma reação onde o mineral fica com brilho metálico, sendo está comumente designada de "estanhagem".

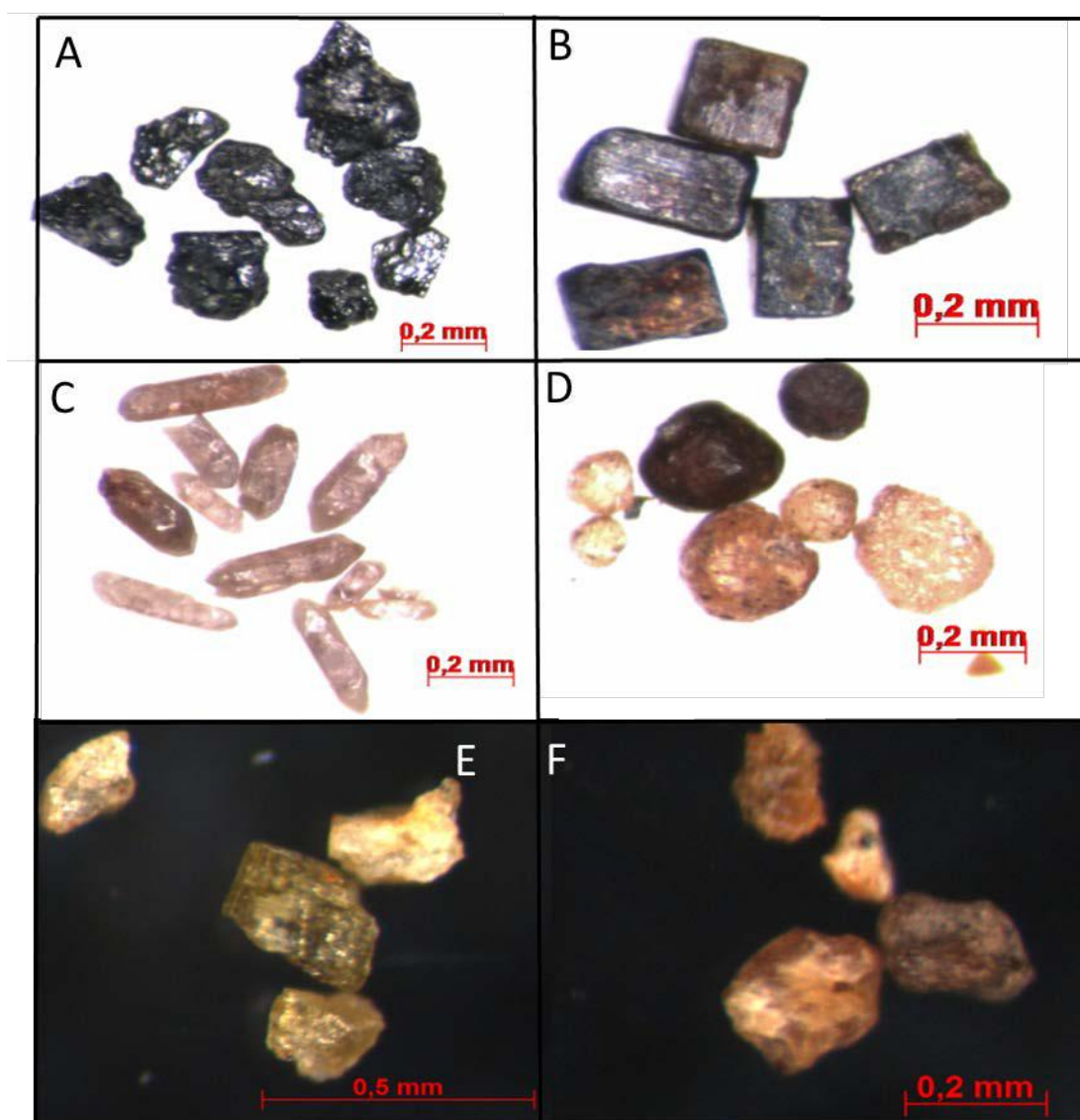


Figura 70 – Alguns dos principais minerais da amostra LE-3A em estereomicroscópio: (a) ilmenita; (b) pirita limonitizada; (c) zircão; (d) granada; (e) epidoto; (f) microlita.

A columbita - tantalita foi encontrada nas frações 0,3 A - 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A e apresenta-se de cor preta, opaca, com brilho metálico e forma euédrica. Possui forma de prismas curtos, achatados e com algumas faces estriadas (assemelham-se a tabletes). Quando alterada para microlita exibe porções mais claras, de cor bege e brilho resinoso, sendo que essa alteração foi reconhecida com o auxílio da microsonda Raman.

A microlita foi encontrada nas frações 0,8 A - 1,0 A - 1,8 A, apresenta forma anédrica, é translúcida, possui brilho desde vítreo até resinoso e cor amarela a marrom. Seu tamanho é variável, mas sua esfericidade e seu arredondamento são bons (Figura 70 f). Não possui inclusões nem associações visíveis nessa escala.

O óxido de Ti foi encontrado nas fração 0,3 A e apresenta-se com forma anédrica, possui brilho desde terroso até adamantino, cor branca a creme, é translúcido e corresponde ao produto da alteração secundária da ilmenita.

A limonita foi encontrada nas frações 0,6 A e 0,8 A e apresenta-se como um mineral anédrico, opaco, de brilho terroso e com cor marrom escura a vermelha. Possui boa esfericidade com grãos geralmente bem arredondados e é fruto da alteração de minerais com ferro da rocha. É muito friável e quando se esfarela ocasiona a formação de um material de coloração avermelhada.

O hidróxido de manganês foi encontrado nas frações 0,6 A - 0,8 A e apresenta-se como um mineral opaco secundário, de brilho terroso, cor preta a cinza escura (por vezes, marrom claro) e forma anédrica.

Sugere-se que a presença de cassiterita e columbita - tantalita nessa amostra possa estar relacionada a contaminação do material durante a preparação e separação no bromofórmio uma vez que esses minerais são típicos de pegmatitos.

#### **7.4.3 Amostra LE-4 (Ortognaisse Resende Costa)**

No concentrado de minerais pesados da amostra LE-4 (Tabela 16) os minerais predominantes são ilmenita (fração 0,3A), limonita (fração 0,5A), epidoto (fração 0,6A) e zircão (frações 0,8A - 1,0A - 1,8 A - Não atraível). Os demais minerais ocorrem em menores proporções e correspondem a granada, turmalina, monazita e cassiterita, enquanto pirita limonitizada, hidróxido de manganês, óxido de Ti e limonita são tipicamente intempéricos.

A ilmenita foi encontrada nas frações 0,3 A e 0,5 A e é um mineral opaco, com brilho metálico, cor preta e ocorre em grãos grandes, predominantemente tabulares achatados, com algumas faces preservadas (Figura 71 a). Encontra-se levemente alterada para óxido de Ti,



pois observa-se a formação de uma massa branca leitosa, em um típico exemplo de substituição secundária.

Tabela 16 - Resultado da análise em estereomicroscópio do concentrado de minerais pesados do ponto LE-4 referente ao ortognaisse Resende Costa.

<b>TABELA DE ANÁLISE DE MINERAIS PESADOS</b>								
TRABALHO DE FINAL DE CURSO								
UFRJ-Geologia-2016								
Analizador: Taís Proença Cidade			Amostra: LE-4A (Ortognaisse Resende Costa)					
Data: 28/08/2016			Procedência: Ortognaisse Resende Costa					
0,3A (0,03g)			0,4A (<0,01g)			0,5A(0,02g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Ilmenita	90					Limonita	80	
Óxido de Ti	7					Óxido de Ti	7	
Granada	2		Sem material			Epidoto	6	
Limonita	1					Pirita Limonitizada	4	
Zircão	Tr					Ilmenita	2	
						Granada alterada	1	
						Turmalina	Tr	
						Zircão	Tr	
0,6A (<0,01g)			0,8A (<0,01g)			1,0A (<0,01g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Epidoto	70		Zircão	32		Zircão	56	
Limonita	27		Hidróxido de Mn	21		Limonita	35	
Zircão	3		Limonita	16		Monazita	6	
Granada alterada	Tr		Epidoto	12		Hidróxido de Mn	3	
			Monazita	8				
			Óxido de Ti	7				
			Turmalina	4				
1,5A (<0,01g)			AMáx. (<0,01g)			N.A.(<0,05g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
			Zircão	96		Zircão	99	
Sem material			Hidróxido de Mn	4		Cassiterita	1	

A limonita foi encontrada nas frações 0,3 A - 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A - 1,0 A e é anédrica, opaca, seus grãos são arredondados (feição típica de agregados de minerais), apresenta brilho terroso e cor marrom escura a vermelha (Figura 71 b). Está associada a processos intempéricos e desagrega-se ao toque da pinça.

O epidoto foi encontrado nas frações 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A e ocorre como um mineral translúcido a transparente, de brilho vítreo a resinoso, com cor verde a amarela e forma subhédrica com algumas faces preservadas (Figura 71 c). Não possui inclusões visíveis, sua esfericidade é baixa e não encontra-se alterado.

Grãos de zircão foram observados em todas as frações e variam de translúcidos a transparentes, possuem brilho adamantino, cor desde creme a marrom e forma bipiramidal

(Figura 71 d). Normalmente todas as fácies do cristal estão preservadas e a forma mais comum é o prisma com uma pirâmide em cada ponta. São os maiores minerais do concentrado como um todo e a maioria dos grãos apresentam feição típica de metamictização, com um aspecto leitoso.

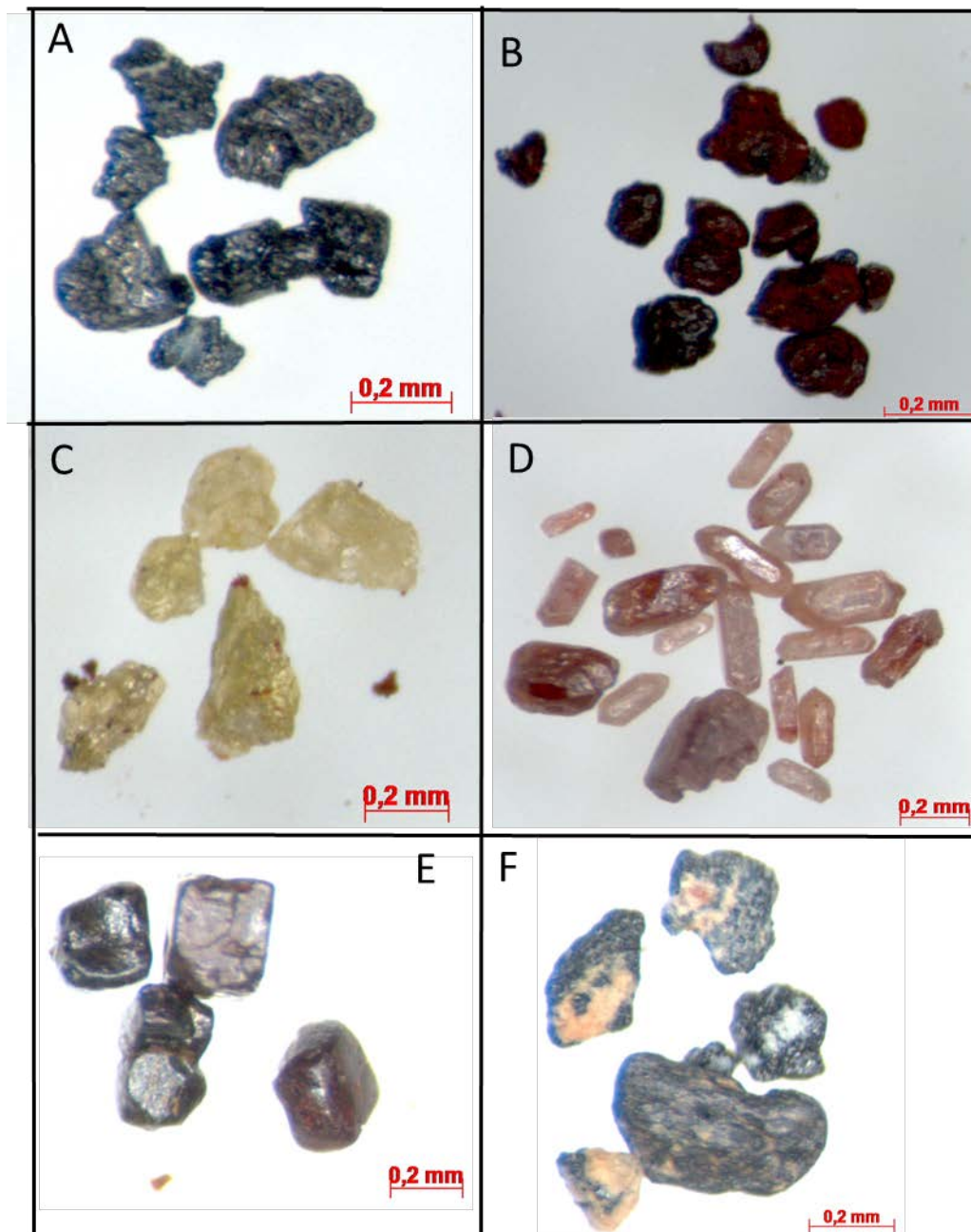


Figura 71 - Alguns dos principais minerais da amostra LE-4 em estereomicroscópio: (a) ilmenita; (b) limonita; (c) epidoto; (d) zircão; (e) pirita limonitizada; (f) óxido de Ti.

A granada foi encontrada nas frações 0,3 A – 0,5 A - 0,6 A, é opaca, possui cor avermelhada e forma próxima a esférica devido ao seu sistema cristalino (isométrico dodecaédrico). Seus grãos são pequenos, é rara e fortemente alterada, com uma capa de limonita ao seu redor. A turmalina foi encontrada na fração 0,8 A e apresenta-se como um

mineral translúcido, de brilho vítreo, cor preta a marrom, forma alongada segundo um eixo e com base sub-triangular com marcantes estrias. É um mineral raro.

A monazita foi encontrada nas frações de 0,8 A e 1,0 A e apresenta-se como mineral translúcido, de brilho resinoso, cor amarela, branca ou levemente esverdeada e encontra-se anédrica (subarredondada) ou mais raramente com algumas faces bem formadas. Não está tão alterada como a monazita da amostra LE-1A e não foi possível observar inclusões.

A cassiterita foi encontrada na fração N.A. e é muito rara, pequena, translúcida, com brilho vítreo, cor preta a castanha e forma anédrica. Os grãos estão arredondados e raramente apresentam faces do cristal original.

A pirita limonitizada foi encontrada na fração 0,5 A e possui brilho terroso, cor marrom escura, forma euédrica em cubos bem preservados e é opaca (Figura 71 e). As formas apresentadas são resquícios de antigos grãos de pirita que foram substituídos isomorficamente, mantendo-se a forma primária dos mesmos. Sua baixa esfericidade e arredondamento estão relacionados ao sistema isométrico do mineral original, onde as faces da pirita ficaram bem preservadas. Ao contrário das amostras LE-1A e LE-3A, esses minerais não são os de maior tamanho do concentrado.

O óxido de Ti foi encontrado nas frações 0,3 A - 0,5 A - 0,8 A e apresenta-se como um mineral opaco, de brilho terroso, cor branca e forma anédrica (Figura 71 f). Ocorre associado a alteração intempérica da ilmenita e sob a forma de um agregado cristalino. O hidróxido de manganês foi encontrado nas frações 0,8 A - 1,0 A - 1,8 A e apresenta-se como um mineral opaco secundário, de brilho terroso, cor preta a cinza escura (por vezes, marrom claro) e forma desde anédrica até botroidal.

Da mesma forma que no concentrado anterior, sugere-se que a cassiterita poderia corresponder a uma contaminação.

#### **7.4.4 Amostra VH-48 (Ortognaisse Resende Costa)**

No concentrado de minerais pesados da amostra VH-58 (Tabela 17) os minerais predominantes são ilmenita (fração 0,3 A), limonita (fração 0,5 A e 0,6A), zircão (frações 0,8 A e N.A.) e sericita (fração 1,8 A). Os demais minerais ocorrem subordinadamente e correspondem a granada, xenotímio, turmalina e monazita; enquanto pirita limonitizada, óxido de Ti, hidróxido de Mn e limonita são minerais tipicamente intempéricos.

A ilmenita foi encontrada nas frações 0,3 A - 0,5 A - 0,6 A - 1,8 A, é um mineral opaco, com brilho metálico, cor preta e ocorre em grãos pequenos, predominantemente fraturados mas com algumas faces preservadas (Figura 72 a). Encontra-se levemente alterada para óxido de Ti, pois observa-se a formação de uma massa branca leitosa, em um típico

exemplo de substituição secundária. Essa alteração pode penetrar as faces dos grãos de ilmenita ao longo de pequenas fraturas.

Tabela 17 - Resultado da análise em estereomicroscópio do concentrado de minerais pesados do ponto VH-48 referente ao ortognaisse Resende Costa.

<b>TABELA DE ANÁLISE DE MINERAIS PESADOS</b>								
TRABALHO FINAL DE CURSO								
UFRJ-Geologia-2016								
Analizador: Taís Proença Cidade			Amostra: VH-48 (Ortognaisse Resende Costa)					
Data: 19/10/2016			Procedência: Ortognaisse Resende Costa					
0,3A (0,18g)			0,4A (0,12g)			0,5A (0,59g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Ilmenita	100		Ilmenita	90		Limonita	55	
Óxido de Ti	Tr		Limonita	5		Piritalimonitizada	45	
Limonita	Tr		Pirita limonitizada	5		Óxido de Ti	Tr	
Granada	Tr		Granada	Tr		Granada	Tr	
Pirita limonitizada	Tr		Zircão	Tr		Zircão	Tr	
Zircão	Tr		Óxido de Ti	Tr		Hidróxido de Mn	Tr	
						Xenotímio	Tr	
0,6A (<0,01g)			0,8A (<0,01g)			1,0A (<0,01g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Limonita	45		Zircão	47		Pouco		
Piritalimonitizada	45		Limonita	33		material		
Zircão	10		Piritalimonitizada	20				
Turmalina	Tr		Turmalina	Tr				
Hidróxido de Mn	Tr							
Sericita	Tr							
Monazita	Tr							
1,5A (<0,01g)			AMáx. (<0,01g)			N.A. (0,71g)		
Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO	Mineral	%	FOTO
Sem material			Sericita	80		Zircão	100	
			Zircão	20				

A limonita foi encontrada nas frações 0,3 A - 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A, é anédrica, opaca, seus grãos são arredondados (feição típica de agregados de minerais), apresenta brilho terroso e cor marrom escura a vermelha (Figura 72 b). Está associada a processos intempéricos desenvolvidos sobre minerais com ferro na sua composição e desagrega-se ao toque da pinça.

O zircão foi encontrado nas frações 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A - 1,8 A - N.A. e varia de translúcido a transparente, possui brilho adamantino, cor desde creme a marrom e forma bipiramidal (Figura 72 c). Normalmente todas as fácies do cristal estão preservadas e a forma mais comum é o prisma com uma pirâmide em cada ponta. São os minerais mais abundantes do concentrado.

A sericita foi encontrada desde a fração 0,6 A até a 1,8 A, possui cor esbranquiçada, brilho nacarado e é translúcida. Sua forma é euédrica em tabletes bem preservados.

A granada foi encontrada nas frações 0,3 A e 0,5 A, possui cor alaranjada e forma esférica devido ao seu sistema cristalino (isométrico dodecaédrico) (Figura 72 d). Seus grãos são pequenos e ocorrem de forma muito rara.

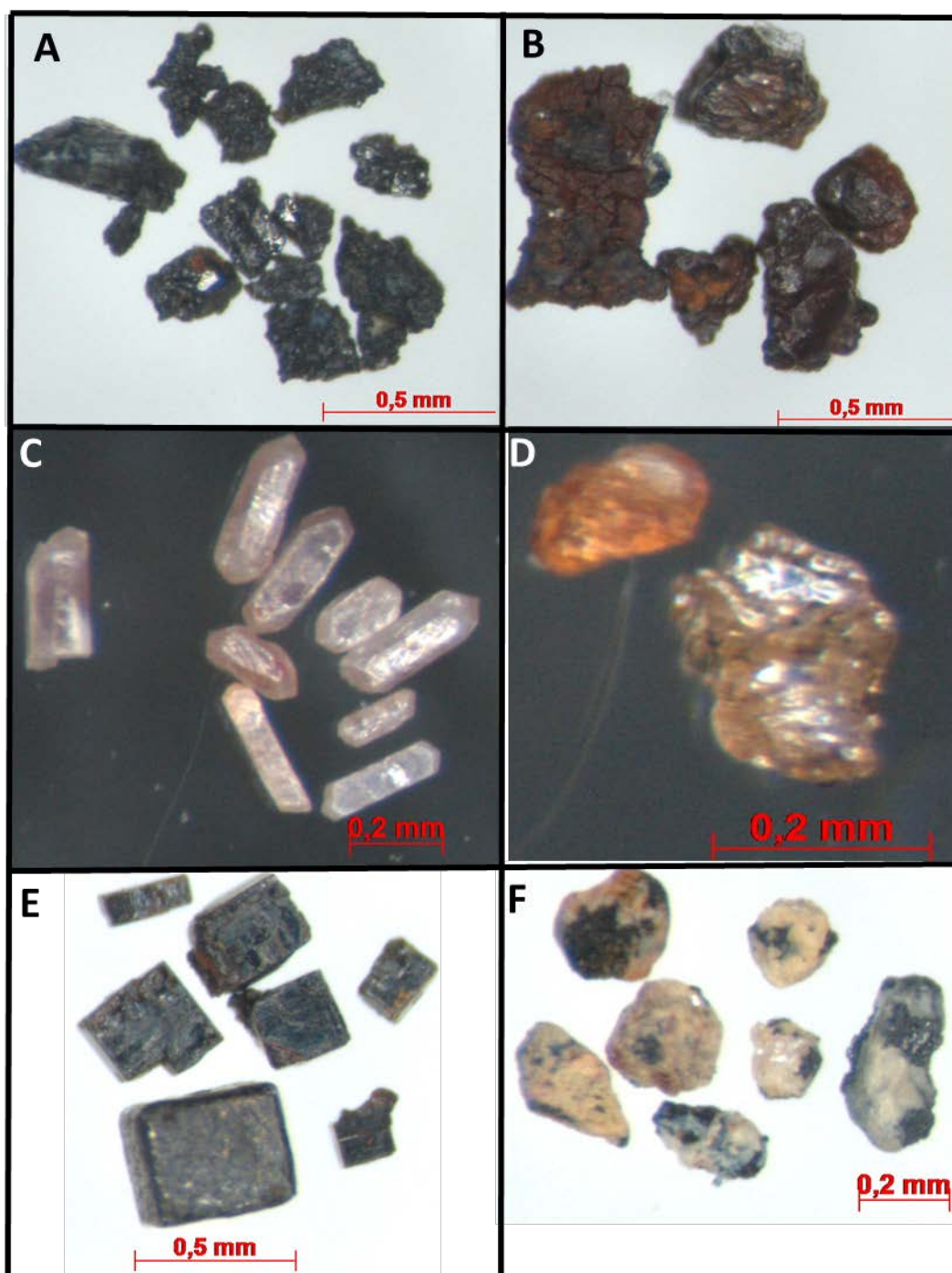


Figura 72 - Alguns dos principais minerais da amostra R-01 em estereomicroscópio: (a) ilmenita; (b) limonita; (c) zircão; (d); granada (e) pirita limonitizada e (f) óxido de titânio.

O xenotímio foi encontrado na fração 0,5 A e a turmalina foi encontrada nas frações 0,6 A e 0,8 A. Esses minerais ocorrem de forma bastante restrita, onde o primeiro é translúcido, resinoso, branco leitoso e seus grãos correspondem a fragmentos de bipirâmides achatadas,



com raras faces bem preservadas, enquanto a turmalina varia de transparente a translúcida, apresenta brilho vítreo, cor marrom e ocorre com faces estriadas ao longo do grão.

A monazita foi encontrada nas frações de 0,6 A e 0,8 A sua cor varia desde branca até levemente amarelada, seu brilho é translúcido e possui forma anédrica.

A pirita limonitizada foi encontrada nas frações de 0,5 A - 0,6 A - 0,8 A, possui brilho terroso, cor marrom escura, forma euédrica em cubos bem preservados e é opaca (Figura 72 e). As formas apresentadas são resquícios de antigos grãos de pirita que foram substituídos isomorficamente, mantendo-se a forma primária dos mesmos. Sua baixa esfericidade e arredondamento estão relacionados ao sistema isométrico do mineral original, onde as faces da pirita ficaram bem preservadas.

O óxido de Ti foi encontrado nas frações 0,3 A - 0,5 A - 0,6 A, apresenta-se como um mineral opaco, de brilho terroso, cor branca e forma anédrica (Figura 72 f). Ocorre associado a alteração intempérica da ilmenita e sob a forma de um agregado cristalino. O hidróxido de manganês foi encontrado nas frações 0,5 A e 0,6 A e apresenta-se como um mineral opaco secundário, de brilho terroso, cor preta a cinza escura (por vezes, marrom claro) e forma anédrica.

## 7.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DOS MINERAIS PESADOS DOS SAPRÓLITOS

### 7.5.1. Ilmenita

Os grãos de ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) foram divididos em dois grupos diferentes, de acordo com a presença ou não de feições de alteração. O primeiro grupo é composto por grãos limpos e sem inclusões (Figura 73 a), que perfaz menos de 2% dos grãos analisados, enquanto o segundo é composto por grãos alterados para óxido de Ti e com inclusões variadas, sendo as mais comuns zircão, titanita e óxido de ferro (Figuras 73 b - d). Outros minerais também foram encontrados como inclusões, porém ocorrem de forma mais restrita, sendo elas: monazita (amostra LE-1A), cassiterita (amostra LE-4), biotita (amostras LE-1A e LE-4A), moscovita (amostra VH-48), columbita-(Fe) (amostras LE-3A e LE-4), quartzo (amostras LE-3A e VH-48) e possível samarskita (amostra LE-3A) (Figuras 74 a-f).

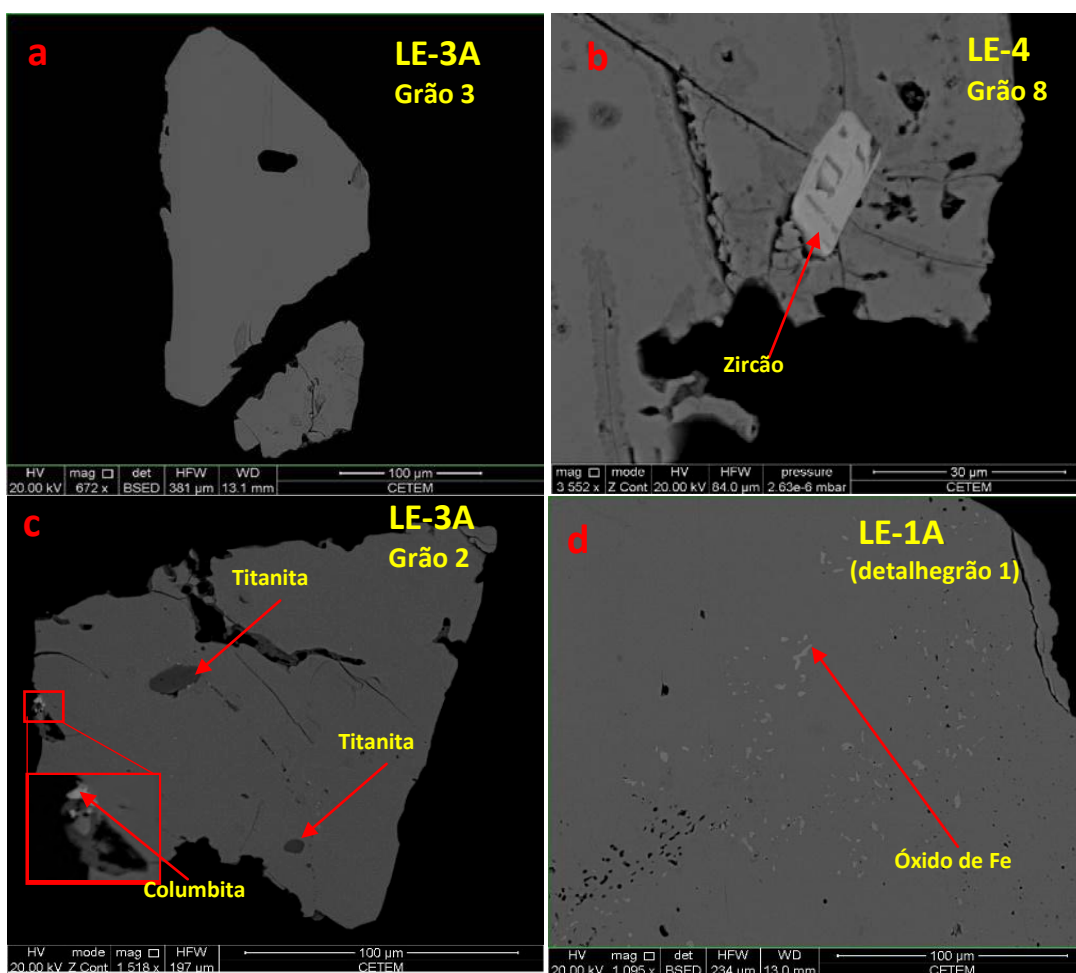


Figura 73 – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de grãos de ilmenita do ortognaisse Resende Costa. (a) grão límpido, sem inclusões ou alterações; (b), (c) e (d) exemplos dos principais tipos de inclusões.

As inclusões de óxidos de Fe tendem, em sua maioria, a ocorrerem paralelas, provavelmente seguindo as direções cristalográficas dos grãos (Figura 75 a - b), sendo então o resultado da exsolução desse mineral da estrutura da ilmenita. Apresentam

predominantemente forma subarredondada, mas também podem ocorrer como pequenas manchas irregulares nos grãos (Figura 75c). Muitas vezes os grãos podem apresentar buracos orientados que poderiam ter sido inclusões de óxido de Fe lixiviadas (Figura 75 b - d). As demais inclusões ocorrem geralmente com hábito subarredondado (Figura 74 a-f), com exceção do zircão que tende a ocorrer com um formato tabular (Figura 73 b).

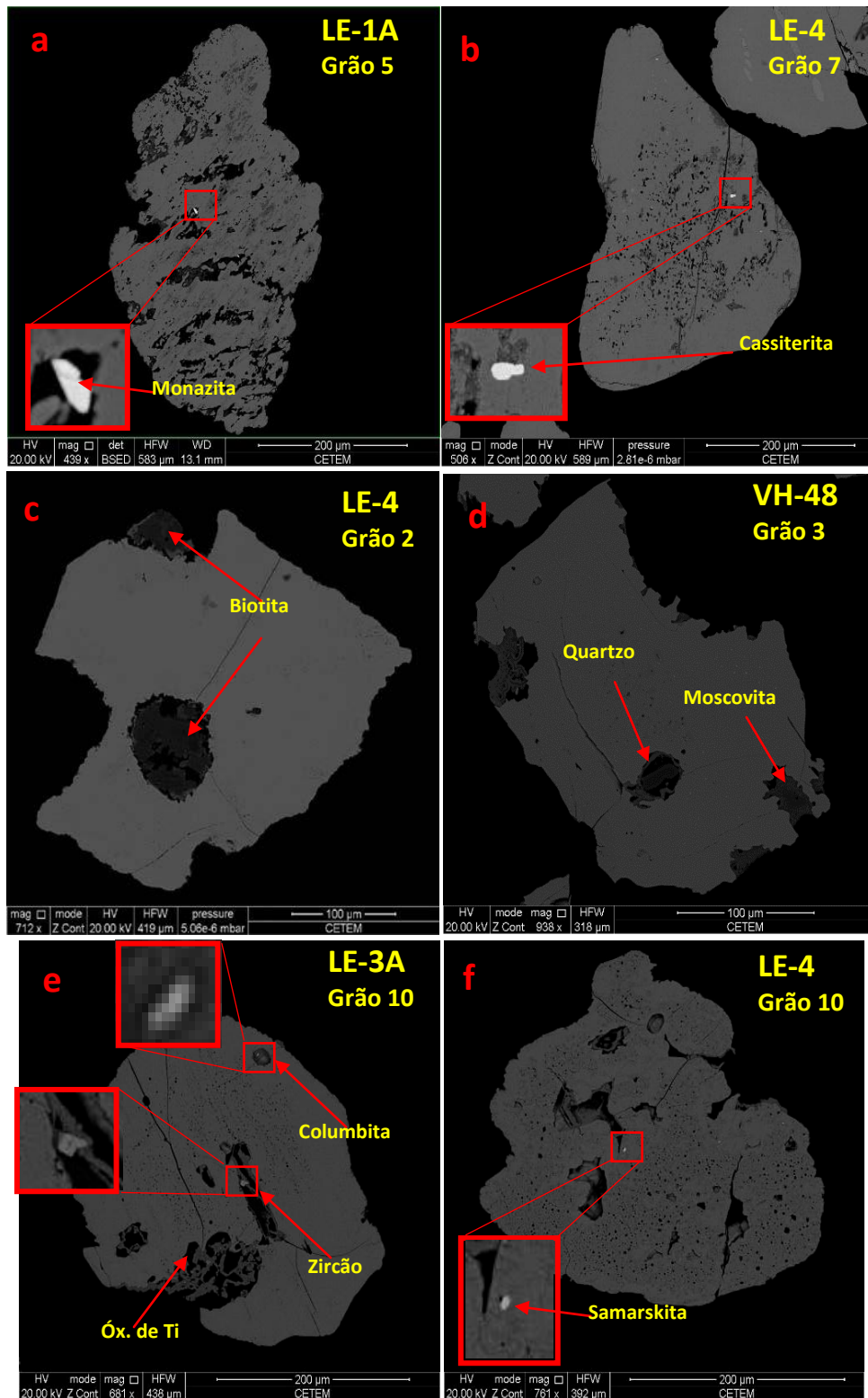


Figura 74 – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de inclusões encontradas nos grãos de ilmenita do ortogneisse Resende Costa. (a) monazita, (b) cassiterita, (c) biotita, (d) quartzo e moscovita, (e) columbita-(Fe), zircão e óxido de titânio e (f) possível samarskita.

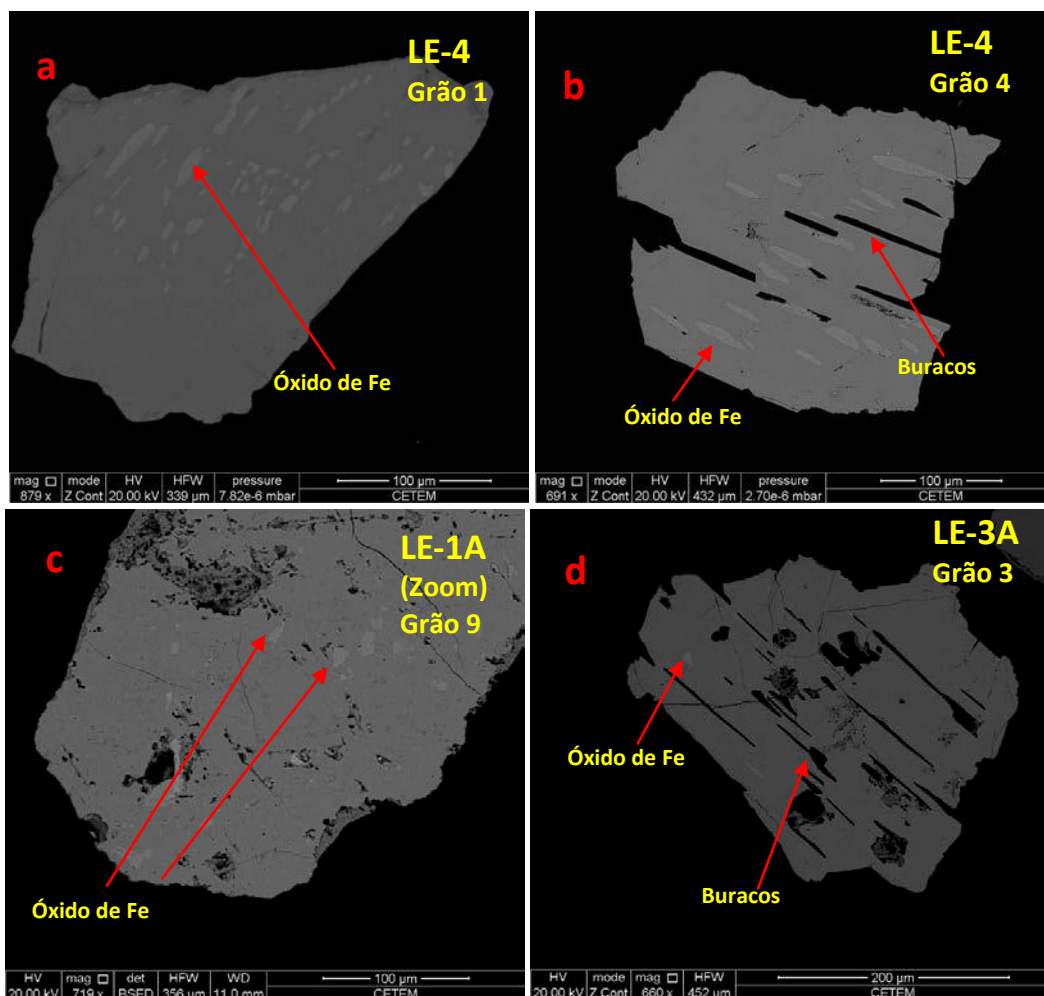


Figura 75 – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de inclusões ou exsoluções de óxido de ferro nos grãos de ilmenita do ortognaisse Resende Costa. (a) inclusões de óxido de ferro subarredondadas e orientadas no grão de ilmenita, (b) inclusões de óxido de ferro subarredondadas, com hábito tabular e orientadas no grão de ilmenita. Presença de buracos com forma tabular, orientados e que poderiam corresponder a inclusões de óxido de ferro que foram removidas do grão de ilmenita, (c) inclusões de óxido de ferro dispostas de maneira irregular no grão de ilmenita e (d) buracos com forma tabular e orientados que poderiam corresponder a inclusões de óxido de ferro que foram removidas do grão de ilmenita.

Os grãos de ilmenita de todas as amostras podem ocorrer ou não associados a minerais de alteração delas mesmas (óxido de Ti). O início da alteração dos cristais de ilmenita para óxido de Ti pode ser observado ao longo de fraturas aleatórias nos grãos (Figura 76a), a partir da ocorrência de fraturas radiais (Figura 76b), nas bordas dos grãos (Figura 76c) e no centro deles com um aspecto gráfico (Figura 76d). Esses tipos de alterações foram encontrados em todas as amostras analisadas.

### 7.5.1.1 Química mineral por MEV/EDS

A ilmenita encontrada no ortognaisse Resende Costa é caracterizada por um elevado conteúdo de  $\text{TiO}_2$  (51,6 a 59,7% em massa) e de  $\text{FeO}$  (34,1 a 46,1 % em massa). Mn é um elemento importante em apenas alguns grãos e seus teores variam bastante, entre 0,00 e 13,8

% em peso de MnO. Si, Nb e Zn ocorrem como elementos menores e seus valores máximos são de 0,2, 0,8 e 0,4 % em massa de seu óxido, respectivamente (Tabela 18).

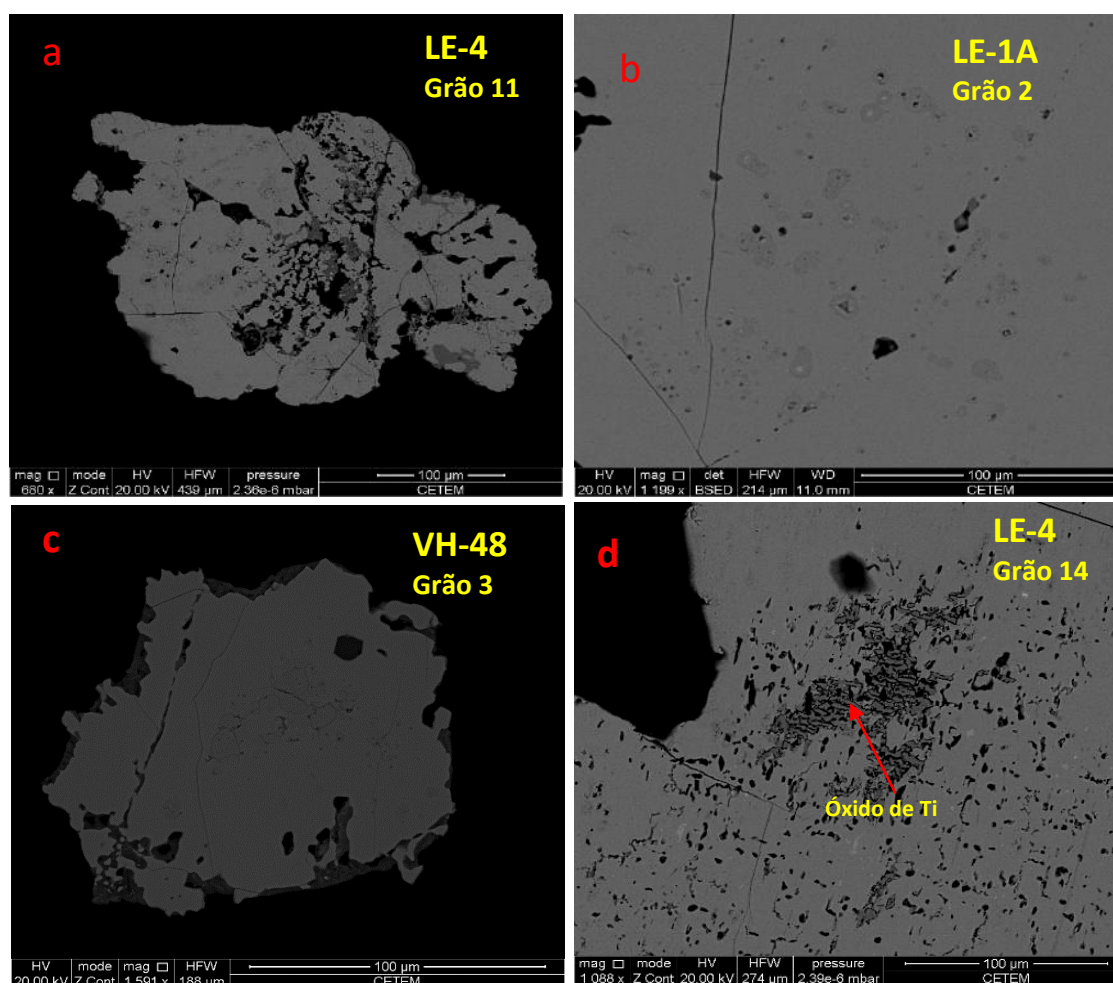
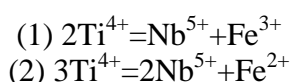


Figura 76 – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de alterações encontradas nos grãos de ilmenitado ortognaisse Resende Costa. (a) início da alteração ao longo de fraturas em um grão, (b) detalhe de fraturas radiais, (c) início da alteração nas bordas de um grão e (d) textura gráfica de alteração em um grão.

É possível observar através da Figura 77 uma correlação direta entre o  $\text{Fe}^{2+}$  e o  $\text{Mn}^{2+}$ , indicando substituições entre cátions divalentes que ocupam o sítio A da ilmenita. As substituições do sítio B se dão principalmente entre  $\text{Ti}^{4+}$  e  $\text{Si}^{4+}$  e os cátions  $\text{Nb}^{5+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ . Para essa estrutura, o mecanismo de substituição adotado foi o proposto por Nakashima & Imaoka (1998), que corresponde a:



O gráfico de correlação entre a ocupação do sítio A ( $\text{Fe}^{2+}$ , Mn) e B (Ti, Nb,  $\text{Fe}^{3+}$ ) (Figura 78) mostra uma tendência de aumento na proporção de cátions que ocupam o sítio A.

O cálculo dos membros finais indica que no ortognaisse Resende Costa predomina ilmenita (entre 70 e 100 % mol), tendo subordinadamente pirofanita ( $\text{MnTiO}_3$ ) entre 0 e 26,9 % mol (Figura 79). Geikielita ( $\text{MgTiO}_3$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e coríndon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ocorrem apenas em algumas análises: LE-3A\_40 e LE-4\_22, LE-4\_22, e LE-3A\_15 e LE-3A\_26. Apesar da



ilmenita possuir cinco membros finais, o diagrama ternário utilizado para interpretação será ilmenita-pirofanita-hematita, devido aos baixos teores de coríndon e geikielita na estrutura da ilmenita. Atráves da Figura 79 é possível observar uma maior concentração das análises ao longo da linha ilmenita-pirofanita.

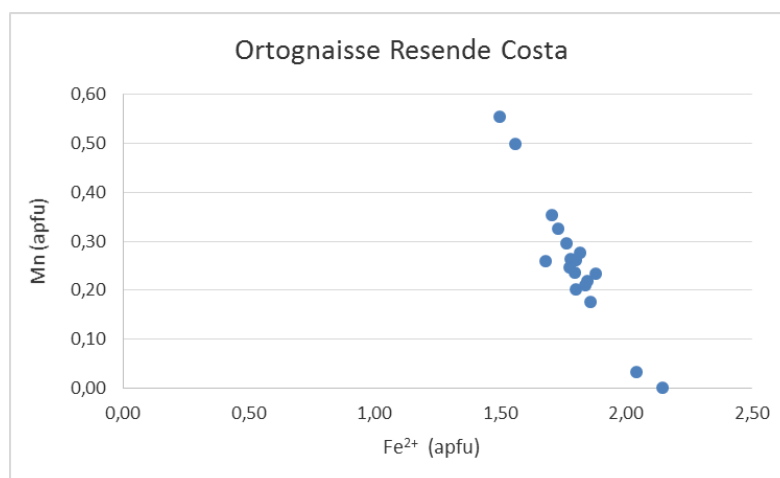


Figura 77 – Gráfico Mn x Fe<sup>2+</sup> em *apfu* de substituição no sítio A nos grãos de ilmenita do ortognaisse Resende Costa.

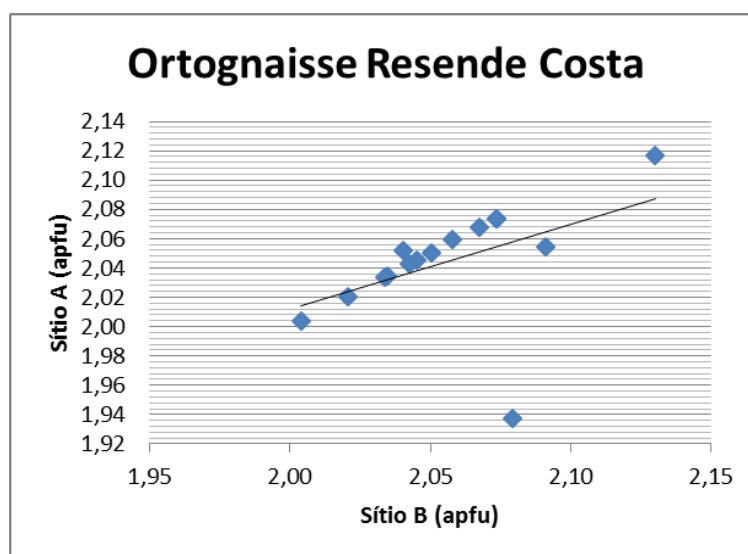


Figura 78 – Gráfico de ocupação dos sítios A e B (em *apfu* para 6 oxigênios) na ilmenita.

### 7.5.2. Granada

Os grãos de granada só foram encontrados nas amostras LE-3A e VH-48 e todas as amostras analisadas apresentam um nível de cinza homogêneo, indicando a ausência de zoneamento químico (Figuras 80a – d). Em geral os grãos estão limpos, podem ter forma arredondada (LE-3A) ou irregular (VH-48), algumas fraturas (Figura 80 b) e raras inclusões minerais, que podem ser de quartzo (LE-3A) e óxido de Ti (LE-3A) (Figuras 80 c - d). A inclusão de quartzo tende a ocorrer um pouco arredondada e comum hábito tabular (Figura 80 c), enquanto a inclusão de óxido de Ti apresenta hábito granular (Figura 80 d).

Tabela 18- Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de ilmenita dos pontos amostrados no ortognaisse Resende Costa.

Rocha hospedeira

Amostra_analise	Ortognaisse Resende Costa																			
	LE-1A					LE-3A					LE-4					VH-48				
	6	14	15	50	62	10	17	20	24	40	1	10	22	35	40	1	7	12	15	18
<i>Óxidos (% em peso)</i>																				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SiO <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TiO <sub>2</sub>	55,2	56,4	55,6	54,3	56,9	59,6	57,9	55,8	57,6	56,5	57,3	57,4	51,6	59,0	59,7	59,3	57,2	56,9	56,4	56,6
MnO	4,5	4,7	0,7	4,2	5,3	5,8	8,0	5,7	13,8	12,1	5,1	6,2	6,0	6,7	5,4	0,0	6,7	6,4	7,1	8,6
FeO	41,8	40,6	44,0	42,2	40,8	37,6	37,4	41,9	34,1	34,2	46,1	43,9	42,7	43,0	44,3	42,6	37,5	39,9	38,2	37,8
ZnO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0
Total	101,6	101,7	100,5	100,7	103,1	103,5	104,3	103,6	106,0	102,9	108,5	107,6	101,2	108,8	109,5	102	101,6	103,4	102,0	103,0
<i>Proporção atômica (6 oxigênios)</i>																				
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Si	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,001	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
Ti	2,045	2,073	2,073	2,035	2,068	2,130	2,073	2,034	2,040	2,058	2,004	2,021	1,956	2,043	2,050	2,145	2,094	2,065	2,067	2,059
Mn	0,191	0,194	0,033	0,177	0,220	0,235	0,325	0,237	0,553	0,500	0,201	0,246	0,258	0,264	0,210	0,000	0,277	0,262	0,295	0,353
Fe <sup>2+</sup>	1,854	1,879	2,041	1,858	1,848	1,882	1,730	1,797	1,499	1,560	1,803	1,775	1,679	1,779	1,840	2,145	1,817	1,803	1,766	1,706
Fe <sup>3+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,119	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,006	0,000
O	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
<i>Membros finais (proporção molar)</i>																				
MnTiO <sub>3</sub> (piofanita)	9,3	9,4	1,6	8,7	10,6	11,0	15,8	11,6	27,0	24,3	10,0	12,2	12,5	12,9	10,3	0,0	13,2	12,7	14,3	17,2
FeTiO <sub>3</sub> (ilmenita)	90,7	90,6	98,4	91,3	89,4	88,4	84,2	88,4	73,0	75,7	90,0	87,8	81,0	87,1	89,7	100,0	86,8	87,3	85,7	82,8
MgTiO <sub>3</sub> (geikielita)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (hematita)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (córindon)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

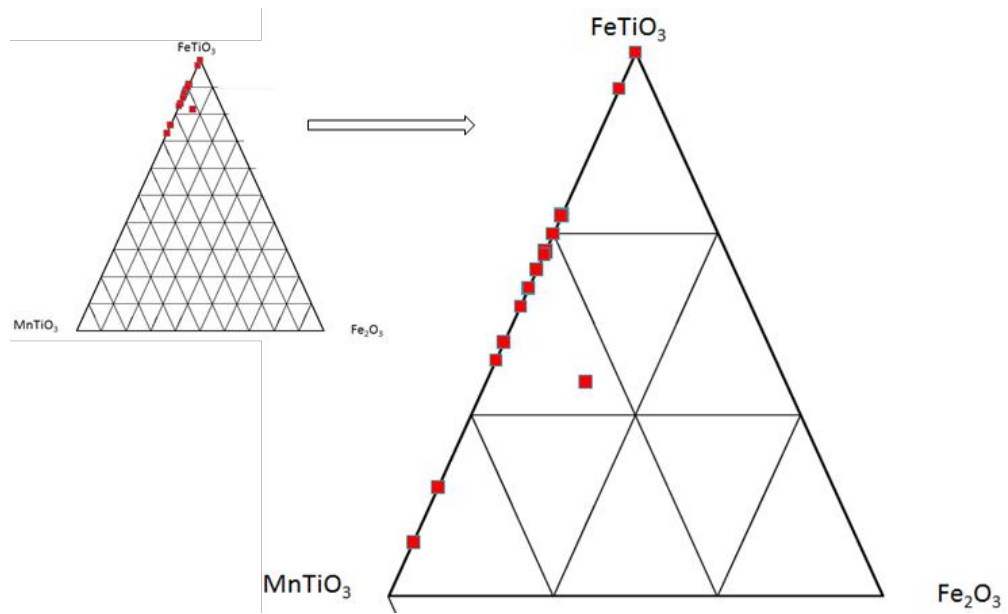


Figura 79 – Diagrama ternário dos membros finais ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) – pirofanita ( $\text{MnTiO}_3$ ) – hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) do ortognaisse Resende Costa.

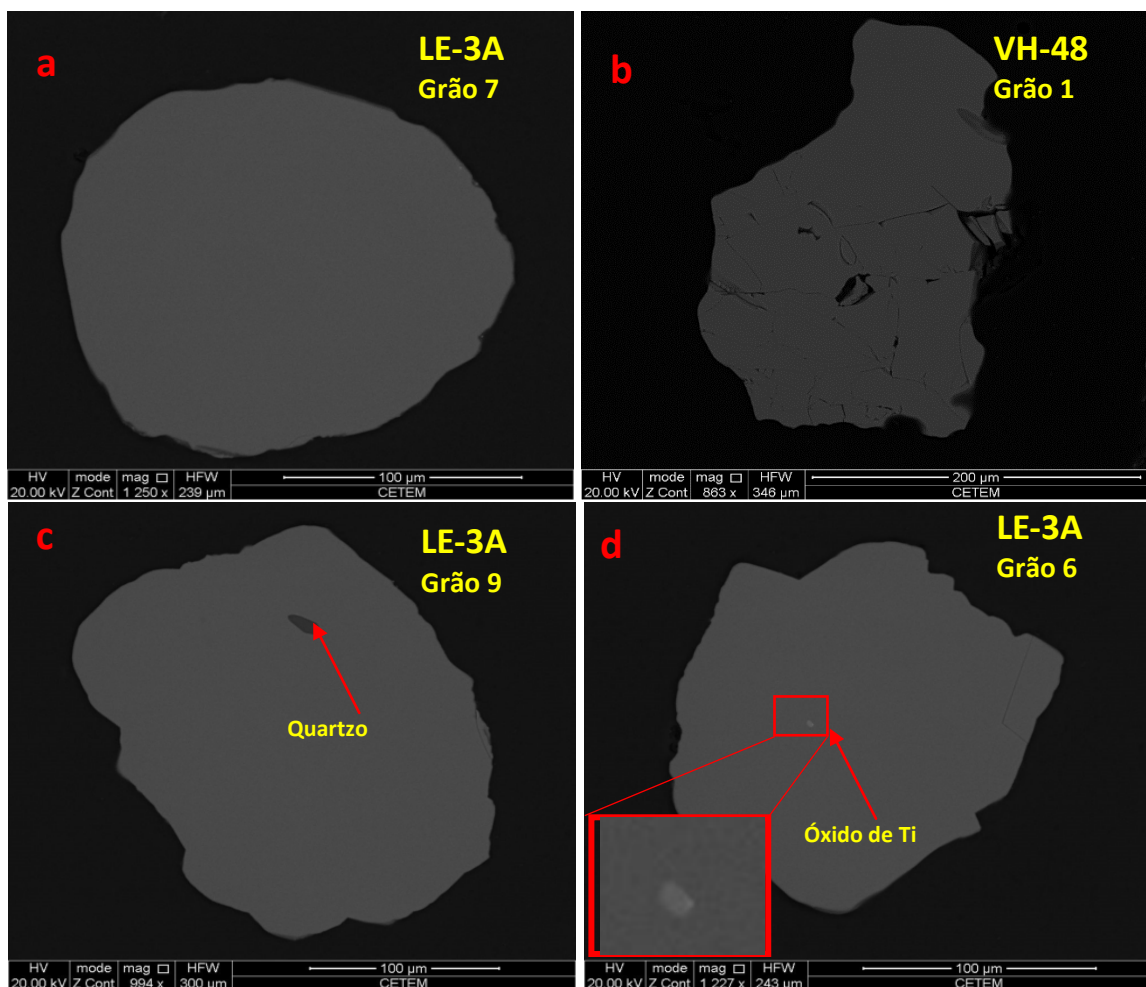


Figura 80 – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de grãos de granadado ortognaisse Resende Costa. (a) grão limpo e com forma arredondada, (b) grão limpo, fraturado e com forma irregular, (c) e (d) grãos com inclusões.

### 7.5.2.1 Química mineral por MEV/EDS

A granada [(Mg, Fe, Mn, Ca)<sub>3</sub>(Al, Fe, Cr)<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] proveniente do ortogneisse Resende Costa é composta principalmente por Al, Si, Mn e Fe (22,6; 35,1; 24,3; 20,5% em média de % em massa de óxido de cada elemento), sendo que os teores variam, principalmente, em relação ao conteúdo de Fe e Mn. Esses dois elementos ocorrem em todos os grãos estudados e variam de 7 a 20,5 % em massa de FeO e de 1,2 a 24,3 % em massa de MnO. O Mg pode chegar a 4,4% em massa de MgO e o Ca a 7,2 % em massa de CaO. O Ti foi encontrado como elemento traço em poucos grãos, chegando a 0,6% em massa de TiO<sub>2</sub> (Tabela 19). Para o cálculo dos membros finais do grupo da granada foi utilizada a planilha Excel disponibilizada por Locock (2008).

O cálculo dos membros finais indica que os grãos de granada são compostos principalmente por spessartita, entre 48,8 a 75,7 % mol. Os membros almandina e grossulária também compõem uma representativa parcela, chegando a 33,6 e 25,7 % mol, sendo que almandina não foi encontrada no grão VH-48\_1, enquanto grossulária é encontrada em apenas 5 grãos com teores considerados altos (amostras VH-48). Já piropo e andradita aparecem com teores relativamente muito baixos e somente em alguns grãos, chegando a 7,4 e 4,2 % mol, respectivamente (Figura 81).

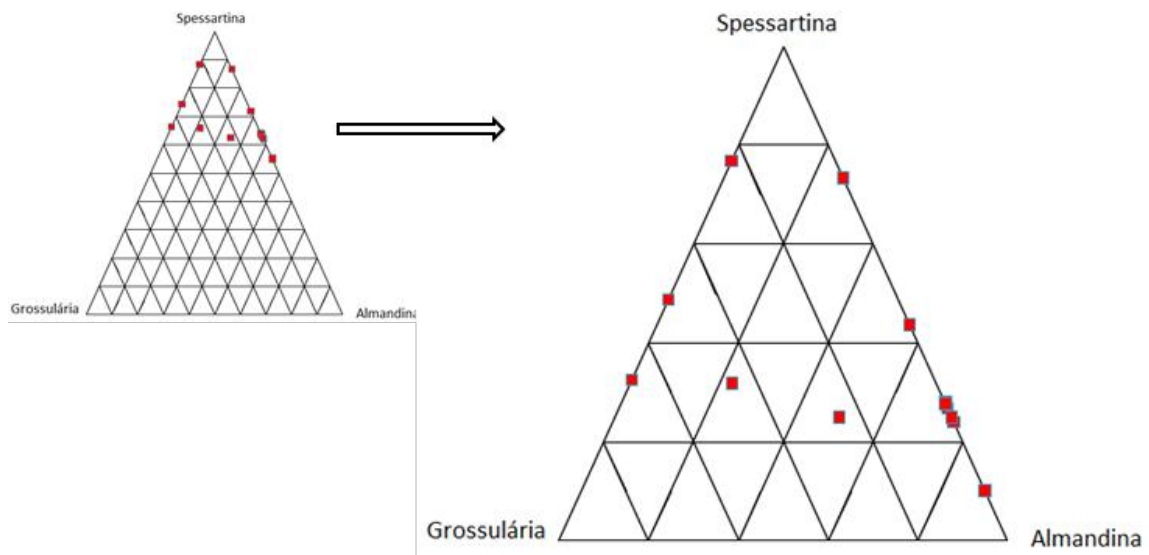


Figura 81 -Diagrama ternário dos membros finais grossulária – almandina – spessartita para granada.

Tabela 19 - Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de granada dos pontos amostrados no ortognaisse Resende Costa.

Amostra Nº da análise	Ortognaisse Resende Costa										VH-48				
	LE-3A										1	2	3	5	6
	1	3	4	5	6	7	9	10	11						
<i>Óxidos (% em peso)</i>															
SiO <sub>2</sub>	37,3	36,4	35,3	34,3	31,1	30,6	36,5	35,4	33,5	38,1	37,6	37,1	33,3	37,0	
TiO <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,6	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,2	24,8	23,4	21,9	20,4	19,4	23,7	22,2	21,3	24,4	24,2	23,7	21,4	23,1	
FeO / FeO <sub>tot</sub>	15,4	16,5	16,0	14,2	14,6	12,9	15,7	16,1	8,0	0,0	1,8	3,1	0,5	7,4	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / calc	9,4	10,5	11,0	12,2	8,4	12,1	9,7	10,9	13,4	9,3	10,9	11,0	7,2	8,0	
MnO	26,8	24,0	23,4	24,1	20,0	21,2	25,4	23,3	29,5	32,8	28,6	28,4	32,6	24,0	
MgO	0,8	1,0	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,4	0,4	0,9	0,9	0,0	2,0	
CaO	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,8	1,1	10,1	9,9	8,6	5,0	7,4	
Total	114,4	113,9	110,6	108,3	96,0	97,6	112,4	109,5	107,3	115,0	113,9	112,9	99,9	109,4	
<i>Proporção atômica (12 oxigênios)</i>															
Si	2,769	2,714	2,724	2,729	2,753	2,717	2,759	2,767	2,713	2,762	2,756	2,748	2,793	2,791	
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000	0,032	
Al	2,111	2,180	2,127	2,055	2,123	2,029	2,114	2,040	2,032	2,083	2,087	2,070	2,113	2,052	
Fe <sup>2+</sup>	0,953	1,032	1,032	0,948	1,081	0,958	0,993	1,050	0,543	0,000	0,108	0,190	0,036	0,465	
Fe <sup>3+</sup>	0,525	0,589	0,638	0,731	0,558	0,806	0,552	0,640	0,814	0,505	0,602	0,612	0,452	0,452	
Mn <sup>2+</sup>	1,684	1,516	1,527	1,621	1,499	1,589	1,626	1,544	2,024	1,928	1,776	1,781	2,312	1,532	
Mn <sup>3+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,084	0,000	0,000	0,000	0,000	
Mg	0,090	0,116	0,122	0,107	0,112	0,112	0,096	0,106	0,049	0,045	0,096	0,104	0,000	0,226	
Ca	0,043	0,050	0,043	0,054	0,061	0,057	0,044	0,067	0,097	0,788	0,776	0,686	0,445	0,600	
O	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	
<i>Membros finais (proporção molar)</i>															
Spessartine	54,9	49,3	49,6	52,4	48,8	51,2	53,0	50,1	65,2	58,6	57,7	57,9	75,7	50,1	
Pyrope	2,9	3,8	4,0	3,5	3,7	3,6	3,1	3,4	1,6	1,5	3,1	3,4	0,0	7,4	
Almandine	31,0	33,6	32,7	26,3	35,2	24,7	32,1	30,5	12,6	0,0	3,5	6,2	1,2	15,2	
Grossular	0,0	1,6	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	25,7	21,8	17,5	13,9	15,0	
Andradite	1,4	0,0	1,4	1,7	1,4	1,8	1,4	2,2	3,1	0,0	3,4	4,2	0,6	3,1	
Total	90,2	88,3	87,7	83,9	89,7	81,4	89,6	86,3	82,6	85,8	89,6	89,1	91,4	90,8	



### 7.5.3. Xenotímio

Os grãos de xenotímio ( $\text{YPO}_4$ ) só foram encontrados nas amostras LE-3A (apenas um grão) e VH-48. Em geral os grãos são porosos, fraturados (Figura 82 a - d) e apresentam inclusões muito finas de diversos minerais de Th e/ou U (Figura 82 a - c) e, mais raramente, de apatita, biotita, granada, quartzo e óxido de Ti (Figuras 82 a - d), podendo ainda apresentar associação com zircão e monazita (Figura 82 b).

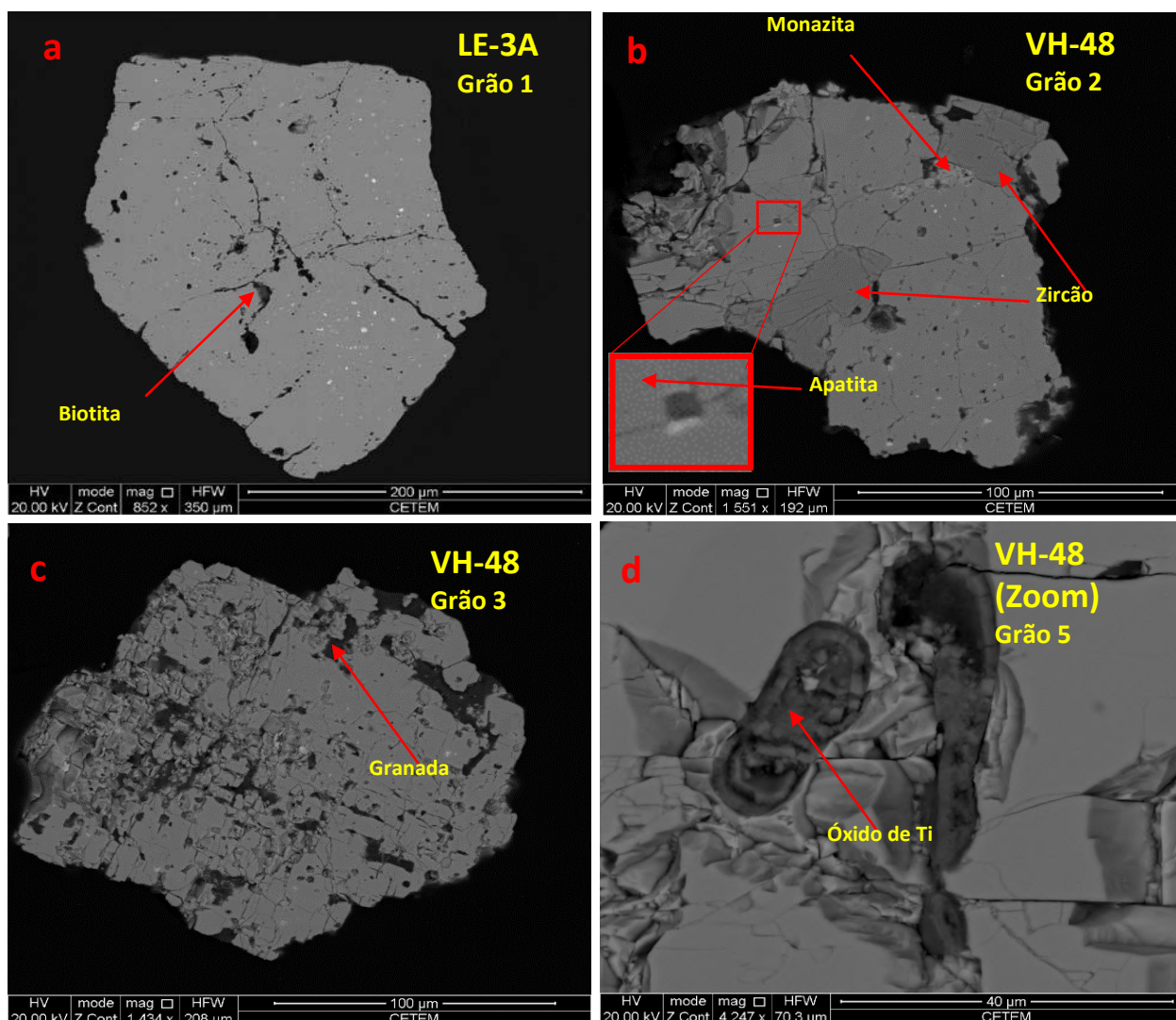


Figura 82 – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com exemplos de grãos de xenotímio do ortognaisse Resende Costa onde é possível de se observar as diversas microinclusões de minerais de Th e/ou U (pontos claros nas imagens a – c). (a) inclusão de biotita, (b) inclusão de apatita e associação com zircão e monazita, (c) inclusão de granada e (d) inclusão de óxido de Ti.

#### 7.5.3.1 Química mineral por MEV/EDS

O xenotímio presente no ortognaisse Resende Costa apresenta uma composição rica em Y (38,7 a 46,1% de peso em  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) e elementos terras raras pesados, sendo eles principalmente Dy, Yb e Er, com médias de 6, 4,3 e 4,3% de peso em óxidos de cada elemento, respectivamente. Também pode apresentar teores menores de outros elementos terras raras pesados ( $\text{Tm}_2\text{O}_3$  com média de 0,36% em peso e  $\text{Ho}_2\text{O}_3$  com média de 0,6% em

peso), além de teores de ETRL ( $Gd_2O_3$  com média de 2,1% em peso e  $Sm_2O_3$  com média de 0,3% em peso). Devido aos superiores teores em mol de Y e baixos de Yb, o termo xenotímio será utilizado aqui como xenotímio-(Y). Os teores de P variaram de 32,4 a 44,3% (em peso de  $P_2O_5$ ). E também ocorrem como elementos menores o Si, Th e U (Tabela 20).

Em relação à distribuição dos ETRP ocorre predomínio do Dy, seguido pelo Yb e Er em proporções semelhantes e, subordinadamente, com Tm e Ho. Esses últimos elementos foram identificados em todas as amostras analisadas (exceto o Tm e o Ho que não foram encontrados em algumas) e perfazem cerca de 14 % do total de ETRP (Figura 83).

Em relação aos ETRL apenas Gd e Sm foram observados na composição do xenotímio. Em geral, o Gd é o elemento principal dentre os ETRL, aparecendo em todas as amostras analisadas, enquanto o Sm apareceu apenas em algumas análises e possui teores bem baixos (Figura 83).

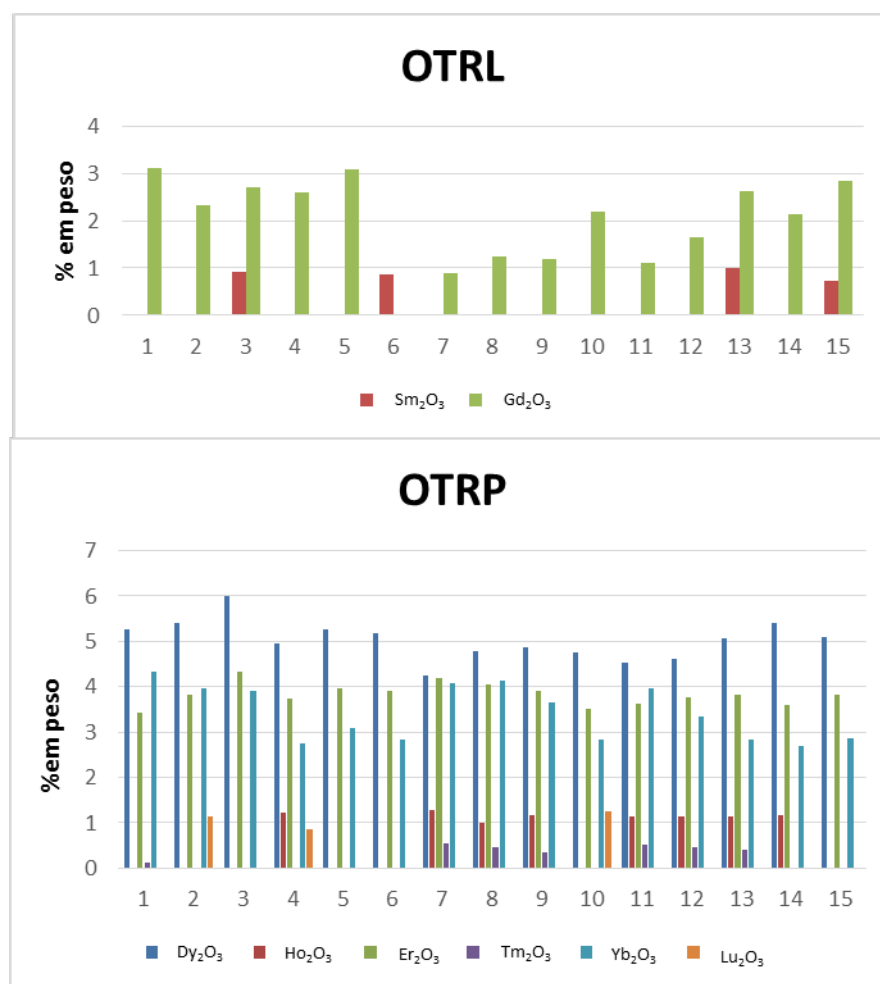


Figura 83 – Distribuição em % em peso dos óxidos dos elementos terras raras leves (OTRL) e pesados (OTRP) nos grãos de xenotímio do ortognaisse Resende Costa. Dados obtidos por meio de análises semiquantitativas de MEV/EDS.

Tabela 20 - Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de xenotímio dos pontos amostrados no ortognaisse Resende Costa.

Amostra Nº da análise	Ortognaisse Resende Costa														
	LE-3A	VH-48													
	1	1	2	3	5	10	13	15	22	23	29	32	34	36	40
<i>Óxidos (% em peso)</i>															
SiO <sub>2</sub>	0,0	0,6	1,7	0,0	1,4	0,0	0,0	0,3	0,0	0,7	0,4	0,6	0,0	0,5	0,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	35,8	32,4	38,6	33,1	33,8	34,3	34,7	44,3	34,2	32,4	34,5	33,9	33,8	34,9	33,0
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43,9	38,6	45,2	40,2	44,3	41,5	44,0	46,1	42,8	39,7	43,0	41,5	41,1	43,2	39,8
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,7
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1	2,3	2,7	2,5	3,0	0,3	0,8	1,2	1,1	2,2	1,1	1,6	2,6	2,1	2,8
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2	5,3	6,0	4,9	5,2	5,9	4,2	4,7	4,8	4,7	4,5	4,6	5,0	5,3	5,0
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	1,2	1,0	1,1	0,0	1,1	1,1	1,1	1,1	0,0
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4	3,8	4,3	3,7	3,9	3,0	4,1	4,0	3,9	3,5	3,6	3,7	3,8	3,6	3,8
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,4	0,3	0,0	0,5	0,4	0,4	0,0	0,0
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,3	3,9	3,9	2,7	3,1	2,2	4,0	4,1	3,6	2,8	3,9	3,3	2,8	2,7	2,8
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	1,1	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ThO <sub>2</sub>	0,0	0,9	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
UO <sub>2</sub>	0,7	1,2	0,0	0,7	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,0	1,0	0,6	0,9	0,0
Total	96,7	90,7	103,5	91,0	96,3	89,9	94,6	106,4	92,3	90,3	92,8	92,2	92,5	94,7	88,2
<i>Proporção atômica (4 oxigênios)</i>															
Si	0,000	0,025	0,055	0,000	0,051	0,000	0,000	0,010	0,000	0,029	0,014	0,024	0,000	0,017	0,000
P	1,022	1,005	1,006	1,017	0,977	1,038	1,015	1,082	1,019	1,005	1,014	1,013	1,019	1,015	1,026
Y	0,789	0,755	0,741	0,777	0,804	0,793	0,809	0,708	0,800	0,772	0,795	0,780	0,777	0,789	0,777
Sm	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,009
Gd	0,035	0,028	0,028	0,031	0,035	0,000	0,010	0,012	0,014	0,027	0,013	0,019	0,031	0,024	0,035
Dy	0,057	0,064	0,060	0,058	0,058	0,059	0,047	0,044	0,055	0,056	0,051	0,052	0,058	0,059	0,060
Ho	0,000	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,014	0,009	0,013	0,000	0,012	0,013	0,013	0,013	0,000
Er	0,036	0,044	0,042	0,042	0,042	0,043	0,045	0,037	0,043	0,040	0,039	0,042	0,043	0,039	0,044
Tm	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,004	0,004	0,000	0,006	0,005	0,005	0,000	0,000
Yb	0,045	0,044	0,037	0,030	0,032	0,031	0,043	0,036	0,039	0,031	0,042	0,036	0,031	0,028	0,032
Lu	0,000	0,012	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Th	0,000	0,008	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
U	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
O	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
<i>Membros finais (proporção molar)</i>															
(Th,U,Pb)SiO <sub>4</sub>	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(La-Gd)PO <sub>4</sub>	3,6	2,9	4,1	3,2	1,3	1,2	1,0	1,4	1,4	2,8	1,3	2,0	4,4	2,5	4,6
(Tb-Lu)PO <sub>4</sub>	14,5	17,2	15,1	15,9	13,6	14,2	16,0	15,4	15,9	14,9	15,7	15,6	15,3	14,6	14,2
YPO <sub>4</sub>	81,9	79,0	80,9	80,2	82,8	84,6	83,0	83,2	82,6	81,4	83,0	82,4	80,2	82,8	81,2

Os elementos que ocorrem substituindo o Y e P na estrutura do xenotímio são o Si, Th e U. O Si foi encontrado em várias análises e pode chegar a 1,78 % de SiO<sub>2</sub>, enquanto o Th e U são elementos mais raros e podem chegar a 1,4 e 1,73 % em peso de massa, respectivamente. Essa substituição se dá pelo seguinte forma:  $\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+} = (\text{Y} + \text{REE})^{3+} + \text{P}^{5+}$  (Förster, 1998).

Todas as amostras apontaram altos teores do membro fosfato de ítrio, entre 79 e 84,5 % mol; teores constantes de fosfatos de terras raras pesadas, entre 13,6 e 17,2 % mol; teores baixos para fosfatos de terras raras leves, entre 1 e 4,6 % mol (Figura 84) e apenas duas análises possuíram teores de huttonita, sendo elas VH-48\_1 e VH-48\_23, com teores de 0,9 e 1 % respectivamente. Cabe destacar que na grande maioria dos grãos havia presença de inclusões de minerais de Th e/ou U, sendo um forte indício de exsolução desses elementos na estrutura do xenotímio. O cálculo dos membros finais é baseado no trabalho de Faulstich (2016).

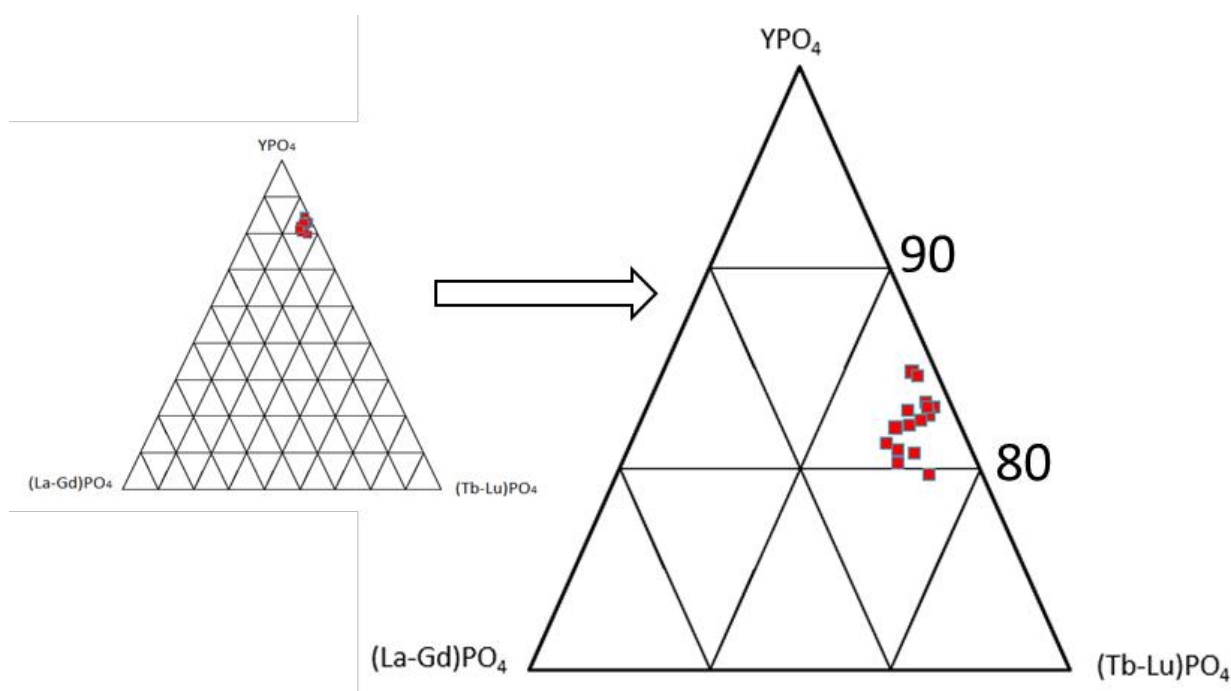


Figura 84 – Diagrama ternário dos membros finais YPO<sub>4</sub> - (La-Gd)PO<sub>4</sub> - (Tb-Lu)PO<sub>4</sub> para os grãos de xenotímio do ortognaisse Resende Costa.

#### 7.5.4. Monazita

Os grãos de monazita foram encontrados nas amostras LE-1A e VH-48 e, em geral, estão fortemente fraturados, porosos (Figura 85 a - d) e apresentam inclusões muito finas de diversos minerais de Th e/ou U (Figura 85 a - c), e mais raramente, inclusões de granada, muscovita (Figura 85 a) e associação com zircão ou xenotímio (Figuras 85 b- d).

As inclusões de óxidos/silicatos de Th e U, em sua maioria, tendem a ocorrer com hábito tabular (Figura 85 b), mas também ocorrem fortemente irregulares e estão em grande parte

associadas a buracos na monazita. As inclusões de xenotímio e zircão variam de anédricas a subédricas (Figura 85 b - c) e ocorrem muitas vezes associadas a cavidades.

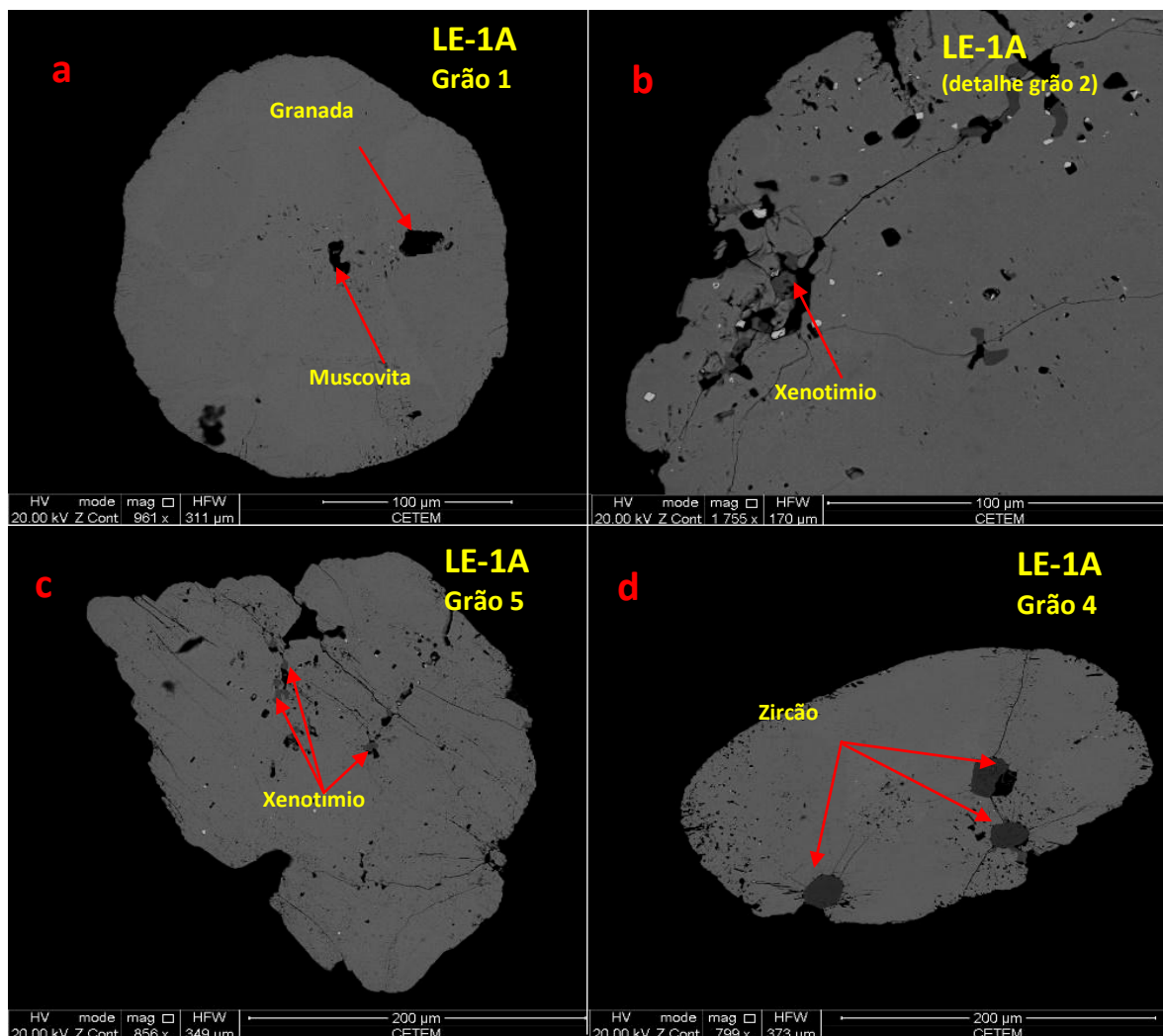


Figura85 – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de inclusões/associações presentes nos grãos de monazita do ortogneisse Resende Costa. (a) inclusões de moscovita e granada, além de várias pequenas inclusões cinzas e brancas de minerais de Th e/ou U, (b) presença de inclusão de xenotímio no grão de monazita e várias inclusões cinza/brancas de minerais de Th e/ou U, (c) associação de xenotímio no grão de monazita e várias inclusões cinza/brancas de minerais de Th e/ou U e (d) associação de zircão com o grão de monazita.

#### 8.5.4.1 Química mineral por MEV/EDS

A monazita presente no ortogneisse Resende Costa é rica em elementos terras raras, predominando Ce (26,2 a 32,4% de massa em  $Ce_2O_3$ ), em relação ao La (12 a 15,1% de massa em  $La_2O_3$ ) e Nd (7,7 a 9,3% de massa em  $Nd_2O_3$ ), mas também pode apresentar outros elementos terras raras, sendo eles Pr, Sm e Gd (com médias de 0,4, 1,8 e 0,4% de massa). O conteúdo de Th varia muito desde 4,9 a 12,3% em massa. Devido ao predomínio em mol de Ce e menores de La, Nd e Sm encontrados, o termo monazita será utilizado aqui como monazita-(Ce). Os teores de P variaram



de 26 a 29% (em massa de  $P_2O_5$ ), enquanto os conteúdos de Ca, Si e Pb são bem baixos com média de 1, 1,2 e 0,9% em massa, respectivamente (Tabela 21).

Tabela 21—Análises químicas semiquantitativa por EDS dos grãos de monazita dos pontos amostrados no ortogneisse Resende Costa

Rocha hospedeira Amostra análise	Ortogneisse Resende Costa					
	LE-1A_1	LE-1A_18	LE-1A_21	LE-1A_27	LE-1A_31	VH-48_1
<i>Óxidos (% em peso)</i>						
Pb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,8	0,7	1,1	1,5	1,1	0,0
SiO <sub>2</sub>	2,1	1,1	1,0	1,3	1,3	0,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	25,9	28,2	29,0	27,0	28,1	26,1
CaO	0,8	1,3	1,4	0,8	0,7	0,6
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,9	12,1	12,2	13,8	15,1	12,4
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,0	26,5	26,8	29,5	30,9	26,7
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,7	8,3	8,8	9,3	8,3	9,0
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	0,3	0,4	0,0	0,0	1,3
ThO <sub>2</sub>	12,3	11,0	9,1	8,8	6,4	4,9
Total	87,4	90,0	90,3	92,3	92,1	81,6
<i>Proporção atômica (16 oxigênios)</i>						
Pb	0,04	0,03	0,05	0,07	0,05	0,00
Si	0,38	0,20	0,18	0,23	0,22	0,08
P	3,87	4,03	4,09	3,89	3,97	4,11
Ca	0,16	0,25	0,26	0,15	0,14	0,12
La	0,78	0,76	0,75	0,87	0,93	0,85
Ce	1,61	1,64	1,63	1,84	1,89	1,82
Nd	0,49	0,50	0,52	0,57	0,49	0,60
Gd	0,03	0,02	0,03	0,00	0,00	0,08
Th	0,49	0,42	0,35	0,34	0,24	0,21
O	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00

#### 8.5.4. Zircão

Em geral os grãos de zircão analisados apresentam tênue zoneamento oscilatório (Figura 86 a – d), estão fraturados e são muito porosos, além de mostrarem grãos geminados (Figura 86 c). Em alguns cristais são observados ainda buracos do que teriam sido grãos mais antigos com faces prismáticas que foram lixiviados (Figura 86d).

As principais inclusões são de apatita, muscovita, minerais de Th e/ou U e óxido de Fe (Figura 87), enquanto inclusões de silicato de Y, xenotímio, granada, galena, quartzo e biotita são mais raras (Figura 87). As inclusões em geral são granulares e não seguem um padrão definido, podendo estar ou não associadas a buracos e fraturas.

#### 8.5.5.1 Química mineral por MEV/EDS

Os grãos de zircão presentes no ortogneisse Resende Costa são caracterizados por um elevado teor de Zr (39,1 a 73,5 % em massa de ZrO<sub>2</sub>) e Si (15 a 47,2 % em massa de SiO<sub>2</sub>), enquanto o Hf é um elemento importante, porém aparece com baixos teores na maior parte dos grãos, alcançando até 2,4% de massa em HfO<sub>2</sub>. Dos elementos terra raras, somente o Ce e o Sc

foram encontrados e eles constituem uma importante parte na composição do zircão chegando a até 1,35 % e 0,4 % de massa, respectivamente. Porém esses elementos estão presentes somente em alguns grãos (Tabela 22).

Al, Fe e Na ocorrem como elementos menores podendo chegar a 5,2, 1,3 e 1,6 % de massa em óxido, respectivamente, enquanto Ca e K ocorrem como traço em apenas alguns dos grãos analisados (<0,1% em massa do óxido).

Os grãos de zircão estudados foram classificados como zircão de acordo com a proposta de Neves *et al.* (1974) (Figura 88) e o zoneamento oscilatório está associado a presença e/ou ausência do Al, Ca e Fe, o que ocasiona o nível de cinza mais escuro nessas porções. Outro elemento que varia sutilmente na composição do zircão é o  $Hf^{4+}$  que pode substituir o  $Zr^{4+}$ .

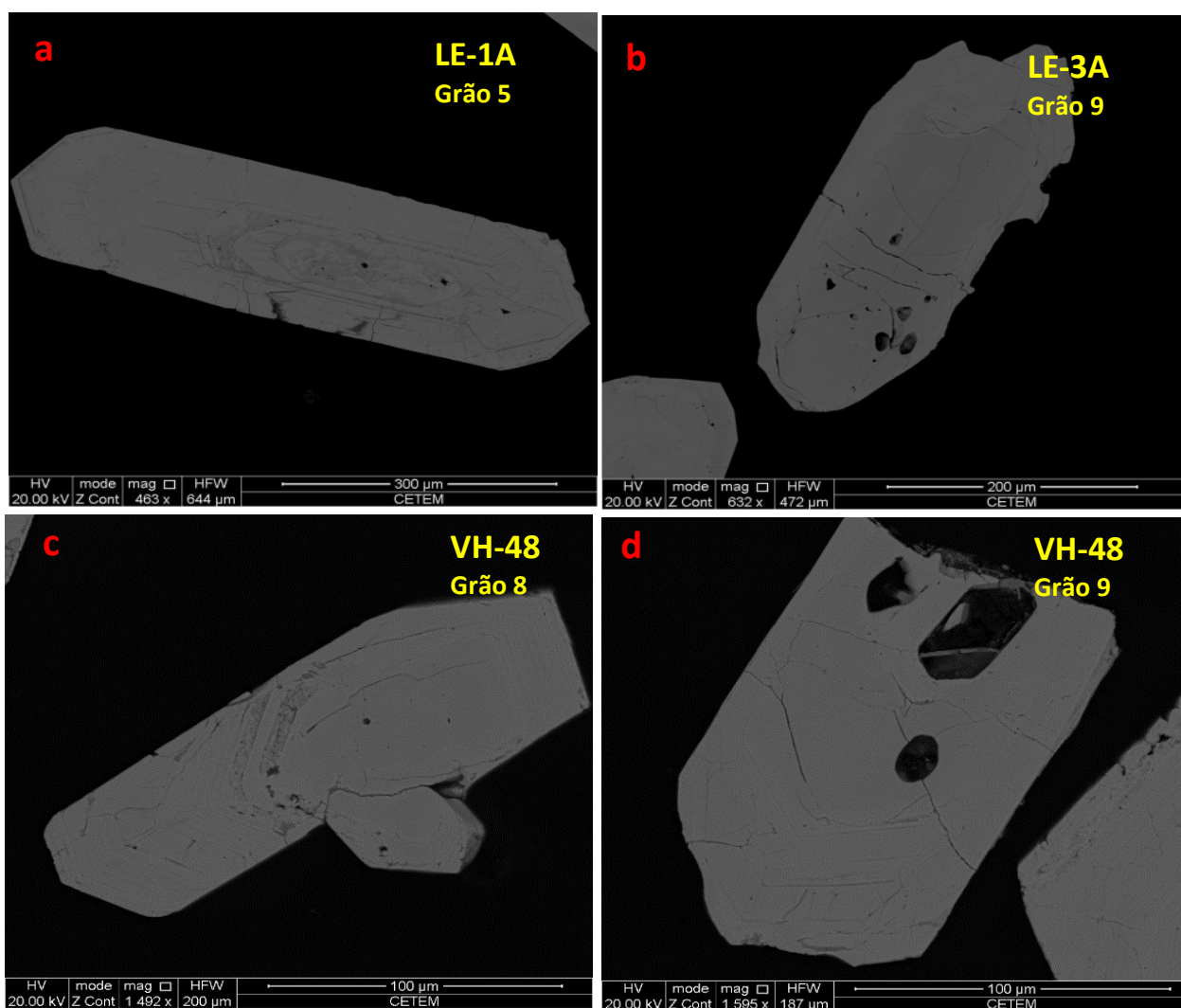


Figura 86 – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com exemplos da morfologia dos grãos de zircão estudados no ortognaisse Resende Costa. (a) grão com zoneamento oscilatório, (b) grão fraturado e poroso, (c) grão com intercrescimento e (d) grão com buraco com a forma perfeita do que provavelmente teria sido um grão pretérito de zircão.

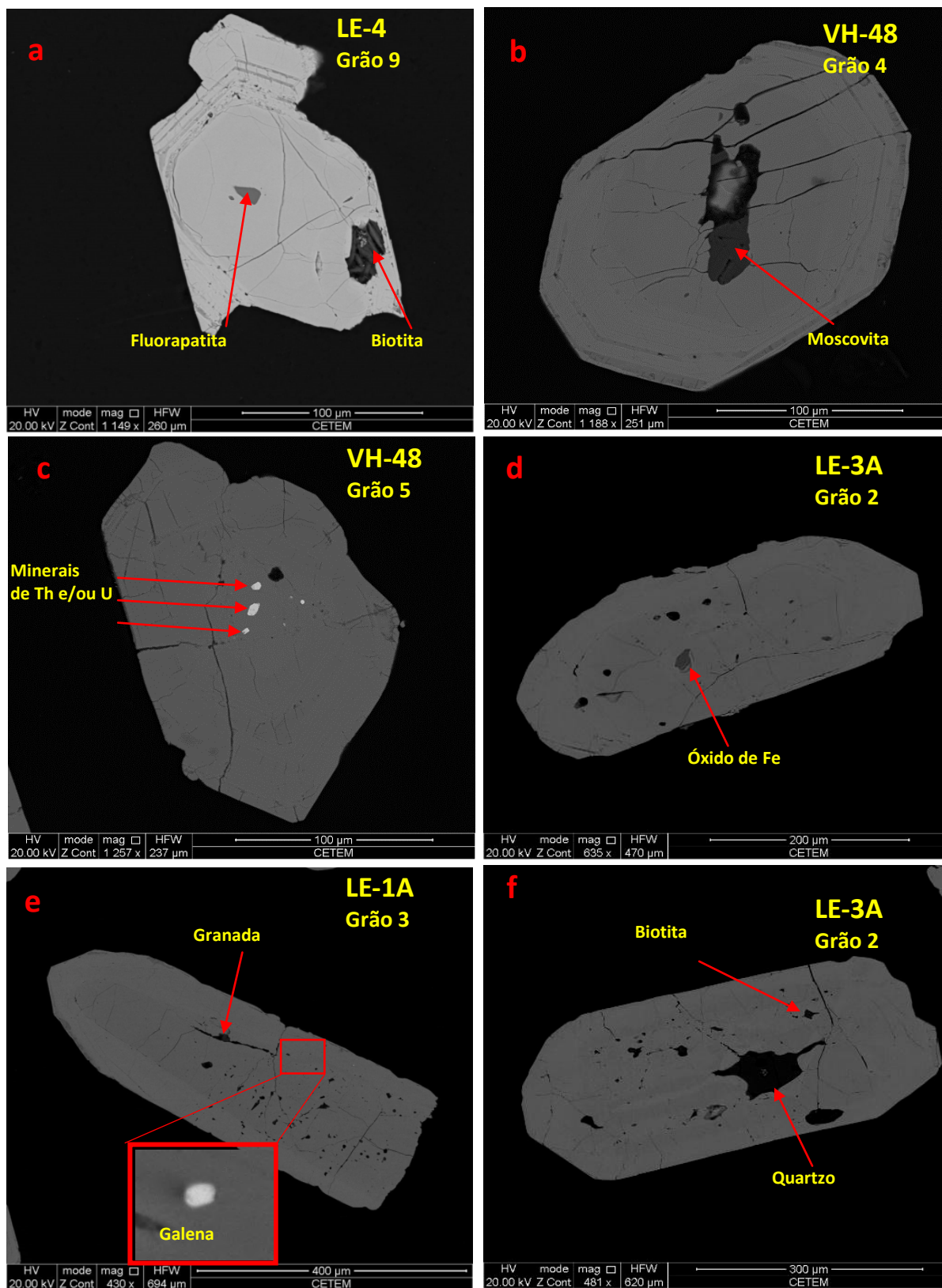


Figura 87 – Imagem BSD de microscópio eletrônico de varredura com diferentes exemplos de inclusões presentes nos grãos de zircão do ortognaise Resende Costa. (a) inclusões de fluorapatita e biotita, além de zoneamento oscilatório; (b) inclusão de biotita e presença de zoneamento oscilatório; (c) inclusões de minerais de Th e/ou U; (d) inclusão de óxido de Fe; (e) inclusões de granada spessartina ao longo de uma fratura e de galena; (f) inclusões de quartzo e biotita.

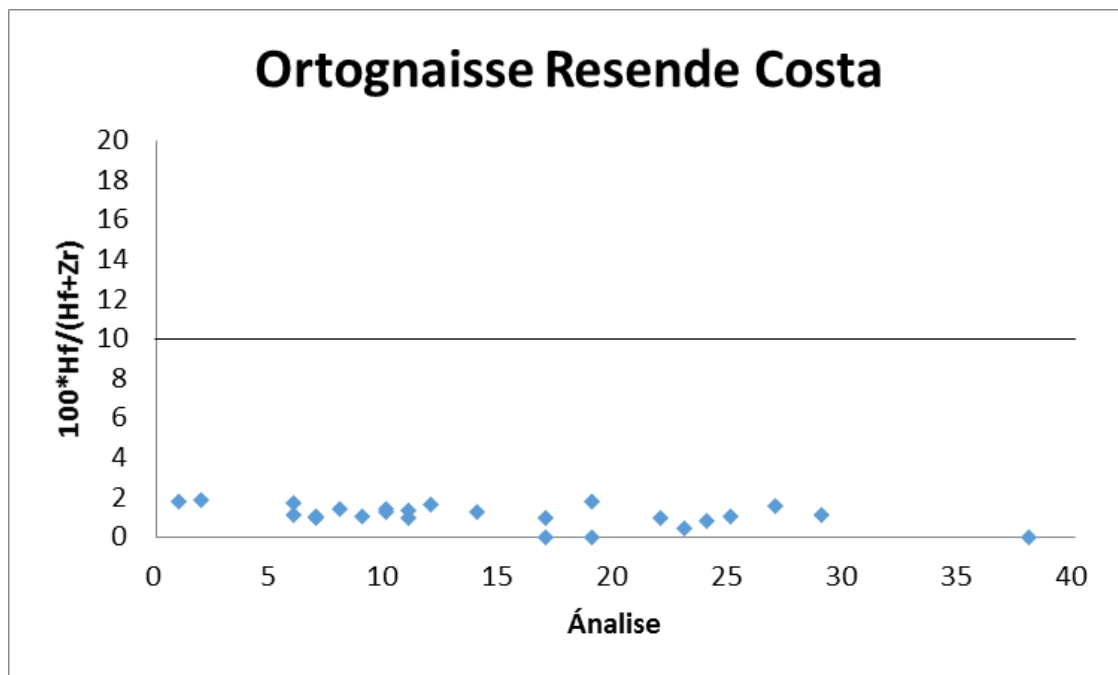


Figura 88 - Diagrama de classificação de zircão conforme proposta de Neves *et al.* (1974), com base na razão atômica  $100 * Hf / (Hf + Zr)$ .

Tabela 22- Análises químicas semiquantitativas por EDS dos grãos de zircão dos pontos amostrados no ortognaisse Resende Costa.

Rocha  
hospedeira

Amostra análise

	LE-1						LE-3A					LE-4												
	6	8	10	12	17	19	1	6	11	14	19	7	9	10	11	23	24	27	7	17	22	25	38	
<i>Óxidos (% em peso)</i>																								
Na <sub>2</sub> O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,24
SiO <sub>2</sub>	28,8	28,6	28,4	28,8	28,5	27,9	29,2	26,9	27,2	28,3	27,1	28,0	27,4	27,5	27,1	27,8	27,2	25,4	26,7	26,7	27,3	26,9	26,9	47,22
CaO	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
K <sub>2</sub> O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,43
FeO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
ZrO <sub>2</sub>	59,3	59,5	58,8	59,2	58,9	57,5	67,7	64,5	64,1	66,4	64,5	66,2	64,5	64,5	64,8	73,2	64,5	60,0	64,6	64,5	65,3	64,7	64,7	50,08
HfO <sub>2</sub>	1,7	1,4	1,2	1,6	0,0	1,7	2,1	1,1	1,4	1,4	0,0	1,1	1,1	1,5	1,0	0,5	0,8	1,6	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	0,00
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
F	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Total	89,9	89,7	89,6	89,7	87,4	87,2	99,0	92,6	93,3	96,4	93,2	95,4	93,1	93,6	93,0	105,1	92,5	92,4	92,5	92,3	93,7	92,8	104,56	
<i>Proporção atômica (4 oxigênios)</i>																								
Na	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,080
Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,009	0,000	0,002	0,001	0,000	0,077	0,000	0,107	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,160
Si	0,988	0,985	0,982	0,990	0,996	0,988	0,929	0,917	0,919	0,921	0,911	0,922	0,926	0,924	0,917	0,839	0,922	0,868	0,911	0,913	0,918	0,914	0,914	1,222
Ca	0,000	0,000	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014
Fe	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zr	0,992	0,998	0,993	0,990	1,001	0,991	1,049	1,069	1,057	1,054	1,059	1,064	1,059	1,057	1,069	1,076	1,066	1,000	1,075	1,074	1,068	1,072	1,072	0,632
Hf	0,017	0,014	0,013	0,016	0,000	0,018	0,019	0,012	0,014	0,013	0,000	0,011	0,011	0,015	0,010	0,004	0,008	0,016	0,010	0,010	0,010	0,011	0,011	0,000
Ce	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sc	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
F	0,000	0,000	0,058	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
O	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000



## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho de conclusão de curso foi determinado que o ortognaisse Resende Costa é composto principalmente por oligoclásio e quartzo. Sua mineralogia acessória é representada por biotita, ilmenita, zircão, epidoto, óxidos de Fe (magnetita e/ou hematita), titanita, microclinio, zoisita/clinozoisita, moscovita, carbonato e sericita. Granada, monazita-(Ce), xenotímio-(Y), fluorapatita e allanita-(Ce) ocorrem como minerais traços, enquanto columbita-(Fe), microlita e turmalina são muito raros. Cassiterita, galena, minerais de Th e U e uma possível samarskita (niobo-tantalato com Y, Ce, La, Fe) foram identificados como inclusões nos minerais das lâminas petrográficas e dos concentrados de minerais pesados. Óxido de Ti, limonita, piritita limonitizada e óxido/hidróxido de Mn são minerais intempéricos e só foram observados nos concentrados de minerais pesados dos saprólitos do ortognaisse Resende Costa. Nesse contexto a mineralogia descrita por Souza (2013) e Teixeira *et al.* (2015) não incluiu granada, monazita-(Ce), xenotímio-(Y), columbita-(Fe), microlita e turmalina, sendo que a maioria dos mesmos foi observada nos concentrados de minerais pesados.

Outros dois problemas envolvendo a comparação da mineralogia encontrada na presente monografia com aquela descrita por Souza (2013) e Teixeira *et al.* (2015) diz respeito aos minerais opacos e ao tipo de plagioclásio. Esses autores não estudaram os minerais opacos por microscopia de luz refletida e, nesse caso, a descrição realizada por microscopia ótica em luz transmitida é bastante genérica. No caso do presente estudo os minerais opacos foram analisados por MEV-EDS e correspondem predominantemente a ilmenita e óxidos de Fe (magnetita e/ou hematita). Cassiterita, galena e a possível samarskita correspondem a minerais opacos presentes como inclusões na ilmenita e no zircão, enquanto os minerais de Th e U também estão presentes no xenotímio, monazita e zircão.

O plagioclásio foi descrito por eles como andesina, a partir da utilização da microscopia ótica e do método de Michel Levi, sendo que no presente estudo esse mineral foi classificado como oligoclásio a partir da sua química mineral obtida por MEV-EDS. Caracterizou-se, ainda, que o plagioclásio apresenta grande parte da sua geminação polissintética mascarada e está fortemente alterado para minerais como epidoto, biotita, sericita e carbonato. Essas alterações podem dificultar a caracterização do mesmo pelo método de Michel Levi, bem como ocasionam a sua decalcificação. De forma oposta, o estudo por MEV-EDS permite que seja realizado um zoom do mineral e, com isso, sejam selecionadas partes que não estão alteradas para serem analisadas. Dessa maneira, o resultado obtido com essa técnica é mais preciso e confiável do que o método de Michel Levi.

Foram identificadas no presente trabalho duas gerações de biotita, sendo uma considerada como primária e a outra como secundária. A biotita primária difere da biotita secundária no

conteúdo mais elevado em Fe e Mg e empobrecimento em Al e Si. Propõe-se que a biotita secundária esteja associada a um fluido metamórfico, pois essa cresce sobre o plagioclásio.

Propõem-se que a evolução mineralógica do protólito do ortognaisse Resende Costa tenha transcorrido da seguinte maneira: zircão, apatita, granada, ilmenita, óxidos de Fe, titanita<sub>1</sub> e allanita cristalizaram no início do processo, pois a maioria desses minerais ocorrem como inclusões nos minerais essenciais; em seguida formaram-se plagioclásio, biotita<sub>1</sub> e quartzo, pois esses representam cerca de 99% da mineralogia do corpo, enquanto o microclínio foi um dos últimos minerais a se formar, pois ocupa os espaços entre os demais. Epidoto<sub>1</sub>, epidoto<sub>2</sub>, epidoto<sub>3</sub>, titanita<sub>2</sub>, titanita<sub>3</sub>, zoisita/clinozoisita, biotita<sub>2</sub>, sericita e carbonato constituem uma paragênese metamórfica.

A presença de inclusões de cassiterita, columbita-(Fe) e de um niobo-tantalato com Y, Ce, La, Fe (possível samarskita) nos grãos de ilmenita do ortognaisse Resende Costa abrem a possibilidade de que esse corpo possa ter sido a fonte para Sn-Nb-Ta-ETR dos corpos pegmatíticos mineralizados da Província Pegmatítica de São João del Rei. Nesse caso o ortognaisse teria sido fundido e também corresponderia a fonte envolvida na formação do metagranitoide Ritápolis, pois esse foi apontado por Faulstich (2016) como o corpo ígneo parental dos corpos pegmatíticos da referida província. Souza (2009) apontou que o metagranitoide Ritápolis poderia ser proveniente de uma fonte mantélica ou crustal, enquanto Ávila (informação verbal) apontam que a gênese desse corpo envolveria material crustal.

Quanto a classificação química dos minerais, a presente monografia apresenta relevante contribuição, principalmente em relação a:

1) A granada estudada é representada principalmente por moléculas de spessartina e almandina, sendo típica de granitoides. Faulstich (2016) e Alves (2017) descreveram a presença de granada rica no membro spessartina e com teores consideráveis do membro almandina nos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei;

2) O xenotímio do ortognaisse Resende Costa foi classificado como xenotímio-(Y), que de forma semelhante está presente nos corpos da referida província (Faulstich, 2016) e como microinclusões na apatita do pegmatito da mina da Volta Grande (Alves, 2017);

3) Os fosfatos de ETRL foram classificados como monazita-(Ce) e são quimicamente semelhante as microinclusões encontradas em grãos de apatita do pegmatito da Volta Grande (Alves, 2017);

4) A apatita aqui descrita foi classificada como fluorapatita, uma vez que essa apresenta F e Cl não foi identificado, bem como não é possível de se estimar hidroxila por MEV-EDS.

5) A allanita estudada foi classificada como allanita-(Ce), uma vez que na maior parte dos casos ela apresenta em seu interior a formação de cerianita e argilominerais.

6) O zircão do ortognaisse Resende Costa apresenta baixíssimo conteúdo de Hf e por isso foi classificado como zircão, diferindo daqueles presentes no pegmatito da mina da Volta Grande (Álves, 2017). Essa feição aponta Hf teria sido um elemento incompatível que se enriqueceu nos estágios finais da formação dos corpos pegmatíticos.

Pode-se concluir ainda que a caracterização mineralógica de uma corpo ígneo ou metaígneo deve envolver diversos materiais e técnicas, dentre as quais o estudo de minerais pesados em estereomicroscópio, microsonda RAMAN e MEV-EDS, bem como a análise petrográfica de lâminas em microscopia ótica por luz transmitida e refletida, conjuntamente com a identificação dos principais minerais por catodoluminescência e a obtenção da química mineral por MEV-EDS ou microsonda.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkmim, F.F. & Noce, C.M. 2006. The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. IGCP 509 Field workshop, Bahia and Minas Gerais, Brazil. Field Guide & Abstracts. 114 pp.

Alkmim F.F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e revelações Ameidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito-Neves, B.B. (orgs.) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca Editor, São Paulo, 17-35 pp.

Álves, F.E.A. 2017. Caracterização mineralógica do minério de Sn-Nb-Ta-Li da mina da Volta Grande, com enfoque nos minerais carreadores de elementos terras raras. Tese de mestrado, Instituto de Geociências/UFRJ, 153 pp.

Ávila, C.A.; Teixeira, W. & Pereira, R.M., 2004. Geologia e petrografia do Quartzo Monzodiorito Glória, Cinturão Mineiro, porção sul do Cráton São Francisco, Minas Gerais. Arquivos do Museu Nacional, 62, 1v., 83-98 pp.

Ávila C.A., Teixeira W., Vasques F.S.G.; Dussin I.A.; Mendes J.C. 2012. Geoquímica e idade U-Pb (LA-ICPMS) da crosta oceânica anfibolíticas riaciana do cinturão Mineiro, borda meridional do cráton São Francisco. In: 46º Congresso Brasileiro de Geologia, Santos, Anais.

Ávila, C.A., Teixeira, W., Bongioiolo, E.M., Dussin, I.A., Souza, V H.P., Barbosa, N.S., Guerra, F.G.V., Bellam, I.O. 2013. Comparação petrográfica, geoquímica e geocronológica entre três gerações 187 distintas de ortognaisses associados ao Cinturão Mineiro. In: XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica. Formato digital disponível em <http://www.sbgq.org.br/>

Ávila, C.A., Teixeira, W., Cordani, U.G., Moura, C.A.V., Pereira, R.M., 2010. Rhyacian (2.23e2.20 Ga) juvenile accretion in the southern Sao Francisco Craton, Brazil: geochemical and isotopic evidence from the Serrinha magmatic suite, mineiro belt. J. S. Am. Earth Sci. 29, 464 e 482 pp.

Ávila, C.A., Teixeira, W., Marques, E., Bongioiolo, E.M., Dussin, I.A., Vieira, T.A.T., 2014. Rhyacian evolution of subvolcanic and metasedimentary rocks of the southern segment of the mineiro belt, Sao Francisco Craton, Brazil. Precambrian Res. 243, 221e 251 pp.

Ávila, C.A., 2000. Geologia, petrografia e geocronologia de corpos plutônicos Paleoproterozóicos da borda meridional do Cráton São Francisco, região de São João del Rei, Minas Gerais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 401 pp.

Barbosa, N.S., Teixeira, W., Ávila, C.A., Montecinos, P.M., Bongioiolo, E.M. 2015. 2.17 e 2.10 Ga plutonic episodes in the mineiro belt, São Francisco Craton, Brazil: U Pb ages, geochemical constraints and tectonics. Precambrian Res. 270, 204e225.

Baltazar, O.F. & Zucchetti, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. Ore Geology Reviews 32, 1–2.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1992. An introduction to rock-forming minerals. Second Edition. Longman, Harlow. 696p.

Farina, F.; C. Dopico, A.C.M.; Moreira, C.A.G.H.; Cutts, J.P.H.K.; Alkmim, F.F.; Lana, C. 2015. The Archean e Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, 1-18.

Faulstich, F.R.L. 2016. Estudo de minerais pesados dos pegmatitos da Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais. Tese de doutorado, Instituto de Geociências/UFRJ, 200pp.

Förster, H.-J. 1998. The chemical composition of REE-Y-Th-U-rich accessory minerals in peraluminous granites of the Erzgebirge-Fichtelgebirge region, Germany. Part II: Xenotime. *American Mineralogist*, 83: 1302-1315.

Guimarães, E. H. A. 2010. Anfibolitos do *Greenstone Belt* Rio das Mortes e diques de metagabro-diabásio na região de Resende Costa, estado de Minas Gerais. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ, 100p.

Guerra, F.G.V.M. 2014. Mapeamento Geológico, petrografia e geoquímica preliminar do ortognaisse granodiorítico Ribeirão dos Mosquitos. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ, 113p.

Hartmann L.A., Endo I., Suita M.T.F., Santos J.O.S, Frantz J.C., Carneiro M.A., McNaughton N.J., Barley M.E. 2006. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes. *Journal of South American Earth Sciences*, 20: 273-285.

Lana, C., Alkmim, F.F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini, H.A., 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambrian Res.* 231, 157e173.

Le Maitre R.W. 2002. *Igneous rocks: a classification and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the systematics of Igneous rocks.* Cambridge University Press, 236p.

Locock A.J. 2008. An Excel spreadsheet to recast analysis of garnet into end-member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets. *Computer & Geosciences*, 34: 1769-1780.

Machado, N. & Carneiro, M.A. 1992. U-Pb evidence of late Archean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. *Can. J. Earth Sci.* 29:2341-2346.

Nakashima, K., Imaoka, T. 1998. Niobian and zirconian ilmenites in syenites from Cape Ashizuri, Southwest Japan. *Mineralogy and Petrology*, 63 v., 1-17 pp.

Neri M.E.N.V, Rosière C.A., Lana C.C. 2013. Supergrupo Minas na Serra de Bom Sucesso, extreme sudoeste do Quadrilátero Ferrífero – MG: petrografia, geoquímica e isótopos de U-Pb. *Série Científica Geologia USP*, 13(2): 175-202.

Neves, J.M.C. e Nunes, J.E.L. 1974. High hafnium members of the zircon-hafnon series from the Granite Pegmatites of Zambézia, Mozambique. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 48: 73-80.

Noce C.M., Machado N., Teixeira W. 1998. U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (southern São Francisco craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Rev. Bras. Geoc.*, 28:95-102.



Noce C.M., Teixeira W., Quéméneur J.J.G., Martins V.T.S., Bolzachini E. 2000. Isotopic signatures of Paleoproterozoic granitoids from the southern São Francisco craton and implications for evolution of the Transamazonic Orogeny. *Journal of South American Earth Sciences*, 13: 225-239.

Oliveira, F.V.C.S.R.S. 2011. Mapeamento geológico, petrografia e geoquímica preliminar dos ortognaisses tonalítico Bandeira e trodhjemito Canoas. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ. 98 p.

Pereira, R.M., Ávila, C.A., Neumann, R., Netto, A.M., and Atencio, D. 2003. Borda de hafnã zirconífero em zircão hafnífero da mina do Volta Grande, Província Pegmatítica de São João del Rei, Minas Gerais, Brasil. *Boletim do Museu Nacional, Série geologia*, 69: 1-14.

Pereira, R. M., Ávila, C. A., Neumann, R. 2004. Estudo mineralógico e químico da cassiterita e de suas inclusões sólidas: implicação com a paragênese das mineralizações da província pegmatítica de São João Del Rei, Minas Gerais, Brasil. *Arquivos do Museu Nacional*, 62(3): 321–336.

Romano, R., Lana, C., Alkmim, F.F., Stevens, G.S., Armstrong, R., 2013. Stabilization of the southern portion of the São Francisco Craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism. *Precambrian Research*, 224: 143–159.

Silva, L.C., Pedrosa-Soares A.C., Armstrong, R., Pinto, C.P, Magalhães, J.T.R., Pinheiro, M.A.P., Santos, G.C. 2015. Disclosing the paleoarchean to ediacaran history of the São Francisco craton basement: The Porteirinha domain (northern Araçuaí orogen, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 1-18.

Souza, J.D., Kosin, M., Melo, R.C., Santos, R.A., Teixeira, L.R., Sampaio, R., Guimarães, J.T, Bento, R.V., Borges, V.P., Martins, A.A.M, Arcanjo, J.B, Loureiro, H.S.C., Angelim, L.A.A. 2003. Mapa Geológico do Estado da Bahia, 1:1.000.000. *Progr. Lev. Geol. Bás. Brasil*, Projeto GIS do Brasil . CPRM e Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM).

Souza, A.N. 2009. Evolução petrográfica e geoquímica do granitóide Ritápolis, borda meridional do cráton São Francisco. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 119 p.

Souza, V.H.P. 2013. Mapeamento geológico, petrografia, geoquímica e implicação tectônica do ortognaisse trondhjemitico Resende Costa, estado de Minas Gerais. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ, 119p.

Stohler, R.C. 2011. Mapeamento Geológico, petrografia e geoquímica preliminar do ortognaisse granítico São Tiago, estado de Minas Gerais. Monografia de Graduação, Instituto de Geociências/UFRJ, 123 p.

Streckesein A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Review*, 12:1-22.

Seixas, L.A.R., David J., Stevenson R. 2012. Geochemistry, Nd isotopes and U–Pb geochronology of a 2350 Ma TTG suite, Minas Gerais, Brazil: Implications for the crustal evolution of the southern São Francisco craton. *Precambrian Research*, 196-197: 61-80.

Teixeira, W., Sabate, P., Barbosa, J., Noce, C.M., Carneiro, M.A., 2000. Archean and tectonic evolution of the São Francisco Craton. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz-Filho, A. (Eds.),

Archean and Tectonic Evolution of the São Francisco Cráton, Brazil. *Tectonic Evolution of South America*, pp. 101e137.

Teixeira, W., Ávila, C.A., Dussin, I.A., Corrêa-Neto, A., Bongiolo, E.M., Santos, J.O. Barbosa, N.S., 2015. A juvenile accretion episode (2.35e2.32 Ga) in the mineiro belt and its role to the minas accretionary orogeny: zircon U e Pb e Hf and geochemical evidences. *Precambrian Res.* 256, 148e169.

Teixeira W. 1985. A evolução geotectônica da porção meridional do Cráton do São Francisco com base em interpretações geocronológicas. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 207p.

Teixeira W. & Figueiredo M.C.H. 1991. An outline of Early Proterozoic crustal evolution in the São Francisco craton, Brazil: a review. *Precambrian Research*, 53: 1-22.

Toledo C.L.B. 2002. Evolução geológica das rochas máficas e ultramáficas no Greenstone Belt Barbacena, região de Nazareno, MG. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 307 p.

Vasconcelos, F.F. 2013. Mapeamento geológico e petrografia das rochas à oeste de Conceição da Barra de Minas, Estado de Minas Gerais. Monografia (Graduação). Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 91p.

Vasques, F.S.G. 2009. Mapeamento geológico, petrografia, geoquímica das rochas anfibolíticas do greenstone belt Rio das Mortes e estudo de diques metabásicos e de gabro-diabásio, região de Cassiterita – Ritópolis, Estado de Minas Gerais. Tese de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 109p.

Williams H., Turner F., Gilbert C.M. 1970. Petrografia. In: *Textura e classificação de rochas ígneas* (Eds.) USP, p.: 13-38.

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

Yardley B.W.D. 2004. *Introdução à petrologia metamórfica*. 2ª edição. UnB, Brasília, 434.