

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Tese de Doutorado

**Caracterização mineralógica do minério fosfático
da Mina de Tapira - MG**

Autora: Ana Maria Dias Chula
Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão

Março/2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Ana Maria Dias Chula

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO MINÉRIO FOSFÁTICO
DA MINA DE TAPIRA - MG

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas
da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Tecnologia Mineral
Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Março/2004

Dedico este trabalho:
Ao meu esposo Alberto, meus filhos Vítor e Gustavo
Aos meus pais José Chula e Maria Cecília Chula
À minha irmã Dani (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Paulo Roberto Gomes Brandão pela orientação, dedicação, incentivo e discussões científicas durante a elaboração deste trabalho;
- À José Aury de Aquino pelo apoio, incentivo e amizade durante todo o tempo de minha permanência no CDTN;
- Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN por toda infra-estrutura disponível, imprescindível para a realização deste trabalho;
- A toda equipe do Setor de Tecnologia Mineral – EC4 do CDTN pelo apoio e colaboração na parte experimental. Em especial à Jeaneth dos Santos Benedetto pelo apoio e incentivo; aos técnicos José Donato de Souza, Mário Lúcio de Souza e Francisco Assis de Souza pelo apoio na preparação das amostras; aos técnicos Luiz Carlos da Silva e Liliani Pacheco Tavares pelas análises químicas; à Francisco Jorge Caldeira pelo apoio nas etapas de moagem e flotação das amostras; ao engenheiro Rodrigo Oscar de Albuquerque pelo auxílio no tratamento de alguns dados; à Ana Cláudia Queiroz Ladeira e ao Carlos Antônio de Moraes pelas sugestões; ao geólogo Walter de Brito agradecimento especial pela amizade, disponibilidade, discussões, incentivo e apoio nas análises de difração de raios-X; ao Éder Anderson Souza de Oliveira pela contribuição na parte de informática; à Maria Aparecida Cardoso Chaves pela amizade e apoio administrativo;
- A equipe do Serviço de Química e Radioquímica do CDTN na figura dos técnicos Iraci Teodoro César, Herculis dos Santos Bernardes e Zilmar Lima Lula pelo apoio na preparação das amostras para difração de raios-X; ao José dos Santos Jorge Pereira pelas análises químicas no KeveX.
- Ao químico Robson Cota de Oliveira (TR3/CDTN) pelas análises de elementos de terras-raras por plasma;

- Ao geólogo James Vieira Alves (EC1/CDTN) pela infra-estrutura na parte de fotomicrografias;
- À Fosfertil pelo fornecimento das amostras e pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho. Em especial ao técnico José Ribeiro dos Santos pela coleta das amostras; ao geólogo Robson S. Aglinskas e aos engenheiros Luiz Antônio F. de Barros e Luiz Otávio A. Almeida pelo apoio e fornecimento de dados;
- À CAPES pela concessão de bolsa de doutorado;
- Ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas/UFMG nas pessoas dos funcionários Maria Aparecida Pacheco e Nelson de Azevedo pelo apoio administrativo;
- Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Minas, em especial Rita C. B. Malafatte pelo apoio nas análises de difração de raios-X; Sandra C. E. M. Teixeira pelos estudos ao microscópio eletrônico de varredura; Isabel S. B. Carvalho pelo auxílio nas análises de difração de raios-X e infravermelho; ao Roberto C. Lois pela assistência nas análises de difração de raios-X dos filossilicatos e nos estudos ao microscópio eletrônico de varredura;
- À Willian Tito Soares, funcionário do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálises (LMA), pertencente ao Consórcio Física, Geologia, Química – UFMG e CDTN pela disponibilidade, incentivo e pelas microanálises WDS;
- Ao professor Roberto Luiz Moreira do Departamento de Física da UFMG pelo apoio nas análises de infravermelho;
- Aos funcionários do Laboratório de Caracterização Tecnológica – LCT, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelas análises químicas e separação de algumas amostras em líquido denso;

- À geóloga Ludmila Maria Motta Pereira pela amizade, incentivo e discussões científicas durante a elaboração deste trabalho;
- Ao geólogo Jarbas Lima Dias Sampaio pela amizade e ajuda durante a utilização de programas na área de informática;
- À Célio Marcos Ziviani pela amizade e apoio no estudo das amostras por fração granulométrica ao microscópio óptico;
- À Pedro Paulo da Luz pela confecção de parte dos desenhos deste trabalho;
- À geóloga Jéssica de Carvalho Tallarico pela grande ajuda nos cálculos das fórmulas estruturais dos minerais;
- À Luiz Guilherme Knauer pela amizade e discussões científicas durante a elaboração deste trabalho;
- À Marília Camargos Botelho Forte pelo companheirismo e motivação;
- Ao laminador Antonino Antônio Mathias pela confecção de parte das lâminas polidas e aos funcionários da laminação da Universidade de Brasília;
- A todos que de uma forma ou outra me incentivaram e ajudaram na elaboração deste trabalho, em especial a meu esposo, Alberto Vilas Boas e aos meus filhos Vítor e Gustavo, pela compreensão, paciência, amor e carinho. Aos meus pais e irmãos, em especial minha irmã Dani, por todo carinho e incentivo.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Apresentação	1
1.2 – Objetivos	3
1.3 – Relevância	4
1.4 – Localização e vias de acesso	6

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Aspectos geológicos	9
2.1.1 – Histórico	9
2.1.2 – Geologia regional	12
2.1.3 – Geologia local	21
2.1.3.1 – Introdução	21
2.1.3.2 – Tipos litológicos presentes	21
2.1.3.3 – Perfil da mineralização	26
2.1.3.4 – Perfil do intemperismo	30
2.1.3.5 – Gênese da mineralização	33
2.2 – Extração e beneficiamento do minério fosfático de Tapira	35
2.3 – Aspectos mineralógicos da apatita	43
2.3.1 – Composição e estrutura	43
2.3.2 – Substituições	45
2.3.3 – Flotabilidade	55
2.4 – Técnicas e métodos instrumentais de caracterização	58
2.4.1 – Difração de raios-X	58
2.4.2 – Análises químicas	60
2.4.2.1 – Via úmida	60
2.4.2.2 – Técnicas analíticas instrumentais	61
2.4.2.3 – Potenciometria	65
2.4.3 – Espectrometria de infravermelho (EIV)	65

2.4.4 – Microscopia óptica	67
2.4.5 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise química (EDS e WDS)	68

3 – METODOLOGIA

3.1 – Amostragem	72
3.1.1 – Amostras das frentes de lavra	72
3.1.2 – Amostras da usina	74
3.2 – Preparação das amostras	77
3.2.1 – Amostras das frentes de lavra	77
3.2.2 – Amostras da usina	81
3.3 – Técnicas analíticas utilizadas	82
3.3.1 – Difração de raios-X	82
3.3.2 – Análises químicas	83
3.3.3 – Microscopia óptica	84
3.3.4 – Microscopia eletrônica de varredura e microsonda eletrônica	85
3.3.5 – Espectrometria de infravermelho – EIV	86

4 – RESULTADOS DAS AMOSTRAS DA MINA

4.1 – Introdução	87
4.2 – Difração de raios-X	88
4.2.1 – Amostras de rocha	88
4.2.2 – Filossilicatos	90
4.2.3 – Argilomineral	100
4.2.4 – Frações granulométricas	102
4.2.5 – Sumário	102
4.3 – Microscopia óptica	103
4.3.1 – Caracterização petrográfica	103
4.3.2 – Caracterização da apatita em lâmina petrográfica	121
4.3.3 – Composição mineralógica por fração granulométrica	129

4.3.4 – Sumário	137
4.4 – Análises químicas	140
4.4.1 – Análises químicas totais	140
4.4.2 – Análises químicas por fração granulométrica	146
4.4.3 – Sumário	149
4.5 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	175
4.5.1 – Sumário	199
4.6 – Microanálises químicas (WDS)	200
4.6.1 – Sumário	214
5 – RESULTADOS DOS CONCENTRADOS DE APATITA OBTIDOS DAS AMOSTRAS DA MINA	
5.1 – Introdução	216
5.2 – Composição mineralógica dos concentrados e características da apatita	216
5.3 – Composição química	225
5.4 – Espectrometria de infravermelho (EIV)	230
5.5 – Sumário	235
6 – RESULTADOS DAS AMOSTRAS DA USINA	
6.1 – Difração de raios-X	237
6.1.1 – Amostras totais	237
6.1.2 – Filossilicatos	238
6.1.3 – Frações granulométricas	241
6.2 – Composição mineralógica por fração granulométrica	241
6.3 – Análises químicas	245
6.3.1 – Análises químicas totais	245
6.3.2 – Análises químicas por fração granulométrica	249
6.4 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	260
6.5 – Espectrometria de infravermelho (EIV)	263
6.6 – Sumário	269
7 – CONCLUSÕES	271

8 – CONHECIMENTOS GERADOS A PARTIR DESTA TESE	277
9 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	278
10 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	279
ANEXO 1 – CARACTERIZAÇÃO DA APATITA POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA NAS AMOSTRAS DA MINA	289
ANEXO 2 – CARACTERIZAÇÃO DA APATITA POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA NAS AMOSTRAS DA USINA	302
ANEXO 3 – RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS DAS AMOSTRAS DA MINA POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA	306
ANEXO 4 – RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS DAS AMOSTRAS DA USINA POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA	319
ANEXO 5 – RESULTADOS DE MICROANÁLISES WDS DAS APATITAS DE CLINOPIROXENITOS DA MINA DE TAPIRA-MG	323

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –	Mapa de Minas Gerais com a localização de Tapira	7
Figura 1.2 –	Imagem do satélite Landsat 5 (composição colorida RGB 345) mostrando o complexo de Tapira de estrutura circular e a localização da mina de Tapira em sua borda norte.....	7
Figura 1.3 –	Mapa rodoviário do Estado de Minas Gerais (escala 1:2.000.000) mostrando os principais acessos para Tapira.....	8
Figura 2.1 –	Mapa de localização das ocorrências alcalinas na porção sul do Brasil (modificado de Gomes <i>et al.</i> , 1990).....	15
Figura 2.2 –	Esboço geológico da região do oeste mineiro (Boletim 136 do DNPM, <i>apud</i> Cruz & Cheney, 1976).....	19
Figura 2.3 –	Perfil esquemático da mineralização em Tapira-MG (modificado de Cruz & Cheney, 1976).....	27
Figura 2.4 –	Perfil típico de intemperismo de Catalão e Araxá, correspondente ao perfil clássico de Bardossy & Aleva (1990) (Morteani & Preinfalk, 1996).....	31
Figura 2.5 –	Fluxograma geral da usina de concentração de Tapira-MG, indicando a localização das amostras coletadas durante o processamento da pilha 912 (Fosfertil).....	41
Figura 2.6 –	Estrutura da fluorapatita onde podem ser visualizados os tetraedros PO ₄ , a coordenação do F com o Ca e os dois tipos de coordenação do Ca (Ribeiro, C. C., 2002).....	45
Figura 3.1 –	Mapa de localização das amostras nas frentes de lavra da Mina de Tapira-MG.....	73
Figura 3.2 –	Fluxograma esquemático mostrando o código, litologia e localização das amostras das frentes de lavra da Mina de Tapira-MG.....	74
Figura 3.3 –	Fluxograma do processamento das amostras da Mina de Tapira-MG.....	79
Figura 3.4 –	Fluxograma do processo de preparação dos concentrados de apatita	

	das amostras da Mina de Tapira-MG.....	80
Figura 4.1 –	Difratograma de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 2, com tratamento térmico e com etilenoglicol.....	93
Figura 4.2 –	Difratograma completo de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 2.....	93
Figura 4.3 –	Difratograma de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 4, com tratamento térmico e com etilenoglicol.....	94
Figura 4.4 –	Difratograma completo de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 4.....	94
Figura 4.5 –	Difratograma de filossilicato do tipo vermiculita e clorita da amostra 10, com tratamento térmico e com etilenoglicol.....	95
Figura 4.6 –	Difratograma completo de filossilicato do tipo vermiculita e clorita da amostra 10.....	95
Figura 4.7 –	Difratograma de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita rara da amostra 9, com tratamento térmico e com etilenoglicol.....	96
Figura 4.8 –	Difratograma completo de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita / vermiculita), vermiculita e clorita da amostra 9.....	96
Figura 4.9 –	Difratograma de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita da amostra 3, com tratamento térmico e com etilenoglicol.....	97
Figura 4.10 –	Difratograma completo de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita da amostra 3.....	97
Figura 4.11 –	Difratograma de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 11, com tratamento térmico e com etilenoglicol. O pico 15,19Å indica a presença de esmectita.....	98

Figura 4.12 –	Difratograma completo de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 11.....	98
Figura 4.13 –	Difratograma de argilomineral do tipo esmectita (nontronita) da amostra 11, com tratamento térmico e com etilenoglicol.....	101
Figura 4.14 –	Difratograma completo de argilomineral do tipo esmectita (nontronita) da amostra 11.....	101
Figura 4.15 –	Curvas de ETR, normalizadas para condritos (a) clinopiroxenitos pouco alterados; (b) clinopiroxenitos micáceos; (c) clinopiroxenitos argilizados; (d) clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita da mina de Tapira-MG.....	145
Figura 4.16 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 2 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG..	154
Figura 4.17 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 2 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.....	154
Figura 4.18 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 5 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG..	155
Figura 4.19 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 5 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.....	155
Figura 4.20 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 10 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG	156
Figura 4.21 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 10 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.....	156
Figura 4.22 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da	

	amostra 1 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.....	160
Figura 4.23 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 1 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.....	160
Figura 4.24 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 4 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.....	161
Figura 4.25 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 4 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.....	161
Figura 4.26 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 9 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.....	162
Figura 4.27 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 9 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.....	162
Figura 4.28 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 11 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.....	165
Figura 4.29 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 11 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.....	165
Figura 4.30 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 12 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.....	166
Figura 4.31 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 12 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.....	166
Figura 4.32 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 3 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	171
Figura 4.33 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 3 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	171

Figura 4.34 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 6 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	172
Figura 4.35 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 6 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	172
Figura 4.36 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 7 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	173
Figura 4.37 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 7 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	173
Figura 4.38 –	Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 8 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	174
Figura 4.39 –	Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 8 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	174
Figura 4.40 –	Eletronmicrografias do clinopiroxenito pouco alterado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões fluidas e inclusão de calcita (am2). (b): apatita com inclusões fluidas e inclusão de calcita e monazita (am2). (c): apatita com inclusão de calcita e monazita (am10). (d): ampliação de uma região da foto anterior mostrando inclusões na calcita de barita, monazita e de um óxido de Fe e Nb...	177
Figura 4.41 –	Eletronmicrografias do clinopiroxenito pouco alterado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela	

acima. (a): apatita com inclusão de calcita e de ilmenita (am10). (b): apatita cortada por vênulas de quartzo (am10). (c): apatita cortada por vênulas de calcita (am10). (d): apatita cortada por vênulas de calcita + quartzo (am2)..... 178

Figura 4.42 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito pouco alterado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênula de calcita + dolomita (am10). (b): apatita cortada por vênula de calcita; nota-se inclusão de zirconolita na calcita (am5). (c): apatita cortada por vênulas de calcita, nota-se monazita inclusa na calcita (am10). (d): apatita associada com perovskita (am5)..... 179

Figura 4.43 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito micáceo (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de calcita (am1). (b): apatita com calcita na borda e inclusões de piroxênio e estroncianita (am4). (c): apatita com inclusões de estroncianita (am4). (d): apatita com inclusões de ilmenita; notam-se tonalidades de cinza diferentes na apatita em função de teores variáveis de ETR (am1)..... 182

Figura 4.44 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito micáceo (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênulas de calcita (am4) (b): apatita associada com magnetita e ilmenita; notam-se inclusões de calcita na ilmenita (am1). (c): apatita associada com quartzo e piroxênio (am9). (d): ampliação de uma região da foto anterior mostrando inclusões de calcita na apatita (am9)..... 183

Figura 4.45 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito micáceo (fração

+0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com perovskita (am9). (b): apatita inclusa em granada com associação de perovskita/anatásio e filossilicato de camadas mistas – FCM (am4). (c): granada associada com perovskita e FCM (am4). (d): ampliação de uma região da foto anterior.....

184

Figura 4.46 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito micáceo (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita porosa associada com FCM, granada e calcita (am4). (b): ampliação de uma região da foto anterior mostrando inclusão de perovskita na apatita e inclusões de estroncianita. (c): ampliação de uma outra região da foto anterior onde podem ser visualizadas inclusões finíssimas de estroncianita e de um silicato de Ca e Na.....

185

Figura 4.47 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito argilizado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER – a, c e d e imagem de elétrons secundários – IES – b). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita porosa com inclusões fluidas (am12). (b): mesma foto anterior ressaltando os poros e as inclusões fluidas (c): apatita porosa com inclusões fluidas (am12). (d): outra região da apatita porosa apresentada em c, mostrando alinhamento dos poros (am12)

187

Figura 4.48 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito argilizado (amostra 11 – fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de feldspato potássico, monazita, zirconolita e anquerita. (b): apatita com inclusões de calcita e de um óxido de Zr e Ca. (c): apatita com inclusões de ilmenita e nontronita. (d): apatita com inclusão de

- nontronita..... 188
- Figura 4.49 –** Eletronmicrografias do clinopiroxenito argilizado (amostra 11 – fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de monazita. (b): outra região da apatita apresentada em (a), mostrando inclusões de barita e de calcita. (c): apatita associada com nontronita e com inclusões finíssimas de barita. (d): anatásio com inclusões de monazita/fosfato do grupo do rabdofânio..... 189
- Figura 4.50 –** Eletronmicrografias do clinopiroxenito argilizado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com perovskita; nota-se magnetita com exsolução de ilmenita (am11). (b): apatita associada com perovskita/anatásio e magnetita (am12). (c): apatita inclusa e na borda de magnetita (am12). (d): ampliação de uma região da foto anterior com detalhe para exsolução de ilmenita na magnetita 190
- Figura 4.51 –** Eletronmicrografias do clinopiroxenito argilizado (am12 – fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com anatásio parcialmente alterado para fosfato secundário do grupo da crandalita e monazita/rabdofana. (b): ampliação de uma região da foto anterior (c): apatita associada com anatásio; notam-se restos de perovskita e inclusões de monazita/rabdofana no anatásio..... 191
- Figura 4.52 –** Eletronmicrografias do argilomineral nontronita presente nas amostras de clinopiroxenito argilizado obtidas no MEV (imagem de elétrons secundários – IES). As microanálises EDS, obtidas como uma média de 15 miniáreas analisadas por amostra, são mostradas na tabela acima. (a), (b) e (c): amostra 11. (d), (e) e (f):

- amostra 12..... 192
- Figura 4.53 –** Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões fluidas e inclusões de calcita (am3). (b): apatita com inclusão de calcita (am8). (c): apatita cortada por vênulas de quartzo (am3). (d): apatita cortada por vênulas de quartzo e associada com FCM (am3)..... 194
- Figura 4.54 –** Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênulas de dolomita (am3). (b): apatita cortada por vênula de dolomita; nota-se associação da apatita com perovskita alterada nas bordas para ilmenita e para anatásio (?) com ETR (am8). (c): apatita cortada por vênulas de calcita (am6). (d): apatita cortada por vênulas de calcita e associada com ilmenita; nota-se inclusão na calcita de provável ancilita (am8)..... 195
- Figura 4.55 –** Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênulas de calcita + quartzo (am6). (b): apatita associada com vermiculita e cortada por vênulas de calcita + dolomita (am8). (c): apatita cortada por vênulas de calcita + dolomita (am6). (d): apatita associada com piroxênio (am6)..... 196
- Figura 4.56 –** Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada

- miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com magnetita, perovskita e FCM (am3). (b): apatita associada com magnetita e perovskita. (am3). (c): apatita e FCM, ambos inclusos em perovskita (am3). (d): apatita associada com magnetita (am3).... 197
- Figura 4.57 –** Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com calcita e magnetita (am8). (b): ampliação de uma região da magnetita mostrando lamelas de exsolução de ilmenita (am8). (c): calcita e quartzo parcialmente recobertos por goethita (am6). (d): quartzo recoberto por goethita (am6)..... 198
- Figura 5.1 –** Difratoograma de concentrado purificado de apatita proveniente da amostra 2 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.. 217
- Figura 5.2 –** Difratoograma de concentrado purificado de apatita proveniente da amostra 9 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG..... 218
- Figura 5.3 –** Difratoograma de concentrado purificado de apatita proveniente da amostra 11 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG..... 218
- Figura 5.4 –** Difratoograma de concentrado purificado de apatita proveniente da amostra 6 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG..... 219
- Figura 5.5 –** Eletronmicrografias dos concentrados C10, C4 e C9 obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com calcita e com inclusão de barita (am C10). (b): apatita cortada por vênulas de calcita mais quartzo (am C10). (c): apatita com inclusões de calcita (am C9). (d): apatita associada com perovskita e com inclusões de estroncianita (am C4)..... 221
- Figura 5.6 –** Eletronmicrografias dos concentrados C1, C4 e C9 obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise

EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com FCM e com inclusão de barita (am C1). (b): apatita com inclusões de ilmenita (am C1). (c): apatita associada com FCM e melanita e com inclusões de zirconolita; nota-se também melanita em associação com calcita e FCM (am C4). (d): apatita cortada por vênula de quartzo (am C9)..... 222

Figura 5.7 – Eletronmicrografias dos concentrados C4, C9 e C11 obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com piroxênio (amC9). (b): apatita associada com calcita e anfibólio; notam-se inclusões de zircão (amC4). (c): apatita com inclusões de monazita, feldspato potássico e nontronita; notam-se na apatita regiões com tonalidades diferentes devido à variações nos teores de Sr e ETR (amC11). (d): apatita com inclusão de monazita (amC11)..... 223

Figura 5.8 – Eletronmicrografias dos concentrados C7 e C11 obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com anatásio (am C11). (b): apatita cortada por vênulas de calcita; nota-se inclusão na calcita de holandita ou romanechita (am C7). (c): apatita cortada por venulações de calcita; nota-se na calcita inclusão de zirconolita (am C7). (d): apatita associada com perovskita parcialmente alterada para ilmenita (am C7)..... 224

Figura 5.9 – Curvas de ETR, normalizadas para condritos (a) – concentrados de apatita obtidos de clinopiroxenitos pouco alterados; (b) – concentrados de apatita obtidos de clinopiroxenitos micáceos; (c) – concentrados de apatita obtidos de clinopiroxenitos argilizados; (d) – concentrados de apatita obtidos de clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita da Mina de Tapira-MG..... 229

Figura 5.10 – Espectro de infravermelho (transmissão) da apatita de Tapira-MG

	(amostra C5).....	232
Figura 5.11 –	Espectro de infravermelho (transmissão) da apatita de Tapira-MG (amostra C9).....	232
Figura 5.12 –	Espectro de infravermelho (transmissão) da apatita de Tapira-MG (amostra C11).....	233
Figura 5.13 –	Espectro de infravermelho (transmissão) da apatita de Tapira-MG (amostra C7).....	233
Figura 6.1 –	Difratograma de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra TC11 (ROM), com tratamento térmico e com etilenoglicol.....	239
Figura 6.2 –	Difratograma completo de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra TC11 (ROM).....	239
Figura 6.3 –	Difratograma de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita (traços) da amostra TC11 (ROM), com tratamento térmico e com etilenoglicol.....	240
Figura 6.4 –	Difratograma completo de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita da amostra TC11 (ROM).....	240
Figura 6.5 –	Curvas de ETR, normalizadas para condritos, dos concentrados da usina de concentração de Tapira-MG.....	248
Figura 6.6 –	Variação dos teores dos principais elementos na amostra da alimentação da usina de concentração de Tapira-MG (TC11-ROM – pilha 912).....	253
Figura 6.7 –	Distribuição em massa dos principais elementos na amostra da alimentação da usina de concentração de Tapira-MG (TC11-ROM – pilha 912).....	254
Figura 6.8 –	Distribuições granulométricas das amostras de concentrados CG e CGR da usina de concentração de Tapira-MG, obtidas por peneiramento clássico.....	255

Figura 6.9 –	Variação dos teores dos principais elementos constituintes da apatita no concentrado CG.....	257
Figura 6.10 –	Variação dos teores dos principais elementos constituintes da apatita no concentrado CGR.....	257
Figura 6.11 –	Variação dos teores dos principais contaminantes no concentrado CG.....	258
Figura 6.12 –	Variação dos teores dos principais contaminantes no concentrado CGR.....	258
Figura 6.13 –	Distribuição em massa e de alguns elementos no concentrado CG...	259
Figura 6.14 –	Distribuição em massa e de alguns elementos no concentrado CGR.	259
Figura 6.15 –	Eletronmicrografias da amostra TC11 – ROM (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênulas de quartzo + calcita; nota-se inclusão de magnetita na calcita. (b): apatita com tonalidades de cinza diferentes em função de variação nos teores de Sr e ETR; notam-se finíssimas inclusões de monazita. (c): apatita associada com granada do tipo schorlomita. (d): apatita inclusa em granada do tipo schorlomita; nota-se também finíssima inclusão de calzirtita.....	261
Figura 6.16 –	Eletronmicrografias da amostra TC11 – ROM (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita inclusa em filossilicato de camadas mistas – FCM. (b): apatita associada com magnetita. (c): magnetita com inclusão e lamelas de exsolução de ilmenita. (d): olivina com inclusões de magnetita.....	262
Figura 6.17 –	Eletronmicrografias dos concentrados CG e CGR (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados	

– IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de calcita (am CG). (b): apatita com inclusões fluidas e de calcita (am CG) . (c): apatita com inclusões de quartzo (am CGR). (d): apatita com inclusões de calcita, barita e FCM (am CGR)..... 264

Figura 6.18 – Eletronmicrografias dos concentrados CG e CGR (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de calcita e de flogopita; notam-se regiões com tonalidades de cinza diferentes na apatita em função de teores variáveis de ETR (am CGR). (b): apatita com inclusões de monazita (am CGR). (c): apatita com inclusões de monazita e cortada por vênula de calcita. Junto com a calcita observa-se magnetita impura (am CGR). (d): apatita cortada por vênulas de dolomita; nota-se associação com piroxênio (am CG)..... 265

Figura 6.19 – Eletronmicrografias dos concentrados CG e CGR (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com calcita; notam-se finíssimas inclusões de barita na calcita (am CGR). (b): apatita associada com provável anfibólio do tipo riebeckita e calcita; notam-se finíssimas inclusões de estroncianita na calcita (am CG). (c): apatita cortada por vênulas de quartzo com calcita e prováveis holandita – ho ou romanechita – ro (am CG) (d): ampliação de uma região da foto anterior..... 266

Figura 6.20 – Eletronmicrografias do concentrado CG (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com FCM; notam-se tonalidades diferentes na apatita devido à variações nos teores de Sr e ETR. (b): apatita

	primária alterada para apatita secundária parcialmente impregnada por hidróxido de ferro.....	267
Figura 6.21 –	Espectro de infravermelho (transmissão) do concentrado CG da usina de Tapira-MG.....	268
Figura 6.22 –	Espectro de infravermelho (transmissão) do concentrado CGR da usina de Tapira-MG.....	269

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Reserva e produção mundial de concentrado de rocha fosfática.....	2
Tabela 2.1	Grupo da apatita (Athena Mineralogy).....	44
Tabela 3.1	Listagem das amostras da pilha 912 coletadas na usina de concentração de Tapira-MG.....	75
Tabela 3.2	Características da pilha 912.....	75
Tabela 3.3	Balanço metalúrgico estimado para a pilha 912 (dados fornecidos pela Fosfertil).....	76
Tabela 3.4	Características da pilha 912.....	76
Tabela 4.1	Resultados de difração de raios-X das amostras de rocha da Mina de Tapira – MG.....	89
Tabela 4.2	Valores do espaçamento basal (em Å) para alguns argilominerais mais comuns depois dos tratamentos clássicos segundo Thorez (1975).....	91
Tabela 4.3	Resultados de difração de raios-X das amostras de filossilicatos da Mina de Tapira-MG.....	92
Tabela 4.4	Composição mineralógica estimada para a amostra 2.....	129
Tabela 4.5	Composição mineralógica estimada para a amostra 5.....	130
Tabela 4.6	Composição mineralógica estimada para a amostra 10.....	130
Tabela 4.7	Composição mineralógica estimada para a amostra 1.....	131
Tabela 4.8	Composição mineralógica estimada para a amostra 4.....	132
Tabela 4.9	Composição mineralógica estimada para a amostra	132

	9.....	
Tabela 4.10 –	Composição mineralógica estimada para a amostra 11.....	134
Tabela 4.11 –	Composição mineralógica estimada para a amostra 12.....	134
Tabela 4.12 –	Composição mineralógica estimada para a amostra 3.....	135
Tabela 4.13 –	Composição mineralógica estimada para a amostra 6.....	136
Tabela 4.14 –	Composição mineralógica estimada para a amostra 7.....	136
Tabela 4.15 –	Composição mineralógica estimada para a amostra 8	136
Tabela 4.16 –	Formas de ocorrência dos carbonatos nos clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG.....	139
Tabela 4.17 –	Análise química dos clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG.....	141
Tabela 4.18 –	Análise química dos clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG – elementos das terras-raras.....	144
Tabela 4.19 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 2 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.....	151
Tabela 4.20 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 5 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.....	152
Tabela 4.21 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 10 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.....	153
Tabela 4.22 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 1 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.....	157
Tabela 4.23 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e	

	metalúrgica da amostra 4 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.....	158
Tabela 4.24 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 9 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.....	159
Tabela 4.25 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 11 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.....	163
Tabela 4.26 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 12 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.....	164
Tabela 4.27 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 3 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	167
Tabela 4.28 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 6 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	168
Tabela 4.29 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 7 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	169
Tabela 4.30 –	Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra 8 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.....	170
Tabela 4.31 –	Microanálises por EDS de granada da amostra 4 da mina de Tapira.	181
Tabela 4.32 –	Análises de clinopiroxênio em clinopiroxenitos da mina de Tapira..	201
Tabela 4.33 –	Análises de FCM em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG.....	203
Tabela 4.34 –	Análises de vermiculita em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG.....	204
Tabela 4.35 –	Análises de carbonatos em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG	206
Tabela 4.36 –	Análises de magnetita em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG..	207

Tabela 4.37	– Análises de perovskita em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG.	209
Tabela 4.38	– Análises de apatita em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG.....	211
Tabela 4.39	– Análises de apatita em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG.....	212
Tabela 5.1	– Composição mineralógica estimada para os concentrados de apatita (% em peso).....	217
Tabela 5.2	– Análise química dos concentrados de apatita de Tapira-MG.....	227
Tabela 5.3	– Análise química dos concentrados de apatita de Tapira-MG – elementos das terras-raras.....	228
Tabela 5.4	– Grupos iônicos com suas respectivas bandas de absorção presentes nos espectros de infravermelho dos concentrados de apatita de Tapira-MG.....	231
Tabela 6.1	– Resultados de difração de raios-X em cada ponto de amostragem da usina de concentração de Tapira-MG.....	238
Tabela 6.2	– Composição mineralógica estimada para a amostra TC11 (ROM)....	242
Tabela 6.3	– Composição mineralógica estimada para a amostra CG.....	243
Tabela 6.4	– Composição mineralógica estimada para a amostra CGR.....	244
Tabela 6.5	– Análise química de cada ponto de amostragem da usina de concentração de Tapira-MG.....	247
Tabela 6.6	– Análise química dos concentrados CG e CGR da usina de concentração de Tapira-MG – elementos das terras-raras.....	248
Tabela 6.7	– Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica da amostra TC11 (ROM) da usina de concentração de Tapira-MG.....	250
Tabela 6.8	– Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica do concentrado CG da usina de concentração de Tapira-MG.....	251
Tabela 6.9	– Análise granulométrica com teores e distribuição de massa e metalúrgica do concentrado CGR da usina de concentração de	

	Tapira-MG.....	252
Tabela 6.10 –	Grupos iônicos com suas respectivas bandas de absorção presentes nos espectros de infravermelho dos concentrados CG e CGR da usina de Tapira-MG.....	268

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1 –	Visão geral da mina de Tapira-MG, mostrando as zonas de alteração (frentes de lavra 1 e 2).....	27
Foto 2.2 –	Visão geral da mina de Tapira-MG, mostrando as zonas de alteração (frente de lavra 3).....	27
Foto 2.3 –	Visão geral da mina de Tapira-MG, mostrando as zonas de alteração (frentes de lavra 5 e 6).....	27
Foto 2.4 –	Moinho de barras (esquerda) e moinho de bolas (direita) do circuito de minério granulado.....	42
Foto 2.5 –	Flotação cleaner do circuito de minério granulado.....	42
Foto 2.6 –	Célula de flotação: concentrado apatítico do circuito de minério granulado.....	42
Foto 2.7 –	Classificação do minério friável.....	42
Foto 2.8 –	Deslamagem do minério friável.....	42
Foto 2.9 –	Separação magnética do circuito friável.....	42
Foto 2.10 –	Células de flotação scavenger do circuito de minério friável grosso.	42
Foto 2.11 –	Célula de flotação: concentrado apatítico final.....	42
Foto 4.1 –	Detalhe de uma região no clinopiroxenito pouco alterado enriquecida em minerais micáceos de cor verde escura, com cristais podendo atingir até 10cm.....	104
Foto 4.2 –	Clinopiroxenito pouco alterado bastante enriquecido em apatita (ap). Amostra 10 (banco 1222/espigão 1).....	104
Foto 4.3 –	Clinopiroxenito pouco alterado cpx (amostra 2) em contato brusco com clinopiroxenito micáceo - cpxm (banco 1209/espigão 2).....	104
Foto 4.4 –	Clinopiroxenito pouco alterado – cpx cortado por venulações de carbonato – cb. Note clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (“silexito”) – cpxmp sob a forma de corpos discordantes	

	e de bolsões (banco 1209/espigão 2).....	104
Foto 4.5 –	Clinopiroxenito pouco alterado – cpx (amostra 5) interdigitado com clinopiroxenito micáceo – cpxm, ambos cortados por corpos de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita – cpxmp – amostra 6.....	106
Foto 4.6 –	Clinopiroxenito argilizado – cpxarg cortado por corpos de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita – cpxmp. Amostra 11 – banco 1258/espigão 3.....	114
Foto 4.7 –	Visão geral de clinopiroxenito argilizado – cpxarg (amostra 12). Banco 1240/espigão 5.....	114
Foto 4.8 –	Corpos centimétricos de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita – cpxmp cortando clinopiroxenito pouco alterado – cpx (amostra 3).....	116
Foto 4.9 –	Corpos de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (cpxmp) cortando clinopiroxenito pouco alterado (cpx). Amostra 8 – banco 1222/espigão 1.....	116
Foto 4.10 –	Bloco de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita – cpxmp – cortado por venulações de carbonato (cb). Amostra 6 – Banco 1222/espigão 2.....	119
Foto 4.11 –	Bloco de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita – cpxmp – onde destacam-se drusas contendo carbonato e quartzo (amostra 6).....	119

LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS

Fotomicrografia 4.1	– Visão geral do clinopiroxenito pouco alterado (amostra 2) composto principalmente por piroxênio (px), magnetita (mt) e minerais micáceos (mc). Note vênulas de carbonato (cb) cortando os minerais. Aumento de 25x – LTP – nicóis cruzados.....	106
Fotomicrografia 4.2	– Amostra 10 – Piroxênio (px) parcialmente alterado para anfibólio (af). Note inclusões de apatita (ap) e vênulas de carbonato (cb). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados.....	106
Fotomicrografia 4.3	– Amostra 2 – Cristal de piroxênio com exsolução de minerais opacos. Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.....	106
Fotomicrografia 4.4	– Amostra 5 – Cristal de piroxênio (px) com inclusões de mineral micáceo (mc) e de perovskita (pv) alterada nas bordas para anatásio (at). Note vênula de carbonato (cb). Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	107
Fotomicrografia 4.5	– Amostra 2 – Venulações de carbonato (cb) cortando cristais de piroxênio (px), mineral micáceo (mc) e magnetita (mt), conferindo aspecto brechado ao clinopiroxenito pouco alterado. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	107
Fotomicrografia 4.6	– Amostra 2 – Venulações de carbonato (cb) cortando cristais de magnetita (mt). Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	107
Fotomicrografia 4.7	– Amostra 10 – Venulações de quartzo (qzo) cortando cristais de piroxênio (px) e de apatita (ap). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados.....	107
Fotomicrografia 4.8	– Amostra 5 – Detalhe de um cristal de mineral micáceo (mc) deformado, próximo ao contato com magnetita (mt). Aumento de 25x – LTP – nicóis cruzados.....	109

- Fotomicrografia 4.9** – Amostra 2 – Cristal de magnetita (mt) mostrando martitização nas bordas, caracterizada pela presença de placas finas de hematita (he) ao longo de seus planos octaédricos. Aumento de 320x – LRP – nicóis descruzados..... 109
- Fotomicrografia 4.10** – Amostra 2 – Cristal de magnetita (mt) intensamente martitizado, sendo observados apenas alguns relictos. Aumento de 320x – LRP – nicóis descruzados..... 109
- Fotomicrografia 4.11** – Amostra 2 – Cristal de magnetita (mt) parcialmente martitizado e exibindo lamelas de exsolução de ilmenita (il). Aumento de 320x – LRP – nicóis descruzados..... 109
- Fotomicrografia 4.12** – Amostra 9 – Visão geral de clinopiroxenito micáceo composto por mineral micáceo (mc), piroxênio (px), magnetita (mt) e apatita (ap). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados..... 112
- Fotomicrografia 4.13** – Amostra 4 – Visão geral de clinopiroxenito micáceo cortado por venulações de carbonato (cb). Note também mineral micáceo (mc), perovskita (pv) e perovskita + granada (pv/gr). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados..... 112
- Fotomicrografia 4.14** – Amostra 4 – Detalhe de um pseudomorfo de olivina composto por anfibólio (af) e circundado por cristais de perovskita (pv). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados..... 112
- Fotomicrografia 4.15** – Amostra 4 – Detalhe de cristal de piroxênio (px) fragmentado pelas vênulas de carbonato (cb). Note cristais prismáticos de apatita (ap). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados..... 112
- Fotomicrografia 4.16** – Amostra 12 – Visão geral de clinopiroxenito argilizado constituído principalmente de piroxênio argilizado (px arg), mineral micáceo (mc), magnetita (mt), perovskita

	(pv) alterada para anatásio (at) e apatita (ap). Aumento de 25x – LTP – nicóis cruzados.....	114
Fotomicrografia 4.17	– Amostra 11 – Visão geral do clinopiroxenito argilizado, podendo ser observadas nontronita (no), apatita (ap) e magnetita (mt). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados.....	116
Fotomicrografia 4.18	– Amostra 12 – Perovskita (pv) intensamente alterada para anatásio (at) e titanita (ti). Note cristal de apatita (ap) hexagonal. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	116
Fotomicrografia 4.19	– Amostra 6 – Visão geral do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita, composto por magnetita (mt), perovskita (pv), mineral micáceo (mc), apatita (ap) e goethita (gt). Note carbonato (cb) em vênulas. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	119
Fotomicrografia 4.20	– Amostra 3 – Cristal de piroxênio (px) cortado por abundantes vênulas de carbonato (cb). Note exsoluções de minerais opacos. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados.....	119
Fotomicrografia 4.21	– Amostra 6 – Venulações de carbonato (cb) cortando cristais de magnetita (mt), perovskita (pv) e apatita (ap) em direções diversas, conferindo à rocha textura brechada. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	120
Fotomicrografia 4.22	– Amostra 3 – Venulações de carbonato (cb) cortando cristais de perovskita (pv) e goethita (gt) em clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	120
Fotomicrografia 4.23	– Amostra 6 – Detalhe de venulação, onde o carbonato (cb) ocorre juntamente com goethita e anatásio, todos com hábitos botrioidais. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	120

- Fotomicrografia 4.24** – Amostra 8 – Detalhe de uma região enriquecida em quartzo (qzo) com hábito radiado em clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados..... 120
- Fotomicrografia 4.25** – Amostra 2 – Cristais anédricos de apatita (ap) inclusos em magnetita (mt). Note vênulas de carbonato (cb) cortando apatita e magnetita. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados..... 123
- Fotomicrografia 4.26** – Amostra 10 – Cristal de apatita (ap) hexagonal incluso em piroxênio (px). Note vênulas abundantes de carbonato (cb) e pontuações de carbonato na apatita. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados..... 123
- Fotomicrografia 4.27** – Amostra 10 – Cristais de apatita (ap) prismáticos e hexagonais inclusos em piroxênio (px) parcialmente alterado para anfibólio. Note vênulas de carbonato (cb) e pontuações de carbonato na apatita. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados..... 123
- Fotomicrografia 4.28** – Amostra 2 – Cristais subédricos de apatita (ap) inclusos em mineral micáceo (mc). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados..... 123
- Fotomicrografia 4.29** – Amostra 5 – Agregados de cristais de apatita (ap) cortados por vênulas de carbonato (cb). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados..... 124
- Fotomicrografia 4.30** – Amostra 10 – Cristal de apatita (ap) cortado por vênulas de quartzo (qzo) + carbonato (cb) e vênulas somente de carbonato. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados..... 124
- Fotomicrografia 4.31** – Amostra 2 – Cristal de apatita (ap) apresentando abundantes inclusões fluidas. Aumento de 200x – LTP – nicóis cruzados..... 124
- Fotomicrografia 4.32** – Amostra 5 – Cristal prismático de apatita (ap) exibindo inclusões fluidas, alinhadas segundo o eixo maior da

	apatita, bem como pontuações de carbonato (cb). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.....	124
Fotomicrografia 4.33	– Amostra 1 – Cristal prismático de apatita (ap) incluso em piroxênio (px). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados.....	125
Fotomicrografia 4.34	– Amostra 1 – Cristais anédricos e hexagonais de apatita (ap) inclusos em mineral micáceo (mc). Note pontuações de carbonato (cb) na apatita. Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.....	125
Fotomicrografia 4.35	– Amostra 1 – Cristais anédricos de apatita (ap) inclusos em perovskita (pv). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.....	125
Fotomicrografia 4.36	– Amostra 9 – Agregados de cristais de apatita (ap) cortados por vênulas de carbonato (cb) e com pontuações de carbonato. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados...	125
Fotomicrografia 4.37	– Amostra 12 – Cristais prismáticos de apatita (ap) em contato com magnetita (mt), mineral micáceo (mc) e perovskita (pv). Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	126
Fotomicrografia 4.38	– Amostra 12 – Cristal de apatita (ap) incluso em mineral micáceo (mc). Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.....	126
Fotomicrografia 4.39	– Amostra 11 – Cristais de apatita (ap) inclusos em perovskita (pv) alterada para anatásio. Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.....	126
Fotomicrografia 4.40	– Amostra 11 – Cristal prismático de apatita (ap) em meio a massa de nontronita (no). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.....	126
Fotomicrografia 4.41	– Amostra 11 – Cristais de apatita (ap) anédricos e hexagonais em meio a massa de nontronita (no). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.....	127

- Fotomicrografia 4.42** – Amostra 12 – Cristais de apatita (ap) mostrando fraturas percoladas por goethita (gt). Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados..... 127
- Fotomicrografia 4.43** – Amostra 12 – Cristais de apatita (ap) mostrando inclusões fluidas tubulares, alinhadas segundo comprimento do cristal. Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados..... 127
- Fotomicrografia 4.44** – Amostra 6 – Detalhe de cristal de apatita (ap) incluso em perovskita (pv) e agregados de cristais de apatita cortados por venulações abundantes de carbonato (cb). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados..... 127
- Fotomicrografia 4.45** – Amostra 6 – Cristais de apatita (ap) inclusos em magnetita (mt) e perovskita (pv). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados..... 128
- Fotomicrografia 4.46** – Amostra 7 – Detalhe de cristal de apatita (ap) incluso em mineral micáceo (mc), ambos cortados por abundantes vênulas de carbonato (cb). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados..... 128
- Fotomicrografia 4.47** – Amostra 6 – Detalhe de cristal subédrico de apatita (ap) cortado por vênulas de carbonato (cb). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados..... 128
- Fotomicrografia 4.48** – Amostra 8 – Detalhe de cristal de apatita (ap) com fraturas percoladas por goethita (gt) e venulações de quartzo (qzo). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados..... 128

RESUMO

Este trabalho objetivou realizar uma caracterização mineralógica detalhada do minério fosfático rico em carbonatos e silicatos, proveniente de regiões mais profundas da mina de Tapira-MG, com a finalidade de fornecer subsídios para a adequação do processo de sua concentração. A mina de Tapira apresenta uma associação mineralógica heterogênea e com baixo teor de apatita, o que leva a processos industriais de beneficiamento muito complexos. Atualmente, a unidade industrial tem sido alimentada parcialmente com minérios ricos em carbonatos, o que tem causado problemas no desempenho da flotação de apatita, quando se utilizam ácidos graxos saponificados como agentes coletores. Foram utilizadas 12 amostras de minério preparadas através de britagem, moagem, peneiramento e deslamagem. Os métodos analíticos empregados foram: difração de raios-X, análises químicas, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, microanálise química (EDS e WDS) e espectrometria de infravermelho (FTIR). Concentrados purificados de apatita de cada amostra foram obtidos através de flotação e separações em meio denso e magnética. Os resultados mostram que, apesar das 12 amostras serem classificadas como clinopiroxenitos, elas apresentam variações modais na composição, o que influencia na escolha dos reagentes de flotação mais apropriados, permitindo uma melhora do concentrado produzido. De acordo com a composição mineralógica e grau de alteração, estas amostras foram separadas em quatro grupos de minério: clinopiroxenitos pouco alterados (amostras 2, 5 e 10), clinopiroxenitos micáceos (amostras 1, 4 e 9), clinopiroxenitos argilizados (amostras 11 e 12) e clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (amostras 3, 6, 7 e 8). A mineralogia principal consiste em diopsídio, apatita, carbonatos, minerais micáceos, magnetita, perovskita, anatásio/rutilo, quartzo e ilmenita, sendo observadas granada do tipo melanita na amostra 4 e esmectita do tipo nontronita nas amostras 11 e 12. Localmente ocorrem quantidades minoritárias de anfibólio, titanita, hematita, goethita, zircão, pirita, monazita, barita, zirconolita, óxido de Mn, Ba e Fe (prováveis holandita e/ou romanechita) e fosfatos secundários dos grupos do rabdofânio e da crandalita. Os minerais micáceos foram identificados como sendo principalmente filossilicatos de camadas mistas (flogopita/vermiculita e biotita/vermiculita, este último somente na amostra 12) e vermiculita pura, ocorrendo também quantidade minoritária de clorita e flogopita. Calcita e dolomita predominam entre os carbonatos e ocorrem principalmente sob a forma de vênulas cortando

os demais minerais dos clinopiroxenitos ou como finas inclusões, em geral nos cristais de apatita. Os teores de carbonatos variam entre $\leq 1\%$ (amostras 1 e 9 – clinopiroxenito micáceo e 11 e 12 – clinopiroxenito argilizado) até 32% (amostra 10 – clinopiroxenito pouco alterado), porém predominam teores entre 11% e 26%. A apatita nas 12 amostras consiste em carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita, é essencialmente primária e aparece em cristais límpidos, apesar de inclusões fluidas e inclusões principalmente de carbonatos serem comuns. As características da apatita sugerem um bom desempenho no processo de flotação, com elevados índices de recuperação, porém deve ser levada em consideração sua seletividade em relação aos minerais de ganga. Entre os principais minerais portadores de cálcio nas 12 amostras da mina de Tapira (diopsídio, carbonatos, perovskita, apatita, melanita e nontronita), os carbonatos correspondem aos maiores contaminantes dos concentrados (teores variando entre $<1\%$ até 6%), localmente ocorrendo diopsídio, monazita, barita, perovskita, minerais micáceos, melanita e nontronita, minerais esses que somados não chegam a atingir 1%. As relações texturais entre a apatita e os carbonatos indicam que concentrados totalmente puros são impossíveis de se obter, uma vez que seria necessária uma moagem excessiva do minério.

ABSTRACT

This work aimed to perform a detailed mineralogical characterization of phosphate ore types from deep parts of the Tapira mine, located in Minas Gerais State, Brazil, that are rich in carbonates and silicates, with the purpose to get suitable information for their concentration process improvement. The Tapira mine shows a heterogeneous mineralogical association and low grade of apatite, which leads to a complex industrial beneficiation process. Nowadays, the industrial concentration plant is partially fed with ore containing higher proportions of carbonates, what has caused problems in the apatite concentration by froth flotation, when fatty acid collectors are used. This study was conducted on 12 ore samples prepared by crushing, grinding, desliming and size separation. The analytical methods used were: X-ray diffraction, chemical analysis, optical microscopy, scanning electron microscopy, chemical X-ray microanalysis (EDS – energy-dispersive spectrometry and WDS – wavelength-dispersive spectrometry) and infrared spectrometry (FTIR). Purified apatite concentrates from each sample were obtained in the laboratory by flotation and heavy liquid and magnetic separations. The results show that, although the 12 samples are classified as clinopyroxenites, they have variable modal proportions of the essential minerals, what influence in the choice of a suitable flotation reagent, aiming to a better apatite concentrate. The samples studied are classified in four ore types, based on the mineralogical characteristics and alteration degree: slightly altered clinopyroxenites (samples 2, 5 and 10), micaceous clinopyroxenites (samples 1, 4 and 9), argillaceous clinopyroxenites (samples 11 and 12) and clinopyroxenites rich in magnetite and perovskite (samples 3, 6, 7 e 8). The essential minerals are diopside, apatite, carbonates, micaceous minerals, magnetite, perovskite, anatase, quartz and ilmenite. Garnet (melanite) occurs in sample 4 and smectite (nontronite) in samples 11 and 12. Very low amounts of amphibole, titanite, hematite, goethite, zircon, pyrite, monazite, barite, zirconolite, Mn, Ba and Fe oxide (probable hollandite and/or romanechite), and secondary phosphates of the rhabdophane and crandallite groups are present. Micaceous minerals were identified mainly as mixed-layer phyllosilicates (phlogopite/vermiculite and locally biotite/vermiculite) and pure vermiculite. Pure phlogopite and chlorite are also observed. The carbonates appear mainly as veinlets or as inclusions in apatite, mainly as calcite and dolomite. The carbonates content varies from $\leq 1\%$ (samples 1 and 9 – micaceous clinopyroxenites and 11 and 12 – argillaceous clinopyroxenites) to 32% (sample 10 – slightly altered clinopyroxenite), although

the contents between 11% and 26% predominate. The apatite in the 12 samples is classified as carbonate-strontium-fluorine-hydroxiapatite, is essentially primary and occurs as clean crystals, although fluid inclusions and inclusions mainly of carbonates are commonly observed. The apatite characteristics suggest that these samples would have a good performance in the froth flotation process, with high recovery. However, the problem could be their selectivity in relation to gangue minerals. Among the main calcium-bearing minerals occurring in the 12 clinopyroxenite samples of the Tapira mine (diopside, carbonates, perovskite, apatite, melanite and nontronite), the carbonates are the major contaminants of the concentrates (contents varies from <1% to 6%), with quantities of less than 1% of diopside, monazite, barite, perovskite, micaceous minerals, melanite and nontronite. The textural relations between apatite and carbonates indicate that a totally clean apatite concentrate would be impossible to achieve, since an excessive grinding of the ore would be needed.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – APRESENTAÇÃO

O fósforo, juntamente com o nitrogênio e o potássio, é utilizado principalmente na fabricação de fertilizantes. Esses produtos são indispensáveis na melhora da produtividade agrícola de um país, atividade esta imprescindível na produção de alimentos para o homem.

A indústria brasileira tem aumentado anualmente sua produção de concentrado de rocha fosfática e ocupa a sétima colocação entre os ofertantes mundiais, onde os principais produtores são Estados Unidos, Marrocos, China e Rússia (Tabela 1.1). Observa-se, pelos dados da tabela, que a produção mundial de concentrado de rocha fosfática em 2002, estimada em 132,6 milhões de toneladas, teve um aumento de 5,2% em relação a 2001. Com relação às reservas mundiais, o Brasil ocupa a décima colocação mundial, com cerca de 260 milhões de toneladas de concentrado de rocha. Os estados de Minas Gerais, São Paulo (Jacupiranga) e Goiás (Catalão) produziram em 2002 cerca de 94% da oferta nacional de concentrado de rocha, destacando-se o primeiro por participar com mais de 50% dessa produção. As principais minas em Minas Gerais são Tapira e Barreiro (Araxá), ambas de origem ígnea, além de Patos de Minas/Lagamar (origem sedimentar).

Em função do aumento da demanda de seus produtos (concentrado de rocha, ácido fosfórico e produtos intermediários), as empresas têm investido em tecnologia, conseguindo bons resultados no aumento da recuperação, na redução de custos e na qualidade dos produtos. O Brasil atualmente é capaz de fornecer cerca de 87% de sua demanda interna de produtos fosfatados, reduzindo as importações que predominavam há 30 anos.

Estudos detalhados do minério fosfático têm tido cada vez mais importância na indústria de fosfatos, em função da necessidade de se trabalhar com minérios mais

complexos, à medida que a lavra atinge níveis mais profundos do manto de intemperismo.

Tabela 1.1 – Reserva e produção mundial de concentrado de rocha fosfática

Discriminação	Reservas (10 ³ t)		Produção (10 ³ t)		
	2002 ^(p)	%	2001 ^(r)	2002 ^{(p) (2)}	%
Brasil	260.000	0,5	4.805	4.883	3,7
China	13.000.000	26,0	21.000	21.000	15,8
Estados Unidos	4.000.000	8,0	31.900	35.800	27,0
Israel	800.000	1,6	3.510	3.500	2,6
Jordânia	1.700.000	3,4	5.840	7.000	5,3
Marrocos	21.000.000	42,0	21.800	24.000	18,1
Rep. África do Sul	2.500.000	5,0	2.550	2.800	2,1
Rússia	1.000.000	2,0	10.500	10.500	7,9
Senegal	160.000	0,3	1.700	1.500	1,1
Síria	800.000	1,6	2.040	2.400	1,8
Tunísia	600.000	1,2	8.000	7.500	5,7
Outros países	4.180.000	8,4	12.355	11.717	8,9
TOTAL	50.000.000	100,0	126.000	132.600	100,0

Fontes: DNPM/DIDEM – Mineral Commodity Summaries 2003 – ANDA/IBRAFOS (Sumário Mineral 2003).

Notas: (r) revisado

(p) preliminar

(2) dados estimados exceto Brasil

A mina de Tapira, inserida no Complexo Alcalino de Tapira, corresponde à área escolhida como objeto de estudo deste trabalho e constitui-se em importante depósito de fósforo e titânio, apresentando destaque econômico para o Estado de Minas Gerais. Esta jazida é o resultado do enriquecimento supergênico a partir de rochas ultramáficas (essencialmente piroxenitos e peridotitos), anormalmente ricas nestes elementos. Ocorrem também rochas alcalinas e carbonatitos. Atualmente a jazida é explotada na parte laterítica, sendo o depósito nitidamente zonado, isto é, varia desde uma zona latossólica, considerada como estéril até uma zona rica em fosfato (apatita), constituída por piroxenitos e peridotitos menos transformados pela ação meteórica.

Neste tipo de jazimento, associado com complexos alcalino-carbonatíticos, o fósforo recuperado é aquele presente na apatita, sendo característica a existência de mantos de intemperismo profundos, onde o enriquecimento supergênico eleva o teor de P₂O₅. A

concentração da apatita é usualmente feita através de flotação aniônica, sendo esta influenciada pelas características físicas, químicas e cristalográficas deste mineral, bem como pelos minerais de ganga presentes. Os principais contaminantes químicos dos concentrados são os óxidos de cálcio (exceto àquele presente na estrutura da apatita), ferro, alumínio e magnésio.

A partir de um conhecimento detalhado dos aspectos mineralógicos e texturais que podem interferir no processo de beneficiamento da apatita é possível adequar os processos industriais a fim de se obter um produto final de qualidade e com maior grau de recuperação.

1.2 – OBJETIVOS

Este estudo teve por objetivo fazer uma caracterização detalhada do minério fosfático, proveniente de partes mais profundas da mina de Tapira (principalmente dos bancos 1209 e 1222), sendo escolhidos dois grupos litológicos principais: piroxenitos (silicificado compacto, silicificado semi-compacto e serpentizado) e silexitos, nomes esses de acordo com a nomenclatura de campo. Estes minérios foram coletados em pontos espalhados da cava, para facilitar uma abordagem comparativa.

O trabalho pretendeu atingir as seguintes metas:

- conhecimento detalhado da mineralogia destes diferentes tipos litológicos, com ênfase para a identificação dos carbonatos (principais contaminantes dos concentrados de rocha fosfática) e suas relações texturais com os demais minerais presentes;
- classificação dos diferentes tipos de minérios em grupos com características mineralógicas e texturais semelhantes, fornecendo dados para que o processo de beneficiamento dos mesmos possa ser melhor planejado, aumentando seu aproveitamento;
- obtenção de concentrados de apatita a partir dos tipos litológicos coletados na mina, para caracterização detalhada da apatita, visando definir as espécies presentes e sua morfologia, salientando os aspectos influentes no processo de sua concentração;

- complementação da caracterização do minério fosfático de Tapira, através do estudo de uma amostra da pilha de alimentação da usina de concentração e duas amostras de concentrados.

Para esse estudo de caracterização foram utilizadas várias técnicas instrumentais, como análises químicas, difração de raios-X, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, microanálises químicas (EDS e WDS) e espectrometria de infravermelho.

1.3 – RELEVÂNCIA

Os depósitos de rochas fosfáticas podem ser classificados em sedimentares (fosforitos), ígneos (intrusões de rochas alcalinas-ultrabásicas) e biogenéticos (guanós). Do ponto de vista econômico, os depósitos sedimentares e ígneos destacam-se pela riqueza em teores de P_2O_5 , sendo os depósitos ígneos responsáveis por 15-20% da produção mundial de concentrado de rocha fosfática e os depósitos sedimentares por 80-85%. Os depósitos biogenéticos são de importância econômica secundária e são formados pela deposição dos dejetos de aves marinhas nos recifes de corais, onde o excremento reage com o material carbonático neles contido, formando a rocha fosfática.

Nos depósitos do tipo sedimentar de origem marinha, as reservas de fosfato possuem teores entre 10% e 25% de P_2O_5 , muitas vezes dispensando processos mais sofisticados de concentração e o minério é geralmente uniforme. Já no caso de depósitos ígneos (caso das principais jazidas brasileiras de fosfato), o conteúdo de P_2O_5 é mais baixo, variando entre 5 a 20% e mostram amplas variações mineralógicas no corpo mineralizado; isto leva a processos de beneficiamento sofisticados e onerosos, a fim de conferir ao concentrado as características necessárias aos processos de solubilização.

Visando vencer esse obstáculo ao seu crescimento, a indústria de fertilizantes no Brasil, na década de 90, investiu intensamente em tecnologia específica para concentrar seu minério, conseguindo melhor aproveitamento de sua reserva mineral e melhor recuperação do fósforo no processo industrial. Como exemplo, o Complexo de Mineração de Tapira, atualmente tem um aproveitamento acima de 76% da reserva

geológica, valor este apenas de 40% em 1985. Todo esse desenvolvimento tornou a mineração de fosfato produtiva e capaz de atender o mercado nacional.

De acordo com dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), verifica-se que no período de 1997-2002 houve um crescimento na produção e consumo de fertilizantes, levando a um conseqüente aumento na produção agrícola do Brasil.

A jazida de Tapira, em função de sua origem magmática, apresenta uma associação mineralógica bastante complexa, heterogênea e com baixo teor de apatita, o que conduz a processos industriais de beneficiamento muito complexos. É necessário um rígido controle das frentes de lavra a céu aberto e diversas operações de processamento, tais como britagens sucessivas, moagens, separações magnéticas, deslamagens e flotações.

Devido à composição mineralógica diferenciada do minério de Tapira, o circuito de beneficiamento foi separado em friável e granulado. O minério fosfático friável representa 70% da reserva e constitui-se de materiais alterados pelo intemperismo e enriquecidos em minerais de ganga silicatados (principalmente micas) e o minério granulado é caracterizado por ser duro e por possuir os carbonatos como principais contaminantes. Segundo dados de Barros *et al.*, 2001, quando os dois minérios são concentrados juntamente, o minério granulado possui um efeito negativo no processo, ocorrendo uma diminuição no teor de P_2O_5 e também na recuperação do fósforo.

A perda no desempenho da flotação da apatita, devido à presença de minerais carbonatados no minério fosfático, é explicada pelo comportamento semelhante entre os carbonatos e a apatita, quando se utilizam ácidos graxos saponificados como agentes coletores. Em alguns casos, combinações de reagentes são utilizadas para aumentar a seletividade da flotação da apatita, evitando que os minerais de ganga, principalmente os carbonatos, contaminem o concentrado. Isso é importante, uma vez que a contaminação do concentrado com os carbonatos, eleva o teor de CaO no concentrado, causando um aumento no consumo de ácido sulfúrico no processo posterior de obtenção de ácido fosfórico, com o conseqüente aumento nos custos operacionais.

Em virtude dessa alta complexidade mineralógica e morfológica, é necessária uma análise detalhada dos minérios e dos produtos obtidos, incluindo identificação mineralógica e sua quantificação, estudo da alteração dos minerais e seus produtos e liberação dos minerais valiosos. Essas informações são obtidas através de estudos de caracterização mineralógica, onde são utilizadas diversas técnicas analíticas, sendo os resultados muito úteis na adequação dos processos industriais às características dos jazimentos. Vale mencionar, que é através de um conhecimento profundo das características do minério a ser processado que consegue-se um aumento do aproveitamento da reserva geológica, através da definição dos reagentes e das técnicas de flotação mais adequados a serem utilizados, permitindo uma melhora na qualidade do concentrado produzido. Como consequência, tem-se uma melhora na produtividade da indústria química que irá processar o concentrado.

Um outro fator importante a ser considerado são as perdas de fósforo que ocorrem durante as etapas de seu aproveitamento. Segundo E. Malavolta *apud* Fusaro *et al.*, (1987) as perdas percentuais de fósforo, após estabelecido o plano de lavra até o aproveitamento pela agricultura, concentram-se na fase da mineração (49%) e na fase agrônômica (37%). Tendo em mente estes dados, fica claro que a redução das perdas ou aumento da recuperação é meta fundamental das minerações de fosfato, uma vez que o aproveitamento global máximo do fósforo inicial é de apenas 8%. Este fato reforça ainda mais a importância dos estudos de caracterização mineralógica dos minérios fosfáticos para a otimização dos processos de seu beneficiamento.

1.4 – LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O Complexo ultramáfico-alcálico-carbonatítico de Tapira está localizado no oeste do Estado de Minas Gerais, no vale do Rio Paranaíba, a aproximadamente 35km a sudeste da cidade de Araxá e acha-se definido pelas coordenadas 19°52' de latitude sul e 46°50' de longitude W de Greenwich (Figura 1.1). A jazida ocupa a borda norte do complexo (Figura 1.2), que apresenta uma área de aproximadamente 35km² e exibe forma ovalada, com dimensões aproximadas dos eixos NS e EW de 6,5km por 5,5km. A partir de Belo Horizonte, o acesso até Araxá é feito pela BR-262, num percurso de

aproximadamente 355km e desta cidade segue-se até Tapira através da MG 428 e da MG 146, totalizando cerca de 390km de distância (Figura 1.3).

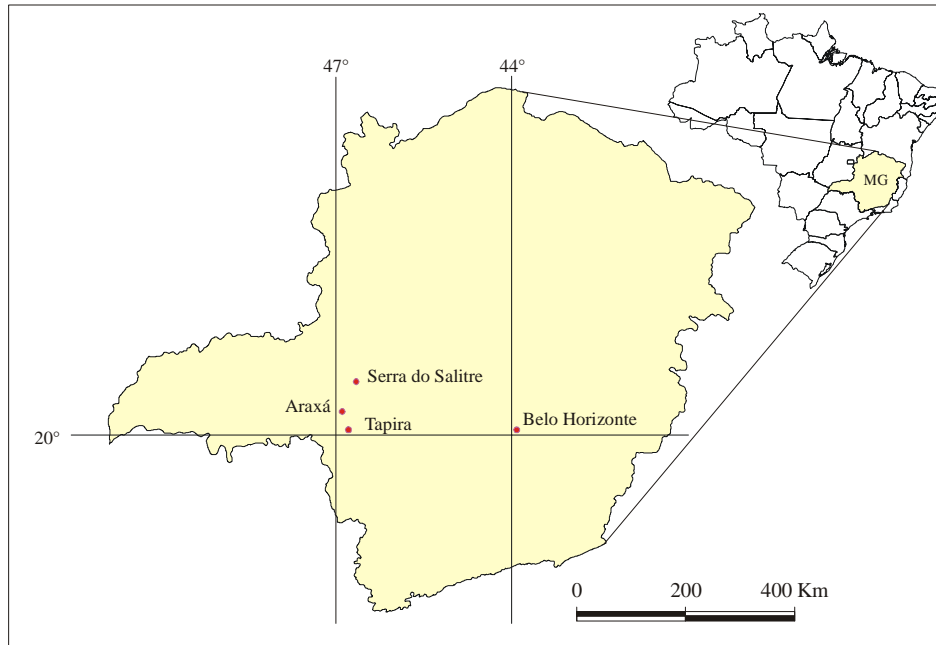


Figura 1.1 – Mapa de Minas Gerais com a localização de Tapira.

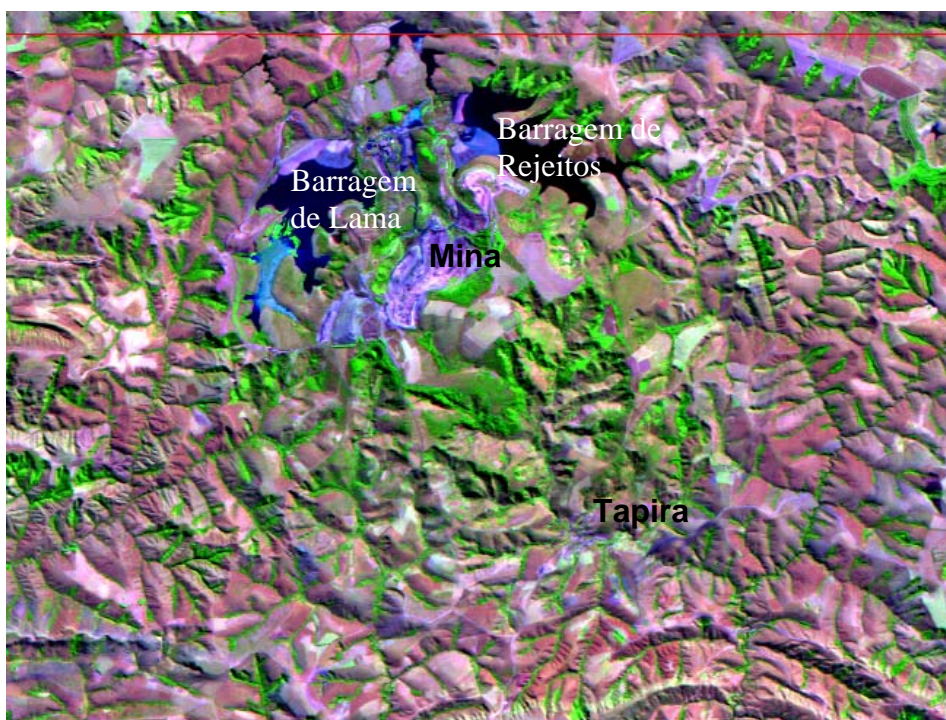


Figura 1.2 – Imagem do satélite Landsat 5 (composição colorida RGB345) mostrando o complexo de Tapira de estrutura circular e a mina de Tapira em sua borda norte.

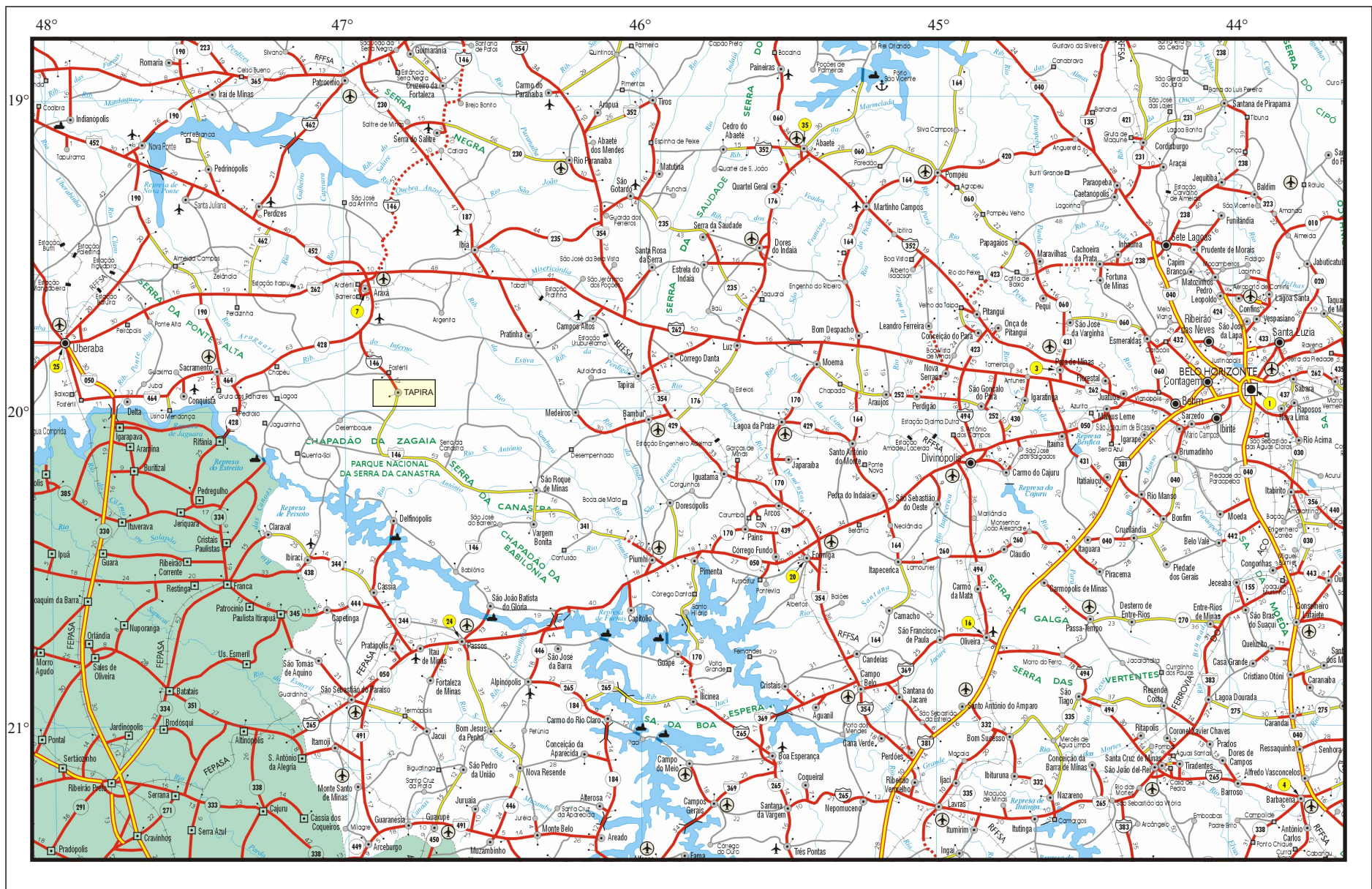


Figura 1.3 - Mapa rodoviário do Estado de Minas Gerais (escala 1:2.000.000) mostrando os principais acessos para Tapira. (Fonte: Departamento de Estradas de Rodagem - DER/MG)

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – ASPECTOS GEOLÓGICOS

2.1.1 – HISTÓRICO

Algumas das primeiras observações gerais sobre a região de Tapira são de J. C. Costa Sena (1921 *apud* Leonardos, 1956), que menciona a presença de titano-magnetita com perovskita e de J. F. de Andrade Júnior (1925 *apud* Leonardos, *op. cit.*), que admite a semelhança entre Tapira e Salitre.

Em 1953, foram realizados levantamentos aerofotográficos e aeroradiométricos na região de Tapira, pela Prospec S. A., a serviço do Conselho Nacional de Pesquisa, sendo verificadas anomalias radioativas e reconhecido, pela primeira vez, o Complexo de Tapira como estrutura circular.

Por volta de 1955, o Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), enviou equipes de pesquisa para a região de Tapira, a fim de examinar ocorrências de manganês. Após reconhecimento geológico da região, foi verificada a semelhança entre a geologia de Tapira e a de Barreiro (Araxá), onde haviam sido descobertos, por um grupo de brasileiros liderados pelo Prof. Djalma Guimarães, depósitos economicamente viáveis de apatita e pirocloro. Através de dados dos levantamentos radiométricos e perfuração de poços, foram levantadas em Tapira áreas com enriquecimento em nióbio e titânio, onde o mineral portador de nióbio é o pirocloro e os minerais de titânio correspondem a perovskita, titanomagnetita e ilmenita. Como fruto desses estudos tem-se o primeiro trabalho de pesquisa mineral em Tapira, de Alves (1960), onde foi mencionada a presença de apatita.

Em 1967, o Departamento de Exploração Mineral da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) enviou uma equipe de pesquisadores para estudar as ocorrências de minerais radioativos nos complexos alcalinos de Araxá, Tapira, Serra Negra e Salitre. Esses pesquisadores verificaram que a radioatividade no Complexo Alcalino de Tapira

era proveniente da ocorrência de Th na perovskita, U e Th em argilas, presença de U e Th nos fosfatos, ocorrência de monazita e presença de Th no zircão. Porém, os trabalhos foram encerrados, uma vez que os teores de U_3O_8 mais altos encontrados em algumas amostras eram inferiores ao teor mínimo de aproveitamento (Sobrinho, 1974). Este autor descreve o Complexo de Tapira como sendo composto por rochas ultrabásicas, rochas alcalinas intrusivas (principalmente alcali-sienito) e extrusivas, rochas piroclásticas e calcários cristalinos (carbonatitos).

Durante o período de 1966 a 1969, o DNPM executou o projeto “Programa Chaminés Alcalinas” no Triângulo Mineiro e contratou a empresa GEOSOL – Geologia e Sondagens Ltda. para continuar os trabalhos de investigações geológicas no Complexo de Tapira, tendo como objetivos principais a caracterização dos minerais de interesse econômico, a sondagem dos materiais e a avaliação da potencialidade dos depósitos minerais. Foi feito um estudo detalhado da geologia na escala 1:10000 e com os dados obtidos nesse trabalho, ficou clara a presença de importantes depósitos de titânio e fosfato em Tapira, Salitre e Serra Negra e de fosfato, titânio e nióbio em Catalão. Foi também verificada a presença de rochas ultramáficas alcalinas nos complexos, sendo estas os protominérios do fosfato, nióbio e titânio. Como fruto dessas pesquisas destacam-se os trabalhos de Grossi Sad & Torres (1971), Grossi Sad (1972) e Grossi Sad & Torres (1976).

Em 1968, foram solicitados os primeiros pedidos de pesquisa para as áreas de Tapira e Salitre, pelos grupos Pedro Maciel, Companhia Meridional de Mineração (CMM) e Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia (CBMM). Em 1971 a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) associou-se à empresa Pedro Maciel, formando a Titânio Internacional SA - TITANSA, sucedida pela Mineração Vale Paranaíba SA – VALEP.

Do final de 1971 até abril de 1976 foi desenvolvido um projeto pela DOCEGEO, nas áreas controladas pelas empresas do Grupo CVRD, nos complexos carbonatíticos de Tapira e Salitre, tendo como objetivo inicial avaliar depósitos econômicos de titânio, sob a forma mineralógica de anatásio e, a partir de 1974, depósitos econômicos de fosfato apatítico. A pesquisa da DOCEGEO consistiu principalmente de furos de

sondagem, furos de trado mecânico, trincheiras, poços e galerias, bem como intensivos trabalhos de laboratório (incluindo análises químicas, estudos petrográficos e mineralógicos e ensaios tecnológicos), esses últimos visando a caracterização da apatita como mineral útil.

Através desse projeto foram delimitadas áreas de mineralização em titânio, fosfato e nióbio em Tapira, sendo definidas 5 zonas correlacionadas com intensidades decrescentes de intemperismo. Essas zonas foram definidas com base química através dos conteúdos de TiO_2 e/ou P_2O_5 , respectivamente maiores ou iguais a 15% e 5% e correspondem a: capeamento estéril, minério de titânio, minério de titânio e fosfato, minério de fosfato e rocha estéril parcialmente intemperizada (Cruz & Cheney, 1976). Através desses trabalhos foram identificados que os principais tipos de rochas presentes no complexo são: 80% de rochas ultrabásicas, onde predominam os piroxenitos; 5% de rochas alcalinas (sienitos e traquitos) e 15% de outros tipos de rochas, onde predominam silexitos e carbonatitos.

Durante a década de 70, o governo brasileiro passou a incentivar o aumento da capacidade de produção nacional e a diversificação da oferta de produtos, através do Plano Nacional de Fertilizantes e Calcário Agrícola. A Petrobrás passou a assumir essa responsabilidade e criou em 1976 a Petrofertil, uma subsidiária específica, composta pela Ultrafertil e Nitrofertil. Posteriormente, a Petrofertil incorporou as Indústrias Carboníferas Catarinenses, a Fosfertil e a Goiasfertil.

A FOSFERTIL (Fertilizantes Fosfatados S.A.) foi criada em 1977, como uma empresa do Governo Federal, tendo o objetivo de desenvolver trabalhos de pesquisa, lavra, concentração e comercialização da rocha fosfática da jazida de Patos de Minas/MG. Em 1980, a FOSFERTIL incorporou a VALEP (mineração de fosfato de Tapira) e a VALEFERTIL (complexo químico de fertilizantes situado em Uberaba/MG). Desse modo, o sistema industrial da FOSFERTIL vai desde a produção e beneficiamento do minério de fosfato até a transformação industrial em fertilizantes fosfatados primários.

No início da década de 80 foi criada a Superintendência do Titânio (SUTAN - CVRD), com a finalidade de pesquisar a viabilidade da utilização do anatásio como minério de titânio e a caracterização dos minerais portadores de elementos de terras-raras. A partir de 1980, a exploração do fosfato é de responsabilidade da FOSFERTIL.

Em 1992, a FOSFERTIL foi privatizada e adquiriu o controle acionário da Goiasfertil e da Ultrafertil. Em 1995, a Goiasfertil incorporou a Ultrafertil e surgiu a atual Fosfertil/Ultrafertil, controlada pela FERTIFOS Administração e Participação S.A. Atualmente, a composição acionária da FOSFERTIL é Fertifos: 56,21%, Bunge: 11,13%, Benzenex: 8,41% e outros: 24,52%. A FERTIFOS corresponde a uma “holding” que tem como acionistas diversas empresas do setor de fertilizantes (BUNGE, FERTIBRÁS, CARGIL e outras).

Nos últimos anos, a FOSFERTIL iniciou estudos para identificação de novas áreas para implantação de nova mina de fosfato e trabalhos realizados por GROSSI SAD (1999) já identificaram novo corpo de minério com forma anelar (Área da Bigorna), tamanho de 5km por 2km, espessura de 30-40m de minério e teor de ~8,5% de P_2O_5 .

2.1.2 – GEOLOGIA REGIONAL

Os carbonatitos e complexos alcalinos são feições essencialmente continentais, reconhecidas em todos os continentes e situam-se preferencialmente em regiões de reativação tectono-magmática em crátons estáveis e em faixas de dobramentos estabilizadas (Lapin *et al.*, 1999), ou seja, em zonas de *rifts*. Apresentam idades que variam desde o Pré-cambriano até o Cenozóico, formas aproximadamente circulares, dimensões variadas e são caracterizados por apresentarem depósitos economicamente importantes de nióbio, terras-raras (principalmente cério e lantânio), fosfato, titânio e calcário (produção de cimento). Alguns apresentam concentrações anormais de Ba, F, Zr, Th, U, Cu, Mo, Fe, Pb e Zn, além da vermiculita, explorados geralmente como subprodutos, porém, às vezes, sendo o principal produto da lavra. Segundo Biondi (1986), as manifestações carbonáticas, às quais se associam mineralizações de P, Ti, Nb e ETR, para que ocorram, parecem necessitar de um ambiente continental, com crosta

espessa e bem evoluída, e que essa crosta seja rompida por estruturas de grandes proporções, que atinjam o manto. Embora sejam comuns províncias alcalinas desprovidas de carbonatitos, o contrário é muito raro, com exceção dos carbonatitos lineares de cinturões móveis, que alojam-se geralmente em zonas de falhas e não apresentam associação com rochas alcalinas magmáticas, apesar de acharem-se envoltos por auréolas de fenitos – metassomatitos alcalinos (Lapin *et al.*, 1999).

Segundo Frolov (1971), os complexos alcalinos-carbonatíticos em geral mostram estrutura anelar zonada, apresentando abundantes tipos litológicos, englobando desde ultrabásitos, rochas da série jacupiranguito-melteigito-ijolito-urtito, nefelina e alcali-sienitos e carbonatitos, ocorrendo em alguns locais rochas efusivas equivalentes aos tipos citados acima e suas piroclásticas. Rochas silicáticas metassomáticas comumente aparecem em volta dos complexos. A organização desses tipos litológicos varia com o nível de exposição do complexo e a seqüência completa é encontrada raramente, podendo ser transformada pela intrusão de membros mais jovens ou ser destruída pela erosão.

De acordo com Frolov (*op. cit.*), o que se observa na maioria dos complexos alcalinos-carbonatíticos é um aumento do desenvolvimento de rochas ultrabásicas (dunitos e piroxenitos) e rochas de sua alteração (metassomatitos micáceos ou ricos em anfibólio), com o aumento da erosão nos maciços e um decréscimo relativo nos carbonatitos. Em áreas profundamente erodidas, os carbonatitos não excedem 5-10% e geralmente ocorrem sobre a forma de veios.

Segundo Frolov (*op. cit.*), a formação das rochas alcalinas-ultrabásicas e carbonatitos é caracterizada pela localização de seu magma de origem a grandes profundidades e vasta extensão de seu movimento através das rochas subcrustais até a superfície da terra. Durante a formação dos plutons/vulcões, ocorrem injeções de derivados alcalinos que substituem os ultrabásitos iniciais e ocupam os níveis mais superiores do maciço. Como conseqüência disto, observa-se uma construção zonada do maciço definida pelo decréscimo de rochas ultrabásicas e ijolito-melteigito para o topo e um aumento relativo de sienitos e carbonatitos. O desenvolvimento em múltiplos estágios desses maciços

leva a uma diferenciação vertical na distribuição dos tipos de mineralização associadas. Os maciços essencialmente ultrabásicos são prospectivos para titânio, fósforo e flogopita (vermiculita); os tipos sieníticos são interessantes para tântalo, nióbio e zircônio; os tipos carbonatíticos (calcita) para nióbio, tântalo, urânio e fósforo; os carbonatitos com calcita-dolomita-ankerita para terras-raras, fluorita, barita e sulfetos de cobre, chumbo, zinco e molibdênio.

No Brasil, existem pelo menos vinte e um complexos carbonatíticos relacionados com rochas alcalinas. Estes complexos estão agrupados em cinco províncias geográficas (Rodrigues & Lima, 1984): Amazônica, Alto Araguaia, Alto Paranaíba, Sudeste e Sul (Figura 2.1) e estão limitados preferencialmente às zonas marginais das áreas cratônicas, bordejando as bacias Paraná e Amazonas. A ocorrência da maioria dos complexos brasileiros ao longo de uma faixa orientada NW-SE mostra que existe um controle tectônico na distribuição dos mesmos.

Segundo Almeida (1971 *apud* Gomes *et al.*, 1990) as feições mais marcantes deste controle tectônico são fraturas paralelas profundas de direção NW, claramente relacionadas com estruturas de arcos. Em alguns casos, zonas de falhas aparentemente antigas parecem exercer influência na colocação destes complexos. Hasui *et al.* (1975 *apud* Morbidelli *et al.*, 1995) propuseram que lineamentos de direção NW-NNW, ativos desde os tempos pré-cambrianos, seriam aparentemente responsáveis pela colocação dos complexos da Província do Alto Paranaíba.

Idades obtidas pelo método K/Ar dos complexos alcalinos e alcalinos-carbonatíticos brasileiros mostram que os mesmos podem ser divididos em três grupos (Gomes *et al.*, 1990 e Morbidelli *et al. op. cit.*):

- ocorrências mesozóicas mais antigas mostrando uma idade de ~130Ma similar às vulcânicas da Bacia do Paraná, portanto anteriores à abertura do Oceano Atlântico Sul e contemporâneos com os basaltos Serra Geral (Anitápolis, Itanhaém, Jacupiranga, Juquiá e Ipanema);
- segundo grupo cronológico com idades de 110-100Ma (Banhadão e Itapirapuã);



Figura 2.1 – Mapa de localização das ocorrências alcalinas na porção sul do Brasil. Os cinturões dobrados do ciclo Brasileiro (450-700 Ma, cf. Almeida *et al.*, 1973) estão representados pelas letras BB (Brasília) e RB (Ribeira). As províncias alcalino-carbonatíticas (Rodrigues & Lima, 1984) estão divididas em: I – Alto Araguaia, II – Alto Paranaíba, III – Sudeste (São Paulo/Paraná) e IV – Sul (Catarinense) (modificado de Gomes *et al.*, 1990).

- terceiro grupo com idades entre 90-50Ma, que envolve numerosos complexos alcalinos com ou sem carbonatitos, pertencentes à diferentes províncias (Araxá, Catalão I e II, Salitre I e II, Serra Negra, Tapira, Mato Preto, Lages e Santo Antônio da Barra);
- evento alcalino mais novo (~30Ma) representado pelas rochas vulcânicas de Fortaleza.

Observa-se, portanto, que a grande maioria dos complexos brasileiros apresenta idades do Cretáceo (variando de 65 a 133 milhões de anos). Segundo dados apresentados em Gomes *et al.* (1990), são exceções os maciços de Mutum, na região amazônica que possui idade pré-cambriana (K/Ar, 1026 m.a.) e Angico dos Dias (norte da BA), também de idade pré-cambriana (U-Pb, 2011 m.a., Silva *et al.*, 1988 *apud* Lapin *et al.*, 1999).

Hasui & Cordani (1968) publicaram os resultados de estudos geocronológicos pelo método K-Ar realizados em rochas alcalinas do oeste mineiro e sul de Goiás. O Complexo de Tapira apresentou idade de aproximadamente 70 milhões de anos (Cretáceo Superior), obtida em biotita de uma rocha ultrabásica. De um modo geral, todas as idades aparentes conseguidas nesses complexos (Serra Negra, Salitre e Catalão) situam-se no Cretáceo Superior, mostrando idade em torno de 80 milhões de anos. Apenas o complexo de Araxá apresentou idade um pouco mais antiga (cerca de 90 m.a.).

No Brasil, os complexos alcalinos-carbonatíticos mostram, em planta, formas variando de ovaladas a circulares e a maioria deles é intrusiva em rochas do embasamento Pré-cambriano, tais como gnaisses, granitos, granodioritos, xistos e quartzitos. Segundo Grossi Sad (1972) e Morbidelli *et al.* (1995), a maioria dos complexos alcalinos-carbonatíticos brasileiros consiste principalmente de litotipos intrusivos, pertencentes a uma associação portadora de dunito, peridotito, piroxenito e carbonatito, muitas vezes associados com diques. Entretanto, existe um único exemplo brasileiro de carbonatito extrusivo, representado pelo aparelho vulcânico de Santo Antônio da Barra-GO, que

apresenta lavas e rochas piroclásticas carbonatíticas (Gaspar & Dani, 1981 *apud* Rodrigues & Lima, 1984).

O Complexo de Tapira está inserido na Província do Alto Paranaíba, considerada a mais importante economicamente, apresentando importantes reservas de nióbio, fosfato, titânio e terras-raras. Ao norte de Tapira ocorrem outros complexos intrusivos semelhantes (Araxá, Salitre, Serra Negra, Catalão), também pertencentes à Província do Alto Paranaíba (Figura 2.1). Esses complexos encontram-se alinhados ao longo de falhas com direção NW, relacionadas com o arco cratônico Paranaíba, situado entre os basaltos da Bacia do Paraná e o cráton do São Francisco. Segundo Brod *et al.* (2000), a Província Ígnea do Alto Paranaíba é composta por uma variedade de tipos de rochas ultrapotássicas, incluindo kimberlitos, lamproítos, kamafugitos e grande quantidade de complexos alcalinos-carbonatíticos intrusivos.

Segundo Morbidelli *et al.* (1995), evidências de campo, juntamente com dados mineralógicos, petrográficos e geoquímicos, indicam que processos de cristalização fracionada foram responsáveis pelos principais *trends* evolutivos dos distritos alcalinos e alcalino-carbonatíticos brasileiros. Os carbonatitos aparentemente formaram-se como corpos individuais por processos de imiscibilidade causados pela saturação de fluidos carbonatíticos, provenientes da evolução de fusões silicáticas.

Brigatti *et al.* (1996) propõem que a petrogênese do Complexo de Tapira também pode ser interpretada como o resultado da cristalização fracionada de um magma original alcalino-silicático, acompanhado por processos de imiscibilidade de líquidos silicáticos-carbonáticos.

Gaspar *et al.* (2000) mostraram que dados isotópicos de Sr, Nd, Os e Pb indicam que as rochas alcalinas do oeste de Minas Gerais e sul de Goiás derivaram-se do manto litosférico. Segundo estes autores, os complexos carbonatíticos originaram-se de magmas ricos em potássio relacionados com o magmatismo geral potássico onde esses complexos ocorrem. A distribuição geográfica das idades dos complexos sugere que o magmatismo possivelmente está relacionado com atividades de plumas mantélicas (*hot*

spots Trindade e Tristão da Cunha) impactando na base da litosfera continental. Sgarbi *et al.* (2000) obtiveram idades para os kamafugitos Mata da Corda-MG e Santo Antônio da Barra-GO, ambos pertencentes à Província do Alto Paranaíba, de 68-81Ma. e 88,3-89,6Ma. (método U-Pb em perovskitas), respectivamente. Essas idades são consistentes com os modelos de *hot spots*, indicando um decréscimo para leste na idade do magmatismo alcalino ultramáfico.

A Figura 2.2 mostra um esboço geológico da região do oeste mineiro, onde verifica-se que o Complexo de Tapira está encaixado em metassedimentos pré-cambrianos do Grupo Canastra. Os metassedimentos do Grupo Canastra encontram-se cortados por abundantes veios de quartzo e segundo Grossi Sad & Torres (1971) podem ser divididos em duas seqüências:

- porção inferior psamítica composta principalmente por quartzitos micáceos, com quantidade variável de feldspato, bem como presença local de hematita e magnetita. Ocorrem ainda intercalações de calcário dolomítico, com alguma grafita e quartzo;
- porção superior pelítica, constituída por filitos/xistos a moscovita, clorita, quartzo e, às vezes, grafita, pirita, rutilo e granada. A pirita e a granada ocorrem como porfiroblastos com diâmetro médio de 5 mm. Subordinadamente ocorrem lentes de calcário.

O oeste mineiro é caracterizado por um substrato granito-gnáissico composto principalmente por granodioritos e tonalitos, intercalados por anfibolitos. Sobre este complexo granito-gnáissico ocorrem rochas, também de idade pré-cambriana, pertencentes aos grupos Araxá (micaxistos e quartzitos), Canastra (quartzitos e filitos/xistos) e Bambuí (calcários, margas, arenitos, siltitos e argilitos). Vale ainda citar a Formação Ibiá (cálcio-xistos com núcleos e leitos quartzosos) posicionada entre os grupos Canastra e Bambuí.

Em contato discordante com as formações anteriores observam-se rochas do Grupo São Bento (basaltos intercalados pelo arenito Botucatu) e rochas da Formação Baurú (sedimentos predominantemente tufáceos), ambos de idade cretácica.

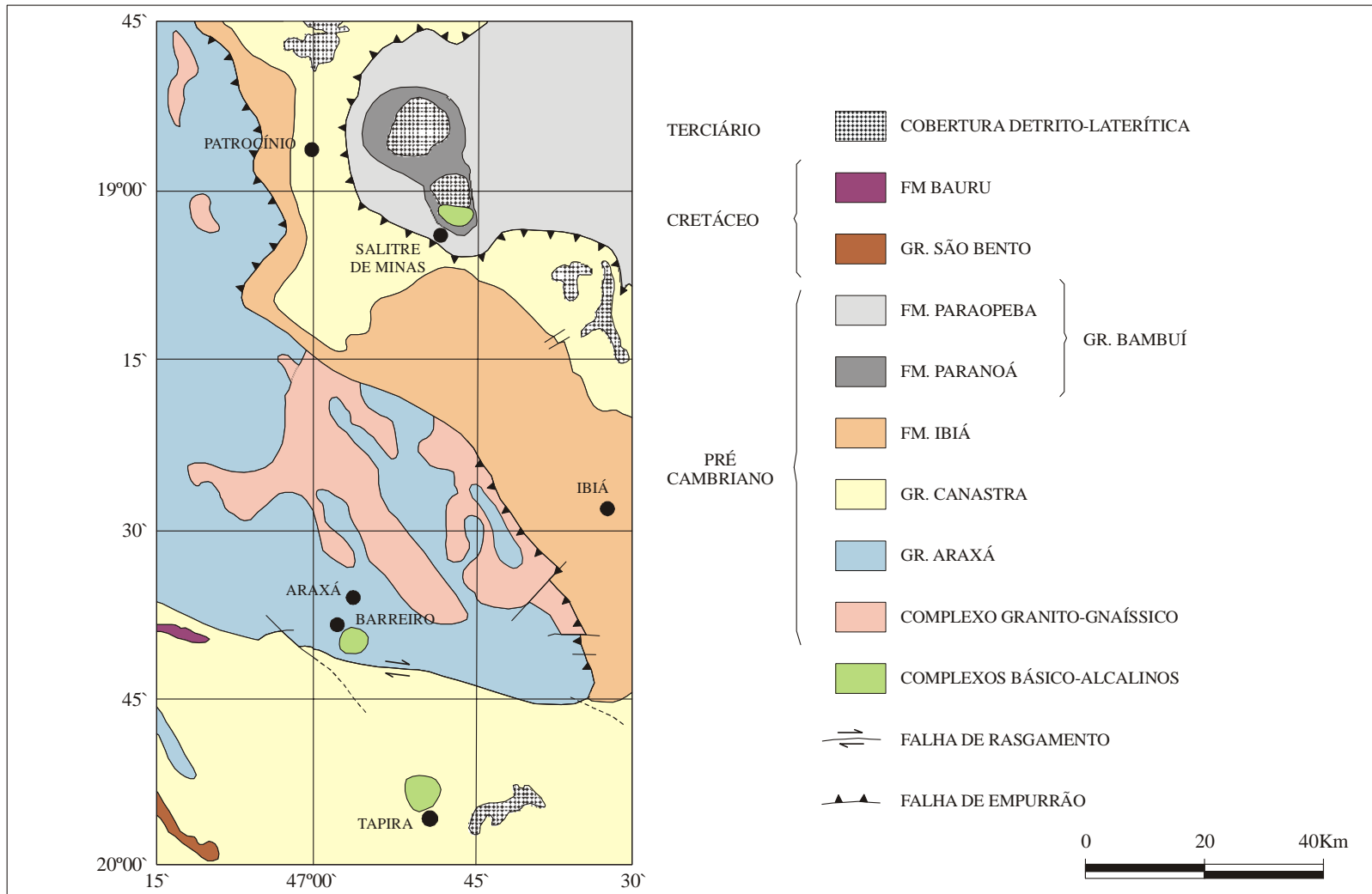


Figura 2.2 – Esboço geológico da região do oeste mineiro (Boletim 136 do DNPM, *apud* Cruz & Cheney, 1976).

No final do Cretáceo ocorreu um intenso magmatismo básico-alcálico, estando representado pelos complexos de Tapira, Salitre, Barreiro e Serra Negra em Minas Gerais, bem como Catalão I e II em Goiás. Sobre as rochas do Cretáceo tem-se em contato discordante, uma cobertura detrito-laterítica de idade terciária.

Verifica-se que existem alguns aspectos estruturais que são comuns à maioria desses complexos carbonatíticos. Os quartzitos do Grupo Canastra, encaixantes da intrusão de Tapira, foram soerguidos com o empuxo do magma básico-alcálico, sendo geradas estruturas semi-anelares, que influenciam na forma radial da drenagem ao redor dos maciços. Falhamentos e fraturas radiais e concêntricas são também observados no complexo. O contato entre o corpo magmático e o anel circundante das encaixantes é vertical e irregular. Os quartzitos formam um anel quase completo ao redor do complexo e, onde está ausente, encontra-se substituído por um material fenitizado.

A fenitização é caracterizada por uma zona de choque, onde tem-se a destruição das estruturas e um fraturamento intenso das rochas originais. Porém, normalmente não ocorre uma brechagem real da rocha, inexistindo a individualização dos fragmentos. Somente em alguns casos, a fenitização gera brechas reais. Segundo Heinrich (1978) e Gomes *et al.* (1990) efeitos de fenitização são descritos em duas categorias: a) fenitos internos, produzidos dentro das rochas antigas do complexo pela intrusão de unidades mais jovens (ex.: flogopitização de rochas máficas e ultramáficas por sienitos ou carbonatitos); b) fenitos externos, que ocorrem nas zonas de contato ou ao longo de fraturas fora do complexo (ex.: rochas feldspáticas e fenitos sieníticos). O fenômeno da fenitização é normalmente evidenciado pela presença de piroxênios e anfibólios alcalinos preenchendo fraturas, aparecendo também soda-ortoclásio, albita-oligoclásio e microclina (Grossi Sad & Torres, 1971; Rodrigues & Lima, 1984; Gomes *et al.*, *op. cit.*). Entretanto, a mineralogia e a forma dos fenitos são fortemente influenciadas pela natureza e estrutura da rocha original. Apesar da fenitização ser comumente sódica, ela pode ser potássica ou sódica-potássica.

2.1.3 – GEOLOGIA LOCAL

2.1.3.1 – INTRODUÇÃO

O Complexo ultramáfico-carbonatítico-alcálico de Tapira está relacionado ao evento magmático que afetou a plataforma brasileira, do fim do Jurássico ao Terciário Inferior, tendo início com os derrames basálticos da bacia do Paraná.

O complexo possui uma área de 35km², onde os eixos NS e EW possuem aproximadamente 6,5 x 5,5km, respectivamente. Os afloramentos são raros, sendo observado, na maioria das vezes, um manto laterítico essencialmente argiloso e com profundidade média de 30m, que mascara completamente o material subjacente. Porém, nos níveis mais profundos, é possível visualizar afloramentos de rochas menos alteradas.

2.1.3.2 – TIPOS LITOLÓGICOS PRESENTES

O Complexo de Tapira (especialmente o Alvo 1), segundo Cruz & Cheney (1976), é composto principalmente por rochas intrusivas ultrabásicas (80%), onde os piroxenitos predominam sobre os peridotitos e dunitos. Ocorrem em menor quantidade rochas alcalinas (5%), onde predominam sienitos e traquitos, bem como outros tipos litológicos (15%), que incluem lamprófiro, carbonatito, silexito, glimerito e fenito.

De acordo com Brod *et al.* (2000), o complexo de Tapira é composto principalmente por rochas silicáticas alcalinas (principalmente bebedouritos e menor quantidade de dunitos, wehrlitos, melilitolitos e sienitos) intrudidas por carbonatitos e diques ultramáficos de granulação fina. Esses diques foram classificados por Gibson *et al.* (1995b apud Brod *et al.*, 2000) como flogopita-picrito, descritos tradicionalmente como lamprófiros. Os bebedouritos possuem granulação variando de fina a grossa, algumas vezes estão foliados e são compostos principalmente por piroxênio diopsídico com quantidades variáveis de flogopita, perovskita, apatita, magnetita, melanita e titanita. O termo bebedourito foi definido por Tröger (1928 apud Le Maitre, 1989) como um nome

local (Serra do Salitre-MG) para uma variedade de biotita piroxenito, composto essencialmente por aegirina-augita e biotita com perovskita e opacos.

Segundo Brod *et al.* (2000), os flogopita-picritos são rochas peralcalinas e ultrapotássicas, constituídas de fenocristais de olivina imersos em matriz de flogopita, carbonato, perovskita, apatita e cromita e representam o magma primitivo que deu origem aos outros tipos de rochas presentes em Tapira (rochas magmáticas silicáticas e carbonáticas), através de processos de cristalização fracionada e imiscibilidade de líquidos. Segundo esses autores, análises químicas de rocha total nos flogopita-picritos de Tapira e de outros complexos carbonatíticos da Província do Alto Paranaíba, assemelham-se com feições químicas dos kamafugitos dessa província, como por exemplo as rochas vulcânicas e piroclásticas Mata da Corda. Similaridades petrográficas observadas entre as rochas silicáticas dos complexos carbonatíticos da Província ígnea do Alto Paranaíba e xenólitos (rochas plutônicas do tipo dunito, piroxenito, melilito e sienito) presentes nos kamafugitos desta mesma província, sugerem uma forte ligação entre o magmatismo kamafugítico e carbonatítico nesta Província, indicando que o Complexo de Tapira representa remanescentes profundamente erodidos de um centro vulcânico kamufugítico.

A seguir, será feita uma descrição sucinta desses tipos litológicos mais comuns no complexo de Tapira, a partir de dados de Cruz & Cheney (1976), Grossi Sad & Torres (1971), Grossi Sad & Torres (1976) e Vieira (1997).

➤ Piroxenitos ou “bebedouritos”

São rochas que variam de cor verde acinzentado a marrom escuro ou marrom amarelado, estas últimas tonalidades quando decompostas; mostram grande variação granulométrica e geralmente exibem textura granular. Possuem o piroxênio (diopsídio ou diopsídio-augítico) como constituinte principal e em quantidade subordinada apresentam apatita, biotita, flogopita, perovskita, titanomagnetita, melanita/schorlomite, calcita, ilmenita e pirita em proporções variadas. Os piroxenitos podem variar de rochas quase monominerálicas ou rochas onde a apatita, biotita, flogopita, perovskita e

titanomagnetita tornam-se minerais essenciais. Alguns piroxenitos apresentam uma foliação definida pela orientação do piroxênio e da mica e, às vezes, mostram um bandamento definido por níveis onde concentram-se perovskita, apatita ou magnetita. Diques de carbonatito e de lamprófito cortam localmente os piroxenitos. É bastante comum a presença de venulações abundantes e irregulares de calcita que cortam a rocha em várias direções.

➤ Dunitos

Caracterizam-se pela cor cinza escuro, granulação fina a média, sendo constituídos principalmente por olivina (principalmente forsterita e às vezes crisolita – variedade mais ferrífera) e quantidade subordinada de apatita, perovskita, magnetita e granada (melanita). Segundo Cruz & Cheney (1976), a composição de alguns dunitos (olivina, magnetita e apatita) é semelhante à do foscorito que ocorre no Complexo de Palabora, África do Sul. Os foscoritos descritos no Complexo carbonatítico do Barreiro (Araxá) apresentam como constituintes principais magnetita, apatita, flogopita e carbonatos e são rochas com aspecto brechado, granulação fina a média e cor escura.

➤ Peridotitos

Correspondem a tipos ultrabásicos intermediários entre os piroxenitos e dunitos. São rochas que possuem cor verde escuro a verde acinzentado quando frescas, ou coloração marrom amarelado a marrom acinzentado quando decompostas e mostram granulação média a grossa e textura inequigranular. Apresentam composição wherlítica (rocha ultramáfica composta por olivina e piroxênio) e ocorrem em pelo menos dois corpos dentro do complexo, um a oeste e o outro a nordeste. Os minerais apatita, perovskita, magnetita, ilmenita, biotita e flogopita podem aparecer como acessórios ou minerais essenciais. O conteúdo em carbonato é variável. Os peridotitos mostram um bandamento composicional, com concentrações em faixas de magnetita-ilmenita, perovskita e calcita. Em alguns locais, os peridotitos encontram-se parcial ou totalmente substituídos por silexitos de cor marrom escuro, compostos por quartzo, calcedônia e goethita (Grossi Sad & Torres, 1971). São comumente cortados por veios e diques de

carbonatitos ou corpos de lamprófiros ou, episodicamente, por pequenas drusas e veios de quartzo e calcedônia.

➤ Glimeritos

Ocorrem preferencialmente na porção centro-oeste do complexo como massas irregulares, sem forma definida, segregados nos peridotitos, piroxenitos e carbonatitos e são os produtos de alteração de piroxenitos e peridotitos, pela interação com fluidos alcalinos metassomáticos, provenientes do magma carbonatítico. O processo consiste basicamente na transformação do piroxênio em anfibólio e deste último em flogopita. Apresentam cor arroxeada, quando frescos, e adquirem tonalidades mais claras, quando decompostos. São compostos quase exclusivamente por micas (predominantemente flogopita), bem como quantidade subordinada de magnetita, olivina, piroxênio/anfibólio, perovskita e calcita. No processo de intemperismo, o glimerito evolui para regiões ricas em vermiculita e argila esbranquiçada.

➤ Traquitos e lamprófiros

Ambos os tipos litológicos ocorrem sob a forma de diques. Os traquitos são caracterizados por textura porfirítica onde tem-se fenocristais de ortoclásio imersos em matriz de biotita, aegirina e melanita. Grossi Sad & Torres (1971) descrevem os traquitos como rochas constituídas por fenocristais de sanidina com hábito ripáceo e com tendência à orientação, imersos em uma matriz formada quase exclusivamente por micrólitos de sanidina orientados e contornando os fenocristais, bem como biotita rara. Com a decomposição, os traquitos são penetrados por limonita e a matriz mostra-se totalmente caulinizada. Os lamprófiros são rochas alcalinas básicas de cor escura, mostram granulação e composição variada, porém, geralmente, apresentam textura porfirítica, sendo observada uma matriz feldspática com estrutura fluidal ou composta por micrólitos de flogopita e anfibólio sódico entremeados por calcita. Os fenocristais podem ser de mica, piroxênio, granada, olivina e anfibólio.

➤ Carbonatitos

Correspondem ao protominério de nióbio e ocorrem nas porções centrais do complexo, sob a forma de veios e diques de poucos cm de largura até poucos metros ou, mais raramente, em massa contínua. São rochas de cor clara, branca e acinzentada quando frescas e castanho escuro quando decompostas. Possuem textura geralmente hipidioblástica ou sacaróide e são constituídas por mais de 90% de calcita (sovito), tendo como acessórios flogopita, dolomita, biotita, apatita, pirita, perovskita, piroxênio e magnetita-ilmenita. Estudos de Vieira (1997) mostraram que o material carbonatítico, tardio no processo magmático, metassomatizou irregularmente as rochas magmáticas iniciais, resultando na formação de novos minerais (anfíbólio e flogopita), podendo o resultado final ser um glimerito.

➤ Silexitos

São compostos geralmente por calcedônia, quartzo e goethita e aparecem nas zonas de fosfato, geralmente abaixo do minério de titânio e sob o nível do lençol freático. Ocorrem em regiões de falhas e fraturas, penetrando-as e substituindo as rochas presentes. As regiões silicificadas mostram enriquecimento em P, Ba e terras-raras. São rochas duras, que por conter alguma goethita, que se decompõe com muita facilidade, apresentam sempre uma cor acastanhada clara ou escura. Podem conter barita e mais raramente fluorita.

Os silexitos são interpretados como sendo relacionados às zonas de silicificação, onde a sílica liberada da solubilização dos silicatos foi depositada sob a forma de calcedônia.

➤ Fenitos

São rochas resultantes do processo de fenitização sobre as encaixantes da chaminé e algumas rochas da intrusão (peridotitos e piroxenitos) e incluem, no primeiro caso, os seguintes tipos litológicos: quartzitos feldspáticos na borda sul e leste da chaminé; fenitos sieníticos distribuídos a sudeste e noroeste; lusitanitos pórfiros na porção leste;

filitos ardosianos fenitizados no sul e sudoeste do complexo e sienitos alcalinos na borda sudeste. No caso dos fenitos internos, tem-se os glimeritos, que são resultantes da flogopitização, relacionada com intrusões do magma carbonatítico nas rochas piroxeníticas.

O processo de fenitização em Tapira consistiu, em linhas gerais, nos seguintes aspectos: introdução de potássio e alumínio nos quartzitos; concentração do ferro no piroxênio (aegirina-augita) ou no feldspato; formação de plagioclásio pela introdução de sódio; desaparecimento do quartzo ou sua concentração em veios (Grossi Sad & Torres, 1971).

2.1.3.3 – PERFIL DA MINERALIZAÇÃO

Com base nas informações obtidas pelo projeto da DOCEGEO, no período de 1971 até abril de 1976, nas áreas controladas pela CVRD, o manto de intemperismo foi dividido em 5 zonas (Cruz & Cheney, 1976). Essas zonas foram definidas em função das características mineralógicas, petrográficas e principalmente química, sendo esta última baseada nos conteúdos de TiO_2 e/ou P_2O_5 , respectivamente maiores ou iguais a 15% e 5% e correspondem a: zona de estéril, zona de mineralização em titânio, zona de mineralização em fosfato com titânio, zona de mineralização em fosfato e rocha estéril parcialmente intemperizada (Figura 2.3 e Fotos 2.1 a 2.3). Ocorre também uma zona de mineralização em nióbio. Essa zonação observada é provavelmente o resultado de variações na litologia original, perceptível em escala métrica ou mesmo centimétrica, e diferenças na velocidade de alteração dos minerais originais.

Segue-se uma descrição de cada uma das zonas com as suas principais características, a partir de dados de Cruz & Cheney (1976), Soubières *et al.* (1991), Alvarenga (1996), Vieira (1997) e Almeida (2000).

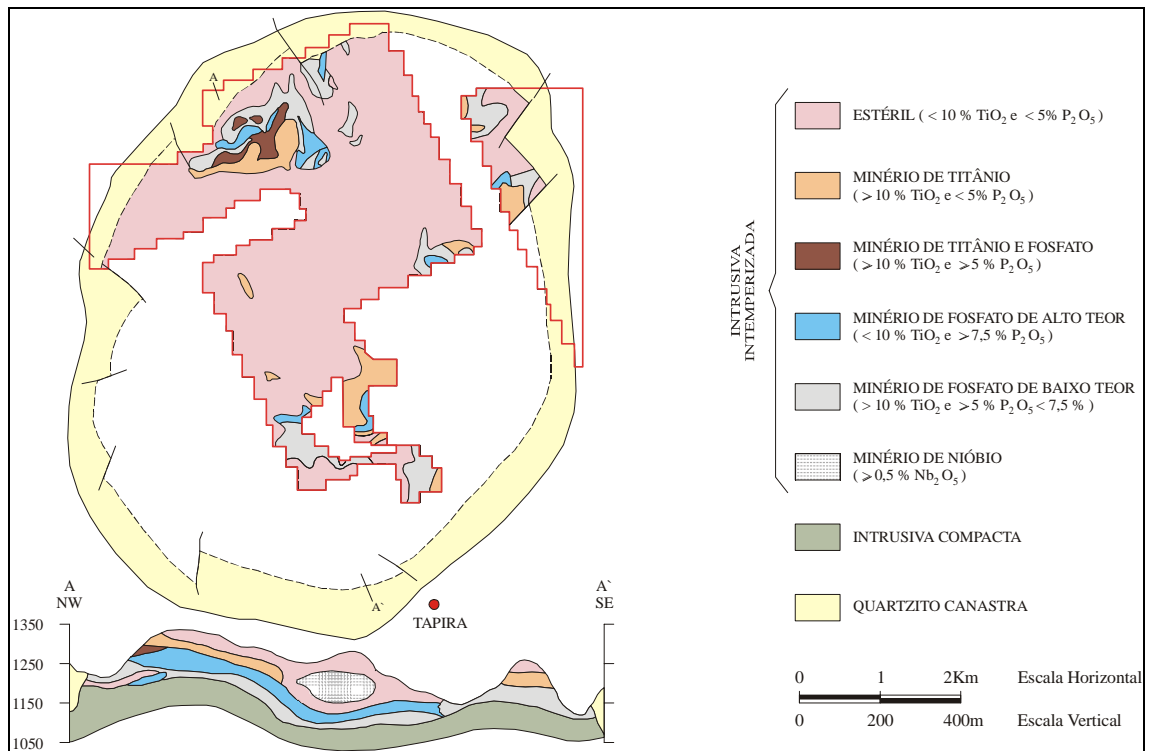
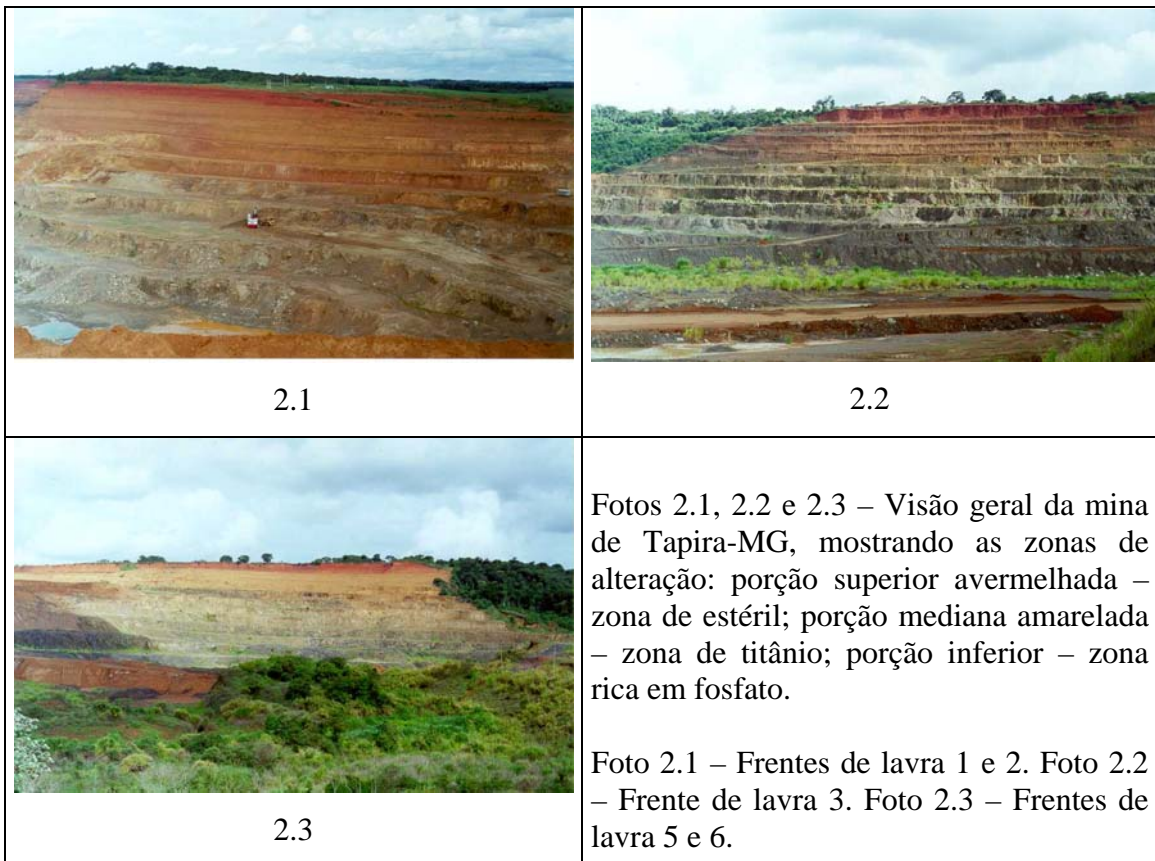


Figura 2.3 – Perfil esquemático da mineralização em Tapira-MG (modificado de Cruz & Cheney, 1976).



➤ Zona de Estéril

Engloba todo o material com teor de P_2O_5 , solúvel em HCl 1:2, abaixo de 5% e teor de TiO_2 menor do que 10%. Esta zona está situada aproximadamente entre as cotas 1345 e 1310m e caracteriza-se por um solo de coloração amarelo-avermelhado, de consistência argilosa, coerente e de aspecto granular. Pequenos fragmentos de rocha silicificada, nódulos milimétricos de limonita e raras palhetas de vermiculita podem ser observados.

Segundo Soubiès *et al.* (1991) e Vieira (1997), esta zona é composta predominantemente por caulinita, gibbsita, goethita, hematita, fosfatos secundários aluminosos e anatásio, bem como magnetita e quartzo residuais.

De acordo com Cruz & Cheney (1976), esta zona corresponde ao produto superlixiviado do antigo peneplano e já hospedou a mineralização, que foi totalmente consumida pelo processo permanente de intemperismo a que está submetida até hoje. Os minerais de fosfato que localmente estão presentes nesta zona são secundários (ex.: fosfato do grupo da crandalita – $(Ca_{0,49}ETR_{0,42}Sr_{0,08...}) (Al_{2,87}Fe^{3+}_{0,13}) (PO_4) (PO_{3,43}(OH)_{0,57}) (OH)_6$ – Soubiès *et al.* (1991)), depositados através da solubilização da apatita primária.

➤ Zona de mineralização em titânio

Pertence a esta zona todo o material que apresenta mais de 10% de TiO_2 e menos de 5% de P_2O_5 solúvel. Situa-se imediatamente abaixo da zona de estéril, entre as cotas 1310 e 1280m. A composição mineralógica é basicamente a mesma observada na zona de estéril, porém a distinção se faz pela presença de maior abundância em anatásio e/ou leucoxênio, elevando o conteúdo de TiO_2 para mais de 10%. Ocorre também alguma perovskita. Segundo Soubiès *et al.* (1991), as micas desta zona aparecem transformadas em vermiculita.

➤ Zona de mineralização em fosfato e titânio

Está localizada imediatamente abaixo da zona de mineralização a titânio e ocorre entre as cotas 1280 e 1250m. Observa-se, nesta zona, o aparecimento do lençol freático. As estruturas da rocha original são bem preservadas e observa-se apatita primária abundante, parcialmente alterada, o que leva a um aumento relativo no teor de P_2O_5 (>5%). Há um aumento na ocorrência de perovskita, quase completamente transformada em anatásio, mantendo os teores de TiO_2 semelhantes aos da zona de mineralização em titânio. Observa-se uma diminuição na frequência de limonita e o silicato mais comum é a mica, em grande parte alterada para vermiculita. Ocorre também magnetita titanífera, parcialmente transformada em maghemita ou hematita (Soubières *et al.*, 1991).

➤ Zona de mineralização em fosfato

É caracterizada por teores de TiO_2 menores de 10% e P_2O_5 solúvel maiores que 5%. Ocorre geralmente nas cotas inferiores a 1250m, até atingir a rocha fresca em profundidade e é uma zona de mineralização essencialmente de apatita. É composta por piroxenitos e peridotitos menos transformados pela alteração meteórica.

Observa-se uma tendência na diminuição dos teores de P_2O_5 em profundidade, ou seja, à medida que tem-se rocha mais fresca, os teores de P_2O_5 decrescem. Os teores de TiO_2 diminuem, havendo predominância de perovskita sobre o anatásio. Observa-se também, em quantidade subordinada, magnetita titanífera, piroxênio (diopsídio), olivina ferruginosa, micas (flogopita é a mais frequente) e granadas. O teor de CaO acompanha o de fosfato e está relacionado também com a quantidade de perovskita e calcita, que aumentam em profundidade.

Logo acima da rocha fresca aparece uma zona dura (~30m de espessura) formada por piroxenito alterado e silexito, sendo necessário o uso de explosivos para sua extração. É comum a presença de veios de carbonatito nas proximidades da rocha fresca.

➤ Zona de mineralização em nióbio

Aparece na parte mais central do corpo intrusivo, sendo verificado através de furos de sonda, que nesta área a faixa intemperizada é muito profunda, com mais de 200m de espessura. Observa-se uma associação entre nióbio, terras-raras, titânio e apatita. O titânio aparece nas regiões próximas à superfície e a apatita ocorre abaixo da zona de nióbio. O mineral útil de nióbio é o pirocloro primário.

2.1.3.4 – PERFIL DO INTEMPERISMO

O perfil clássico de intemperismo laterita-saprólito definido por Bardossy & Aleva (1990 *apud* Morteani & Preinfalk, 1996) pode ser visualizado na Figura 2.4 e consiste do topo para a base em um horizonte de solo, um horizonte de laterita (carapaça laterítica e bauxita), um horizonte de saprólito e a rocha mãe fresca. Algumas vezes uma ou mais camadas de silcrete estão presentes. Entende-se por silcrete as rochas produzidas pela cimentação, usualmente em condições supergênicas, de materiais do regolito não consolidado, por quartzo microcristalino.

O horizonte de solo residual é composto de produtos do intemperismo químico e mecânico do horizonte subjacente misturados com restos de plantas (raízes) e matéria orgânica. Este horizonte é seguido em profundidade pela porção laterítica constituída por um horizonte de carapaça laterítica, que é geralmente o mais duro do perfil, devido à presença de minerais de ferro recristalizados ou novos, geralmente com uma cor vermelha intensa ou vermelha-amarronada e por um horizonte de bauxita, que pode ser distinguido do horizonte superior de carapaça laterítica pelo baixo conteúdo em minerais de ferro. O horizonte de saprólito é composto principalmente por produtos silicáticos intemperizados da rocha original. Rutilo e zircão são minerais altamente resistentes no ambiente saprolítico. Este horizonte muitas vezes possui estruturas e texturas remanescentes da rocha original. O perfil de intemperismo termina na rocha original. A espessura relativa desses horizontes pode variar lateralmente em função da erosão mecânica.

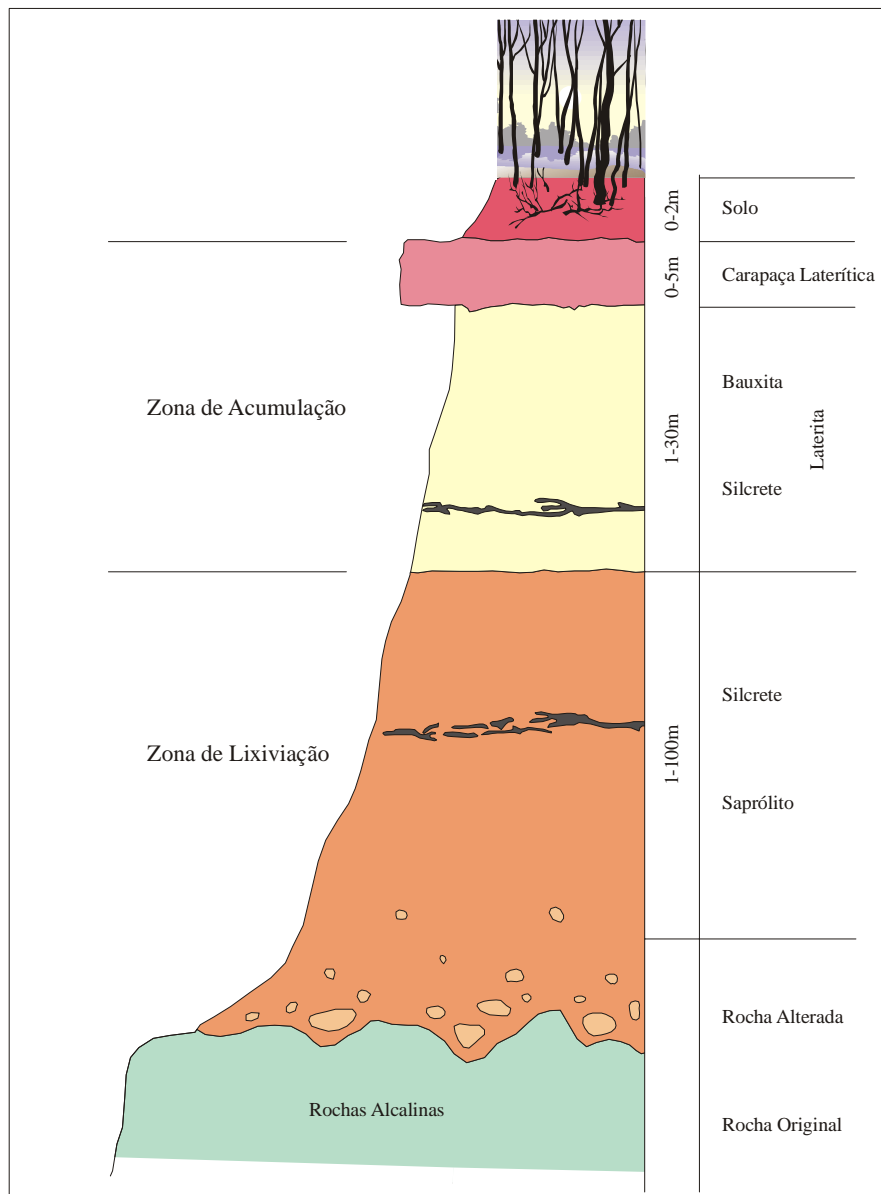


Figura 2.4 – Perfil típico de intemperismo de Catalão e Araxá, correspondente ao perfil clássico de Bardossy & Aleva (1990) (Morteani & Preinfalk, 1996).

Estudos de Morteani & Preinfalk (1996) nos complexos alcalinos carbonatíticos de Catalão e Araxá verificaram que os perfis de intemperismo desses complexos correspondem ao perfil clássico descrito acima, sendo reconhecidos um horizonte de solo (gorceixita, goethita, hematita, magnetita, gibbsita, caulinita e quartzo), um horizonte de laterita (gorceixita, goethita, hematita, magnetita, caulinita e quartzo), um horizonte de saprólito (apatita, gorceixita, goethita, magnetita, quartzo, vermiculita,

barita e boehmita) e as rochas alcalinas (apatita, monazita, magnetita, hematita, pirita, silicatos e carbonatos).

Em Tapira, Vieira (1997) estudou o perfil de intemperismo podendo ser também reconhecidos horizontes típicos, conforme descrição abaixo:

- Horizonte de solo: apresenta cor vermelha-amarronzada e é composto por um material residual constituído de goethita e caulinita, com matéria orgânica. Nesta matriz ocorrem quartzo, gibbsita, martita, hematita e anatásio/crandalita;
- Horizonte laterítico: composto por goethita, caulinita, quartzo, gibbsita, martita, hematita e anatásio/crandalita;
- Horizonte saprolítico: apresenta cor marron a alaranjada e possui prototexturas minerais ainda preservadas. É composto por anatásio/crandalita, apatita, goethita, caulinita/esmectita, vermiculita, magnetita/martita, hematita, ilmenita, quartzo/tridimita, barita, óxido de manganês e vestígios de gibbsita. Anatásio e crandalita concentram-se nas porções superiores deste horizonte, enquanto a apatita é mais rica nas partes inferiores;
- Rocha pouco alterada: apresenta cor cinza-esverdeada, sendo composta por esmectita, flogopita, vermiculita, clorita, caulinita, magnetita, hematita, ilmenita, apatita, perovskita, piroxênio, anfibólio, quartzo/tridimita e carbonato;
- Piroxenito fresco: mostra cor cinza a verde escuro, sendo constituído de piroxênio, anfibólio, perovskita, flogopita, apatita, magnetita e calcita.

Resultados obtidos por Melfi *et al.* (1991), Soubiès *et al.* (1991) e Vieira (1997) sobre a mineralogia e geoquímica dos elementos de terras-raras no perfil de intemperismo em Tapira/MG mostram que, a partir da rocha original inalterada, a perovskita corresponde ao principal mineral portador de terras-raras – ETR (1,5 a 2,0% TR₂O₃), seguida da apatita (0,1 a 0,4% TR₂O₃). A alteração desta rocha provoca várias mudanças na mineralogia, entre elas: a dissolução parcial da apatita primária; neoformação de apatita secundária empobrecida em ETR e enriquecida em flúor; transformação total da perovskita em anatásio microbotrioidal, nos vazios do qual desenvolvem-se geodos de um fosfato de ETR e Ca do grupo do rabadofânio. Com a progressão da alteração, verifica-se a total dissolução da apatita, substituição parcial do rabadofânio por um

fosfato do grupo da crandalita rico em ETR e início de alteração da magnetita titanífera. A magnetita passa para martita (mistura de hematita e magnetita) a profundidades mais rasas. A monazita/rabdofânio apresenta teores de ETR maiores do que os observados nas apatitas e fosfatos crandalíticos. Esses estudos mostraram que: o fósforo tem um papel fundamental na captura dos ETR liberados por hidrólise dos minerais primários; os ETR se mantêm nos alteritos e se fixam em fosfatos de ETR cada vez mais aluminosos e existe uma íntima associação entre os ETR e o Ti.

Estudos geoquímicos de Vieira (1997) em rocha total mostraram que os teores dos elementos de terras-raras leves (ETRL) mantêm-se praticamente idênticos aos do material não alterado ao longo do perfil de intemperismo. Nos complexos alcalinos-carbonatíticos de Araxá e Catalão, Morteani & Preinfalk (1996) mostraram que os diferentes horizontes do perfil laterítico têm o mesmo padrão de enriquecimento em ETRL observado nas rochas alcalinas subjacentes e que há um enriquecimento em ETR de pelo menos uma ordem de magnitude, quando comparado com as rochas alcalinas subjacentes. Em Araxá e Catalão, os principais minerais portadores de ETR nas rochas alcalinas são a apatita e a calcita; no saprólito são a apatita e os fosfatos de Al do tipo gorceixita; nos horizontes de solo e laterita são os fosfatos de Al. Em Catalão observa-se também monazita rica em ETR nas camadas de silcrete.

2.1.3.5. – GÊNESE DA MINERALIZAÇÃO

A importância econômica dos complexos carbonatíticos do Brasil está geneticamente relacionada ao intenso processo de intemperismo que afetou suas rochas. Os depósitos minerais têm sido formados por processos supergênicos e concentração residual dos minerais primários, durante longos períodos de intemperismo.

O minério de fosfato, nióbio e titânio de Tapira é o resultado direto de um enriquecimento supergênico de rochas ultramáficas com conteúdos anormais de fósforo e titânio, que deu origem ao espesso manto laterítico que cobre o complexo. O manto de intemperismo possui profundidades médias em torno de 30m, podendo atingir até 200m.

Segundo Cruz e Cheney (1976), o processo foi desenvolvido com a formação dos peneplanos no Terciário, em associação com o clima tropical, estrutura bem fraturada da rocha matriz, juntamente com sua heterogeneidade. Segundo estes autores, os quartzitos encaixantes comportaram-se como uma barreira protetora para a preservação das intrusões e agiram também como barreira à água infiltrada e retirada no interior do Complexo, devido ao seu estado de fenitização e impermeabilização.

Os processos de laterização (intenso intemperismo de rochas) mudam dramaticamente a mineralogia e composição química das rochas primárias. Nesses processos supergênicos predominam os mecanismos de subtração, onde ocorre a lixiviação dos elementos mais móveis (Ca, Mg, Na e K), havendo como resultado uma acumulação residual relativa dos menos móveis (Ti, Nb, ETR, Fe, Al, P, etc.). Em regiões de clima quente e com boa drenagem, o intemperismo ocorre em condições oxidantes, sendo a acidez geralmente alta nos horizontes superficiais desses solos. Desse modo, os silicatos são hidrolizados e a sílica liberada migra, depositando-se quando o pH é neutralizado.

Em função da extrema heterogeneidade apresentada pelas rochas intrusivas, houve uma resposta desigual do material ao intemperismo. O depósito de titânio situa-se acima do nível do lençol freático e forma uma camada que acompanha grosseiramente a topografia atual. O mineral-útil corresponde ao anatásio, formado através da alteração supergênica de perovskita, ilmenita e titanomagnetita, minerais estes pré-existentes na rocha fresca em pequenas proporções. A reserva geológica total de titânio em Tapira é de 338.000.000t de minério com teor médio de TiO_2 de 16,8%.

O minério de fosfato aparece sob a forma de uma camada sobre a rocha fresca e acompanha também a topografia atual. O contato com o minério de titânio sotoposto é nítido e ocorre freqüentemente através de uma zona de mineralização a fosfato e titânio. O mineral-útil é a apatita, que ocorre como mineral primário disseminado na rocha matriz (5 a 10%), ou formando bolsões ou níveis enriquecidos, concordantes com a rocha encaixante. Parte da apatita permaneceu no manto de intemperismo como constituinte primário e outra parte alterou-se dando origem a fosfatos secundários. A

reserva geológica total de fosfato em Tapira é de 1.200.000.000t de minério com teor médio de P_2O_5 de 8,2%.

O minério de nióbio é também residual e de aspecto geral terroso, sendo constituído de pirocloro (mineral-útil primário) e parece estar relacionado com as porções carbonatíticas da intrusão. A reserva geológica total de nióbio em Tapira é de 166.000.000t de minério com teor médio de Nb_2O_5 de 0,72%.

2.2 – EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO FOSFÁTICO DE TAPIRA

Todas as informações abaixo foram retiradas de dados de Alvarenga (1996), Almeida (2000) e informações obtidas em visitas feitas ao Complexo de Mineração de Tapira-MG (CMT).

A lavra é feita a céu aberto, utilizando-se o método convencional de bancadas a meia encosta, sendo a altura dos bancos de 13m. O material friável é retirado por escavadeiras e o material duro é detonado por explosivos e carregado com escavadeiras e pás-carregadeiras.

As operações de lavra são planejadas através do *software Data Mine* (fabricado pela MICL – Mineral Industries Computing Limited – versão 1.1.1136.0), que possui um banco de dados gerado com as informações de furos de sondagem, onde os teores de P_2O_5 , CaO, TiO_2 , Fe_2O_3 e MgO, a densidade e o nível de compactação da rocha (granulado, friável) são as principais variáveis analisadas.

Com as informações obtidas na sondagem e no modelo utilizado para estimar as variáveis do bloco, a tipologia mineral é determinada, sendo feita a classificação do minério (de fosfato ou de titânio), para que se possa executar a operação de extração de cada um dos tipos. A operação de extração é feita pela FOSFERTIL, dentro da filosofia do Consórcio de Mineração Vale Fosfertil Tapira (CVFT), isto é, a FOSFERTIL cuida do aproveitamento dos fosfatos e a CVRD é responsável pelo futuro beneficiamento dos minérios de titânio desmontados e/ou decapeados pela FOSFERTIL.

Após a extração, o fosfato segue o seu curso para o beneficiamento e o titânio é colocado em pilhas de forma sistemática, a fim de que seja permitido o seu aproveitamento futuro pela Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). O CMT produz um concentrado de “rocha fosfática” (apatítico), que é obtido a partir da concentração do minério de fosfato, sendo o teor atual de 35,98% de P_2O_5 . Este concentrado é transferido para o Complexo Industrial de Uberaba (CIU), através de um mineroduto, onde é feita a fabricação de fertilizantes.

Serão descritas de forma sucinta, as principais etapas apresentadas no fluxograma utilizado pela FOSFERTIL para o beneficiamento do minério de fosfato (Figura 2.5 e Fotos 2.4 a 2.11).

Todo o minério lavrado é transportado em caminhões até a unidade de britagem primária, onde se reduz o minério do tamanho de 762mm (30”) para 127mm (5”), utilizando-se um britador giratório. Nesta etapa, o minério é descarregado em um silo e passa deste para um alimentador de placas que alimenta uma grelha vibratória com abertura máxima de 127mm (5”). O retido na grelha vai para o britador giratório e o produto junta-se com o passante da grelha numa correia transportadora de 1000m de comprimento até o pátio de homogeneização e amostragem, com capacidade nominal de 4000t/h.

O produto dessa britagem é homogeneizado em duas pilhas paralelas prismáticas, com 700 metros de comprimento e capacidade individual para 240.000t. Enquanto uma pilha está sendo construída, o minério é retomado da outra pilha através de retomadores de caçambas e enviado por meio de um sistema de transportadores de correia até os silos de rebritagem.

O minério retomado é classificado inicialmente em duas peneiras vibratórias em paralelo. O passante dessas peneiras segue para as peneiras do circuito da britagem terciária e o retido alimenta um britador secundário, do tipo cônico. Neste ponto, o processo é feito a úmido em função da quantidade de finos presente no minério. O

produto da britagem/peneiramento secundário alimenta um circuito fechado de britagem/peneiramento terciário, composto de um britador cônico e um de impacto.

Após essa etapa de rebitagem do minério, que é composta pelos estágios de britagem secundária e terciária e classificação, são obtidos dois produtos: o primeiro é denominado de minério **granulado** e apresenta granulometria teórica entre 7,1 e 28mm e o segundo tipo de minério é chamado de minério **friável** e possui granulometria abaixo de 7,1mm. Os produtos granulado e friável são alimentados de forma independente na usina de concentração, sendo o granulado enviado por meio de transportadores de correia para o circuito de moagem granulado e o friável é bombeado diretamente para o circuito de moagem friável.

Esta subdivisão do processo de beneficiamento resulta em dois circuitos principais independentes: minério granulado (mais duro e rico em CaO) e minério friável grosso e fino (intemperizado e com alto teor de Fe_2O_3 e Al_2O_3). Ela visa a obtenção de produtos dentro das especificações do mercado e com o máximo de rendimento, em função das dificuldades encontradas de manuseio e de recuperação, quando as tipologias são tratadas juntamente. Segundo Barros *et al.* (2001) o minério granulado, especialmente àquelas tipologias contendo piroxenitos e silexitos, contribuem para a redução do teor de P_2O_5 no concentrado e para a diminuição da recuperação.

Nos últimos anos a taxa média de alimentação da usina de concentração variava entre 1408-1496t/h (base seca), sendo dividido em circuito friável (1070-1152t/h) e circuito granulado (338-344t/h). Verifica-se então, que a partição em massa aproximada do material que alimentava os circuitos era de 24-30% para o circuito granulado e de 70-76% para o circuito friável. Atualmente, esses valores são de 80% para o circuito friável e 20% para o granulado.

O circuito de moagem do minério granulado é constituído por uma moagem de barras com separação magnética, seguida de moagem de bolas em circuito fechado com classificação em hidrociclones. O minério granulado proveniente da rebitagem alimenta dois moinhos de barras de 3,3m x 6,1m (11' x 20'), operando em paralelo. Os

produtos destes moinhos são misturados e alimentam um conjunto de separadores magnéticos de baixo campo, constituídos de 3 separadores *rougher* e um *cleaner*. A fração magnética (magnetita titanífera) é bombeada para a barragem de rejeitos e a não magnética alimenta uma classificação em hidrociclones de 660mm (26”), visando remover os finos gerados na moagem de barras. O *underflow* desses hidrociclones fecha o circuito do moinho de bolas de 4,1m x 6,1m (13.5’ x 20’).

O *overflow* da classificação alimenta a bateria de 1ª deslamagem, constituída de quatro hidrociclones de 660mm (26”), onde é feito um corte em 70 μ m (d50). O *underflow* dessa etapa, após atricionado em *scrubber* na presença de soda cáustica, alimenta uma bateria de 3ª deslamagem, com 4 hidrociclones de 381mm (15”). O *overflow* dessa 3ª deslamagem, juntamente com o *overflow* da 1ª deslamagem alimentam a 2ª deslamagem, com hidrociclones de 152mm (6”).

O *underflow* dessa etapa sofre mais uma deslamagem (4ª deslamagem) em ciclones de 102mm (4”). O *overflow* da 4ª deslamagem, juntamente com o *overflow* da 2ª deslamagem constituem a lama do circuito granulado, sendo descartada. O *underflow* da 4ª deslamagem alimenta uma coluna de finos da flotação do circuito granulado. O rejeito dessa coluna vai para a barragem, enquanto o concentrado, juntamente com o *underflow* da 3ª deslamagem, constituem a alimentação nova do circuito de flotação do granulado.

Essa etapa de flotação do granulado é realizada em células mecânicas convencionais, nos estágios *rougher*, *scavenger*, *cleaner* e *re-cleaner*, onde o material flotado no último estágio corresponde ao concentrado final do circuito de granulado.

O circuito de moagem do friável é composto por uma pré-classificação em hidrociclones de 660mm (26”), seguida de moagem em circuito fechado, com separação magnética e classificação. O minério friável alimenta quatro linhas independentes de moagem em paralelo. O *underflow* da pré-classificação juntamente com o *underflow* da classificação alimentam moinhos de bolas de 4,1 x 6,1m (13,5’ x 20’) e o *overflow* da

pré-classificação é enviado para a 2ª deslamagem do circuito, com hidrociclones de 152mm (6”).

A descarga do moinho é direcionada para a separação magnética de baixo campo, sendo o produto magnético enviado para a barragem de rejeitos. A parte não magnética alimenta a classificação com hidrociclones de 660mm (26”), cujo *underflow* fecha circuito alimentando o moinho. O *overflow* da classificação (produto final da moagem), juntamente com o *underflow* da 2ª deslamagem constituem a alimentação da 1ª deslamagem, com ciclones de 660mm (26”). O *overflow* da 2ª deslamagem é descartado por se tratar de lamas. A partir da 1ª deslamagem os produtos da moagem se juntam dois a dois, formando duas linhas de deslamagem.

O *underflow* da 1ª deslamagem, após atricionado é direcionado para 3ª deslamagem, com ciclones de 381mm (15”). O *underflow* desses ciclones, após condicionamento com amido de milho gelatinizado, constitui, juntamente com o concentrado da linha de flotação do minério friável fino, a alimentação nova do circuito de flotação do minério grosso friável, realizado em células mecânicas convencionais, nas etapas *rougher*, *scavenger*, *cleaner* e *re-cleaner*. O material flotado deste último estágio corresponde ao concentrado final do circuito friável.

O *overflow* da 1ª deslamagem, juntamente com o *overflow* da 3ª deslamagem alimentam a 4ª deslamagem, realizada em ciclones de 102mm (4”). O *underflow* da 4ª deslamagem, após atricionado, é direcionado para a 6ª deslamagem, com ciclones também de 102mm (4”). O *overflow* da 6ª deslamagem junta-se com o *overflow* da 4ª deslamagem e constituem a alimentação do circuito de ultrafinos.

Esse circuito é constituído por três estágios de microdeslamagem com ciclones de 50mm de diâmetro. O *underflow* de cada estágio alimenta a etapa subsequente e o *overflow* de cada estágio retorna à etapa anterior. Após a deslamagem e condicionamento, a polpa ultrafina segue para o circuito de concentração, constituído de colunas *rougher* e *cleaner* e um estágio de flotação convencional *scavenger*. O concentrado *cleaner* (concentrado ultrafino expedido) é espessado, filtrado e empilhado.

O *underflow* da 6ª deslamagem, após condicionado, junta-se com o da outra linha de deslamagem e constituem a alimentação nova do circuito de flotação de finos friável, onde os estágios *rougher* e *scavenger* são realizados em células mecânicas convencionais, tendo-se a opção de mudança do circuito, passando a operar com colunas.

Os afundados das etapas *scavenger* nos dois circuitos de flotação friável constituem-se nos rejeitos finais da etapa de flotação. Os concentrados finais dos circuitos de flotação do minério granulado e de grossos do minério friável juntam-se e são remoídos em dois moinhos de 3m x 3m (10' x 10') e 3m x 4,9m (10' x 16'), que operam em circuito fechado com ciclones. O produto final possui 4 a 8% da massa retida em 150 µm (100 mesh Tyler), para adequação ao transporte por mineroduto. Esse produto é espessado em operação conjunta espessador/ciclone e depois é enviado para 4 tanques de homogeneização, que alimentam o mineroduto.

Nos circuitos de flotação tanto do granulado quanto do friável são utilizados reagentes que funcionam como depressores (amido de milho gelatinizado com soda cáustica) e outros como coletores (misturas de reagentes sintéticos – sulfossuccinatos e sulfossuccinamatos e ácidos graxos saponificados com soda cáustica). O regulador de pH é a própria soda cáustica.

Os produtos da usina possuem em média 13% de rejeito magnético, 21% de lamas, 14% de concentrado fosfático e 52% de rejeitos de flotação. O teor médio do concentrado fosfático (base em 2003) foi de 35,98% de P_2O_5 , 1,99% de Fe_2O_3 , 0,43% de MgO , 50,62% de CaO , sendo a razão CaO/P_2O_5 de 1,407. A capacidade atual de produção de concentrado fosfático do Complexo de Mineração de Tapira é de 1.600.000t/ano.

O mineroduto tem 120 km de comprimento, tubulação de 224,5mm (9,625") e interliga os complexos de Tapira (CMT) e Uberaba (CIU), transportando o concentrado fosfático em suspensão em água, numa proporção de 61% de sólidos, através de bombeamento. No Complexo Industrial de Uberaba localizam-se as instalações químicas para a produção de fertilizantes MAP (fosfato de monoamônio) e TSP (superfosfato simples).

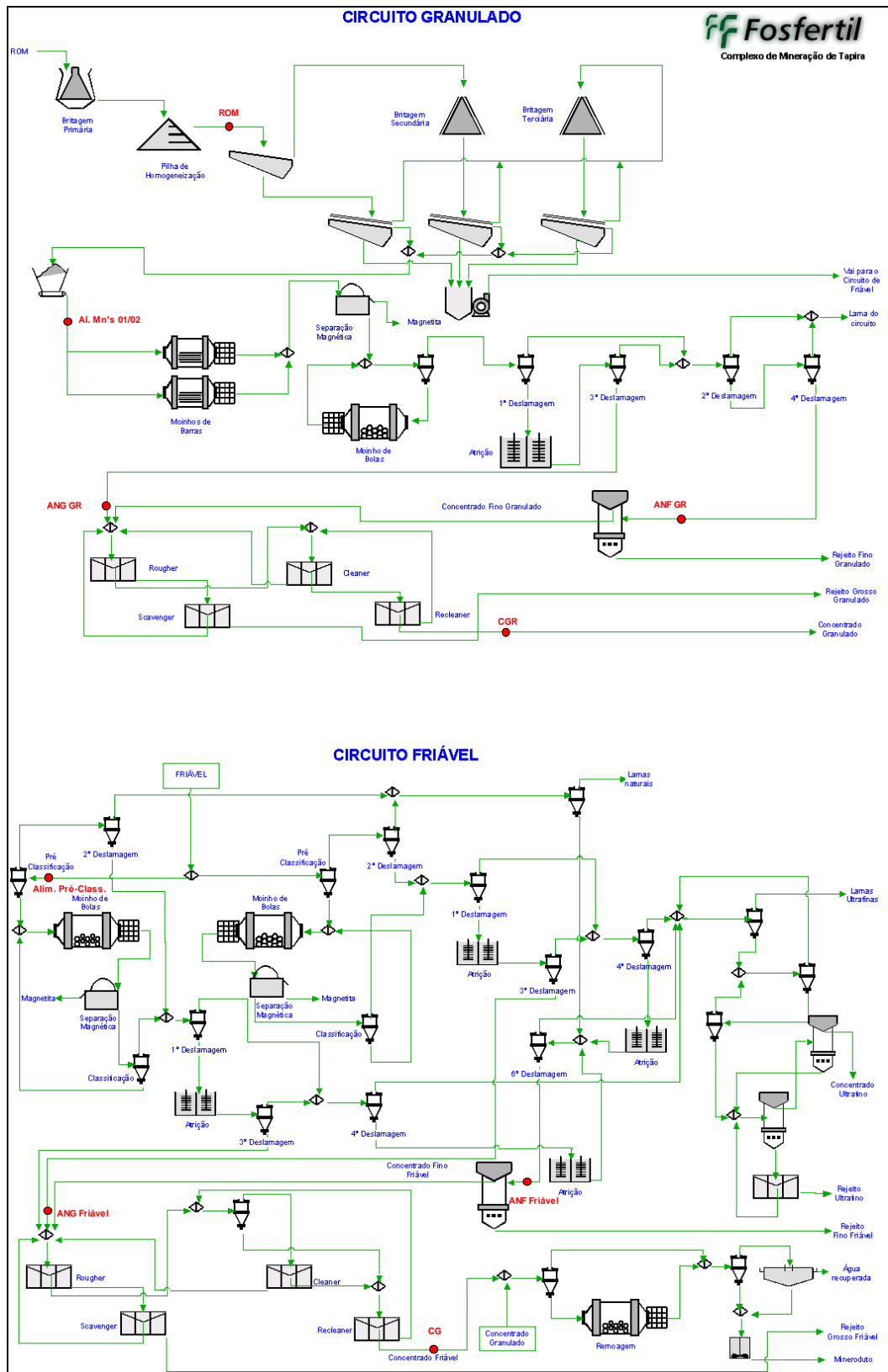


Figura 2.5 – Fluxograma geral da usina de concentração de Tapira-MG, indicando a localização das amostras coletadas durante o processamento da pilha 912 (Fosfertil).



Foto 2.4 – Moinho de barras (esquerda) e moinho de bolas (direita) do circuito de minério granulado.



Foto 2.5 – Flotação *cleaner* do circuito de minério granulado.



Foto 2.6 – Célula de flotação: concentrado apatítico do circuito de minério granulado.



Foto 2.7 – Classificação do minério friável.



Foto 2.8 – Deslamagem do minério friável.



Foto 2.9 – Separação magnética do circuito friável.



Foto 2.10 – Células de flotação *scavenger* do circuito de minério friável grosso.



Foto 2.11 – Célula de flotação: concentrado apatítico final.

2.3 – ASPECTOS MINERALÓGICOS DA APATITA

2.3.1 – COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA

Os componentes do grupo da apatita são minerais acessórios muito comuns em quase todas as rochas ígneas e também ocorrem em rochas metamórficas e sedimentares, podendo atingir até 5% em volume, embora o intervalo mais comum seja entre 0,1 e 1%. Nos complexos carbonatíticos, a apatita aparece em quantidade apreciável, sendo geralmente o principal mineral útil de fósforo. O mineral mais freqüente do grupo da apatita é a fluorapatita e muitas vezes o termo apatita é utilizado como sinônimo de fluorapatita (Deer *et al.*, 1981).

O grupo da apatita inclui uma ampla família de minerais. Segundo dados de Klein & Hurlbut (1985), complementados com informações obtidas no *site* Athena Mineralogy, o Grupo da Apatita é constituído pelos minerais apresentados na Tabela 2.1. A estrutura dos membros do Grupo da Apatita foi descrita por Náray-Szabó e Mehmel *apud* Dana & Dana (1951), sendo verificado que seus membros mostram ampla substituição de soluções sólidas.

A fórmula geral do grupo é $A_{10}(XO_4)_6Z_2$, onde $A = Ca, Pb, Sr, ETR, Na, Ba, Mg, Mn, Zn, Cd, Ag, \dots$, $X = P, Si, S, C, As, V, \dots$ e $Z = F, Cl, OH, \dots$

Segundo Deer *et al.* (1981), a francolita (nome utilizado para a apatita que contém quantidade apreciável de carbonato e mais que 1% de flúor – $(Ca,Na,Mg)_{10}(PO_4,CO_3)_6(F,OH)_2$) e a dalita (nome empregado para a carbonatohidroxiapatita – $Ca_{10}(PO_4,CO_3)_6(OH)_2$, com teores de flúor inferiores a 1%) são variedades de apatita bastante comuns. A francolita constitui a principal fonte de fosfato do mundo. Já a dalita é comum em depósitos tipo guano, podendo ocorrer também em associação com a francolita em depósito de origem sedimentar marinha.

Tabela 2.1 – Grupo da Apatita (Athena Mineralogy)

MINERAL	COMPOSIÇÃO QUÍMICA
Fluorapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3\text{F}$
Cloroapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Hidroxiapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3\text{OH}$
Carbonatohidroxiapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3 (\text{OH})$
Carbonatofluorapatita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3 \text{F}$
Esvabita	$\text{Ca}_5 (\text{AsO}_4)_3 \text{F}$
Turneureita	$\text{Ca}_5 [(\text{As}, \text{P}) \text{O}_4]_3 \text{Cl}$
Johnbaumita	$\text{Ca}_5 (\text{AsO}_4)_3 (\text{OH})$
Fermorita	$(\text{Ca}, \text{Sr})_5 (\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_3 (\text{OH})$
Fluorcafita	$\text{Ca} (\text{Sr}, \text{Na}, \text{Ca}) (\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ce})_3 (\text{PO}_4)_3 \text{F}$
Estrôncioapatita	$(\text{Sr}, \text{Ca})_5 (\text{PO}_4)_3 (\text{OH}, \text{F})$
Belovita – (Ce)	$\text{Sr}_3 \text{Na} (\text{Ce}, \text{La}) (\text{PO}_4)_3 (\text{F}, \text{OH})$
Belovita – (La)	$\text{Sr}_3 \text{Na} (\text{La}, \text{Ce}) (\text{PO}_4)_3 (\text{F}, \text{OH})$
Alforsita	$\text{Ba}_5 (\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Morelandita	$(\text{Ba}, \text{Ca}, \text{Pb})_5 (\text{AsO}_4, \text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Hedifana	$\text{Pb}_3\text{Ca}_2 (\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$
Piromorfita	$\text{Pb}_5 (\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Mimetita	$\text{Pb}_5 (\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$
Clinomimetita	$\text{Pb}_5 (\text{PO}_4)_3\text{Cl}$
Vanadinita	$\text{Pb}_5 (\text{VO}_4)_3\text{Cl}$

A estrutura dos minerais apatíticos é hexagonal, onde cada átomo de F está rodeado por três átomos de Ca num mesmo nível e, além disso, tem-se colunas de Ca-O unidas com tetraedros PO_4 formando a malha hexagonal (Figura 2.6). A apatita mostra simetria representada pelo grupo espacial $\text{P6}_3/\text{m}$ e possui dois planos de simetria paralelos ao plano (001) e tetraedros PO_4 associados às colunas Ca-O, formando uma estrutura em colméia. Sua principal característica é a presença de dois tipos de canais perpendiculares ao plano (001). O primeiro deles apresenta diâmetro de cerca de 2Å e corresponde aos eixos ternários da estrutura, sendo bordejados por íons Ca^{2+} , denominados Ca (1), coordenados a 9 átomos de oxigênio. O segundo tipo mostra diâmetro de 3 a $3,5\text{Å}$ e é formado pelos eixos c helicoidais, bordejados pelos íons Ca^{2+} , denominados Ca (2), coordenados a 7 átomos de oxigênio, ou seis átomos de O e uma coluna de ânion (F, OH). O arranjo forma uma malha elementar correspondente a um

prisma reto de base losangular, com 4 íons Ca(1), 6 íons Ca(2), 6 íons P, 2 íons F e 24 íons de O.

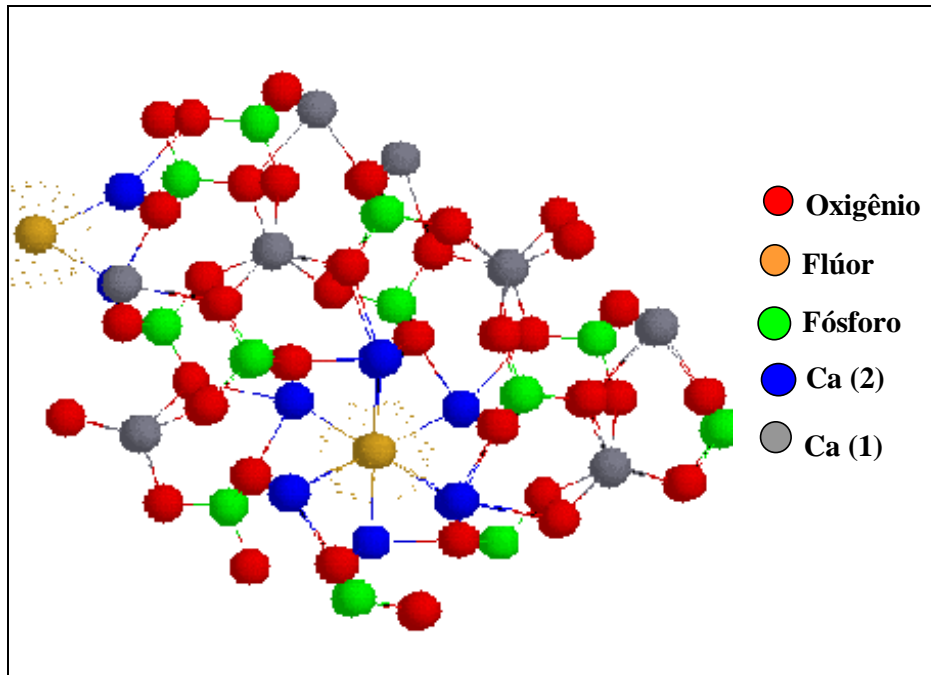


Figura 2.6 – Estrutura da fluorapatita onde podem ser visualizados os tetraedros PO_4 , a coordenação do F com o Ca e os dois tipos de coordenação do Ca (Ribeiro, C. C., 2002).

2.3.2 – SUBSTITUIÇÕES

A apatita é um mineral onde as substituições na rede cristalina são muito comuns e variadas, sendo difícil a observação de espécies naturais puras. Segundo McClellan (1980), as substituições de íons nos sítios da apatita são mais uma regra do que uma exceção. Essas substituições têm sido estudadas tanto em amostras naturais como em produtos sintéticos, sendo verificado que são possíveis substituições nos sítios do cátion Ca^{2+} , do ânion PO_4^{3-} e do ânion monovalente dos canais (F), bem como substituições de menor importância em sítios vazios do mineral.

A composição da apatita depende de sua estrutura mineralógica, do ambiente de sua formação e também da necessidade de compensação de cargas para manter sua eletroneutralidade, quando ocorrem substituições entre íons de carga diferente em

relação à fluorapatita ideal. O conteúdo aniônico pode incluir no sítio XO_4^{3-} as seguintes substituições: CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , SiO_4^{4-} , AsO_4^{3-} , VO_4^{3-} , CrO_4^{2-} e outros; o sítio monovalente F^- pode ser ocupado por OH^- , Cl^- e CO_3^{2-} e o cátion Ca^{2+} pode ser substituído por Na^+ , Sr^{2+} , Mn^{2+} , K^+ , Bi^{4+} , U^{4+} , Ba^{2+} , Mg^{2+} , $ETR^{2+, 3+}$, Fe^{2+} , Al^{3+} , Ag^+ , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Y^{3+} , Sc^{3+} e outros. O íon O^{2-} pode ser substituído por F^- e OH^- .

Em geral, os limites de substituição podem ser previstos pelo raio iônico dos elementos substituintes. O raio iônico irá influenciar diretamente na estabilidade do íon na estrutura do mineral.

Um tipo de substituição muito importante nos complexos carbonatíticos é a dos ETR, pois refletem a composição do magma e sua evolução. Nas rochas presentes nesses complexos, geralmente, a perovskita serve como o principal mineral portador dos ETR, além da apatita, ilmenita e monazita. A entrada de ETR^{3+} na estrutura da apatita em substituição ao íon Ca^{2+} é muitas vezes acompanhada por uma combinação de substituições ($ETR^{3+} + Si^{4+} \leftrightarrow Ca^{2+} + P^{5+}$ e $ETR^{3+} + Na^+ \leftrightarrow 2Ca^{2+}$) para manter o balanço de cargas (Hughes *et al.*, 1991, Fleet & Pan, 1995, Fleet & Pan, 1997 e Chakmouradian & Mitchell, 1999). Fleet & Pan (1995) sugerem ainda mais duas possíveis combinações de substituições para manter o balanço de cargas na apatita ($ETR^{3+} + O^{2-} \leftrightarrow Ca^{2+} + F^-, OH^-, Cl^-$ e $2ETR^{3+} + vacância \leftrightarrow 3Ca^{2+}$). Em geral, a apatita natural serve como hospedeira principalmente para os ETR leves ($La \rightarrow Sm$), onde o Ce é o ETR mais comum na substituição, existindo uma preferência para o sítio do Ca(2) em seu arranjo atômico.

A presença de ETR em apatitas resulta em uma forte catodoluminescência – CL, quando o mineral é irradiado por um feixe de elétrons, sendo esta técnica importante na investigação da presença de tais elementos (Mariano, 1978; Mitchell *et al.*, 1997). As apatitas de diferentes paragêneses exibem cores distintas de CL, que refletem a presença de proporções diferentes dos ativadores de CL. No caso das apatitas primárias de carbonatito, sua cor é azul. Variações de concentrações nos elementos ativadores abaixo de 100ppm já geram modificações nas cores de CL. Os principais elementos ativadores em apatitas são os ETR (Sm^{3+} , Dy^{3+} , Tb^{3+} , Pr^{3+} , Ce^{3+} , Er^{3+} , Eu^{3+} e Eu^{2+}), bem como

Mn^{2+} . Segundo Mitchell *et al.* (1997), no caso das apatitas naturais, o espectro de CL resulta de três fatores principais: concentração relativa de cada ETR; eficiência relativa da luminescência do ETR presente e a presença ou ausência de outros ativadores de CL, tais como Mn.

Santos (1998) aplicou a técnica de CL em apatitas dos concentrados e rejeitos de Tapira-MG, sendo verificado que as apatitas sem alteração intempérica mostram cor violeta ou violeta-azulada e flotam mais facilmente. Já as apatitas secundárias exibem cor de CL rosa-alaranjada e geralmente não são aproveitadas no processo de beneficiamento. A cor rosa foi atribuída à presença de Mn nos oxi-hidróxidos de ferro e nos produtos de alteração observados nessas apatitas. Foram observadas também misturas entre os dois tipos de apatita (“apatitas mistas”) refletidas nas cores de CL e presentes principalmente no rejeito.

Em complexos alcalinos-carbonatíticos, as apatitas geralmente descritas são fluorapatitas e hidroxiapatitas com algum carbonato. As substituições mais comuns consistem na troca do íon fosfato pelo íon carbonato e a substituição do cálcio por estrôncio e elementos de terras-raras. Ocorrem também substituições importantes do F^- por OH^- .

Uma técnica instrumental excelente para identificação de algumas substituições de íons na estrutura da apatita é a espectrometria de infravermelho – EIV. O espectro infravermelho das apatitas é caracterizado pelas vibrações dos grupos iônicos PO_4 , que em seu estado livre mostram uma simetria de grupo espacial representada por um tetraedro perfeito T_d .

De acordo com Ross (1974), o grupo PO_4 apresenta os seguintes modos de vibração: um estiramento simétrico A_1 (deformação axial ν_1), uma flexão E (deformação angular simétrica ν_2), um estiramento assimétrico F_2 (deformação axial assimétrica ν_3) e uma flexão F_2 (deformação angular assimétrica, triplamente degenerada ν_4).

A presença de outros cátions e ânions na estrutura cristalina das apatitas causa uma distorção do tetraedro PO_4 , levando à diminuição de sua simetria de T_d para C_s . Um exemplo é a hidroxiapatita, onde as distâncias das ligações são diferentes: $\text{P-O}_1 = 1,538\text{\AA}$; $\text{P-O}_2 = 1,537\text{\AA}$ e $\text{P-O}_3 = \text{P-O}_4 = 1,529\text{\AA}$.

Segundo dados apresentados por Ross (1974), as posições aproximadas das vibrações fundamentais do grupo PO_4 são as seguintes:

$$\nu_1 (A_1) = 938 - 980 \text{ cm}^{-1};$$

$$\nu_2 (E) = 358 - 420 \text{ cm}^{-1} \text{ (duplamente degenerada);}$$

$$\nu_3 (F_2) = 1017 - 1082 \text{ cm}^{-1} \text{ (degeneração tripla);}$$

$$\nu_4 (F_2) = 500 - 567 \text{ cm}^{-1} \text{ (degeneração tripla).}$$

O espectro infravermelho das apatitas pode apresentar outras vibrações dependendo de sua composição. A presença do grupo OH na estrutura da apatita (hidroxiapatita) causa o aparecimento de duas bandas adicionais: $3560\text{-}3570 \text{ cm}^{-1}$ (vibração axial) e $630\text{-}635 \text{ cm}^{-1}$ (vibração angular). Segundo Fowler (1974 *apud* Liu & Comodi, 1993) as vibrações de oscilação do OH são identificadas pela vibração axial em $3536\text{-}3572 \text{ cm}^{-1}$ e vibrações angulares em $670\text{-}750 \text{ cm}^{-1}$ e em $340\text{-}350 \text{ cm}^{-1}$.

Santos & Clayton (1995) e Comodi *et al.* (1999) verificaram que ocorre um deslocamento nas bandas de vibração do OH no espectro IV de uma hidroxiapatita pura e de uma flúor-hidroxiapatita. No caso da espécie pura, as bandas aparecem em $3571\text{-}3573 \text{ cm}^{-1}$ e $634\text{-}636 \text{ cm}^{-1}$ e, quando o flúor está presente, as vibrações ocorrem em $3536\text{-}3538 \text{ cm}^{-1}$ e $739\text{-}745 \text{ cm}^{-1}$, representando as vibrações da ligação O-H-F.

A presença do CO_3 na estrutura das apatitas (carbonato-apatita) também pode ser verificada pelo seu espectro IV. As posições de vibração dos íons carbonato são:

$$\nu_2 = 860 - 885 \text{ cm}^{-1} \text{ (deformação angular);}$$

$$\nu_3 = 1420 - 1465 \text{ cm}^{-1} \text{ (estiramento em carbonato-apatita do tipo B);}$$

$$\nu_4 = 1465 - 1542 \text{ cm}^{-1} \text{ (estiramento em carbonato-apatita do tipo A).}$$

Segundo Montel *et al.* (1977 *apud* Lenharo 1994), as carbonato-apatitas do tipo A são aquelas onde o íon CO_3^{2-} substituiu os íons F e OH na posição Z e as do tipo B são aquelas onde o íon PO_4^{3-} foi substituído por CO_3^{2-} na posição X. A carbonatação do tipo A foi encontrada apenas em hidroxiapatitas preparadas a altas temperaturas e em algumas apatitas de origem biológica. Em todas as outras apatitas, há um consenso de que o íon CO_3^{2-} está substituindo o PO_4^{3-} .

Segundo Liu & Comodi (1993), a presença de Si na estrutura da apatita pode ser identificada pelo aparecimento de bandas em 520 cm^{-1} e bandas próximas de 650 cm^{-1} , 930 cm^{-1} e 1160 cm^{-1} . Estas bandas refletem as vibrações Si-O na estrutura da apatita.

É bastante comum na literatura o estudo sobre o efeito das substituições iônicas nas modificações das propriedades ópticas da apatita, na estabilidade (solubilidade) e na sua estrutura (modificações nos parâmetros de cela unitária e conseqüentemente na densidade do mineral).

Deer *et al.* (1981) mencionam que os índices de refração são mais elevados para a cloroapatita e diminuem por substituição de OH e ainda mais pela substituição do F. A substituição parcial do P por C também provoca uma redução geral dos índices de refração e a entrada de Mn aumenta os índices de refração, causando também um aumento na densidade. A substituição do Ca por Sr, apesar de não alterar substancialmente os índices de refração, aumenta consideravelmente a densidade. Uma outra propriedade afetada pelas substituições do grupo (OH,F,Cl) é a birrefringência. Ela é mais baixa na cloroapatita (0,001), intermediária na fluorapatita (0,004) e mais elevada na hidroxiapatita (0,007). Algumas carbonato-apatitas podem apresentar birrefringências ainda mais elevadas.

McClellan & Lehr (1969) estudaram mais de 100 amostras de apatita, sendo essas principalmente de depósitos sedimentares (francolita) de todo o mundo e algumas apatitas de depósitos ígneos e metamórficos. Através de modelos matemáticos, mostraram que existe uma correlação entre as constantes de cela unitária e a composição química das apatitas, sendo isto bastante útil no exame das diferentes

possíveis combinações de substituições que podem ocorrer. Foi verificado que a substituição do fosfato por carbonato na estrutura da apatita resulta em um decréscimo não linear do parâmetro “a”. Segundo Náray-Szabó (1930 *apud* McClellan & Lehr, 1969) os parâmetros “a” e “c” para uma fluorapatita pura são 9,37Å e 6,88Å, respectivamente. McClellan & Lehr (*op. cit.*) mostraram que a substituição do íon fosfato pelo íon carbonato diminui o parâmetro “a” de 9,37Å para 9,32Å, com um aumento da razão molar CO₃/PO₄ de zero para 0,3.

A substituição inicial do fosfato por carbonato causa uma mudança maior no parâmetro “a” do que as substituições subsequentes, pois essas ocorrem em uma estrutura já altamente substituída. A relação não linear obtida por esses modelamentos mostra também que existe um limite para a quantidade de substituição, sem ocorrer a ruptura da estrutura da apatita. Uma indicação física para o valor limite dessa substituição pode ser visualizada pelo decréscimo geral no tamanho dos cristais com o aumento da substituição, sugerindo que acima de um certo nível de substituição os cristais de francolita não podem mais crescer. O nível máximo de substituição de carbonato encontrado é de 6,3% de CO₂.

McClellan & Lehr (1969) também verificaram que o valor do parâmetro “c” aumenta com o ajuste da estrutura da apatita para incorporar o flúor nos sítios de oxigênio em adição ao flúor presente nos sítios dos canais hexagonais. Porém, a variação do parâmetro “c” é menor e menos significativa (varia dentro dos limites 6,88Å - 6,9Å). O excesso de flúor é significativo com o aumento da substituição do íon fosfato pelo íon carbonato. Isso ocorre porque quando um íon carbonato substitui um íon fosfato, o sítio vazio do oxigênio é ocupado por um íon flúor. Este arranjo incomum carbonato-flúor preserva a eletroneutralidade e completa a coordenação dos cátions na estrutura da apatita. A substituição do íon fosfato pelo íon carbonato é muitas vezes acompanhada por substituições do cálcio por sódio e magnésio, para manter a eletroneutralidade da apatita.

A substituição do íon PO₄³⁻ por CO₃F³⁻ verificada nos estudos de McClellan & Lehr (1969) e McArthur (1985) é rejeitada por alguns autores (Carlstrom & Glas, 1963 *apud*

McClellan, 1980), sendo sugerida a substituição por $\text{CO}_3\text{H}_2\text{O}^{2-}$. Regnier *et al.* (1994), através de estudos de EIV, espectrometria de ressonância magnética nuclear e cálculos de mecânica quântica mostraram que o excesso de F incorporado na apatita durante a substituição do íon CO_3^{2-} por PO_4^{3-} deve estar preferencialmente localizado nos espaços intersticiais do que substituindo o sítio vazio de O.

Estudos de laboratório (Kreidler, 1967 *apud* McClellan, 1980) sobre a avaliação dos efeitos das substituições nos valores da cela unitária das apatitas têm mostrado que as substituições de cátions nos “sítios A” apresentam o maior efeito sobre os parâmetros de rede e que as dimensões de “a” e “c” são afetadas igualmente. As substituições nos “sítios X” possuem um efeito menor (60% daqueles em A) nos valores da cela unitária, porém, eles aumentam os efeitos de anisotropia, uma vez que o parâmetro “a” sofre variações duas vezes maiores do que “c”. As substituições nos “sítios Z” apresentam o menor efeito sobre os valores da cela unitária e causam variações anisotrópicas, quando “a” aumenta e “c” diminui, ou vice-versa.

A substituição na posição do cátion Ca por um elemento maior (Sr, Ba, Pb, Ce, La) possui maior efeito e provoca aumento simultâneo dos dois parâmetros (estrôncio-flúor-apatita = 9,72Å e 7,28Å – Kriedler, 1967 *apud* Lacout *et al.*, 1998). A fixação do ânion bivalente CO_3 na posição do ânion trivalente PO_4 causa diminuição do eixo “a” e aumento do eixo “c”. Já a substituição do ânion F por um ânion maior possui o menor efeito e causa variações anisotrópicas com expansão do eixo “a” e contração do eixo “c” (hidroxi-apatita = 9,43Å e 6,88Å), sendo o parâmetro “a” mais sensível às mudanças do que o parâmetro “c”. Estudos de El Feki *et al.* (2000) mostraram também que a substituição do íon CO_3 na posição do ânion trivalente PO_4 em hidroxiapatitas causa diminuição do eixo “a” e aumento do eixo “c”. O parâmetro “a” passa de 9,43Å para 9,32 Å e o parâmetro “c” aumenta de 6,88 Å para 6,92 Å.

Santos & Clayton (1995) utilizaram a espectrometria de infravermelho por transformada de Fourier para determinar o conteúdo de CO_3^{2-} presente na estrutura de apatitas provenientes de carbonatitos e rochas silicáticas alcalinas, em amostras de Jacupiranga-SP e Tapira-MG. Os resultados mostraram que o conteúdo de CO_2 nas apatitas parece

depender de seu ambiente geológico de formação, variando entre 0,06 a 0,8%. Os maiores teores de CO₂ foram observados em apatitas relacionadas com processos metassomáticos (femitização). Santos & Clayton (1995) também mostraram que experimentos realizados em apatitas sintéticas a altas temperaturas sugerem que o carbonato substitui o íon PO₄³⁻ na estrutura da apatita, conforme já verificado por alguns autores citados anteriormente. Porém, em seus experimentos não ficou claro se existe uma simples substituição do CO₃²⁻ por PO₄³⁻ ou se outros elementos estão arranjados na estrutura a fim de se manter o balanço de cargas.

Segundo McClellan (1980), as relações estequiométricas para uma fluorapatita pura são CaO/P₂O₅ = 1,318 e F/P₂O₅ = 0,089. No caso da francolita esses valores aumentam e são CaO/P₂O₅ = 1,621 e F/P₂O₅ = 0,148.

Vários estudos têm mostrado que as francolitas são mais instáveis (mais solúveis) que as fluorapatitas, devido à substituição de PO₄³⁻ por CO₃²⁻, que possui um efeito desestabilizador em sua estrutura (Regnier *et al.*, 1994). Verifica-se, então, que a substituição do íon PO₄³⁻ por CO₃²⁻, além de diminuir o teor de P₂O₅, aumenta a reatividade das apatitas. A fluorapatita é a menos solúvel (mais estável) e a francolita é a mais solúvel, estando a hidroxiapatita na posição intermediária. A metaestabilidade das apatitas tem várias implicações geológicas, podendo ser citada a alteração sistemática de francolita para fluorapatita como resultado de intemperismo, metamorfismo e diagênese (McClellan, 1980 e McArthur, 1985).

É importante mencionar que os processos de alteração nas apatitas causam modificações em sua composição. A evolução supergênica dos fosfatos primários, com lixiviação e fixação do fósforo e a subsequente neoformação de estruturas supergênicas depende das condições locais (aspectos climáticos e topográficos) e das características texturais e mineralógicas da rocha original, que irão determinar as condições físico-químicas do meio e o comportamento dinâmico do fósforo.

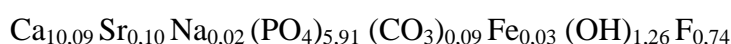
Segundo Kahn (1988), pode-se adotar o comportamento do fósforo descrito para depósitos sedimentares associados a calcários e margas (The British Sulphur

Corporation Limited, 1980) como modelo para seu comportamento no perfil de alteração dos maciços alcalino-carbonatíticos. Isso pode ser descrito da seguinte forma: inicialmente, a água levemente ácida permitiria a rápida dissolução dos carbonatos, originando uma solução levemente alcalina. A apatita (pouco solúvel em meio alcalino) manter-se-ia estável, propiciando condições para sua concentração residual. Nos horizontes superiores, onde os carbonatos já foram totalmente solubilizados, o meio seria um pouco mais ácido, favorecendo a dissolução da apatita. O fósforo solubilizado seria em parte fixado por outros cátions em solução (Ba, Al, Fe, Sr, etc.) dando origem aos fosfatos secundários, e em parte migraria para níveis inferiores do perfil, eventualmente formando apatita supergênica, ao atingir horizontes mais alcalinos. Verifica-se, então, que o pH das águas pluviais e do nível freático são os principais fatores condicionantes da solubilização e reprecipitação da apatita no perfil de intemperismo e da formação dos fosfatos secundários.

Soubiès *et al.* (1991) mostrou que a apatita primária de Tapira-MG sofre dissolução parcial no perfil de intemperismo formando uma apatita secundária enriquecida em flúor e empobrecida em ETR, Na, Si e Sr. McArthur (1978, 1985) estudou francolitas sedimentares em diversas situações de exposição e verificou que o intemperismo reduz as concentrações de Na, Sr, SO_4^{2-} e CO_3^{2-} , presentes originalmente na francolita. Este autor mostrou que, durante os processos de alteração, a francolita (carbonatofluorapatita) sofre uma descarbonatação e passa para fluorapatita. Esse autor ressaltou que o Sr é o elemento mais afetado pelo intemperismo, evidenciando sua mobilidade em relação à estrutura da apatita. Isso foi explicado pelo fato de que a substituição do Sr na estrutura da apatita não requer substituições acopladas para manter o balanço de cargas, como é o caso do Na, CO_3 e SO_4 , ficando o Sr livre para sair e entrar na sua estrutura.

Em geral, os trabalhos existentes mostram que o teor de CO_3^{2-} pode diminuir (geralmente em depósitos de apatitas ricas em CO_3^{2-} – fosforitos marinhos) ou aumentar (caso das alterações de apatitas pobres em CO_3^{2-} – apatitas de rochas ígneas) em função dos processos de alteração.

Através de estudos detalhados de caracterização de concentrados de apatita de Tapira (Cruz & Cheney, 1976), utilizando análises químicas, microscopia óptica, difração de raios-X, espectrometria de infravermelho e microsonda, a apatita foi classificada como sendo uma carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita. O radical OH^- substitui parcialmente o flúor; o Sr e o Na substituem parcialmente o cálcio; e o carbonato substitui parcialmente o PO_4^{3-} . A fórmula calculada para a apatita foi:



As dimensões da cela unitária, obtidas por difração de raios-X, são 9,402Å do parâmetro “a” e 6,891Å do parâmetro “c”. Os índices de refração medidos pelo método de imersão são de 1,639 (epsilon) e 1,643 (omega).

Lenharo (1994) estudou apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfatos, através de uma caracterização mineralógica detalhada. Em Tapira, foram reconhecidas apatitas primárias (apatitas contidas nas rochas originais e também no manto de intemperismo, como mineral eluvial, apresentando algumas modificações na superfície, como sulcos e estrias de dissolução, originando um aspecto “mamelonar”) e apatitas secundárias ou reprecipitadas (que ocorrem nas porções mais intemperizadas).

As apatitas primárias mostram hábito granular, subordinadamente prismático, superfície lisa ou irregular e apresentam intercrescimento com carbonatos e micas e, comumente, possuem inclusões. A apatita primária foi identificada como estrôncio-hidroxi-flúor-apatita. As apatitas secundárias ocorrem de três formas: a) em prismas radiais concêntricos, constituindo leques em camadas sobrepostas; b) microcristalina, formando agregados com aspecto rugoso associados a óxido-hidróxidos de ferro e c) criptocristalina, recobrando os grãos de apatita primária com tendência de precipitação orientada, produzindo um aspecto geral em rede. As apatitas secundárias apresentam composição carbonato-flúor-apatita.

Os estudos de Lenharo (1994) sobre as dimensões da cela unitária das apatitas primárias de Tapira-MG, através de difração de raios-X, mostraram valores médios de

“a” = 9,406Å e “c” = 6,892Å. A causa da expansão dos eixos foi relacionada à substituição do Ca por Sr, em função dos teores de SrO relativamente altos (0,75-1,10%), encontrados nas análises químicas. A maior expansão do eixo “a” em relação ao eixo “c” foi explicada pela provável substituição do F por OH, reforçada pela relação F/P₂O₅ bem inferior ao valor para a fluorapatita ideal. No caso das apatitas secundárias, os valores médios de cela unitária (“a” = 9,371Å e “c” = 6,873Å) foram considerados imprecisos, devido à íntima associação com as apatitas primárias.

Rodrigues (1992) já havia determinado os valores das dimensões da cela unitária para a apatita primária de Tapira-MG, através de difração de raios-X, sendo os resultados encontrados semelhantes aos obtidos por Cruz & Cheney (1976) e Lenharo (1994). Os valores obtidos foram “a” = 9,402Å e “c” = 6,893Å.

2.3.3 – FLOTABILIDADE

A flotação é um processo de concentração mineralógica baseado na adesão de uma bolha de ar a uma partícula mineral parcialmente hidrofóbica. Como a maioria dos minerais são hidrofílicos, para que a adesão ocorra é necessária a utilização de surfatantes que irão adsorver-se às suas superfícies, tornando-os hidrofóbicos.

Estudos de diversos autores incluindo Assis *et al.* (1985) e Assis *et al.* (1987) têm mostrado que as características intrínsecas dos minerais podem ajudar na previsão do comportamento de um minério na flotação. A intensidade com que os minerais interagem com coletores aniônicos na flotação pode ser modificada pela heterogeneidade química e física (granulação, rugosidade superficial e cristalinidade) das partículas minerais, resultantes de processos geológicos diferenciados. Silva *et al.* (1985) estudaram apatitas de vários depósitos brasileiros com relação à influência da heterogeneidade, grau de cristalinidade e rugosidade na sua flotabilidade. Os resultados encontrados também mostraram que existe um efeito marcante da heterogeneidade e da rugosidade superficial das partículas na flotabilidade, porém não foi observada influência da cristalinidade. Por outro lado, Rodrigues (1992), Rodrigues & Brandão (1993) e Brandão & Rodrigues (1997) também estudaram apatitas de diversos depósitos

e verificaram que existe uma dependência entre o grau de cristalinidade e a flotabilidade das apatitas. Segundo estes autores, para uma apatita com baixa cristalinidade atingir os mesmos níveis de flotabilidade de uma apatita altamente cristalina, torna-se necessário um aumento considerável da concentração do coletor.

Os coletores mais utilizados na flotação dos minerais levemente solúveis (isto é, minerais com solubilidade moderada em água) são os ácidos graxos de cadeia longa e seus sabões alcalinos, especialmente, o ácido oléico e o oleato de sódio. Porém, em função da influência das características intrínsecas dos minerais na flotação e da variabilidade mineralógica encontrada na natureza, sabe-se que os reagentes adotados para a recuperação de um mineral de um depósito específico muitas vezes não são efetivos na recuperação do mesmo mineral de um outro depósito. Isso é válido também para zonas diferentes dentro de um mesmo depósito. Um exemplo disso é a Mina de Tapira-MG, onde o circuito de beneficiamento do minério fosfatado é separado em granulado (rico em carbonatos) e friável (rico em micas), em função das características diferentes apresentadas por esses minérios. No circuito granulado, a seletividade melhor foi obtida utilizando-se uma mistura de 60% de óleo vegetal saponificado, mais 40% de coletores sintéticos (sulfossucinatos e sulfossucinamatos). Já no caso do minério friável, é utilizado 85% de óleo vegetal saponificado, mais 15% de coletores sintéticos (sulfossucinatos e sulfossucinamatos). Porém, deve ser ressaltado que essa proporção pode ser modificada conforme a pilha de minério.

A flotabilidade dos minerais levemente solúveis varia também de acordo com as condições experimentais empregadas (pH, concentração do coletor, etc.).

Assis *et al.* (1985) e Assis *et al.* (1987) ao estudarem apatita, calcita e dolomita de Jacupiranga (SP) e Itataia (CE) verificaram que a granulação, forma do cristal e a rugosidade superficial modificavam o comportamento destes minerais na flotação, como mencionado na literatura. Os minerais que possuíam maior tamanho do grão, formas subédricas e euédricas e menor rugosidade apresentaram maior flotabilidade. No caso da apatita, foi verificado também que um aumento no teor de ferro em sua estrutura diminuiu sua flotabilidade.

Estudos de Lenharo (1994) em Tapira verificaram que a apatita primária, identificada como estrôncio-hidroxi-flúor-apatita, destaca-se pelos índices elevados de cristalinidade e flotabilidade, reduzidos apenas por impregnações superficiais associadas a processos intempéricos. Já as apatitas secundárias apresentam composição de carbonato-flúor-apatita e graus de cristalinidade e flotabilidade mais baixos, em função de suas características morfológicas, associadas a intercrescimento e recobrimento por oxihidróxidos de ferro e outras impurezas.

Além das características químicas e físicas da apatita que interferem no processo de seu beneficiamento mencionadas anteriormente, um outro problema encontrado na flotação da apatita é a seletividade em relação aos minerais da ganga. A contaminação do concentrado com minerais da ganga (especialmente carbonatos – calcita e dolomita) leva a um aumento no consumo de ácido sulfúrico no estágio de produção do ácido fosfórico, o que acarreta um grande aumento nos custos operacionais. Deve-se, então, procurar as condições que forneçam a melhor seletividade no processo.

Segundo Kahn (1988), existem algumas variáveis que interferem no processo de flotação da apatita e estão relacionadas às características físicas do minério. Alguns desses fatores são:

- impregnação superficial da apatita por óxidos-hidróxidos de ferro, onde os grãos com maior intensidade de recobrimento superficial não respondem adequadamente ao processo;
- os carbonatos (calcita e dolomita) e outros minerais portadores de cálcio, quando presentes, tendem a ser coletados juntamente com a apatita, diluindo o concentrado, uma vez que aumentam os elementos indesejáveis, tais como Mg (contido na dolomita, tremolita e micas);
- presença de silicatos ferromagnesianos (principalmente vermiculita e minerais argilo-limoníticos de granulção fina) que tendem a ser parcialmente coletados com a apatita, elevando os teores de Mg, Fe e Al no concentrado;

- liberação inadequada da apatita, acarretando maiores perdas de fosfato. Este fator e a impregnação superficial da apatita por óxidos-hidróxidos de ferro podem ser reduzidos com uma moagem em granulometria mais fina.

2.4 – TÉCNICAS E MÉTODOS INSTRUMENTAIS DE CARACTERIZAÇÃO

O processo de caracterização mineralógica tem por objetivo conhecer a composição e principais propriedades de um material e envolve a análise conjunta de dados obtidos por diversas técnicas instrumentais. Esta etapa é de fundamental importância para se avaliar a possibilidade de uso industrial de tal material, assim como o estabelecimento das operações de beneficiamento.

A seguir serão apresentadas as principais características dos métodos instrumentais que foram utilizados neste trabalho.

2.4.1 – DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Este método é utilizado principalmente para a identificação de substâncias cristalinas. Isso é possível pelo fato dos átomos dentro dos cristais possuírem um arranjo ordenado e regular e pela existência de uma relação entre o comprimento de onda dos raios-X difratados e o espaçamento entre os planos dos cristais.

A difração de raios-X pelos cristais resulta de um processo em que os raios X são dispersos pelos elétrons dos átomos da amostra sem mudanças de comprimento de onda (Formoso, 1984). Nesse caso, a interação entre o fóton do feixe incidente e o elétron da amostra é elástica, ou seja, sem perda de energia (fenômeno conhecido por espalhamento coerente ou espalhamento de Rayleigh).

Estudos de William Henry Bragg & William Lawrence Bragg mostraram que usando um dado comprimento de onda (λ), somente sob certas condições, se produz uma difração a partir de uma família de planos cristalinos paralelos. Essas condições devem satisfazer a equação abaixo, conhecida como lei de Bragg.

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

onde: n = número inteiro (1, 2, 3 ...n);
 λ = comprimento de onda;
 d = distância entre os planos sucessivos, paralelos;
 θ = ângulo entre o feixe difratado e o plano cristalino.

Verifica-se então, pela equação, que para um dado espaçamento de um comprimento de onda λ , as difrações irão ocorrer somente para os ângulos de θ que a satisfaçam. Vale ainda citar, que a difração segue a direção segundo a qual há interferência construtiva da radiação X. Para que essa interferência ocorra os seguintes requisitos devem ser satisfeitos: mesmo comprimento de onda λ (espalhamento sem perda de energia); mesma direção de propagação e as ondas devem estar em fase.

Existem dois métodos de difração de raios-X: o método do monocristal e o método do pó, esse último utilizado em sistemas policristalinos. No caso do estudo de monocristal existem os métodos de Laue (policromático) e do cristal rotatório ou oscilatório (monocromático) (Cullity, 1967).

O método do pó é ideal para a identificação de fases minerais e utiliza radiação monocromática (λ constante). Neste método, o material analisado deve ser reduzido a um pó, com tamanho mínimo e máximo das partículas. Em geral, utiliza-se como diâmetro máximo 20 μm e como diâmetro mínimo 2 μm . É importante que a amostra não seja muito pulverizada, pois a redução excessiva da granulometria pode diminuir sua cristalinidade (amorfização). Além do tamanho das partículas, a amostra no método do pó necessita de outros pré-requisitos, tais como orientação aleatória e número mínimo de cristalitos, para que todas as famílias de planos cristalográficos possam se manifestar e, por último, a amostra deve ser homogênea, para que não ocorra distorção na intensidade dos picos (Formoso, 1984; Brandão, 2000).

A difração de raios-X é empregada não só para identificação de substâncias inorgânicas, como também é utilizada na determinação do grau de cristalinidade, parâmetros de cela unitária, tamanho e orientação dos cristais e em análise quantitativa (Porphírio & Barbosa, 1998).

2.4.2 – ANÁLISES QUÍMICAS

2.4.2.1 – VIA ÚMIDA

As técnicas da via úmida utilizadas neste trabalho foram a gravimetria, volumetria ou titulometria e espectrometria de absorção molecular (colorimetria).

Na gravimetria, separa-se o elemento a ser analisado através de reações químicas. Seu peso é obtido na forma de elemento ou como composto definido do elemento sob uma forma tão pura quanto possível. O elemento ou composto é separado de uma porção da substância que está sendo analisada. Para obtenção de seu peso, são necessárias condições apropriadas para desenvolvimento das reações químicas e operações de separação. Os métodos mais importantes de separação do elemento ou composto que o contém são: precipitação, volatilização e desprendimento, eletroanalíticos e métodos de extração e cromatográficos (Vogel, 1981).

A titulometria ou volumetria é um método de análise quantitativa executado com a determinação do volume de uma solução, cuja concentração é exatamente conhecida (solução padrão), requerido para reagir quantitativamente com a solução da substância a ser determinada (Vogel, 1981). O peso da substância a ser determinada é calculado do volume da solução padrão consumido, aplicando-se as leis da estequiometria. O ponto final da titulação é mostrado por uma propriedade facilmente reconhecida visualmente (indicador específico que muda de cor) ou por instrumentos sensíveis à potenciometria ou milivoltagem. As reações empregadas na análise de titulometria podem ser divididas em quatro classes (Vogel, 1981):

- Reações de precipitação: dependem da combinação de íons para formar um precipitado (compostos pouco solúveis). Nenhuma mudança de estado de oxidação ocorre nesse processo;
- Reações de neutralização, ou acidimetria e alcalimetria: incluem a titulação de espécies ácidas com solução padrão alcalina (alcalimetria) e titulação de espécies básicas com uma solução padrão de ácido (acidimetria);
- Reações de formação de complexos: dependem da combinação de íons, outros que não o íon hidrogênio e o íon hidróxido, para formar um íon ou composto levemente dissociado. O ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) é um reagente muito importante para as titulações com formação de complexo;
- Reações de oxidação-redução: são todas as reações que envolvem uma mudança de número de oxidação ou transferência de elétrons entre as substâncias que reagem entre si. As soluções padrões são agentes oxidantes ou redutores. Cita-se como exemplo a determinação do teor de ferro total baseada na redução do ferro (III) pelo cloreto estanoso e titulação do ferro (II) utilizando-se solução padrão de dicromato de potássio, em presença de difenilamina-sulfonato de bário como indicador do ponto final (dicromatometria).

A espectrometria de absorção molecular (colorimetria) é um método de determinação quantitativa, que compara a densidade de cor da amostra com a de padrões. O elemento a ser quantificado é convertido em uma solução colorida, onde a intensidade da cor será proporcional à concentração. Esta cor sofrerá absorção diferencial na região do visível para um comprimento de onda específico, sendo possível determinar a quantidade do elemento. Esse método é bastante sensível para determinação de pequenas quantidades de substâncias em solução, possui boas precisão e exatidão e apresenta a vantagem de requerer um equipamento simples (espectrofotômetro).

2.4.2.2 – TÉCNICAS ANALÍTICAS INSTRUMENTAIS

Todas as técnicas instrumentais utilizadas neste trabalho baseiam-se no mesmo princípio, isto é, excitação do átomo (elemento) a ser dosado e quantificação da resposta obtida, seja por emissão ou absorção atômica. Serão empregados os seguintes métodos:

fotometria de chama, absorção atômica (AAS), espectrometria de emissão por plasma induzido – ICP, espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) e espectrometria de energia de raios-X por excitação de raios gama (KEVEX).

A FOTOMETRIA DE CHAMA é um método baseado na medida da intensidade da radiação emitida pelo elemento analisado quando sua solução é nebulizada em uma chama. Este método é utilizado para análise de K, Na e Li.

A ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA (AAS) é um método baseado na medida da energia absorvida pela excitação do átomo nas zonas do visível e ultravioleta (Gonçalves, 1983). Faz-se passar uma luz do comprimento de onda de ressonância através de uma chama contendo átomos no estado fundamental da solução com o elemento a ser analisado. Uma parte dessa luz será absorvida e a extensão da absorção é proporcional ao número de átomos no estado fundamental presentes na chama. Uma das características da fonte de emissão é que ela contém o elemento a ser analisado na chama. As lâmpadas de cátodo ôco contêm no cátodo o elemento a ser analisado na chama; deste modo, a amostra vaporizada na chama será irradiada pela lâmpada cujo cátodo possui o elemento a ser analisado.

A técnica de absorção atômica é eficiente para dosagem de quase todos os metais, na faixa de ppm. Podem ser dosados cerca de 60 a 70 elementos, variando o grau de dificuldade, dependendo do elemento.

A ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO POR PLASMA INDUZIDO (ICP) é uma técnica analítica multielementar, mostrando alta sensibilidade e limites de detecção muito baixos, quando comparados com outras técnicas instrumentais. Seu princípio baseia-se na excitação atômica dos elementos em solução por meio de um plasma de argônio, sustentado por um meio magnético gerado por uma bobina de rádio-freqüência. O plasma pode atingir temperaturas de até 10.000°C, diminuindo os efeitos da matriz, uma vez que não favorece as reações químicas (Porphírio & Barbosa, 1998) e produzindo uma quantidade de linhas de emissão muito maior do que em outros

sistemas, sendo essa energia suficiente não só para excitar os átomos mas também os íons que chegam ao plasma.

A amostra é solubilizada e após passar por um nebulizador extremamente fino (dentro de um tubo de vidro), as gotículas maiores são drenadas e descartadas, enquanto as menores passam pelo plasma de argônio.

Os limites de detecção são excelentes, variando de 1 a 20ppm, para os piores elementos, como As, Cd, Sn, W, Mo, Bi e In e chegando a atingir valores de ppb em solução para os demais elementos (Ratti, 2001).

O plasma é bastante útil na determinação de elementos de terras-raras, uma vez que podem ser analisados diretamente em algumas amostras, como por exemplo, em carbonatitos, areias monazíticas e solos lateríticos (Porphírio & Barbosa, 1998).

A ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX) é uma técnica que pode ser utilizada tanto para identificação dos elementos químicos em uma amostra, quanto para a quantificação de suas concentrações. O princípio básico dessa técnica consiste na dispersão da radiação X por difração em um cristal analisador.

A fonte de raios-X é um tubo, geralmente de ródio, com uma janela por onde sai o feixe que incide na amostra. Os raios emitidos pela amostra são colimados e incidem em um ou mais cristais, que apresentam valores de d (espaçamento interplanar) bem conhecidos. Os cristais giram fazendo com que os feixes difratados se espalhem, obtendo-se um espectro de varredura.

Através da equação de Bragg ($n\lambda = 2d\sin\theta$), calcula-se o valor de λ (comprimento de onda). Esse valor é característico de cada elemento químico e é refletido nos picos do espectro de emissão de raios-X, sendo então possível identificá-los.

A preparação de amostras para a FRX é bastante simples, podendo ser analisados materiais sólidos (pós compactados ou superfícies polidas) ou líquidos. As formas mais comuns de preparação de amostras são: polimento da superfície, prensagem de pós com

aglomerantes e fusão para eliminação de interferências e obtenção de pastilhas vítreas. Dentre as diversas vantagens desta técnica, pode-se citar a alta exatidão, boa reprodutibilidade dos dados, limite de detecção baixo (da ordem de partes por milhão), ampla capacidade de detecção e caráter não destrutivo (Dutra & Gomes, 1984).

Vale também mencionar que a interpretação do espectro de FRX é bem mais simples do que o espectro obtido por difração de raios-X, devido à existência de bem menos elementos (92) do que o universo amplo das fases minerais. Desse modo, a análise qualitativa na FRX é geralmente fácil e confiável. A análise semiquantitativa pode ser realizada pela comparação e por cálculos elaborados envolvendo as alturas dos picos com os espectros-padrão e a análise quantitativa é realizada através da medida das intensidades das linhas do espectro característico dos elementos procurados e do relacionamento destas intensidades com sua concentração na matriz, onde encontram-se dispersos, por meio de curvas de calibração (Brandão, 2000).

NA ESPECTROMETRIA DE ENERGIA DE RAIOS X POR EXCITAÇÃO DE RAIOS GAMA (KEVEX), os raios gama, provenientes de uma fonte radioativa de amerício 241 com 100 mCi (milicurie) de atividade, atingem a amostra e interagem com seus átomos provocando excitação e emissão de fótons de raios-X. O sistema possui um detector de estado sólido Si (Li), que converte a energia de raios-X em pulsos elétricos com amplitude diretamente proporcional à energia do fóton capturado. É então gerado um espectro de picos das energias dos fótons dos diversos elementos presentes na amostra. Determina-se a intensidade das linhas de raios-X características, para se calcular as concentrações elementares.

A sensibilidade do método depende do tempo de contagem para cada análise. Ela é da ordem de poucos microgramas por grama e pode ser obtida para elementos com número atômico (Z) na faixa $40 \leq Z \leq 68$. A técnica é bastante eficiente na determinação da presença de U, Th e terras-raras. Os limites detectáveis são: para La, Ce, Pr e Nd, teor acima de 10 ppm; para Sm, Eu, Gd e Tb, teor acima de 40 ppm; para Dy, Ho e Er, teor acima de 100ppm; e para Th e U, teor acima de 200ppm (Barbosa, 1985 e Barbosa & Pereira, 1995).

2.4.2.3 – POTENCIOMETRIA

A potenciometria é um método que utiliza uma medida do potencial de eletrodo para determinar a concentração de uma espécie iônica em solução (Vogel, 1981; Skoog *et al.*, 1998). Baseia-se no princípio de que todo elemento químico desenvolve um potencial em uma solução aquosa e este potencial pode ser medido utilizando-se o eletrodo específico do elemento, acoplado a um equipamento de precisão para milivoltagem. O potencial medido é convertido em concentração, através de um gráfico mono-log ou semi-log.

2.4.3 – ESPECTROMETRIA DE INFRAVERMELHO (EIV)

A espectrometria de infravermelho (EIV) é um método analítico que tem ampla aplicação na química orgânica e atualmente, com o desenvolvimento dos espectrômetros a transformada de Fourier, também no estudo de minerais e compostos inorgânicos. Ela fornece resultados qualitativos e quantitativos e pode ser utilizada na análise de amostras gasosas, líquidas e sólidas (cristalinas e amorfas) (Brandão *et al.*, 1990; Skoog *et al.*, 1998).

No caso de espécies mineralógicas, a EIV pode ser uma técnica fundamental, fornecendo a “impressão digital” dos minerais e geralmente é utilizada como técnica complementar a outros métodos analíticos. O espectro de infravermelho de um mineral, que é uma propriedade característica, fornece informação básica sobre as ligações interatômicas e também sobre a estrutura do cristal. A EIV permite, em certos casos, melhores identificações de minerais de baixa cristalinidade, com altos índices de substituição no retículo ou materiais amorfos.

O princípio do método consiste na vibração dos átomos constituintes das moléculas. Esses átomos vibram uns em relação aos outros e as ligações químicas funcionam como molas que os conectam. Cada molécula possui seu conjunto de frequências vibracionais, porém diferentes moléculas apresentam diferentes conjuntos de vibrações. A frequência de vibração das ligações químicas dos compostos orgânicos e minerais estão na mesma

faixa de frequência da região espectral do infravermelho, fazendo com que a EIV tenha grande importância como método analítico. Desse modo, as bandas de absorção que aparecem no espectro IV são produzidas pela interação da radiação IV com as vibrações dos átomos ou rotações do sistema molecular (Chia & Ricketts, 1988). Essas bandas são utilizadas na identificação dos compostos orgânicos, inorgânicos e minerais, especialmente na faixa entre 4000 e 600 cm^{-1} .

Os instrumentos de IV medem o espectro de vibração de uma amostra, através da passagem da radiação IV por ela e registram quais os comprimentos de onda que foram absorvidos e qual a extensão desta absorção. Uma vez que a quantidade de energia absorvida também é função do número de moléculas presentes, o instrumento IV fornece informação tanto qualitativa quanto quantitativa. O espectro obtido é uma propriedade fundamental da molécula e pode ser utilizado tanto para caracterizar a amostra como também para determinar sua concentração.

A obtenção de um espectro IV de boa qualidade está intimamente relacionada com os métodos e técnicas de preparação das amostras. A escolha do método depende principalmente do estado físico (gasoso, líquido ou sólido) da amostra, sendo mais comum a utilização do método da pastilha de sal (em geral KBr) ou da reflectância difusa.

No caso do método da pastilha de sal (KBr), a técnica consiste em pegar uma amostra sólida finamente pulverizada e dispersá-la com o haleto alcalino, seguido de sua prensagem, formando uma pastilha transparente (em geral com 13mm de diâmetro e espessura máxima de 1mm). A quantidade de material utilizado é geralmente 2mg de amostra para 200 a 300mg de sal. Para preparação das pastilhas utiliza-se um molde evacuável, de aço inoxidável, uma prensa de laboratório de até 12t, uma bomba de vácuo capaz de atingir 1 a 2mm Hg.

O método da reflexão difusa consiste em coletar o feixe da radiação IV que foi refletido difusamente pelas partículas da amostra, não sendo considerados os componentes da radiação transmitido e refletido especularmente. Este esquema utiliza 5 espelhos planos,

onde um deles (M1) possui dupla face. O único reflector esférico (M4) possui o papel de focar o feixe incidente na amostra e também de coletar o feixe refletido com um poder de condensação de 8x. O ângulo de incidência é de 38°, reduzindo o componente de reflectância especular do KBr (ou KCl) a não mais do que 5%. A preparação da amostra é bastante simples, necessitando-se de quantidades extremamente pequenas do pó da amostra (até alguns μg), que são compactadas sobre um leito de KBr (ou KCl, CsI), sem necessidade de prensa e bomba de vácuo. Caso seja possível, para se reduzir as distorções devido à reflectância especular, a amostra deve ser triturada até um tamanho de partículas próximo ao comprimento de ondas da radiação.

A identificação de um mineral através de um espectro IV é feita comparando-se um espectro de uma amostra padrão (geralmente obtidos através das fontes de referência existentes para espectros de IV, obtidas na literatura ou através de fontes comerciais) com o espectro da amostra a ser identificada. Se, por exemplo, a amostra apresentar mais de uma fase mineral, a identificação de cada componente individual, através do espectro IV, depende da disponibilidade de espectros de referência para cada componente (Brandão *et al.*, 1990).

2.4.4 - MICROSCOPIA ÓPTICA

O microscópio óptico utiliza luz visível e é o instrumento mais prático e simples para observação de estruturas na faixa entre 1 cm e 1 μm .

Através do microscópio óptico é possível identificar os minerais mais comuns, revelar suas características e estabelecer as relações entre os constituintes de uma amostra. Pode-se também fazer estudos quantitativos, através da contagem dos grãos por pontos, linhas ou áreas, obtendo assim a composição percentual das fases.

Em geral, os tipos de instrumento mais comuns são o microscópio óptico de luz transmitida (MOLT), onde a luz atravessa a amostra e o microscópio óptico de luz refletida (MOLR), onde a luz incidente sobre a amostra é refletida. A luz polarizada pode ser utilizada tanto no microscópio óptico de luz transmitida como no microscópio

óptico de luz refletida, sendo o primeiro utilizado para minerais transparentes e o segundo para minerais opacos (Craig & Vaughan, 1994).

A imagem nesse instrumento é formada por dois conjuntos de lentes chamadas de objetiva e ocular. A objetiva está mais próxima ao objeto e forma uma imagem intermediária ampliada, que é real. A partir dessa imagem intermediária, a ocular forma uma imagem virtual final, com uma ampliação maior. Existem ainda oculares de projeção, que projetam a imagem final (Habesch, 1996).

Podem ser feitos dois tipos de observação em um microscópio polarizador: observação ortoscópica, que fornece ao olho uma imagem virtual realística e observação conoscópica, que mostra as figuras de interferência representantes de um padrão ótico, causado pelo comportamento da luz em cristais individuais.

A escolha do método de preparação da amostra a ser estudada ao microscópio depende muito do tipo de material. Os métodos mais utilizados em mineralogia são:

- preparações não fixas diretamente em lâminas cobertas por lamínulas, por imersão dos grãos geralmente em óleo Nujol;
- lâminas delgadas cobertas por lamínula, utilizadas para estudos petrográficos ou montagem de grãos. No caso de estudo de grãos, é feita sua montagem prévia em resinas, corte da amostra resinada em fatia, colagem da lâmina de vidro e desbaste até atingir a espessura de 0,03mm, seguido do recobrimento com lamínula;
- lâminas delgadas polidas obtidas pelo polimento das lâminas sem recobrimento com lamínula;
- seções polidas, utilizadas no caso do estudo de minerais opacos em microscópio óptico de luz refletida.

2.4.5 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E MICROANÁLISE QUÍMICA (EDS E WDS)

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica muito poderosa de caracterização microestrutural, encontrando aplicações tanto nas áreas de mineralogia, petrologia e

geoquímica como na metalurgia, ciência de materiais, botânica, biologia, pedologia, odontologia, etc, por permitir a caracterização local de diferentes tipos de materiais com alta resolução espacial e excelente qualidade dos resultados. Ressalta-se ainda a possibilidade de estudo de partículas com dimensões mínimas e a obtenção de aumentos mínimos em torno de 35x. A preparação da amostra a ser analisada é relativamente simples, cumprindo-se os requisitos de que ela deve estar seca e ser condutora de corrente elétrica. No caso de materiais não condutores, a amostra pode se tornar condutora através de seu recobrimento com uma película fina de algum material condutor, tal como carbono, alumínio ou ligas de ouro-paládio.

O princípio da técnica consiste em fazer incidir sobre a amostra um feixe de elétrons extremamente fino e focado, podendo este ser estático ou varrer a superfície do material. Este bombardeio de elétrons provoca o aparecimento de diferentes sinais (elétrons secundários, elétrons retroespalhados, elétrons Auger, raios-X característicos, raios-X contínuos e catodoluminescência) que podem ser captados com detectores adequados, proporcionando informações sobre a natureza da amostra, tais como composição, morfologia (forma, tamanho), zoneamento, associações, etc (Goldstein *et al.*, 1992).

Na microscopia eletrônica de varredura (MEV), os sinais de maior interesse são os elétrons secundários e os elétrons retroespalhados, enquanto na microsonda eletrônica, o sinal de maior interesse refere-se aos raios-X característicos, resultantes do bombardeamento do feixe de elétrons sobre a amostra, permitindo a definição qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes em um microvolume.

Os elétrons secundários apresentam energia abaixo de 50eV e intensidade relativamente baixa, necessitando de técnicas elaboradas para sua detecção e processamento. Porém, devido à sua baixa energia podem ser facilmente coletados, utilizando-se campos elétricos e magnéticos. O detector mais comum corresponde a uma gaiola de Faraday que atrai os elétrons para uma célula fotomultiplicadora, onde o sinal é convertido em diferença de potencial. A imagem gerada por estes elétrons é de alta resolução, com possibilidade para grandes aumentos máximos (da ordem de 100.000 a

150.000/200.000x). O sinal dos elétrons secundários proporciona uma imagem da morfologia superficial da amostra, onde o relevo (topografia) e a densidade das fases influem no contraste (Brandão, 2000).

Já os elétrons retroespalhados possuem energia muito acima de 50eV e intensidades maiores, apresentam potencial para resolução média e aumentos máximos relativamente baixos (da ordem de 3000x – 5000x). No caso das imagens de elétrons retroespalhados, tem-se além da densidade e topografia mais um fator que influi no contraste. Esse fator é o número atômico dos átomos da amostra. Na imagem de elétrons retroespalhados, tem-se duas opções para contraste: modo COMPO, onde é enfatizada a composição química (densidade e número atômico) e modo TOPO, que maximiza a topografia e filtra os efeitos de densidade e número atômico (Brandão, 2000). Os elétrons retroespalhados são mais fáceis de detectar e de serem processados. O detector utilizado para sua coleta é de estado sólido.

O sinal de raios-X fornece espectros e imagens sobre a composição dos elementos químicos da amostra. Além da obtenção de um espectro de um ponto discreto da amostra ou em uma região determinada, existem duas outras formas gráficas de se obter informação sobre o sinal de raios-X: os perfis de concentração e os mapas de raios-X. No primeiro caso, obtém-se um gráfico sobre a intensidade do sinal de raios-X de um ou mais elementos ao longo de uma linha de varredura entre dois pontos de uma amostra, sendo bastante interessante para se observar como varia a concentração de um ou mais elementos entre dois pontos. No caso do mapa de raios-X, tem-se um mapa da intensidade do sinal de raios-X de um ou vários elementos de uma região da amostra que está sendo visualizada. É ideal para se ter uma idéia da distribuição dos elementos em uma zona específica.

Na microsonda eletrônica, os raios-X característicos dos elementos gerados na amostra são detectados por dois tipos diferentes de espectrômetros, ambos permitindo a realização de microanálises qualitativas e quantitativas. Estes são o espectrômetro de dispersão de energia (EDS), com discriminação de todo o espectro de energia através de um detector no estado sólido de Si(Li) ou Ge e o espectrômetro de raios-X por dispersão

do comprimento de onda (WDS), onde cristais analisadores e a lei de Bragg são empregados para a discriminação dos raios-X, segundo o comprimento de onda da radiação.

Atualmente, é bastante comum o microscópio eletrônico utilizado em materiais, metalurgia, mineração e geologia possuir pelo menos um detetor para microanálises químicas (EDS), aliado aos recursos de imagem.

O microscópio eletrônico pode ser considerado como o instrumento mais versátil para análise de características microestruturais de objetos sólidos, apresentando custo/benefício muito inferior à microsonda eletrônica. É principalmente utilizado em análise micromorfológica, quantificação de fases com números atômicos diferentes, identificação/composição química das fases presentes em uma amostra, bem como estudos de liberação de minérios. Porém, no caso de rotinas de microanálises químicas quantitativas, a microsonda eletrônica continua sendo o equipamento mais indicado, especialmente no caso da determinação de elementos menores, devido aos limites de detecção bem baixos ou em situações que exijam maior resolução espectral (Kahn, 2001). Ressalta-se que na microsonda eletrônica a imagem obtida geralmente não é excelente, pois o instrumento é projetado para ótima condição de análise e não de imagem.

Dentre as diversas vantagens do MEV e da microsonda eletrônica, pode-se considerar que: o método é considerado não destrutivo uma vez que geralmente a incidência do feixe de elétrons não acarreta mudanças na composição química e física da amostra; e o material pode ser visualizado ao mesmo tempo em que a análise está sendo feita, sendo possível a correlação entre a composição química e a microestrutura (Gomes, 1984).

3.1 – AMOSTRAGEM

Neste trabalho foram estudadas amostras de minério das frentes de lavra do Complexo de Mineração de Tapira-MG e algumas amostras dos minérios granulado e friável, coletadas em pontos específicos da usina de concentração.

3.1.1 – Amostras das frentes de lavra

Os critérios de amostragem foram estabelecidos através do conhecimento prévio da problemática do minério de Tapira-MG (Eng. Luis Antônio F. de Barros, comunicação verbal), sendo escolhidos para estudo os tipos litológicos denominados na mina de piroxenitos silicificados compactos e semi-compactos, piroxenitos serpentinizados e silexitos. Esses tipos de minérios ocorrem em partes mais profundas da mina (principalmente bancos 1209 e 1222) e apresentam grande quantidade de carbonatos e/ou silicatos (minerais micáceos, piroxênio/anfibólio, argilomineral e outros), minerais esses problemáticos no processo de concentração da apatita por flotação.

Foram coletadas 12 amostras relativas a esses tipos litológicos variados e mostrando diferentes graus de alteração (Figuras 3.1 e 3.2), em pontos espalhados da mina, para que fossem realizados estudos comparativos. O trabalho visou um detalhamento mineralógico dessas diferentes rochas, com ênfase aos minerais portadores de cálcio (especialmente os carbonatos) e suas relações texturais com os demais minerais presentes. O intuito foi obter informações que auxiliem no processo de beneficiamento do minério fosfático de Tapira.

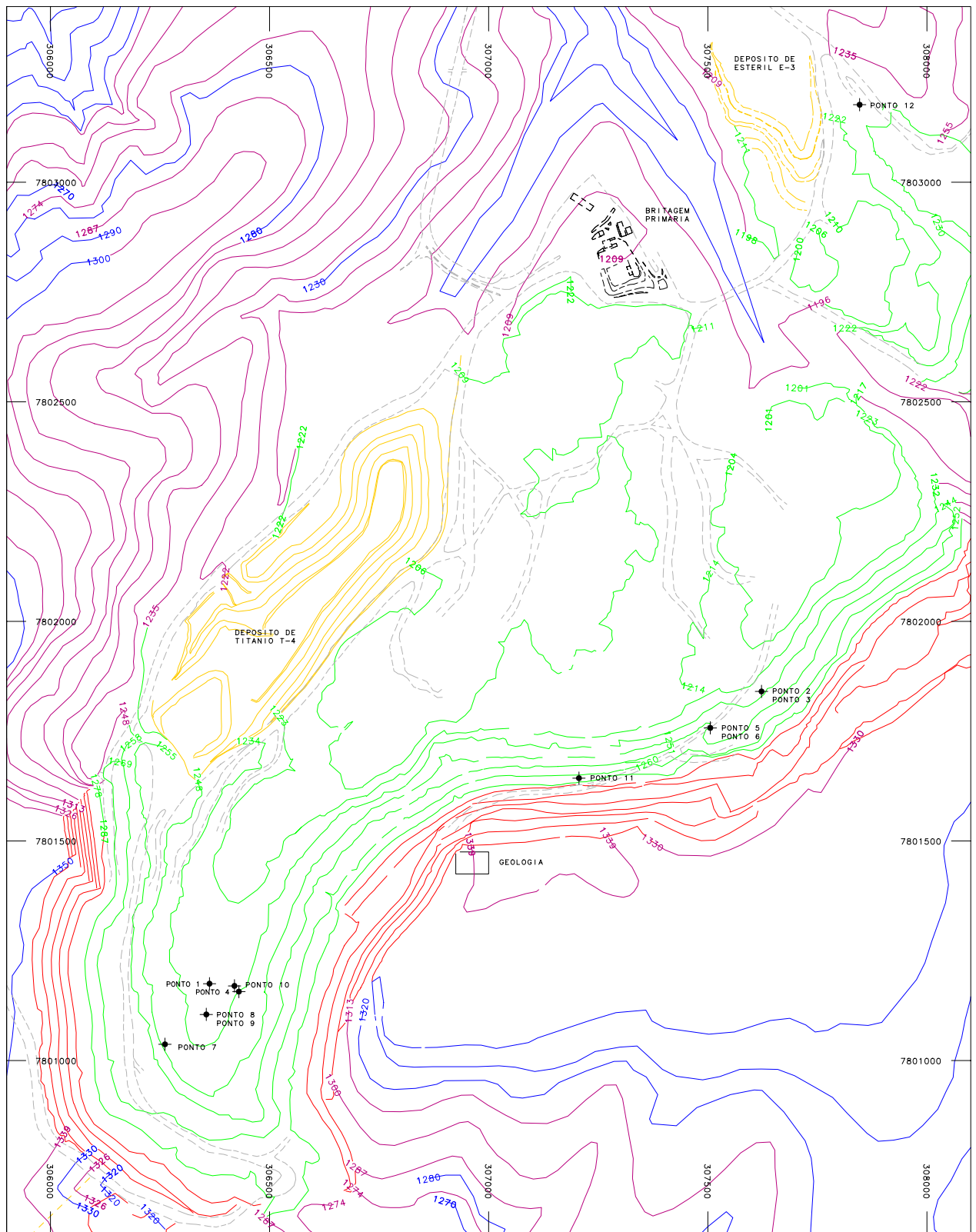


Figura 3.1 – Mapa de localização das amostras nas frentes de lavra da Mina de Tapira-MG.

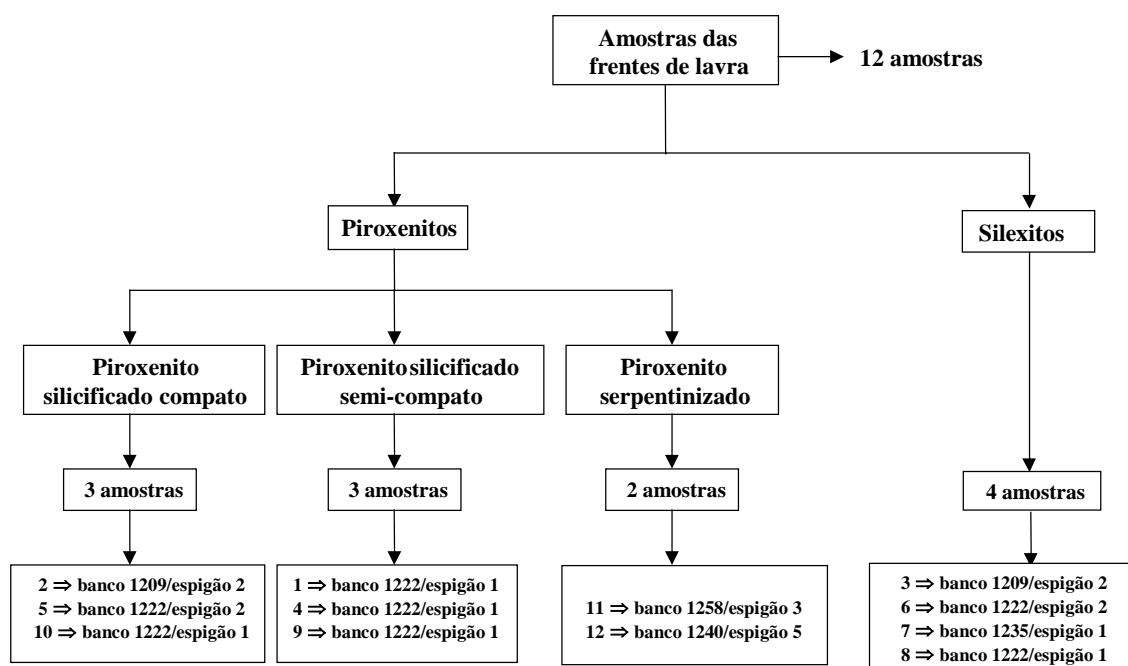


Figura 3.2 – Fluxograma esquemático mostrando o código, litologia e localização das amostras das frentes de lavra da Mina de Tapira-MG.

3.1.2 – Amostras da usina

As amostras da usina de concentração de Tapira foram coletadas nos dias 08 e 09 de fevereiro de 2001, durante o processamento da pilha 912 (Tabela 3.1 e Figura 2.5), incluindo alguns dos pontos mais importantes do circuito de beneficiamento do minério fosfático granulado e friável. A pilha 912 foi composta pelas frentes de lavra 2, 3, 4 e 5, incluindo os tipos litológicos piroxenito, silexito, glimerito e peridotito (Tabela 3.2). O balanço metalúrgico estimado para a pilha 912, conforme dados da Fosfertil, pode ser visualizado na Tabela 3.3 e um resumo desses dados é apresentado na Tabela 3.4.

Foi feito um estudo detalhado apenas na amostra da alimentação inicial do circuito (TC11 – ROM) e nas amostras dos concentrados finais do circuito granulado (CGR) e do circuito grosso friável (CG). O estudo da amostra da alimentação e de concentrados da usina foi importante para conhecimento da mineralogia dos diversos tipos litológicos presentes na mina de Tapira e identificação dos minerais portadores de cálcio que entram na alimentação e saem no concentrado. Ressalta-se, mais uma vez, a importância

de se controlar o teor de cálcio no concentrado final, uma vez que esse teor, se elevado, acarreta um aumento no consumo de ácido sulfúrico no processo de obtenção de ácido fosfórico.

Tabela 3.1 – Listagem das amostras da pilha 912 coletadas na usina de concentração de Tapira-MG

Código da amostra	Descrição
TC11	ROM – run of mine
TC'22 e 23 – ALMN 01/02	Alimentação dos moinhos de barra 1 e 2 do circuito granulado
ANF Granulado (ANF GR)	Alimentação da coluna de finos do circuito granulado
ANG Granulado (ANG GR)	Alimentação do circuito grosso granulado – alimentação da flotação
CGR	Concentrado granulado
AL Pré-class.	Alimentação do circuito friável – pré-classificação
ANG Friável (ANG F)	Alimentação do circuito grosso friável – alimentação da flotação
ANF Friável (ANF F)	Alimentação do circuito fino friável – alimentação da flotação
CG	Concentrado grosso friável

Tabela 3.2 – Características da pilha 912 (dados fornecidos pela Fosfertil)

Frentes de lavra	Banco	P₂O₅ (%)	Participação por banco (%)	Participação por frente (%)	Tipo de rocha
2	1235	8,38	21,4	46,1	Piroxenito semi-compacto
		6,20	10,0		
		10,67	1,9		
	1209	7,69	5,4		Provável silixito
		5,16	5,4		
	1248	9,53	0,3		Piroxenito friável
	1258	8,44	0,8		Piroxenito friável
BD	7,62	0,9	*		
3	DPM	7,30	15,2	15,2	**
4	1209	6,36	19,5	19,5	Piroxenito e Glimerito
5	1250	8,69	16,0	19,2	Peridotito alterado (friável)
		6,52	3,2		

*BD – Barragem BD-2: material parcialmente beneficiado, que é descartado da usina quando ocorrem paradas. Esse material já está moído e parcialmente deslamado e corresponde a uma mistura de tipos litológicos.

** DPM – Depósito M3, formado por material exclusivamente friável para alimentação da britagem primária no período chuvoso. Representa uma mistura de vários tipos litológicos.

Tabela 3.3 – Balanço metalúrgico estimado para a pilha 912
(dados fornecidos pela Fosfertil)

Produto		Massa		Teor (%)				Recup. P ₂ O ₅ (%)	
		t	%	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Total	Etapa
Alimentação da usina - ROM		161.555	100,00	7,38	19,72	4,19	13,55	100,0	
Granulado	Alimentação	44.105	27,30						
	Magnético	5.954	3,69						
	Lama	7.498	4,64						
	AN gran.	30.653	18,97	7,82				20,1	
	Rej. grosso gran.	25.719	15,92	2,59				5,6	
	Conc. grosso gran.	4.934	3,05	35,08	0,76	0,54	52,02	14,5	72,2
Friável	Alimentação	117.450	72,70						
	Magnético	16.443	10,18						
	Lama	25.839	15,99						
	AN fino friável	22.550	13,96	8,63				16,3	
	Rej. fino friável	15.972	9,89	1,60				2,1	
	Conc. fino friável	6.578	4,07	25,70				14,2	86,9
	AN grosso friável	52.618	32,57	10,15				44,8	
	Alim. flot. gros. fri.	59.196	36,64	11,88				59,0	
	Rej. grosso friável	42.221	26,13	3,00				10,6	
	Con. grosso friável	16.975	10,51	33,96	1,6	0,68	50,39	48,3	82,0
Usina	Alimentação	161.555	100,00	7,38	17,54	5,41	12,89	100,0	
	Magnético	22.397	13,86						
	Lama	33.337	20,63						
	AN total	105.821	65,50	9,15				81,2	
	Rej. total	83.912	51,94	2,61				18,4	
	Conc. total	21.909	13,56	34,21	1,41	0,65	50,76	62,9	77,4

Tabela 3.4 – Características da pilha 912

P ₂ O ₅	7,38%
Fe ₂ O ₃	19,72%
MgO	4,19%
CaO	13,55%
Relação CaO/P ₂ O ₅ (RCP)	1,84
Recuperação de P ₂ O ₅	63%
Tonelagem da alimentação	161.555t
P ₂ O ₅ no Concentrado Final	34,21%

3.2 – PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.2.1 – Amostras das frentes de lavra

As amostras provenientes da mina foram inicialmente preparadas nas instalações do Complexo de Mineração de Tapira – CMT (britagem inicial até o tamanho de aproximadamente 2,54cm) e, em seguida nos Laboratórios do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN conforme Figura 3.3, visando a obtenção de alíquotas para a utilização das diversas técnicas analíticas empregadas.

Amostras significativas de cada tipo litológico coletadas na mina, seguiram as seguintes etapas de preparação:

- impregnação das amostras para a confecção de lâminas delgadas polidas para estudo petrográfico ao microscópio óptico;
- separação de uma fatia gêmea da lâmina delgada para difração de raios-X;
- britagem inicial de cerca de 100 kg de cada amostra, obtendo material com granulometria aproximada de 2,54cm (CMT). Dos 100 kg de amostra coletados, 50 kg foram arquivados no CMT e o restante foi enviado para o CDTN para realização dos estudos de caracterização;
- separação de uma alíquota de cada amostra de rocha total para análise química dos elementos maiores (P_2O_5 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 e TiO_2), realizadas no Complexo de Mineração de Tapira, Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP e CDTN/CNEN;
- complementação das análises químicas das amostras de rocha total nos laboratórios do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) e Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP;
- cada amostra sofreu uma homogeneização inicial em mesa adequada, sendo retirados cerca de 10kg para processamento do material conforme Figura 3.3. Antes da moagem em 1,65mm (10#) foi feita uma retirada prévia dos finos já existentes na amostra original, utilizando-se peneiras da série Tyler;

- o moinho de rolos utilizado para cominuição da amostra abaixo de 1,65mm (-10#) é da marca Denver. A fim de evitar a geração excessiva de material muito fino, essa etapa de cominuição foi conjugada com peneiramento na granulometria máxima de 1,65mm (10#), em circuito fechado, com retorno ao moinho apenas do material grosso, retido na peneira de 1,65mm (10#);
- o material abaixo de 1,65mm (10#) foi reduzido a -0,297mm (48#) em moinho de barras da marca Denver;
- após essa etapa, as amostras foram quarteadas e retirados cerca de 3kg de cada amostra para prosseguimento do procedimento exposto na Figura 3.3. O restante do material foi arquivado;
- as amostras passaram por peneiramento a úmido em 0,037mm (400#), com separação em 5 frações granulométricas conforme Figura 3.3. A classificação granulométrica é importante na verificação da distribuição do tamanho das partículas com a partição do elemento útil nessa distribuição, bem como individualizar frações para as análises posteriores. Cada fração foi devidamente pesada para posterior balanço granuloquímico, visando um controle da percentagem de perdas e a partição em massa das amostras. O balanço de massa das frações geradas permite uma avaliação granulométrica das amostras e fornece informações preliminares sobre a distribuição dos principais minerais nas frações.

Para obtenção de concentrados puros de apatita dos 12 tipos de minérios da mina, as amostras passaram por etapas de flotação em célula mecânica DENVER e separação em meio denso, conforme Figura 3.4. A flotação foi feita em aproximadamente 1Kg de cada amostra (material de granulometria -0,297mm), sendo utilizado amido como depressor, Hidrocol (coletor misto, composto pela combinação de ácidos graxos contidos em óleos vegetais com catalisadores químicos, submetidos a hidrogenação – fabricado pela HIDROVEG) como coletor, silicato de sódio como depressor e dispersante e porcentagem de sólidos de 40%. A quantidade de etapas cleaners variou de acordo com cada amostra.

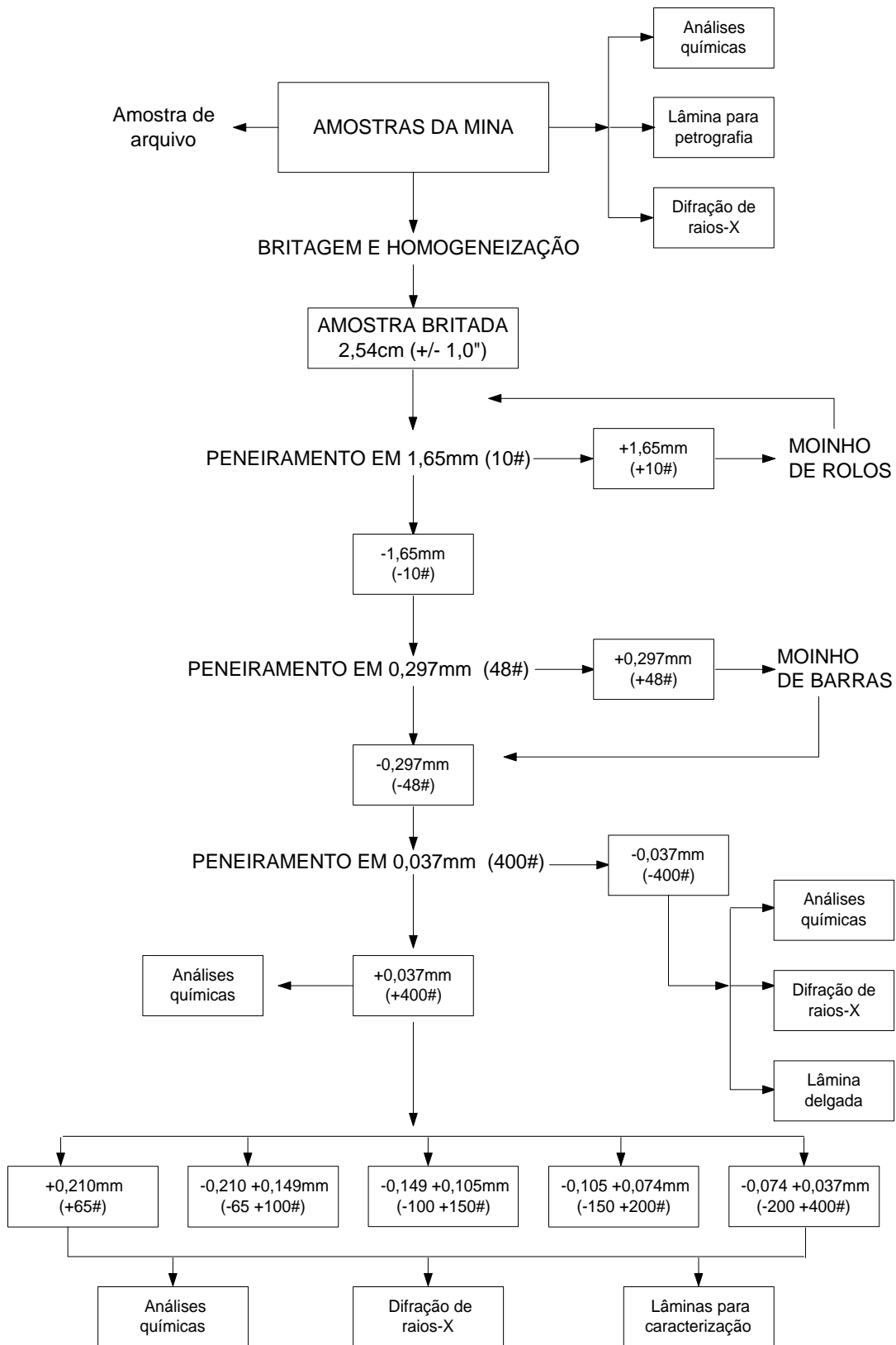


Figura 3.3 – Fluxograma do processamento das amostras da Mina de Tapira-MG.

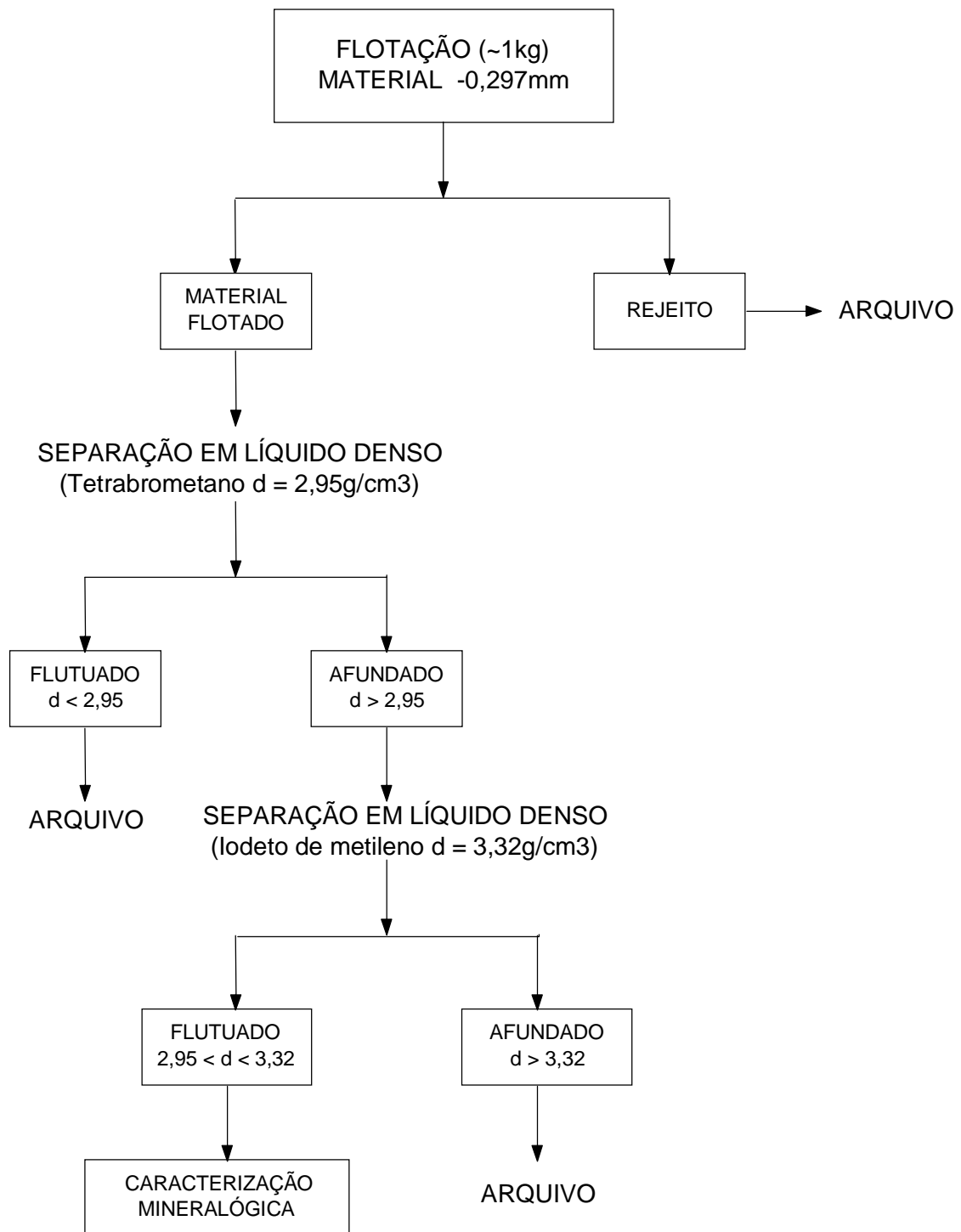


Figura 3.4 – Fluxograma do processo de preparação dos concentrados de apatita das amostras da Mina de Tapira-MG.

Devido à observação, através de espectros de difração de raios-X, de que os concentrados continham muita impureza, especialmente grande quantidade de carbonatos (calcita e dolomita), as amostras passaram por separação em meio denso de tetrabrometano ($d=2,95 \text{ g/cm}^3$) e iodeto de metileno ($d= 3,32 \text{ g/cm}^3$).

Para melhor purificação do concentrado, as frações de densidade intermediária ($2,95 < d < 3,32$), que correspondem ao produto rico em apatita, sofreram separações magnéticas no separador isodinâmico Frantz, fornecendo concentrados de apatita na fração não magnética a 1,5A. Cada etapa de obtenção dos concentrados puros de apatita foi acompanhada por estudos de difração de raios-X.

As etapas de flotação e separação magnética no separador isodinâmico Frantz foram feitas nos laboratórios do CDTN e a separação por meio denso foi realizada no Laboratório de Caracterização Mineralógica da Escola Politécnica da USP.

3.2.2 – Amostras da usina

Foram estudadas com maior detalhe somente as amostras TC11 (ROM), CGR e CG. As demais amostras da usina, listadas na Tabela 3.1, não receberam um estudo mais detalhado. Foi apenas complementada a análise química feita pelo CMT e feita uma análise por difração de raios-X para conhecimento da mineralogia principal de cada amostra.

A amostra TC11 (ROM) foi inicialmente seca em estufa a 80°C e, como sua granulometria era bastante heterogênea, os fragmentos maiores de rocha foram separados e britados, utilizando-se britador de mandíbulas da marca FIXOFORJA, e posteriormente reduzidos a menos $0,297\text{mm}$ (-48#), conforme fluxograma da Figura 3.3.

O procedimento de preparação das amostras CG e CGR para a obtenção de frações granulométricas seguiu o mesmo roteiro da Figura 3.3, iniciando-se a partir do peneiramento a úmido em $0,037\text{mm}$ (400#).

3.3 – TÉCNICAS ANALÍTICAS UTILIZADAS

3.3.1 – Difração de raios-X

As análises de difração de raios-X das amostras totais foram feitas no Laboratório do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, utilizando-se difratômetro de raios-X de fabricação Rigaku, modelo Geigerflex, semi-automático, com monocromador de cristal de grafita curvo e tubo de cobre. No estudo das frações granulométricas de cada amostra e no estudo detalhado dos filossilicatos e argilominerais utilizou-se também o Laboratório de Difração de Raios-X pertencente ao Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, equipado com difratômetro de raios-X da marca Philips, modelo PW 3710, com trocador automático de amostras, também com tubo de cobre e monocromador de cristal de grafita curvo.

No caso das amostras de rocha total provenientes da mina, a análise foi feita em uma fatia gêmea da lâmina para estudos petrográficos, contendo aproximadamente 150g, através das seguintes etapas de preparação: (a) redução da amostra a -0,210 mm (-65#) e obtenção de uma alíquota de cerca de 150g; (b) peneiramento da alíquota de 150g, utilizando-se a série de peneiras Tyler e obtenção das frações -0,210 + 0,149mm (-65+100#), -0,149 + 0,044mm (-100+325#) e -0,044mm (-325#); (c) deslamagem da fração -0,210 + 0,149mm (-65+100#), seguida de sua separação densimétrica utilizando-se bromofórmio como líquido separador, obtendo-se as frações leve, intermediária e pesada; (d) separação magnética da fração pesada, utilizando-se o imã de mão e o separador magnético Frantz, e obtenção das frações: imã de mão, 0,25A, 0,50A, 0,75A, 0,75PM, 1,00A, 1,25A, 1,50A, 1,75A e 1,75NM (A= ampère e NM = aparentemente não magnética); e (e) identificação dos constituintes minerais em cada fração obtida e avaliação semiquantitativa de seus conteúdos.

No estudo dos filossilicatos, as análises foram feitas em minerais micáceos catados manualmente em 10Kg de cada amostra, seguindo-se o seguinte roteiro:

- pulverização do material;
- espectro completo dos minerais micáceos em cada amostra;

- espectro ampliado dos minerais micáceos em cada amostra, começando com 2θ em 3° e terminando com 2θ em 14° ;
- os minerais micáceos foram cobertos com etilenoglicol e após duas horas prepararam-se as lâminas. Após a secagem do material, foram obtidos os espectros de difração de raios-X no intervalo de 2θ entre 3° e 14° ;
- tratamento térmico das amostras, que consistiu em colocá-las em uma mufla a 500°C durante uma hora. As amostras foram retiradas e imediatamente colocadas em um dessecador com vácuo durante o período de 1 hora e meia para que pudessem esfriar. Após este tempo, as amostras foram imediatamente colocadas no difratômetro, obtendo-se um espectro de difração de raios-X no intervalo de 2θ entre 3° e 14° ;

No caso dos argilominerais (amostras 11 e 12), a porção argilosa foi obtida após mistura do material com água, esperando-se a sedimentação dos minerais mais grossos e pesados, sendo retirado, com uma pipeta, o material sobrenadante. O roteiro para análise pela técnica de difração de raios-X foi o mesmo utilizado no caso dos filossilicatos.

3.3.2 - Análises químicas

As análises químicas das amostras totais (amostras de rocha da mina e amostras da usina) referentes aos elementos maiores (P_2O_5 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Na_2O , K_2O , MnO e PF) apresentadas nesse trabalho foram realizadas no Laboratório de Caracterização Mineralógica da Escola Politécnica da USP, através de fluorescência de raios-X (FRX), efetuadas em espectrômetro Philips, modelo PW2404. Essas mesmas análises foram comparadas com resultados prévios fornecidos pelos Laboratórios do Complexo de Mineração de Tapira e Laboratórios do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN, onde foram utilizados os métodos: via úmida, fotometria de chama, espectrometria de absorção atômica e fluorescência de raios-X.

As análises foram complementadas nos Laboratórios do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN, utilizando-se as mesmas amostras, onde foram

analisados os seguintes elementos: BaO, F, SrO, ZrO₂, U₃O₈, ThO₂, Nb₂O₅, Y₂O₃ e terras-raras. Os métodos utilizados foram os seguintes:

F → eletrodo seletivo;

BaO, SrO, ZrO₂, U₃O₈, ThO₂, Nb₂O₅, Y₂O₃ e terras-raras → espectrometria de energia de raios-X por excitação de raios gama (KEVEX), utilizando tempo de contagem de 800s para as terras-raras e de 400s para os demais óxidos.

Todas as outras análises, referentes às frações granulométricas das amostras da mina e da usina e dos concentrados de apatita obtidos a partir das amostras da mina, foram realizadas nos Laboratórios do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN e no Laboratório de Caracterização Mineralógica da Escola Politécnica da USP, utilizando-se os mesmos métodos descritos acima. Nas frações granulométricas das amostras da mina, foi determinado também o teor de CO₂ através de dupla calcinação (600 e 950°C), de acordo com a metodologia de eliminação dos voláteis (água de cristalização e matéria orgânica).

No caso das análises de terras-raras das amostras totais da mina e concentrados puros de apatita obtidos a partir das amostras da mina, as mesmas foram também analisadas por espectrometria de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado, utilizando o equipamento ICP/AES seqüencial da marca Spectroflame, pertencente ao CDTN. A abertura das amostras foi feita utilizando-se ácidos clorídrico e fluorídrico.

3.3.3 – Microscopia óptica

Foram estudadas ao microscópio óptico lâminas delgadas polidas das amostras de rocha provenientes da mina, com o objetivo de análise petrográfica para identificação da mineralogia, principais texturas e estruturas, bem como lâminas delgadas polidas destas mesmas amostras, porém em frações granulométricas. Nas amostras de partículas, foram quantificadas as fases minerais presentes e feitos estudos de liberação da apatita, estes últimos segundo metodologia descrita por Gaudin (1939).

No caso das amostras da usina, foram estudadas lâminas delgadas polidas de cada fração granulométrica de interesse. Os concentrados de apatita foram estudados com o objetivo de verificar seu grau de pureza, tipos de apatita presentes, presença de impregnação superficial por oxi-hidróxidos de ferro, morfologia dos grãos e presença de inclusões.

As demais lâminas polidas de partículas foram preparadas misturando-se cerca de 3 gramas do material com uma resina sintética, seguido de seu desbaste até atingir a espessura de ~0,03mm. O estudo petrográfico/mineralógico foi realizado no microscópio óptico Leitz-Ortoplan, pertencente ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, com recursos para observação em luz transmitida e refletida.

3.3.4 – Microscopia eletrônica de varredura e microsonda eletrônica

Algumas das lâminas polidas foram utilizadas para estudo no microscópio eletrônico de varredura/microsonda eletrônica com o objetivo da identificação de fases mineralógicas minoritárias não observadas ao microscópio ótico, bem como o detalhamento das fases presentes já identificadas. Foi útil na identificação dos tipos de apatita presentes, suas morfologias, zoneamento, inclusões e impurezas.

O microscópio eletrônico utilizado foi o equipamento da marca JEOL, modelo JSM-5410 pertencente ao Departamento de Engenharia de Minas da UFMG. As microanálises foram obtidas através do equipamento da marca Noran, modelo TN-M3055, composto de EDS – espectrômetro dispersivo em energia, que permite a detecção de todos os elementos de número atômico igual ou superior ao boro.

No caso de análises quantitativas mais detalhadas foi utilizada a microsonda eletrônica da marca JEOL, modelo JXA8900RL, pertencente ao consórcio CNEN–CDTN/UFMG. As amostras estudadas no MEV/MSE foram recobertas por uma película de carbono para tornarem-se condutoras.

As condições de análise foram 15KV de tensão de aceleração e 20nA de corrente de feixe. No caso das análises WDS, os padrões utilizados na calibração foram minerais e fases sintéticas. Especificamente nas microanálises de apatita, utilizou-se como padrão para o CaO uma apatita natural (Astimex) e para o P₂O₅ um fosfato sintético (Ca₂P₂O₇ – padrão IAN Steele). Os tempos de contagem variaram de acordo com os elementos analisados, utilizando geralmente de 10 a 30 segundos no pico e de 5 a 10 segundos no *background*.

3.3.5 – Espectrometria de infravermelho – EIV

Algumas substituições de íons na estrutura da apatita são refletidas no seu espectro vibracional. Por esse motivo, o estudo de EIV foi realizado nas amostras dos concentrados puros de apatita obtidos a partir das amostras da mina, com o objetivo de caracterizar os grupos iônicos presentes em sua estrutura (OH⁻, CO₃²⁻ e F⁻), definindo melhor sua composição.

O equipamento utilizado foi da marca Bomem Hartmann & Braun, modelo DA8, pertencente ao Departamento de Física da UFMG. As amostras foram preparadas pelo método do KBr (brometo de potássio), utilizando-se cerca de 8-12mg de amostra e 300mg de KBr. Os espectros foram obtidos na faixa de número de onda de 500-4000 cm⁻¹.

4 – RESULTADOS DAS AMOSTRAS DA MINA

4.1 – INTRODUÇÃO

Serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através de várias técnicas instrumentais de caracterização (difração de raios-X, microscopia óptica em luz transmitida (LTP) e luz refletida (LRP), análises químicas, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microanálise química (EDS e WDS) e espectrometria de infravermelho, segundo uma seqüência de mais fácil entendimento. As amostras das frentes de lavra, dos concentrados de apatita e da usina de concentração de Tapira-MG serão discutidas separadamente.

Através dos estudos petrográficos, verificou-se que todas as amostras coletadas nas frentes de lavra tratam-se de clinopiroxenitos, afetados por diferentes graus de alteração hidrotermal e/ou intempérica. Amostras semelhantes da região do Complexo carbonatítico de Tapira foram classificadas por Brod (1999) como “bebedouritos”, em função da classificação usual para rochas ultramáficas ser inadequada para descrever a composição desses tipos de rochas, geralmente ricas em apatita, magnetita e perovskita, minerais esses que não entram nos diagramas normais de classificação. Entretanto, nessa tese, o termo “clinopiroxenito” foi preferido por ser mais usual e de fácil compreensão para os trabalhadores da mina.

Observam-se variações modais entre os clinopiroxenitos, sendo verificadas regiões ricas em apatita (amostra 10), porções onde tem-se uma maior concentração de magnetita e perovskita (amostras 3, 6, 7 e 8) e regiões enriquecidas em minerais micáceos (amostras 1, 4 e 9). A amostra 4 possui pseudomorfos de provável olivina e poderia ser classificada como “olivina clinopiroxenito” ou até mesmo de “peridotito rico em minerais micáceos”. Porém, em função do grau de alteração e de ser somente uma amostra, fica difícil sua classificação exata.

Com o intuito de auxiliar no processamento industrial, as 12 amostras foram separadas em 4 grandes grupos, de acordo com suas características mineralógicas e diferentes

graus de alteração. A nomenclatura utilizada para os grupos de rochas reflete a mineralogia mais característica (predominante) observada em cada conjunto e não segue os critérios comumente utilizados para classificação de rochas magmáticas. Vale ressaltar que mesmo dentro dos grupos podem ocorrer variações modais.

- clinopiroxenitos pouco alterados (amostras 2, 5 e 10);
(classificação de campo: piroxenito silicificado compacto)
- clinopiroxenitos micáceos (amostras 1, 4 e 9);
(classificação de campo: piroxenito silicificado semi-compacto)
- clinopiroxenitos argilizados (amostras 11 e 12);
(classificação de campo: piroxenitos serpentinizados)
- clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (amostras 3, 6, 7 e 8);
(classificação de campo: silexitos)

Sempre que possível, os resultados são apresentados por grupos de rochas, na forma de tabelas e/ou gráficos.

4.2 – DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

4.2.1 – AMOSTRAS DE ROCHA

A difração de raios-X nas amostras de rocha foi utilizada como uma ferramenta de apoio para os estudos ao microscópio óptico, indicando a mineralogia principal de cada tipo petrográfico estudado, sendo feita em fatias gêmeas das amostras utilizadas para confecção das lâminas petrográficas, previamente pulverizadas e separadas nas frações leve, intermediária e pesada. Na fração pesada, foi feita separação magnética, utilizando-se imã de mão e separador magnético Frantz, sendo analisada cada fração obtida.

Os resultados qualitativos encontram-se na Tabela 4.1 e revelaram a presença de quase todas as fases já esperadas para os tipos de rochas abordados.

Tabela 4.1 – Resultados de difração de raios-X das amostras de rocha da Mina de Tapira-MG

Tipo de rocha	Amostra	Minerais identificados
clinopiroxenito pouco alterado	2	anatásio, anfibólio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, goethita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo, rutilo, titanita e vermiculita e/ou clorita
	5	anatásio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo e vermiculita e/ou clorita
	10	anatásio, anfibólio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, goethita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo, rutilo e vermiculita e/ou clorita
clinopiroxenito micáceo	1	anatásio, anfibólio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, goethita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo, rutilo, vermiculita e/ou clorita e zircão
	4	anatásio, anfibólio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, goethita, granada, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo, rutilo, vermiculita e/ou clorita
	9	anatásio, anfibólio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo, rutilo e vermiculita e/ou clorita
clinopiroxenito argilizado	11	anatásio, anfibólio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, monazita, esmectita, perovskita, quartzo, titanita e vermiculita e/ou clorita
	12	anatásio, anfibólio, apatita, diopsídio, dolomita, goethita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, esmectita, perovskita, quartzo, rutilo, titanita e vermiculita e/ou clorita
clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita	3	anatásio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, goethita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo e vermiculita e/ou clorita
	6	anatásio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, goethita, hematita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo e vermiculita e/ou clorita
	7	anatásio, apatita, calcita, dolomita, goethita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo, rutilo e vermiculita e/ou clorita
	8	anatásio, apatita, calcita, diopsídio, dolomita, goethita, hematita, ilmenita, magnetita, mineral micáceo, perovskita, quartzo, rutilo e vermiculita e/ou clorita

Os clinopiroxenitos pouco alterados (amostras 2, 5 e 10) são compostos principalmente por piroxênio (diopsídio), magnetita e minerais micáceos (biotita/flogopita e filossilicato de camada mista), quantidade pouco abundante de carbonatos (calcita e dolomita), perovskita e apatita (sendo exceção a amostra 10, onde a apatita é abundante), ocorrendo ainda vermiculita e/ou clorita, anatásio, rutilo, ilmenita, hematita, quartzo e, às vezes, titanita, goethita e anfibólio.

Os clinopiroxenitos micáceos (amostras 1, 4 e 9) são compostos principalmente por filossilicato de camada mista, vermiculita e/ou clorita, apatita, magnetita e piroxênio (diopsídio), quantidade pouco abundante de perovskita, anatásio, rutilo e anfibólio, ocorrendo ainda carbonatos (calcita e dolomita), hematita, ilmenita e, às vezes, zircão, quartzo e goethita. A amostra 4 difere das amostras 1 e 9 em relação a quantidade relativa dos minerais presentes, apresentando menos apatita e magnetita e quantidade abundante de carbonatos e mica, bem como pela presença de granada.

Os clinopiroxenitos argilizados (amostras 11 e 12) são constituídos basicamente pelos mesmos minerais dos clinopiroxenitos pouco alterados e micáceos, porém em função do seu grau de alteração, aparece abundante argilomineral do grupo das esmectitas. Foram identificados minerais micáceos (biotita/flogopita e filossilicato de camada mista), vermiculita e/ou clorita, piroxênio, anfibólio, apatita, magnetita, hematita, perovskita, anatásio, rutilo, titanita, ilmenita, monazita e quartzo. Os carbonatos são praticamente ausentes, ocorrendo somente em quantidade minoritária.

Os clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (amostras 3, 6, 7 e 8) são compostos principalmente por carbonatos (calcita e dolomita), magnetita, apatita e perovskita, quantidade pouco abundante de minerais micáceos (filossilicato de camada mista e, às vezes, biotita/flogopita), vermiculita e/ou clorita, anatásio, rutilo, quartzo, goethita e piroxênio (diopsídio), bem como traços de ilmenita e hematita.

A presença de hematita em todos os difratogramas foi confirmada nos estudos de microscopia óptica, sendo função da martitização parcial ou raramente total da magnetita.

4.2.2 – FILOSSILICATOS

A identificação exata dos filossilicatos através dos difratogramas globais de raios-X tornou-se difícil, devido à presença de vários minerais nas amostras de rocha. Em função disso, os filossilicatos foram separados manualmente em cada amostra global e estudados detalhadamente. Quando foi observada a presença de micas com diferentes

graus de alteração visual, elas foram separadas e obtidos difratogramas de raios-X individuais.

A técnica de difração de raios-X, combinada com as propriedades características da expansão da distância interplanar basal de alguns filossilicatos pela adição de substâncias orgânicas, como por exemplo o etilenoglicol ($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$), e de transformações térmicas de cada filossilicato, permite que os principais grupos desses minerais sejam identificados. A Tabela 4.2 resume os resultados de análises de difração de raios-X dos principais grupos de filossilicatos (Thorez, 1975).

Tabela 4.2 – Valores do espaçamento basal (em Å) para alguns argilominerais mais comuns depois dos tratamentos clássicos segundo Thorez (1975)

distância interplanar d (Å)											
Mineral	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Clorita								N EG 500			
Clorita expansiva								N 500		EG	
Vermiculita				500				N EG			
Esmectitas (montimorilonitas)				500	N	←————→				N	EG
Sepiolita				500				N EG			

N = amostra original; EG = tratamento com etilenoglicol; 500 = amostra aquecida a 500°C.

Os filossilicatos podem ocorrer na natureza com suas celas unitárias apresentando um empilhamento regular da folha estrutural ou, em alguns casos, as celas unitárias são constituídas de unidades compostas, isto é, tem-se camadas com espessura variável de dois ou mais tipos diferentes de filossilicatos empilhadas verticalmente. Neste último caso, dá-se o nome de camadas mistas ou interstratificação (Reynolds, 1980).

A maioria dos filossilicatos interstratificados contem dois componentes e o primeiro passo para nomeá-los consiste em identificar os dois tipos de camadas presentes.

Segundo Reynolds (1980), as camadas podem estar regularmente interestratificadas, isto é, seguem esquemas de empilhamento periódico; aleatoriamente interestratificadas, onde não existe nenhum padrão discernível na seqüência dos tipos de camadas; ou parcialmente ordenadas. No primeiro caso, a variedade mais comum é aquela que envolve uma alternância regular dos dois tipos de camadas e existem nomes específicos para algumas estruturas, cujo mineral apresenta características de difração de raios-X bem definidas. No segundo caso, o mineral é designado pelos nomes dos filossilicatos que compõem as camadas, colocando-se o tipo de camada mais abundante em primeiro lugar. No caso das espécies parcialmente ordenadas, ainda não existe consenso na literatura a respeito de suas denominações.

A Tabela 4.3 resume os resultados obtidos através da técnica de difração de raios-X, para a identificação dos filossilicatos presentes em cada local de amostragem da mina de Tapira-MG. Alguns difratogramas de raios-X podem ser visualizados nas Figuras 4.1 a 4.12.

Tabela 4.3 – Resultados de difração de raios-X das amostras de filossilicatos da Mina de Tapira-MG

Tipo de rocha	Amostra	Filossilicatos identificados
clinopiroxenito pouco alterado	2	camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita
	5	camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita
	10	camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita
clinopiroxenito micáceo	1	camadas mistas (flogopita/vermiculita) e vermiculita
	4	camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita, clorita e esmectita
	9	camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita
clinopiroxenito argilizado	11	camadas mistas (flogopita/vermiculita)
	12	camadas mistas (biotita/vermiculita)
clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita	3	camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita
	6	camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita
	7	camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita
	8	camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita

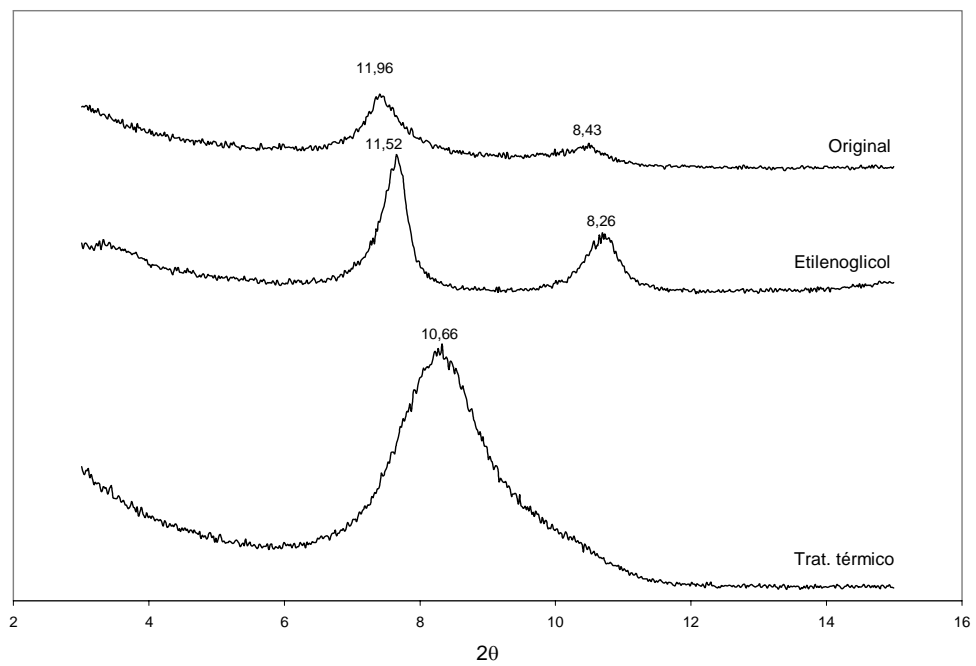


Figura 4.1 – Difratograma de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 2, com tratamento térmico e com etilenoglicol.

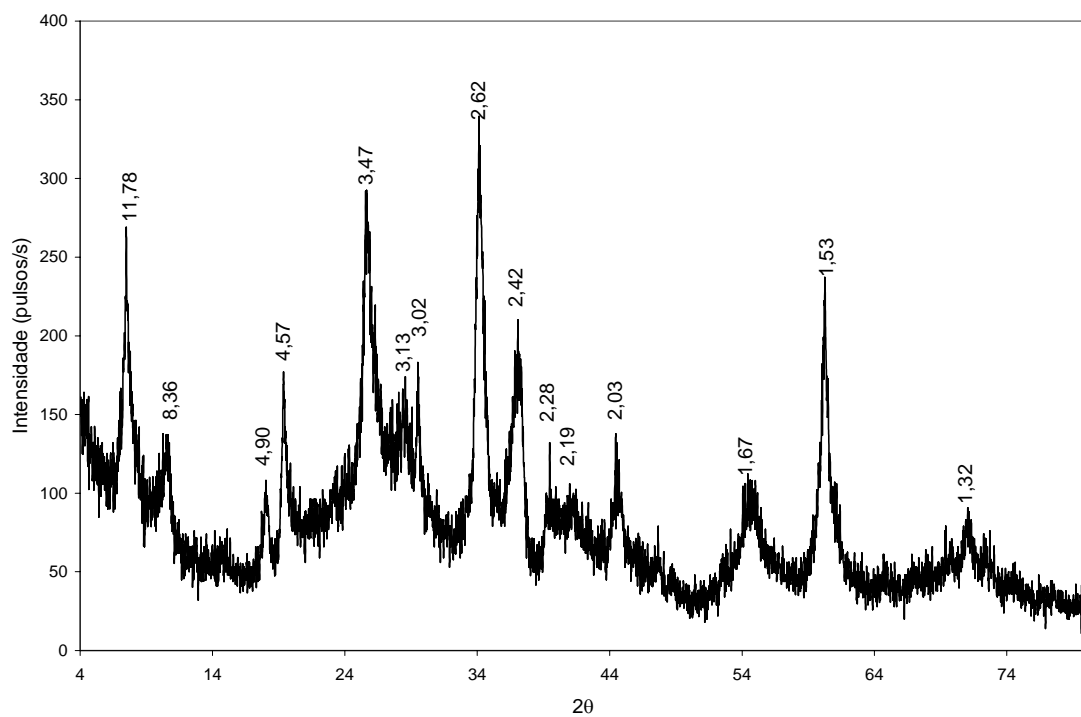


Figura 4.2 – Difratograma completo de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 2.

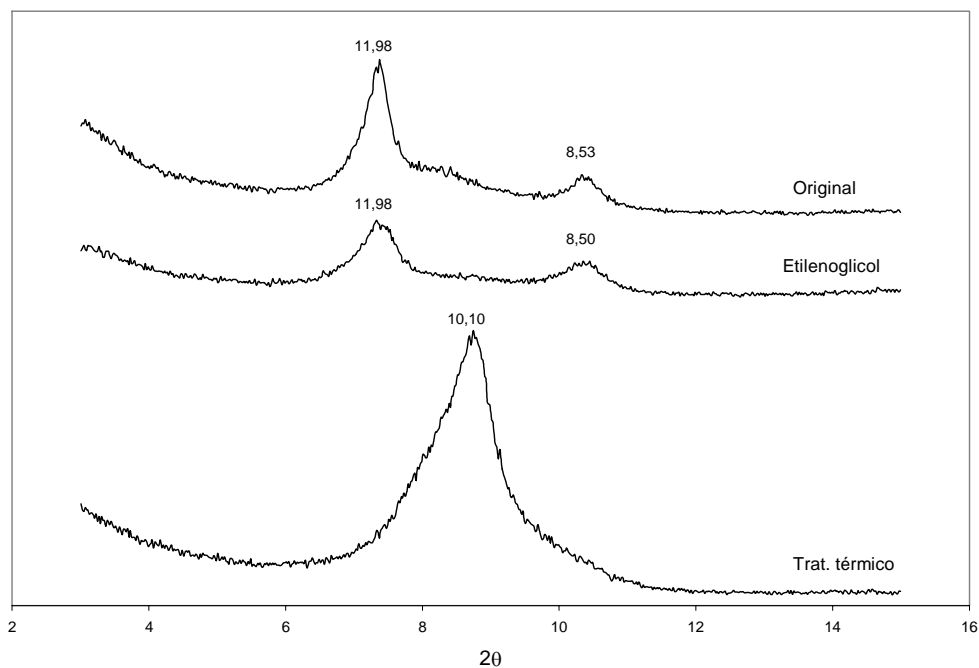


Figura 4.3 – Difratograma de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 4, com tratamento térmico e com etilenoglicol.

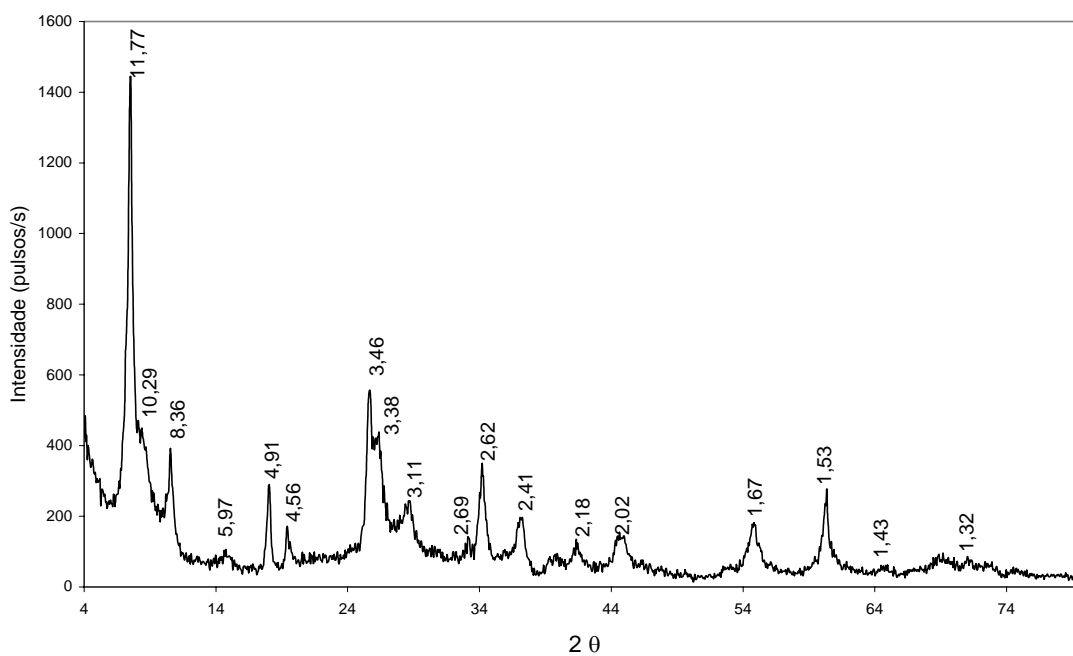


Figura 4.4 – Difratograma completo de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 4.

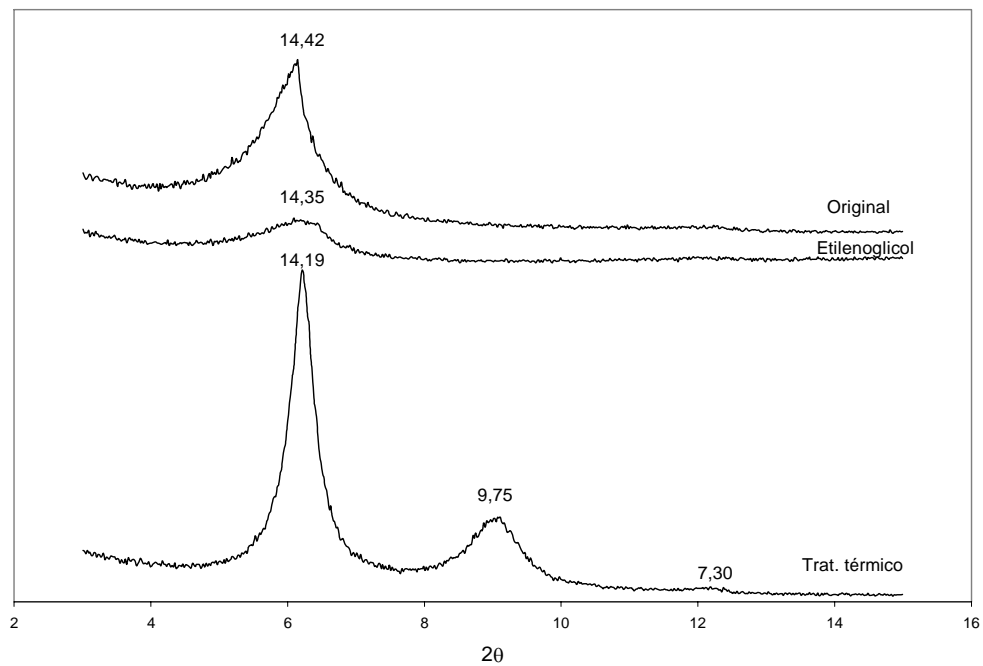


Figura 4.5 – Difratograma de filossilicatos do tipo vermiculita e clorita da amostra 10, com tratamento térmico e com etilenoglicol.

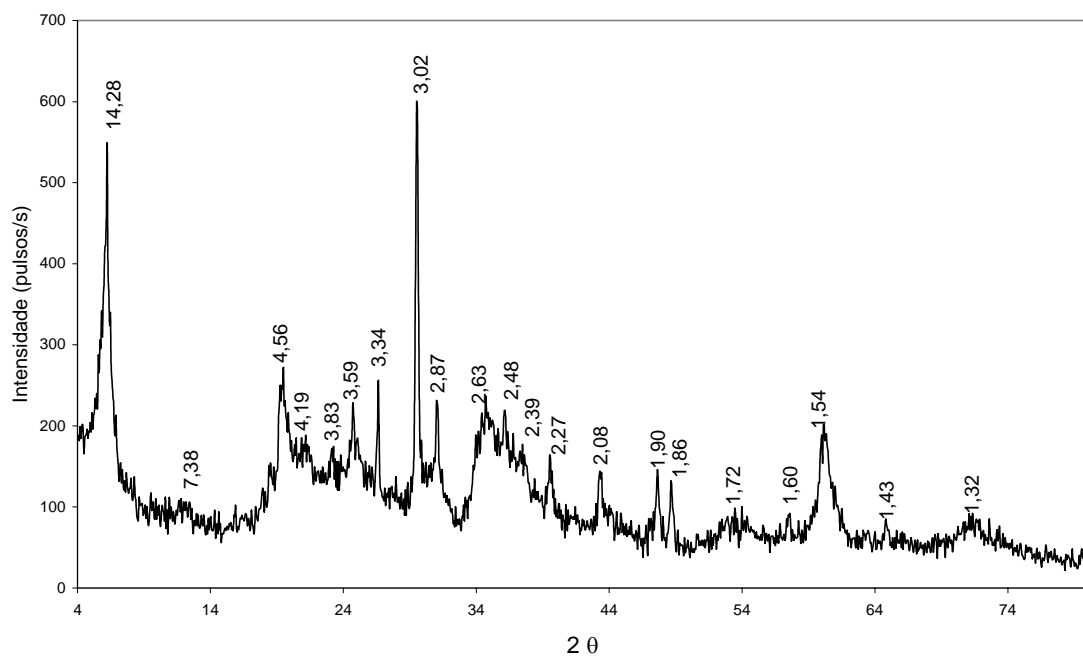


Figura 4.6 – Difratograma completo de filossilicatos do tipo vermiculita e clorita da amostra 10.

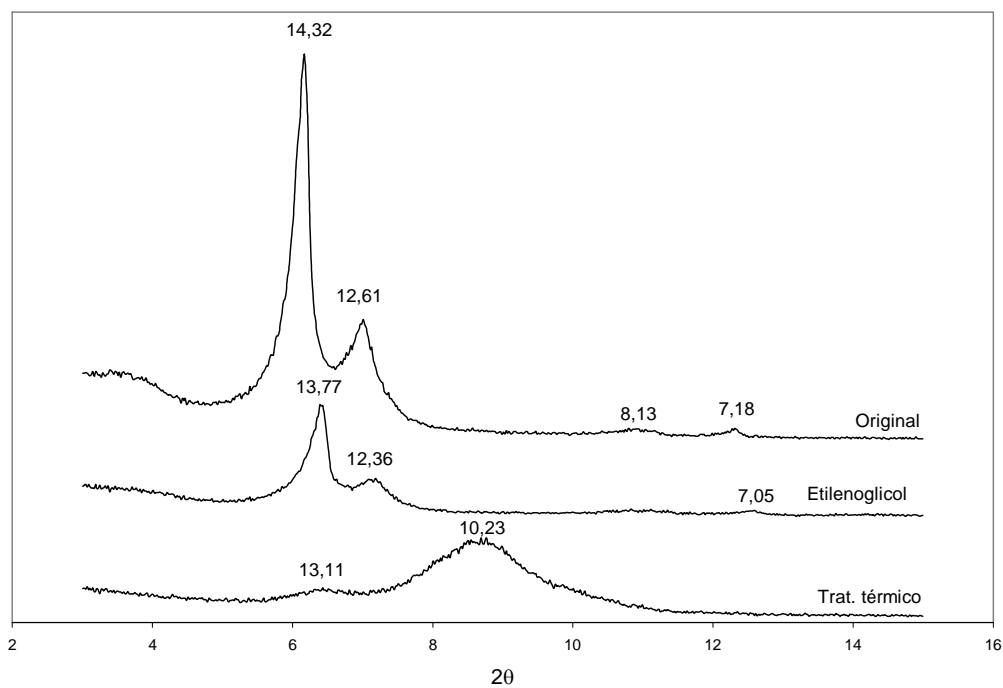


Figura 4.7 – Difratograma de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita rara da amostra 9, com tratamento térmico e com etilenoglicol.

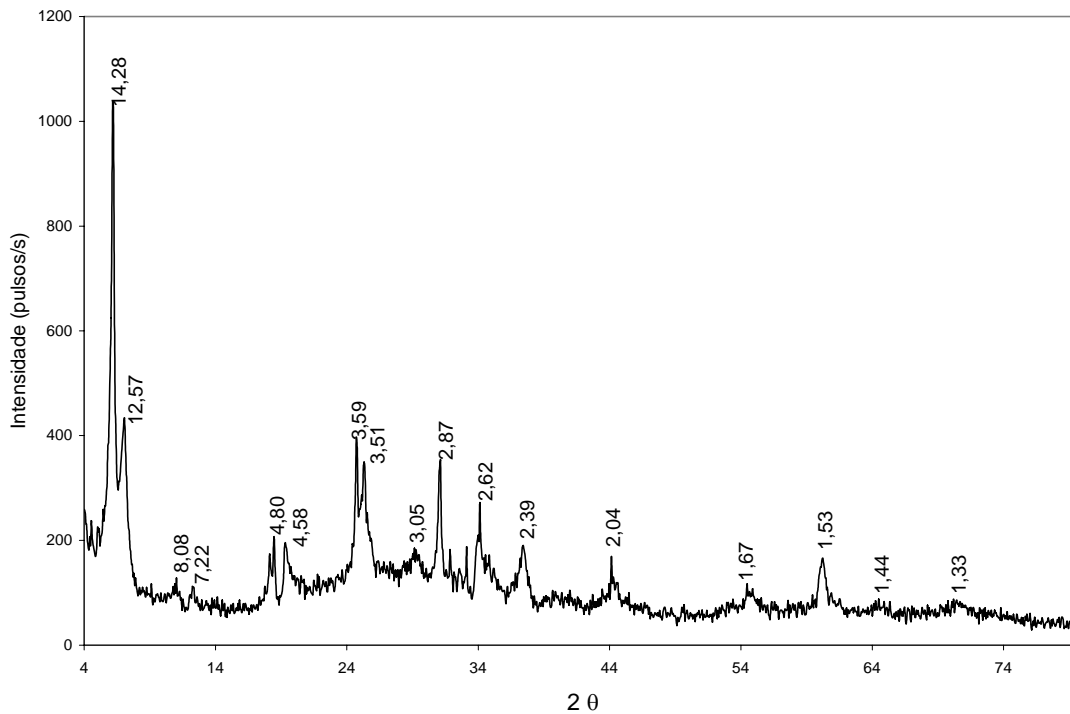


Figura 4.8 – Difratograma completo de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita da amostra 9.

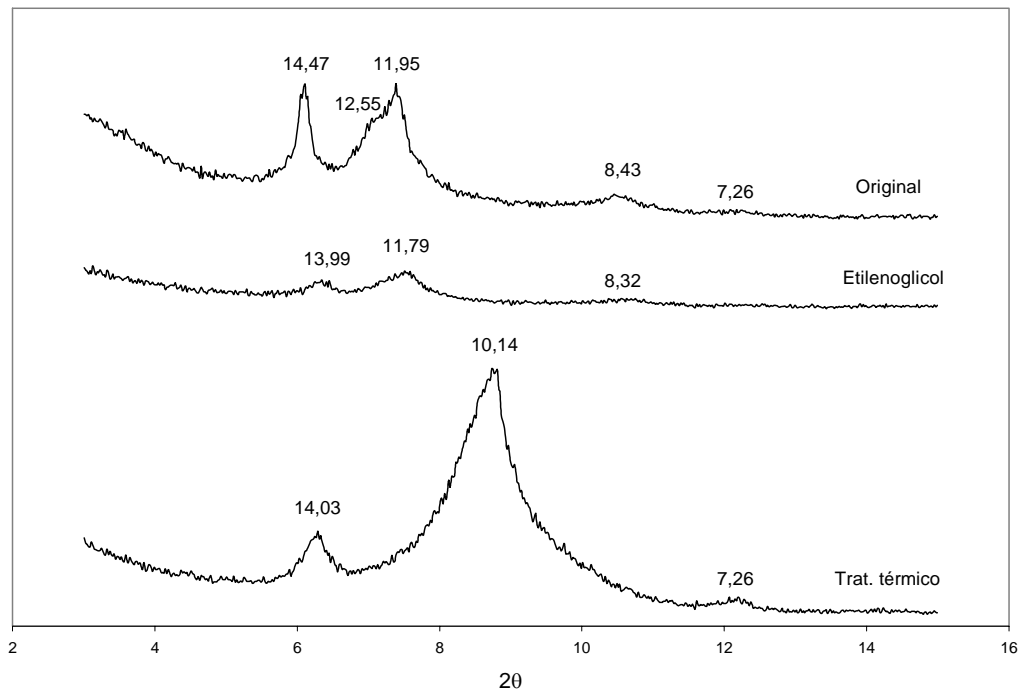


Figura 4.9 – Difratograma de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita da amostra 3, com tratamento térmico e com etilenoglicol.

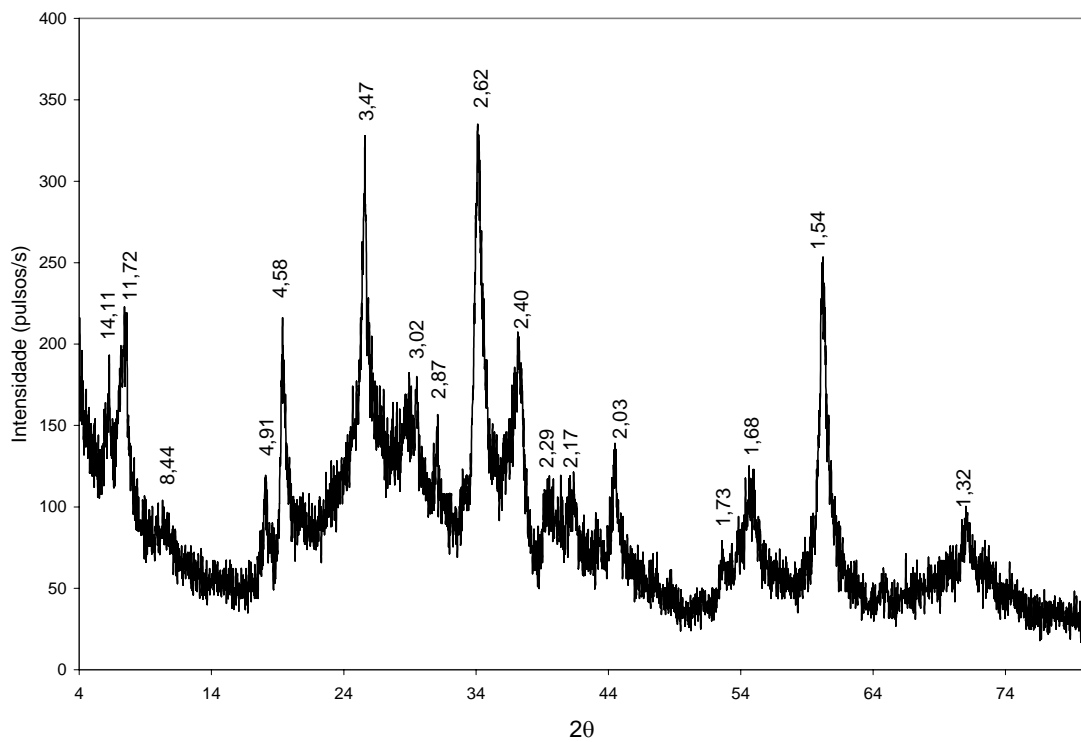


Figura 4.10 – Difratograma completo de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita da amostra 3.

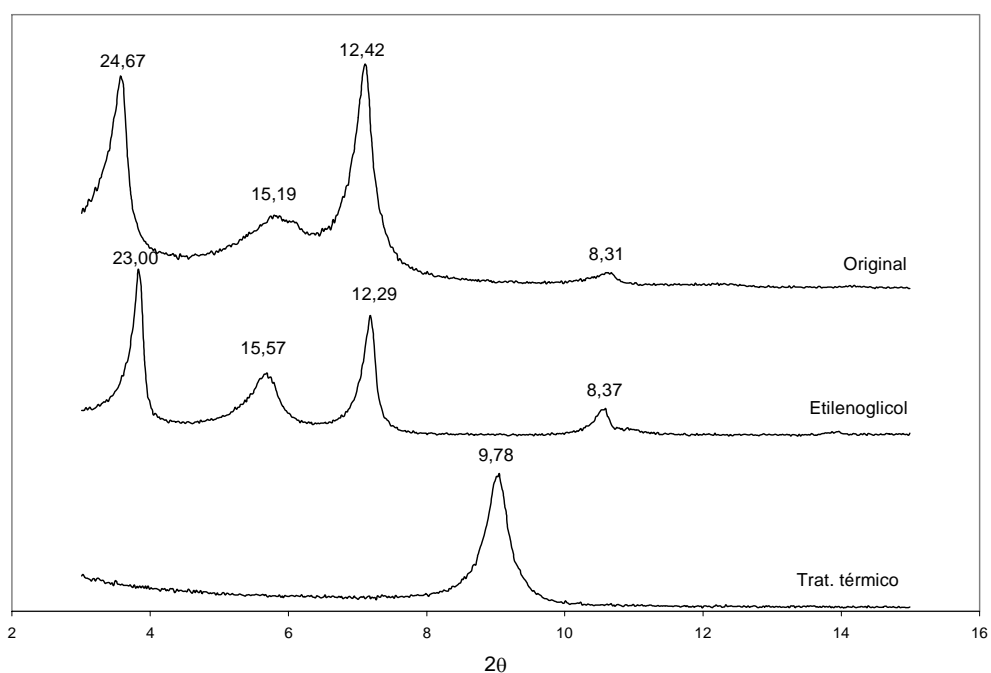


Figura 4.11 – Difratograma de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 11, com tratamento térmico e com etilenoglicol. O pico 15,19Å indica a presença de esmectita.

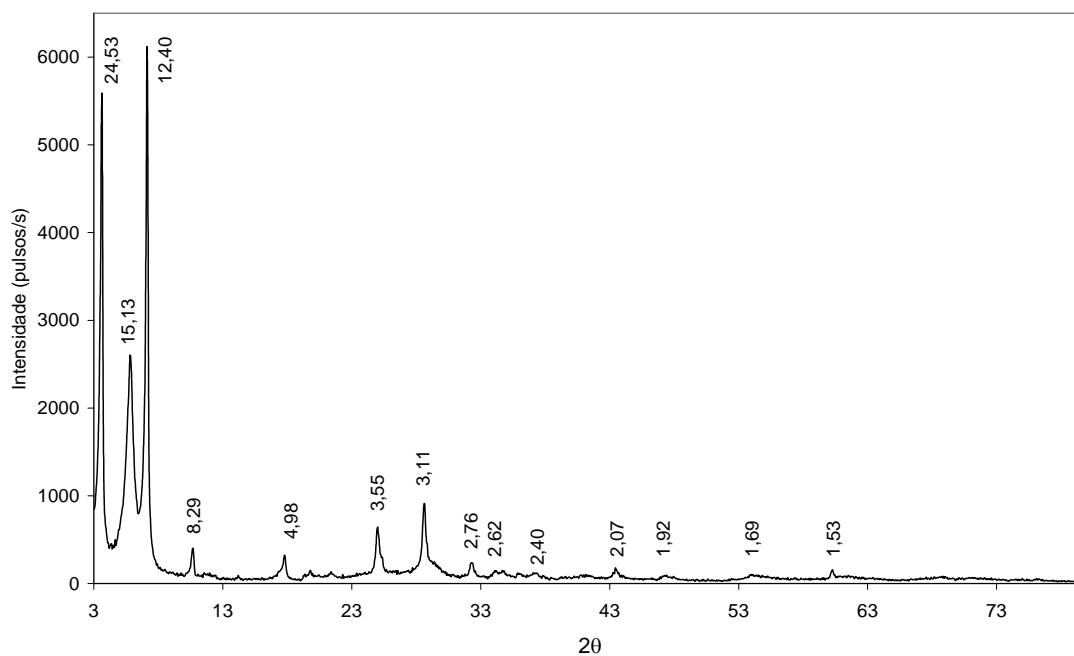


Figura 4.12 – Difratograma completo de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra 11.

Verificam-se pelos resultados que todas as amostras apresentam filossilicatos do tipo camadas mistas, identificados pela presença de reflexão entre 11,93Å e 12,63Å no difratograma de raios-X da amostra original e seu deslocamento com o tratamento térmico, passando a ocorrer um pico em torno de 10Å. Essa identificação foi baseada na comparação entre os difratogramas totais observados e difratogramas modelos para camadas mistas, segundo dados de Reynolds (1980).

De acordo com valores apresentados por Reynolds (*op. cit.*) os filossilicatos presentes nas amostras de clinopiroxenitos pouco alterados (2, 5 e 10) correspondem principalmente a uma camada mista do tipo flogopita/vermiculita, sendo estas camadas ordenadas e compostas por 60% de mica e 40% de vermiculita (pico ~ 12 Å). A identificação da mica como flogopita e não biotita foi feita através de microanálises WDS apresentadas no item 4.6.

Os clinopiroxenitos micáceos (1, 4 e 9) apresentam predominantemente um filossilicato de camada mista também do tipo flogopita/vermiculita, sendo estas camadas também ordenadas, porém compostas por 40% de mica e 60% de vermiculita (pico ~ 12,6 Å). Observa-se também o tipo flogopita/vermiculita, em camadas ordenadas e compostas por 60% de mica e 40% de vermiculita.

Os clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (amostras 3 e 6) apresentam predominantemente um filossilicato de camada mista também do tipo flogopita/vermiculita, sendo estas camadas ordenadas e compostas por 60% de mica e 40% de vermiculita, ocorrendo também um camada mista com camadas ordenadas, porém composto por 40% de mica e 60% de vermiculita. No caso das amostras 7 e 8, foi observado apenas o segundo tipo de camada mista.

Os clinopiroxenitos argilizados (11 e 12), assim como as amostras de clinopiroxenitos micáceos apresentam um filossilicato de camada mista do tipo flogopita/vermiculita, sendo estas camadas ordenadas e compostas por 40% de mica e 60% de vermiculita. Microanálises WDS apresentadas no item 4.6 indicaram que na amostra 11 o filossilicato trata-se de um camada mista do tipo flogopita/vermiculita e na amostra 12 trata-se de biotita/vermiculita.

Os dados acima mostraram que à medida que as amostras apresentam um maior grau de alteração, aumenta a proporção de vermiculita nas camadas mistas. Esses dados são condizentes com as observações ao microscópio óptico.

A distância interplanar 14 Å, conforme dados apresentados na Tabela 4.2, poderia corresponder a uma vermiculita ou clorita. A diferenciação, neste caso, foi feita através do tratamento térmico. Em algumas amostras, houve o desaparecimento deste pico e o aparecimento de um pico em torno de 10Å, o que caracterizou o mineral como sendo vermiculita. Em outros casos, além do pico de 10 Å no difratograma da amostra após tratamento térmico, verificou-se também a permanência de um pico em 14 Å, indicando a presença também de clorita.

A identificação de clorita nos difratogramas de raios-X pôde ser confirmada pelos estudos ao microscópio óptico, onde observou-se a alteração, de incipiente a mais raramente avançada, da mica para clorita.

Os filossilicatos do tipo camada mista (mica/vermiculita) já haviam sido identificados na Mina de Tapira por Assis & Brandão (1999 – parte I) em um estudo sobre a interação entre reagentes (ácidos graxos e amido de milho) utilizados em alguns sistemas de flotação e minerais micáceos, onde o material em questão foi o minério fosfático de Tapira. A caracterização dos minerais micáceos foi feita também por difração de raios-X, sendo gerados espectros das amostras sem qualquer tratamento químico ou físico, após aquecimento a 500°C e após condicionamento com etilenoglicol.

4.2.3 – ARGILOMINERAL

Nas amostras de clinopiroxenitos argilizados (11 e 12), a porção argilosa foi separada e estudada pela técnica de difração de raios-X, sendo feito um difratograma da amostra original completo, um difratograma ampliado entre 3,01 e 14,99 Å da amostra original, um difratograma ampliado da amostra após tratamento com etilenoglicol e outro ampliado após tratamento térmico. Os resultados obtidos para as amostra 11 e 12 indicam que o argilomineral pertence ao grupo das esmectitas, sendo pouco expansivo. Microanálises químicas feitas por EDS (item 4.5) permitiu a identificação da esmectita

como sendo nontronita $[(\text{Fe}, \text{Mg})_2 (\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}) (\text{OH})_2 | (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10}]_n \text{H}_2\text{O}$, uma vez que apresenta elevado teor em ferro. As figuras 4.13 e 4.14 apresentam os difratogramas obtidos para a amostra 11.

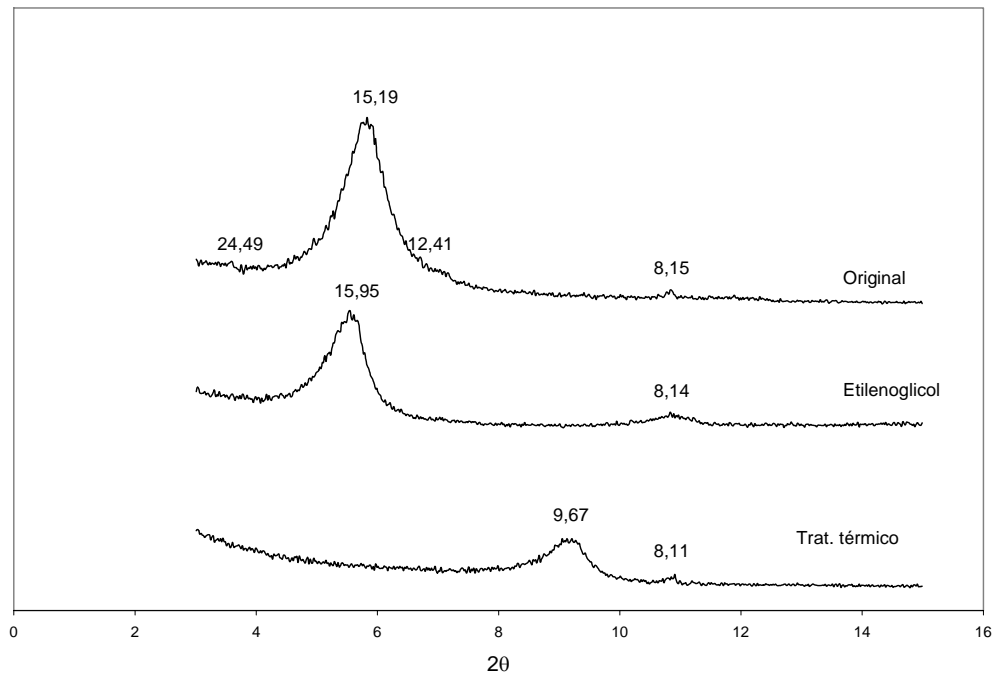


Figura 4.13 – Difratograma de argilomineral do tipo esmectita (nontronita) da amostra 11, com tratamento térmico e com etilenoglicol. As reflexões 24,49 Å, 12,41Å e 8,15Å correspondem a um filossilicato do tipo camada mista.

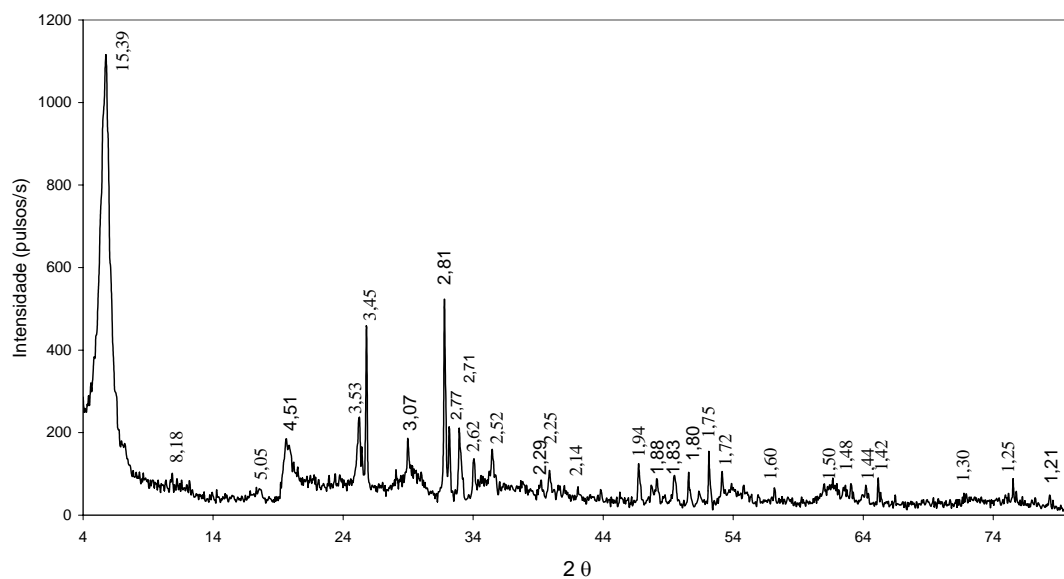


Figura 4.14 – Difratograma completo de argilomineral do tipo esmectita (nontronita) da amostra 11.

4.2.4 – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Análises qualitativas por difração de raios-X foram realizadas em todas as amostras da mina, nas frações granulométricas escolhidas para estudo, isto é, +0,210mm, -0,210 + 0,149mm, -0,149 + 0,105mm, -0,105 + 0,074mm, -0,074 + 0,037mm e -0,037mm. A mineralogia encontrada é a mesma obtida para as amostras totais.

Vale mencionar que as intensidades dos picos de difração de raios-X indicam que, nas amostras de clinopiroxenitos pouco alterados (2, 5 e 10) e micáceos (1, 4 e 9), o carbonato predominante é a calcita, ocorrendo pequena quantidade de dolomita e, nas amostras de clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (3, 6, 7 e 8), a dolomita ocorre em quantidade mais abundante, apesar da calcita continuar predominando.

4.2.5 – SUMÁRIO

- As 12 amostras de minério da mina de Tapira são classificadas como clinopiroxenitos.
- Os resultados de difração de raios-X nas amostras de rocha total da Mina de Tapira indicaram que os clinopiroxenitos pouco alterados, micáceos e ricos em magnetita e perovskita são compostos basicamente pelos mesmos minerais (anatásio, apatita, calcita, diopsídio/anfibólio, dolomita, goethita, hematita, ilmenita, magnetita, minerais micáceos, perovskita, quartzo e rutilo), variando somente a proporção entre eles, dependendo do grupo de rocha onde se encontram. Vale ressaltar a presença de granada somente na amostra 4 (clinopiroxenito micáceo). Os clinopiroxenitos argilizados, além de serem constituídos basicamente desses mesmos minerais, são ricos em esmectita, identificada como nontronita.
- Estudos detalhados dos filossilicatos identificaram que os mesmos tratam-se principalmente de camadas mistas (flogopita/vermiculita e mais raramente biotita/vermiculita) e vermiculita pura, ocorrendo quantidade minoritária de clorita.

4.3 – MICROSCOPIA ÓPTICA

4.3.1 – Caracterização petrográfica

As informações petrográficas foram obtidas através do estudo de lâminas delgadas polidas de cada tipo litológico estudado, complementadas com informações obtidas nos afloramentos. Os resultados estão apresentados por grupos de rochas.

- **CLINOPIROXENITOS POUCO ALTERADOS (AMOSTRAS 2, 5 e 10)
(Classificação de campo: piroxenito compacto)**

Em escala mesoscópica e macroscópica, os clinopiroxenitos pouco alterados apresentam cor predominante verde escuro, granulação média a muito grossa e textura granular. Localmente os minerais máficos encontram-se orientados, marcando uma foliação. O clinopiroxenito localmente pode mostrar cor ocre/amarelada na superfície, em função de alteração incipiente. Estas rochas são compostas principalmente por piroxênio, quantidade menos abundante de magnetita anédrica e subédrica, minerais micáceos de cor verde escuro a dourado e de perovskita. Em algumas regiões, observa-se uma concentração dos minerais micáceos, podendo estes atingir tamanho de cerca de 10 cm (Foto 4.1). Ocorrem também regiões enriquecidas em apatita (Foto 4.2).

O clinopiroxenito pouco alterado ocorre freqüentemente em associação com o clinopiroxenito micáceo (Foto 4.3) e está localmente cortado por abundantes venulações de carbonato, com espessura submilimétrica a até cerca de 2mm, apresentando direções variadas (Foto 4.4) e também por vênulas de quartzo. Sobressaem-se abundantes corpos de rochas avermelhadas, denominadas na mina como “silexitos” e neste estudo classificadas como clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita, ocorrendo como corpos de rochas concordantes ou tipo dique nos outros clinopiroxenitos, ou também como bolsões disseminados (Fotos 4.4 e 4.5). As rochas pertencentes ao grupo dos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita podem ser interpretadas como variações de facies dos piroxenitos, sendo enriquecidas em magnetita e perovskita e cortadas por abundantes vênulas de carbonato.



Foto 4.1 – Detalhe de uma região no clinopiroxenito pouco alterado enriquecida com mineral micáceo de cor verde escura, com cristais podendo atingir até 10 cm (banco1222/espigão2)

Foto 4.2 – Clinopiroxenito pouco alterado bastante enriquecido em apatita (ap.) Amostra 10 (banco1222/espigão1)



Foto 4.3 – Clinopiroxenito pouco alterado cpx (amostra 2) em contato brusco com clinopiroxenito micáceo – cpxm (banco1209/espigão2)

Foto 4.4 – Clinopiroxenito pouco alterado cpx cortado por venulações de carbonato – cb. Note clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (“silexito”) – cpxmp sob a forma de corpos discordantes e de bolsões (banco1209/espigão2)



Microscopicamente, os clinopiroxenitos pouco alterados são constituídos de quantidade abundante de piroxênio (diopsídio), magnetita e carbonatos (calcita e dolomita), com quantidade pouco abundante de minerais micáceos (flogopita/vermiculita e vermiculita), perovskita, anatásio, rutilo, apatita, ilmenita e goethita, podendo às vezes apresentar quartzo, clorita, anfibólio, pirita e titanita (Fotomicrografia 4.1). A amostra 10 se difere das amostras 2 e 5 pela elevada quantidade de apatita, podendo ser chamada de “clinopiroxenito apatítico” e pela alteração incipiente a avançada do diopsídio para anfibólio (Fotomicrografia 4.2).

A textura ígnea granular hipidiomórfica está bem preservada, podendo localmente ser observada também uma foliação, definida pela orientação dos cristais de piroxênio e minerais micáceos, juntamente com o alinhamento de alguns cristais de magnetita.

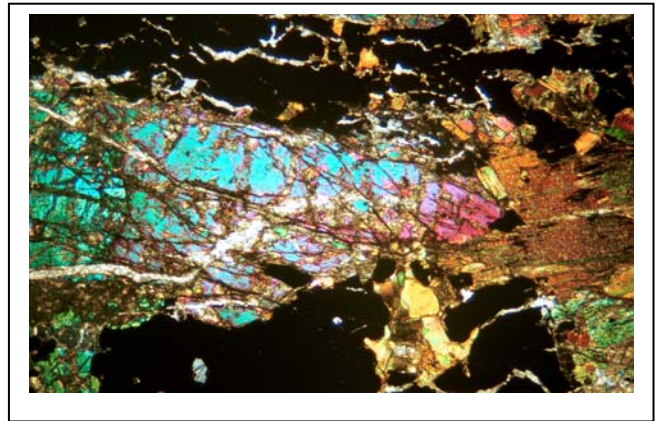
O clinopiroxênio foi identificado como diopsídio, ocorrendo em cristais prismáticos bastante fraturados, sendo as fraturas de direções diversas e, às vezes, percoladas por goethita e anatásio. São comuns exsoluções de minerais opacos (provavelmente magnetita e/ou ilmenita) dispostos segundo um arranjo bem estruturado (Fotomicrografia 4.3). Feições semelhantes foram descritas por Grossi Sad & Torres (1971) em piroxênios de peridotito da região de Tapira e por Brod (1999) em piroxênios de bebedouritos do Complexo de Tapira. O diopsídio nesse grupo de rochas está bem preservado, porém pode apresentar como produtos de sua alteração um anfibólio de cor verde-azulada (amostra 2) e um anfibólio de cor amarelada (amostra 10). São comuns inclusões de minerais micáceos, perovskita/anatásio, magnetita e de apatita no diopsídio (Fotomicrografia 4.4), indicando que o piroxênio se formou em estágios mais tardios da cristalização. Raramente tem-se clorita como alteração do anfibólio.

Os carbonatos (calcita e dolomita) ocorrem principalmente sob a forma de venulações submilimétricas, cortando os minerais das rochas em direções diversas e se entrecortando. Essas venulações fragmentam os minerais e, às vezes, conferem um aspecto brechado para a rocha (Fotomicrografias 4.5 e 4.6). Na amostra 10, ocorrem também venulações preenchidas por quartzo (Fotomicrografia 4.7).



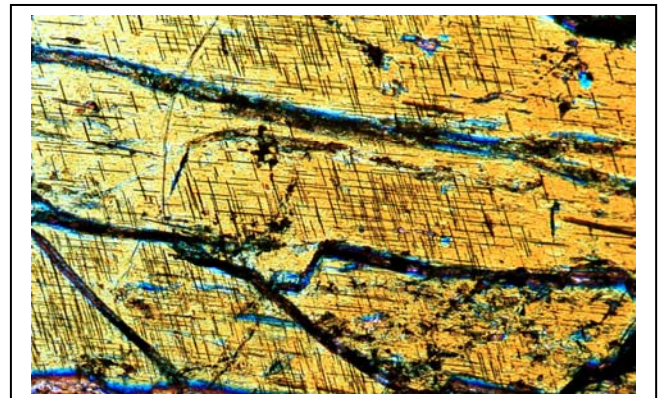
Foto 4.5 – Clinopiroxenito pouco alterado – cpx (amostra 5) interdigitado com clinopiroxenito micáceo – cpxm ambos cortados por corpos de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita – cpxmp – amostra 6 (banco 1222/espigão2)

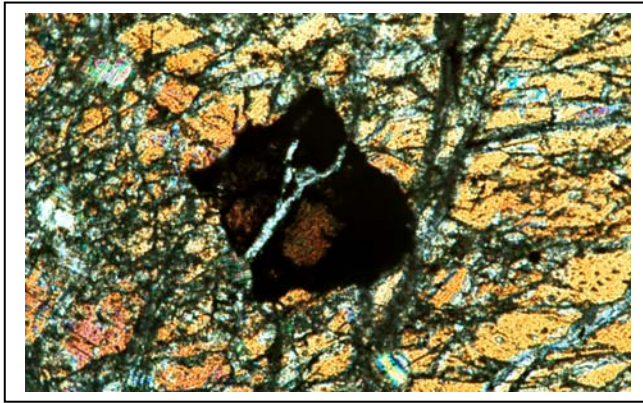
Fotomicrografia 4.1 – Visão geral do clinopiroxenito pouco alterado (amostra 2) composto principalmente por piroxênio (px), magnetita (mt) e mineral micáceo (mc). Note vênulas de carbonato (cb) cortando os minerais. Aumento de 25x – LTP – nicóis cruzados.



Fotomicrografia 4.2 – Amostra 10 – Piroxênio (px) parcialmente alterado para anfibólio (af). Note inclusões de apatita (ap) e vênulas de carbonato (cb). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados

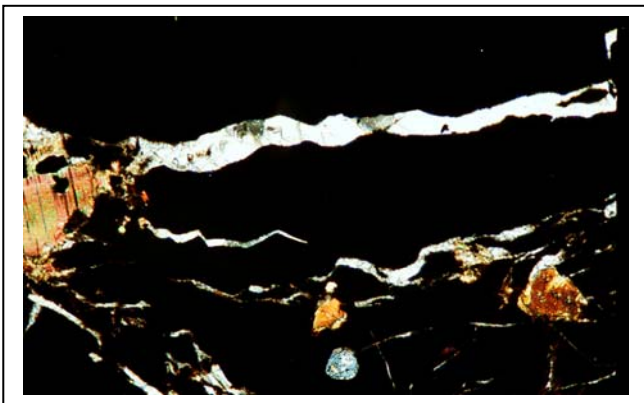
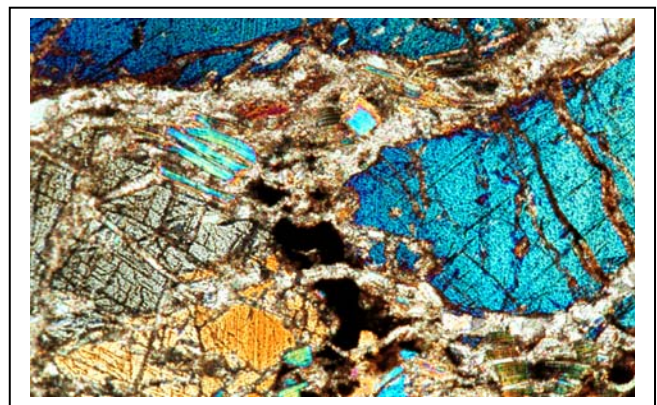
Fotomicrografia 4.3 – Amostra 2 – Cristal de piroxênio com exsolução de minerais opacos – Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados





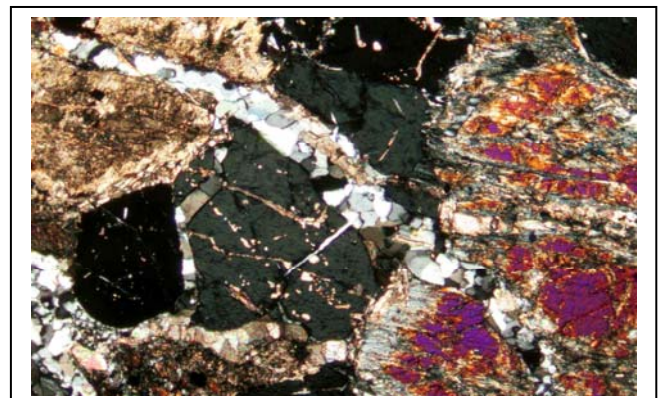
Fotomicrografia 4.4 – Amostra 5 – Cristal de piroxênio (px) com inclusões de mineral micáceo (mc) e de perovskita (pv) alterada nas bordas para anatásio (at). Note vênulas de carbonato (cb). Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados

Fotomicrografia 4.5 – Amostra 2 – Venulações de carbonato (cb) cortando cristais de piroxênio (px), mineral micáceo (mc) e magnetita (mt), conferindo aspecto brechado ao clinopiroxenito pouco alterado. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados



Fotomicrografia 4.6 – Amostra 2 – Venulações de carbonato (cb) cortando cristais de magnetita (mt). Aumento de 63 x – LTP – nicóis cruzados

Fotomicrografia 4.7 – amostra 10 – Venulações de quartzo (qzo) cortando cristais de piroxênio (px) e de apatita (ap). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados

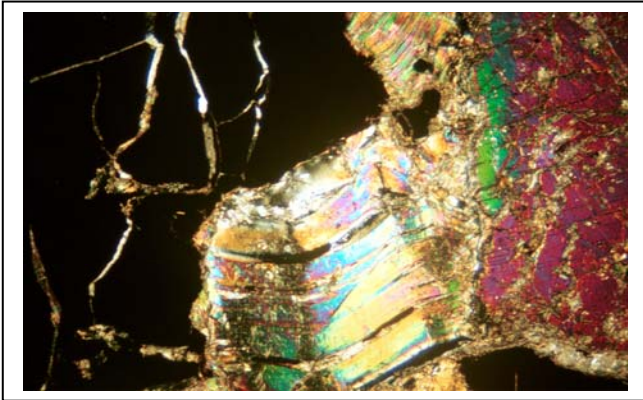


Os minerais micáceos (principalmente flogopita/vermiculita e quantidade pouco abundante de vermiculita) aparecem geralmente disseminados pela rocha em palhetas bem desenvolvidas, ocupando os espaços intergranulares e, em algumas regiões, especialmente nas imediações dos cristais de magnetita, encontram-se deformados (Fotomicrografia 4.8). As palhetas podem apresentar rara alteração para clorita, inclusões de anatásio/rutilo microcristalino e alguns cristais encontram-se cortados pelas vênulas de carbonato.

A magnetita predomina entre os minerais opacos e aparece em cristais anédricos e subédricos, com granulação variada (<1mm até mais de 2cm). Ocorre disseminada pela rocha ou localmente forma faixas alinhadas (Fotomicrografia 4.1). Os cristais mostram martitização (alteração da magnetita para hematita) incipiente a avançada, caracterizada pela presença de placas finas de hematita ao longo de seus planos octaédricos (111), começando geralmente nas bordas e fraturas e, às vezes, invadindo todo o cristal, deixando apenas alguns relictos (Fotomicrografias 4.9 e 4.10). Alguns cristais de magnetita exibem lamelas de exsolução de ilmenita (Fotomicrografia 4.11). Em alguns locais, a magnetita apresenta alteração para goethita, principalmente nas bordas e fraturas. A magnetita comumente mostra inclusões de apatita, carbonatos e minerais micáceos.

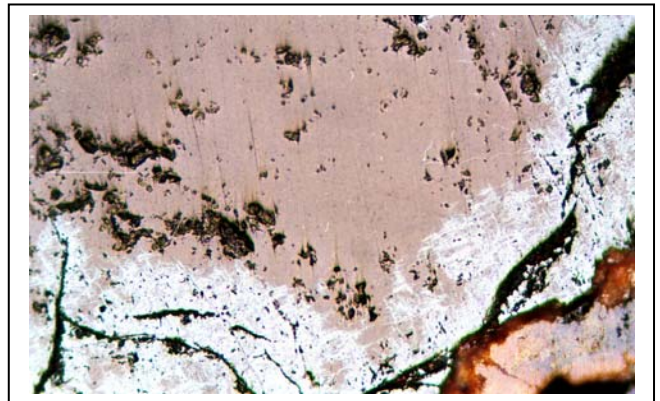
A ilmenita aparece ainda intercrescida com a magnetita ou como cristais anédricos ou tabulares disseminados ou localmente formando faixas alinhadas. Pode apresentar alteração incipiente para anatásio/rutilo. Pirita é rara e só foi observada como inclusão na magnetita ou ilmenita.

A perovskita ocorre em cristais geralmente anédricos disseminados pela rocha ou preferencialmente contornando os cristais de magnetita e, às vezes, forma faixas alinhadas. Alguns cristais estão inclusos na magnetita, enquanto outros possuem inclusões de magnetita. A perovskita mostra alteração parcial para anatásio/rutilo, principalmente em suas bordas e fraturas (Fotomicrografia 4.4) e mais raramente para titanita.



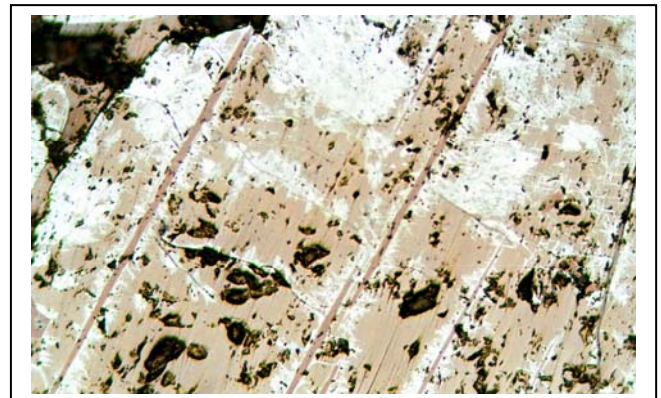
Fotomicrografia 4.8 – Amostra 5 – Detalhe de um cristal de mineral micáceo (mc) deformado, próximo ao contato com magnetita (mt). Aumento de 25x – LTP – nicóis cruzados

Fotomicrografia 4.9 - Amostra 2 – Cristal de magnetita (mt) mostrando martitização nas bordas, caracterizada pela presença de placas finas de hematita (he) ao longo de seus planos octaédricos. Note, na porção inferior direita, alteração da mt para goethita (gt). Aumento de 32x – LRP – nicóis descruzados



Fotomicrografia 4.10 – Amostra 2 – Cristal de magnetita (mt) intensamente martitizado sendo observados apenas alguns relictos. Aumento de 320x – LRP – nicóis descruzados

Fotomicrografia 4.11 – Amostra 2 – Cristal de magnetita (mt) parcialmente martitizado e exibindo lamelas de exsolução de ilmenita (il). Aumento de 320x – LRP – nicóis descruzados



- **CLINOPIROXENITOS MICÁCEOS (AMOSTRAS 1, 4 e 9)**
(Classificação de campo: piroxenito semi-compacto)

Os clinopiroxenitos micáceos apresentam cor verde escuro a ocre/amarelada, granulação variando de fina até grossa e textura granular.

Essas rochas são compostas principalmente por minerais micáceos, apatita, magnetita e piroxênio (diopsídio)/anfíbólio, quantidade pouco abundante de perovskita, anatásio, rutilo, ilmenita e carbonato e, às vezes, pirita e quartzo (Fotomicrografia 4.12). Granada, titanita e óxido de Mn, Ba e Fe (prováveis holandita e/ou romanechita) foram observados na amostra 4.

A amostra 4 foi incluída neste grupo por apresentar grande quantidade de minerais micáceos, porém diferencia-se das amostras 1 e 9 por ter granulação mais fina, possuir abundantes granada e carbonatos (predominantemente calcita e pouca dolomita) e menor quantidade de apatita e de magnetita (Fotomicrografia 4.13). A amostra 4 exhibe também pequena quantidade de pseudomorfos de provável olivina (Fotomicrografia 4.14), constituídos de anfíbólio, clorita, carbonatos e minerais micáceos, bem como raro quartzo, com os contornos marcados por perovskita/anatásio/rutilo/leucóxênio. Esta amostra poderia ser chamada de “olivina clinopiroxenito” ou talvez ser classificada como “peridotito (wehrlito) rico em minerais micáceos”. Cristais de olivina circundados por agregados de pequenos grãos de perovskita e cromita foram observados por Brod (1999) em amostras de wehrlitos em Tapira.

Os minerais micáceos consistem em camadas mistas (flogopita/vermiculita) e vermiculita, constituem-se nos minerais predominantes e aparecem em cristais bem desenvolvidos, disseminados e localmente deformados. É comum apresentarem inclusões de apatita e, às vezes, também de magnetita e ilmenita, indicando serem, nesses casos, um dos últimos minerais a se formar. Em alguns locais, os minerais micáceos exibem alteração parcial para clorita.

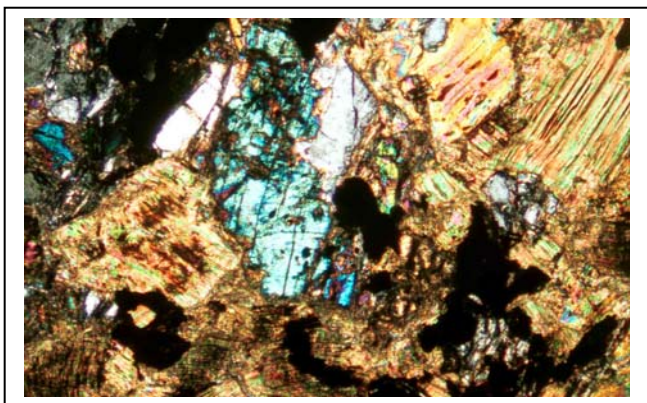
O piroxênio consiste em diopsídio, está muito fraturado e mostra alteração incipiente a avançada para um anfibólio de cor amarelada. São comuns exsoluções de minerais opacos (provável magnetita e/ou ilmenita), estruturalmente organizadas. Na amostra 4, o piroxênio encontra-se cortado pelas venulações de carbonato (Fotomicrografia 4.15).

Os carbonatos podem ser raros (amostra 1), onde ocorrem somente como inclusão na apatita; minoritários (amostra 9), ocorrendo em vênulas irregulares e descontínuas cortando os minerais, ou como inclusão na apatita e magnetita ou ainda como esparsos cristais ocupando os espaços intergranulares; ou muito abundantes (amostra 4), aparecendo essencialmente sob a forma de venulações cortando a rocha em direções diversas e se entrecortando (Fotomicrografias 4.13 e 4.15) e, mais raramente, como inclusão na apatita. Os carbonatos das venulações foram provavelmente introduzidos por fluidos derivados dos carbonatitos, porém aqueles carbonatos que ocorrem nos espaços intersticiais podem ser porções das venulações ou ser de origem primária, e nesse último caso, tendo se formado a partir de líquidos residuais de cristalização (Brod, 1999).

A magnetita possui granulação variando de muito fina a até cerca de 4mm, tem forma preferencialmente anédrica e encontra-se disseminada, via de regra em associação com a perovskita. Os cristais mostram martitização incipiente a total (amostra 4), começando geralmente nas bordas e fraturas e normalmente exibem lamelas de exsolução de ilmenita ou inclusões de ilmenita anédrica. A ilmenita pode ser observada também nas bordas da magnetita ou como cristais isolados. A magnetita pode apresentar inclusões de apatita, minerais micáceos e mais raramente de perovskita.

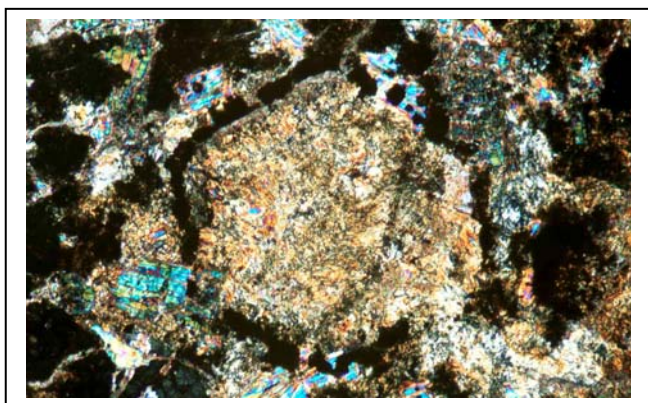
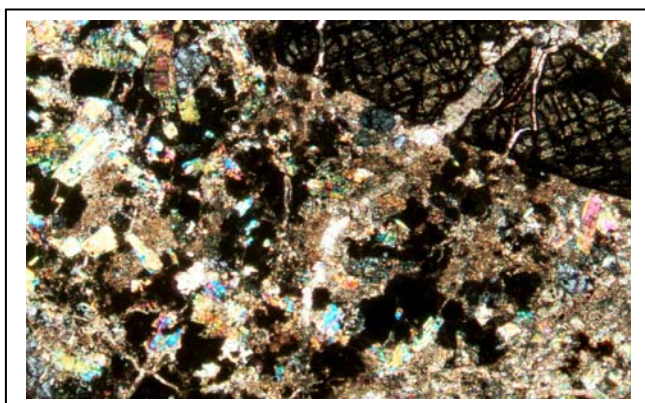
A perovskita ocorre em cristais anédricos e subédricos, disseminada e mostra alteração incipiente a avançada para anatásio, rutilo e localmente para titanita, geralmente nas bordas e fraturas. Inclusões de apatita e de magnetita são observadas, às vezes. Na amostra 4, a perovskita encontra-se geralmente cortada pelas venulações de carbonatos.

O quartzo foi observado somente na amostra 4 e ocorre preenchendo cavidades irregulares, vênulas ou raramente entremeado aos outros minerais da rocha.



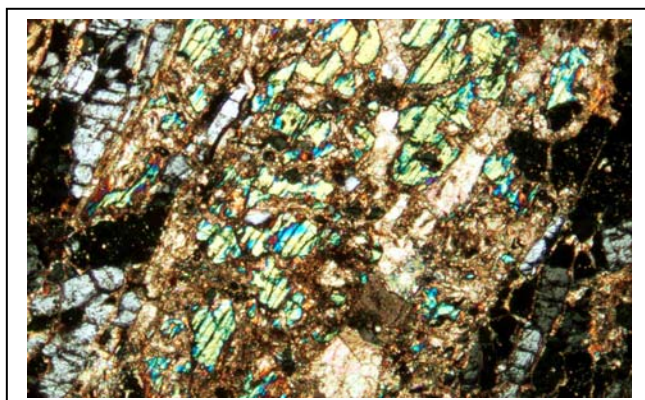
Fotomicrografia 4.12 – Amostra 9 – Visão geral de clinopiroxenito micáceo composto por mineral micáceo (mc), piroxênio (px), magnetita (mt) e apatita (ap). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados

Fotomicrografia 4.13 – Amostra 4 – Visão geral de clinopiroxenito micáceo cortado por venulações de carbonato (cb). Note também mineral micáceo (mc), perovskita (pv) e perovskita + granada (pv/gr). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados



Fotomicrografia 4.14 – amostra 4 – Detalhe de um pseudomorfo de olivina composto por anfibólio (af) e circundado por cristais de perovskita (pv). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados

Fotomicrografia 4.15 - Amostra 4 – Detalhe de cristal de piroxênio (px) fragmentado pelas vênulas de carbonato (cb) Note cristais prismáticos de apatita (ap). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados



A granada também foi identificada somente na amostra 4, encontra-se disseminada, possui cor marrom escuro e varia de anédrica a subédrica. Ocorre geralmente junto com os minerais micáceos e em associação com perovskita (Fotomicrografia 4.13). Os cristais de granada, via de regra, mostram inclusões de apatita, perovskita e magnetita, sugerindo formação mais tardia. Análises químicas por EDS apresentadas no item 4.5 indicam que a granada trata-se de melanita (variedade de andradita com $\text{TiO}_2 < 15\%$).

- **CLINOPIROXENITOS ARGILIZADOS (AMOSTRAS 11 e 12)**
(Classificação de campo: piroxenito serpentizado)

Os piroxenitos, chamados na mina de serpentizados, são rochas bastante alteradas, de cor ocre-amarelada a verde clara (Fotos 4.6 e 4.7), granulação fina a média e constituídos principalmente de argilominerais, minerais micáceos, magnetita, apatita e perovskita/anatásio. Em alguns locais, aparecem cortados por veios das rochas chamadas na mina de “silexitos” e veios de lamprófiro.

Microscopicamente, este piroxenito é composto predominantemente por uma massa de argilomineral (identificado como uma esmectita do tipo nontronita) e minerais micáceos, quantidade medianamente abundante de magnetita e apatita, menor quantidade de perovskita, anatásio/rutilo/leucoxênio e titanita, bem como goethita, hematita e ilmenita (Fotomicrografias 4.16 e 4.17). Em algumas porções da rocha, restos do piroxênio ainda podem ser reconhecidos.

A magnetita destaca-se na rocha pela sua granulação (0,13mm a 4mm), varia de anédrica a subédrica e está disseminada. Em alguns locais, ela está inclusa ou parcialmente envolvida pelos minerais micáceos e ocorre frequentemente em associação com perovskita/anatásio/leucoxênio, estando estes últimos geralmente nas suas bordas. A magnetita mostra martitização incipiente a moderada, começando nas bordas e fraturas e exibe abundantes lamelas de exsolução de ilmenita, bem como cristais de ilmenita anédrica intercrescidos. Raramente tem-se cristais isolados de ilmenita.



Foto 4.6 – Clinopiroxenito argilizado – cpxarg cortado por corpos de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita – cpxmp. Amostra 11 – banco 1258/ espigão 3

Foto 4.7 – Visão geral de clinopiroxenito argilizado – cpxarg (amostra 12). Banco 1240 – espigão 5



Fotomicrografia 4.16 – Amostra 12 – Visão geral de clinopiroxenito argilizado constituído principalmente de piroxênio argilizado (pxarg), mineral micáceo (mc0, magnetita (mt), perovskita (pv) alterada para anatásio (at) e apatita 9ap). Aumento de 25x – LTP – nicóis cruzados

Os minerais micáceos foram identificados também como camadas mistas (flogopita/vermiculita na amostra 11 e biotita/vermiculita na amostra 12) e mais raramente vermiculita, aparecem em palhetas finas a bem desenvolvidas, às vezes deformadas e encontram-se disseminados pela rocha (Fotomicrografia 4.16). A presença de inclusões de apatita, magnetita e perovskita nos minerais micáceos, indica que estes se formaram em estágios tardios da cristalização.

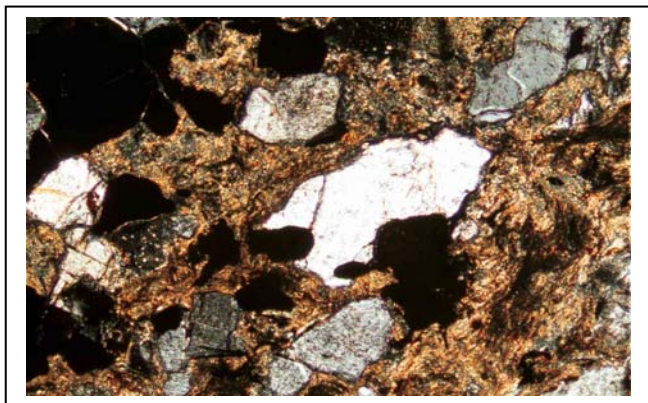
A perovskita ocorre em cristais anédricos ou localmente subédricos, está disseminada e bastante alterada para anatásio/leucóxênio, principalmente nas bordas e fraturas e, às vezes, também para titanita (Fotomicrografia 4.18). É comum a associação da perovskita com a magnetita, tanto intercrescidas, quanto com a perovskita ocorrendo nas bordas da magnetita.

A goethita apresenta-se em cristais maciços ou mais raramente botrioidais, impregnando os minerais da rocha ou preenchendo fraturas.

A classificação deste tipo litológico como “clinopiroxenito argilizado” justifica-se em função de sua composição mineralógica e elevado grau de alteração, principalmente intempérica. Não foi observada serpentina, mas sim um argilomineral do grupo das esmectitas.

- **CLINOPIROXENITOS RICOS EM MAGNETITA E PEROVSKITA (AMOSTRAS 3, 6, 7 e 8)**
(Classificação de campo: **silexito**)

Este tipo de rocha apresenta cor ocre/amarronzada a avermelhada, granulação variando de fina a muito grossa e ocorre sob a forma de corpos concordantes ou cortando os clinopiroxenitos pouco alterados, micáceos e argilizados (Fotos 4.8 e 4.9) ou formando bolsões irregulares dentro dessas rochas (Foto 4.4). Os corpos são geralmente centimétricos e podem ser subparalelos entre si ou se entrecortarem.



Fotomicrografia 4.17 – Amostra 11 – Visão geral de clinopiroxenito argilizado, podendo ser observadas nontronita (no), apatita (ap) e magnetita (mt). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados

Fotomicrografia 4.18 – Amostra 12 – Perovskita (pv) intensamente alterada para anatásio (at) e titanita (ti). Note cristal de apatita (ap) hexagonal. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados

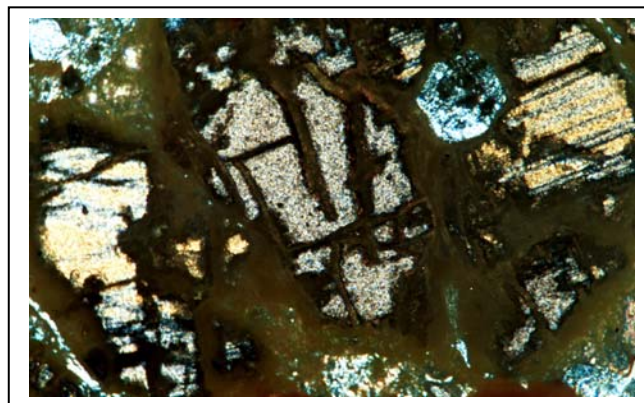


Foto 4.8 – Corpos centimétricos de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita – cpxmp cortando clinopiroxenito pouco alterado (cpx). Amostra 3 – banco 1209/espigão2

Foto 4.9 – Corpos de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (cpxmp) cortando clinopiroxenito pouco alterado (cpx). Amostra 8 – banco 1222/espigão1



Essas rochas estão normalmente cortadas por abundantes veios de carbonatos (Foto 4.10) e, às vezes, também de quartzo. Esses veios variam de submilimétricos a milimétricos e mostram direções diversas, apesar de localmente serem subparalelos entre si. Ocorrem ainda drusas preenchidas por carbonatos e/ou quartzo (Foto 4.11).

Microscopicamente, estas rochas são compostas por quantidade abundante de magnetita, apatita, perovskita e carbonatos, quantidade pouco abundante de minerais micáceos, piroxênio (diopsídio), quartzo, goethita, anatásio, rutilo e ilmenita, bem como hematita e, às vezes, pirita, titanita, zircão e óxido de Mn, Ba e Fe (prováveis holandita e/ou romanechita) (Fotomicrografia 4.19). Em alguns locais tem-se também anfibólio e clorita.

A rocha possui geralmente um aspecto de brecha, conferido pelas abundantes venulações submilimétricas de carbonatos (calcita e dolomita) e de quartzo, que cortam os minerais em direções diversas e às vezes se entrecortam (Fotomicrografias 4.20 e 4.21). Os carbonatos ocorrem essencialmente na forma de venulações, onde às vezes crescem perpendicularmente às paredes (estrutura em pente), ou preenchendo geodos (Fotomicrografias 4.22 e 4.23), ou ainda como agregados de cristais granulares em meio à goethita. As venulações podem também estar preenchidas por carbonatos e quartzo ou somente por quartzo. O quartzo aparece também preenchendo geodos, juntamente com o carbonato, ou em agregados de cristais microcristalinos (calcedônia) e finos, por vezes com hábito radiado ou fibrorradial em meio à goethita (Fotomicrografia 4.24).

A goethita ocorre disseminada pela rocha em cristais maciços ou localmente com hábito botrioidal e apresenta inclusões dos demais minerais da rocha, bem como inclusões alinhadas de cristais finos e tabulares de hematita, às vezes mostrando restos de magnetita. Este fato sugere que a hematita observada é proveniente da alteração total da magnetita. Através de estudos no microscópio eletrônico de varredura observou-se que, muitas vezes, a goethita ocorre somente como uma película recobrando os carbonatos e/ou silicatos do tipo piroxênio, minerais micáceos e quartzo.

A magnetita varia de anédrica a subédrica, mostra granulação variando de muito fina (0,007mm) até cerca de 1,5cm e encontra-se disseminada pela rocha ou episodicamente forma faixas alinhadas. É comum a associação da magnetita com perovskita, estando esta geralmente em suas bordas. A magnetita mostra uma martitização que varia de incipiente a avançada, começando pelas bordas e fraturas e alguns cristais exibem lamelas de exsolução de ilmenita. Esta ocorre ainda intercrescida com a magnetita ou como cristais anédricos ou tabulares, geralmente nas bordas da magnetita e da perovskita.

A perovskita ocorre em cristais anédricos e subédricos, com tamanhos variados (0,09mm a 3,0mm) e está disseminada pela rocha, sendo comum sua associação com a apatita. É freqüente sua alteração parcial para anatásio, principalmente em suas bordas e fraturas. Alguns cristais de perovskita apresentam inclusões de minerais micáceos, apatita e magnetita, indicando ter se formado mais tarde no processo de cristalização.

Os minerais micáceos foram identificados como camadas mistas (flogopita/vermiculita) e vermiculita, e aparecem sob a forma de palhetas ocupando os espaços intergranulares; podem apresentar inclusões de anatásio microcristalino e, via de regra, estão associados ao carbonato, estando fragmentadas. Em alguns locais, os minerais micáceos encontram-se parcial e totalmente alterados para clorita.

Estas rochas, chamadas na mina de “silexitos”, foram aqui classificadas como clinopiroxenitos, em função da mineralogia essencial ser primária, isto é, magnetita, ilmenita, apatita, perovskita, minerais micáceos e piroxênio (diopsídio). Acredita-se que sejam uma variação de facies do piroxenito, ricas em magnetita e perovskita, estando afetadas por processos de alteração principalmente intempérica, com a formação de goethita e quartzo e cortadas por abundantes venulações de carbonato.

O termo “silexito” não pode ser utilizado, pois se refere a rochas ígneas constituídas quase inteiramente de quartzo (Streckeisen, 1976 *apud* Le Maitre, 1989) e, nas amostras estudadas, o quartzo é um mineral subordinado e, juntamente com a goethita, formado por alteração intempérica.



Foto 4.10 – Bloco de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (cpxmp) cortado por venulações de carbonato (cb).
Amostra 6 – Banco 1222/espigão2

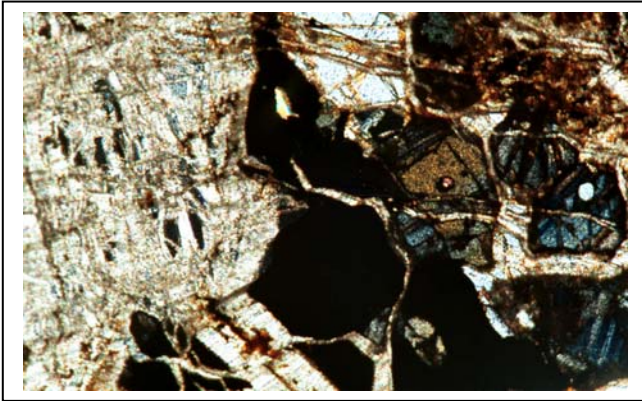
Foto 4.11 – Bloco de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (cpxmp) onde destacam-se drusas contendo carbonato e quartzo.
Amostra 6 – Banco 1222/espigão2



Fotomicrografia 4.19 – Amostra 6 – Visão geral do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita composto por magnetita (mt), perovskita (pv), mineral micáceo (mc), apatita (ap) e goethita (gt). Note carbonato (cb) em vênulas.
Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados

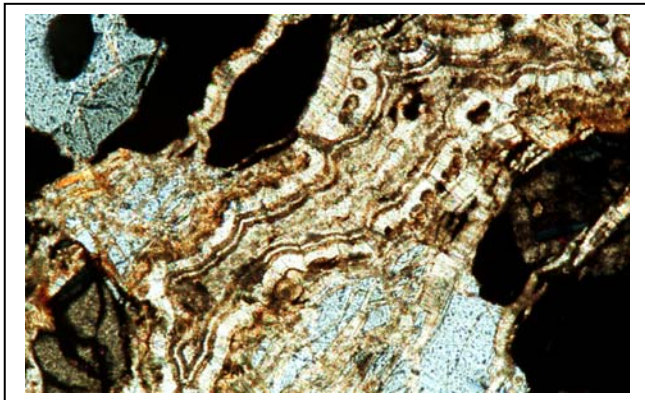
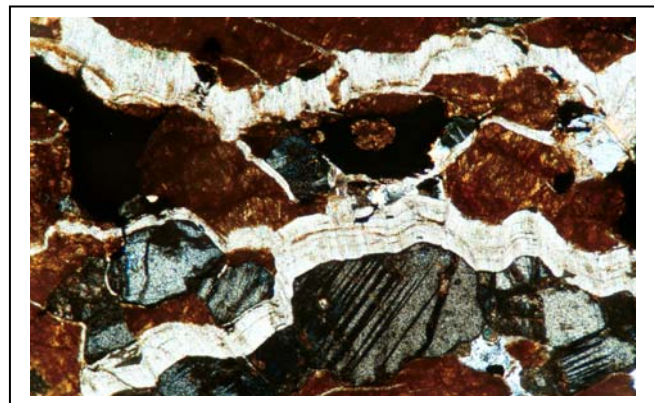
Fotomicrografia 4.20 – Amostra 3 – Cristal de piroxênio (px) cortado por abundantes vênulas de carbonato (cb). Note exsoluções de minerais opacos – Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados





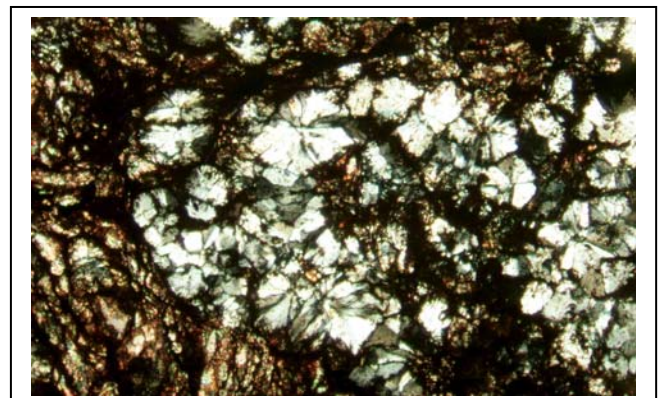
Fotomicrografia 4.21 – Amostra 6 – Venulações de carbonato (cb) cortando cristais de magnetita (mt), perovskita (pv) e apatita (ap) em direções diversas, conferindo á rocha textura brechada. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.

Fotomicrografia 4.22 – Amostra 3 – Venulações de carbonato (cb) cortando cristais de perovskita (pv) e goethita (gt) em clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita. Observe que o carbonato cresce perpendicularmente as paredes das vênulas. Aumento de 63 x – LTP – nicóis cruzados



Fotomicrografia 4.23 – Amostra 6 – Detalhe da venulação, onde o carbonato (cb) ocorre juntamente com goethita e anatásio, todos com hábitos botrioidal. Note cristal de apatita (ap) cortado por vênulas de cb. Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.

Fotomicrografia 4.24 – Amostra 8 – Detalhe de uma região enriquecida em quartzo (qzo) com hábito radiado em clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados



4.3.2 – Caracterização da apatita em lâmina petrográfica

- **CLINOPIROXENITOS POUCO ALTERADOS (AMOSTRAS 2, 5 e 10)**

A apatita possui granulação variada (0,05mm a até cerca de 6,0mm), tem forma preferencialmente anédrica ou mais raramente prismática e prismática hexagonal e encontra-se disseminada pela rocha, ocupando os espaços intergranulares ou como inclusões na magnetita, piroxênio/anfibólio, minerais micáceos e perovskita (Fotomicrografias 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28). Em algumas regiões das amostras, observa-se uma tendência de concentração da apatita, apresentando-se em agregados de cristais anédricos e/ou subédricos. Os cristais mostram superfície de corte lisa e encontram-se muito fraturados pelas venulações de carbonato e de quartzo (amostra 10) (Fotomicrografia 4.29 e 4.30). Estas venulações muitas vezes separam os cristais de apatita; os fragmentos chegam a ficar individualizados, mas não há rotação destes. Alguns cristais possuem inclusões de carbonatos, minerais micáceos e minerais opacos, bem como inclusões fluidas arredondadas e tubulares, estas últimas geralmente orientadas segundo o eixo maior do prisma (Fotomicrografias 4.31 e 4.32).

A presença de cristais de apatita como inclusões na magnetita, piroxênio/anfibólio, minerais micáceos e perovskita indica que este mineral foi um dos primeiros a se formar durante a cristalização dessas rochas ultramáficas. Este fato foi bem evidenciado no trabalho de Brod (1999).

- **CLINOPIROXENITOS MICÁCEOS (AMOSTRAS 1, 4 e 9)**

A apatita encontra-se disseminada pela rocha, ocupando os espaços intergranulares ou como inclusão na magnetita, piroxênio, minerais micáceos e perovskita, possui granulação variada (0,05mm a até cerca de 2,0mm) e tem forma anédrica ou prismática ou prismática hexagonal (Fotomicrografias 4.33, 4.34 e 4.35). Em alguns locais, observa-se uma tendência da apatita ocorrer em agregados de cristais (Fotomicrografia 4.36). A apatita mostra superfície de corte lisa e encontra-se muito fraturada e, no caso das amostras 4 e 9, cortada pelas venulações de carbonato (Fotomicrografia 4.36).

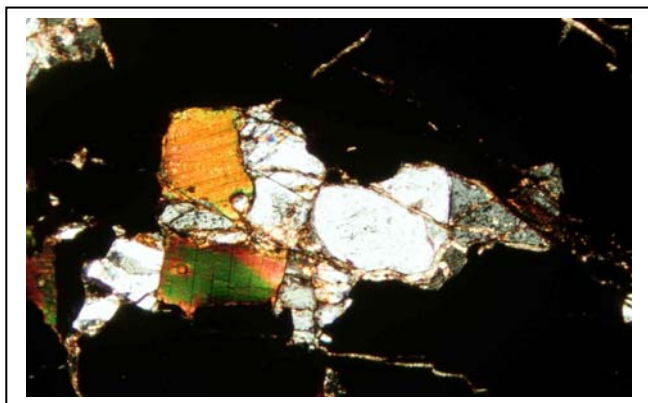
Inclusões arredondadas de carbonatos são freqüentes em todas as amostras (Fotomicrografias 4.34 e 4.36). Raros cristais apresentam inclusões fluidas.

- **CLINOPIROXENITOS ARGILIZADOS (AMOSTRAS 11 e 12)**

A apatita nesse tipo de rocha destaca-se pela sua abundância e granulação (0,05mm até cerca de 2,5cm), estando disseminada e também ocorrendo em agregados de cristais ocupando os espaços intergranulares ou como inclusão nos minerais micáceos, perovskita e magnetita (Fotomicrografias 4.37, 4.38 e 4.39). A apatita varia de prismática, hexagonal a anédrica (Fotomicrografias 4.40 e 4.41) e geralmente mostra fraturas preenchidas por goethita (Fotomicrografia 4.42). Os cristais em geral mostram aspecto poroso (amostra 12) e exibem abundantes inclusões fluidas arredondadas e tubulares (Fotomicrografia 4.43). Na amostra 11, a apatita apresenta abundantes inclusões de carbonato.

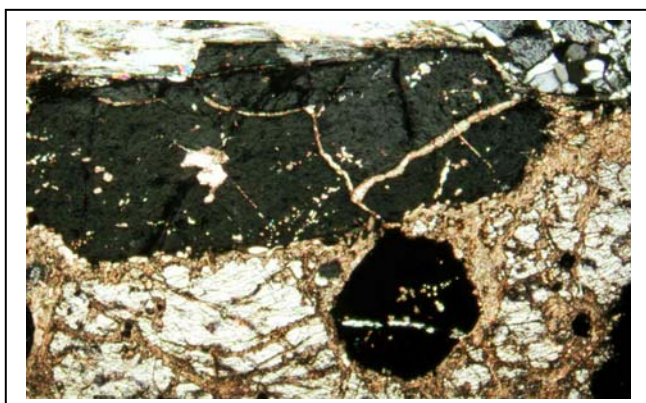
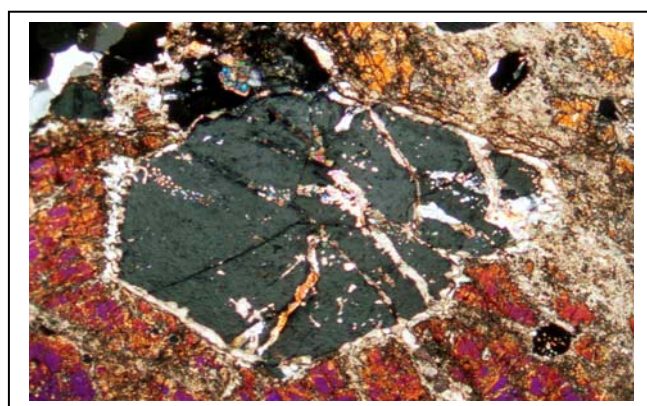
- **CLINOPIROXENITOS RICOS EM MAGNETITA E PEROVSKITA (AMOSTRAS 3, 6, 7 e 8)**

A apatita possui granulação variada (0,02mm a 3,0mm), podendo localmente atingir até quase 1cm, tem forma preferencialmente anédrica a localmente prismática ou prismática hexagonal e ocorre em agregados de cristais disseminados pela rocha, ocupando os espaços intergranulares ou como inclusões na goethita, magnetita, piroxênio, minerais micáceos e perovskita (Fotomicrografias 4.44, 4.45 e 4.46). Em algumas porções, a apatita possui uma tendência de formar faixas alinhadas. Os cristais mostram superfície de corte lisa, estão intensamente cortados por fraturas, às vezes percoladas por goethita e também pelas venulações de carbonatos e mais raramente de quartzo (Fotomicrografias 4.47 e 4.48). As venulações, muitas vezes, individualizam os cristais de apatita, porém geralmente não se observa nenhuma rotação dos fragmentos. Alguns cristais estão incipientemente impregnados por goethita e podem ainda apresentar inclusões de carbonato.



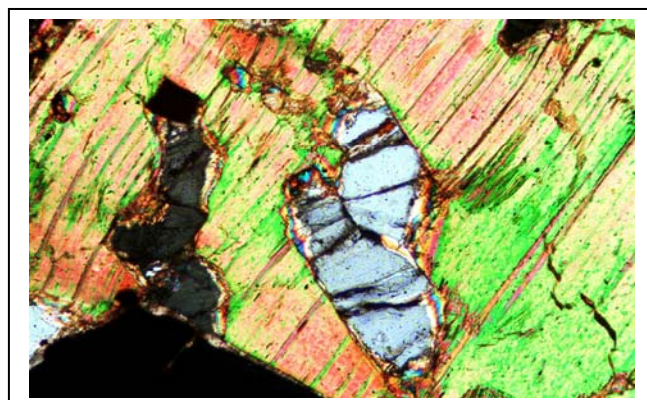
Fotomicrografia 4.25 – Amostra 2 – Cristais anédricos de apatita (ap) incluídos em magnetita (mt). Note vênulas de carbonato (cb) cortando apatita e magnetita. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados

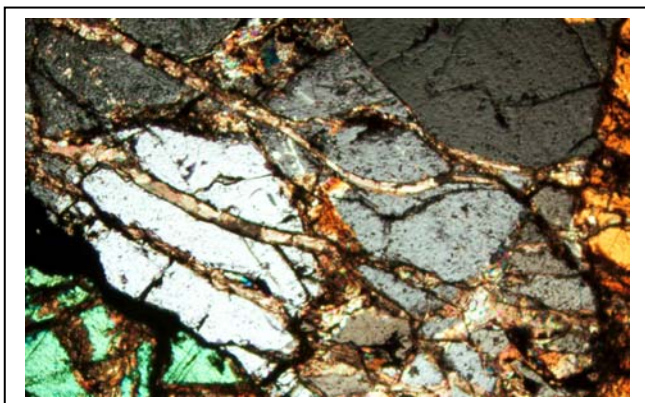
Fotomicrografia 4.26 – Amostra 10 – Cristal de apatita (ap) hexagonal incluído em piroxênio (px). Note vênulas abundantes de carbonato (cb) e pontuações de carbonato na apatita. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados



Fotomicrografia 4.27 – Amostra 10 – Cristais de apatita (ap) prismáticos e hexagonais incluídos em piroxênio (px) parcialmente alterado para anfibólio. Note vênulas de carbonato (cb) e pontuações de carbonato na apatita. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados

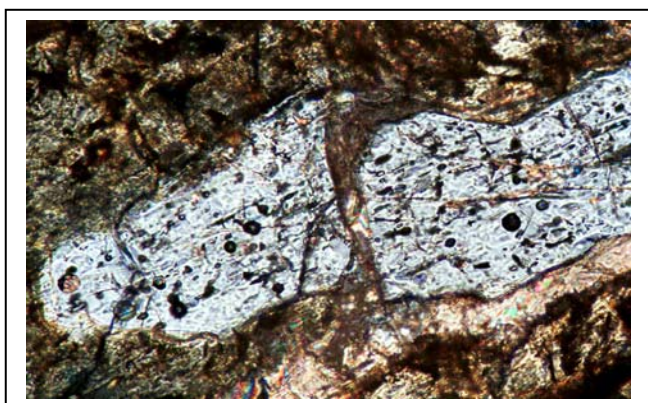
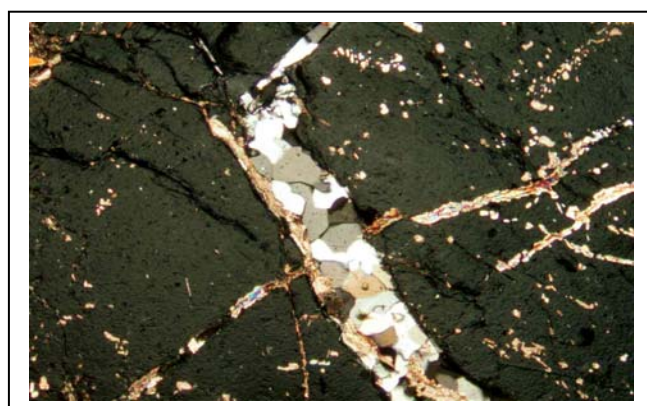
Fotomicrografia 4.28 – Amostra 2 – Cristais subédricos de apatita (ap) incluídos em mineral micáceo (mc). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados





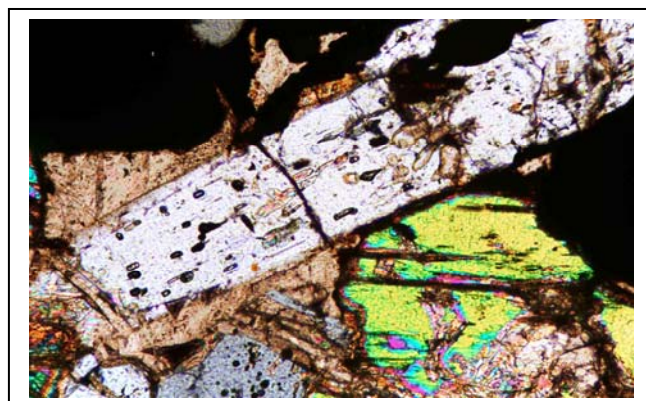
Fotomicrografis 4.29 – Amostra 5 – Agregados de cristais de apatita (ap) cortados por vênulas de carbonato (cb). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados

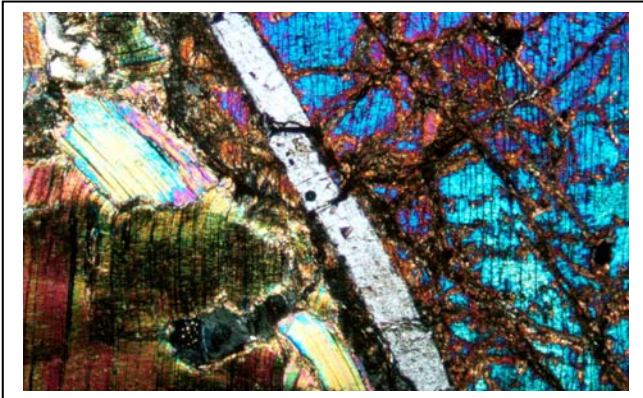
Fotomicrografia 4.30 – Amostra 10 – Cristal de apatita (ap) cortado por vênulas de quartzo (qzo) + carbonato (cb) e vênulas somente de carbonato. Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados



Fotomicrografia 4.31 – Amostra 2 – Cristal de apatita (ap) apresentando abundantes inclusões fluidas tubulares e arredondadas. Aumento de 200x – LTP – nicóis cruzados

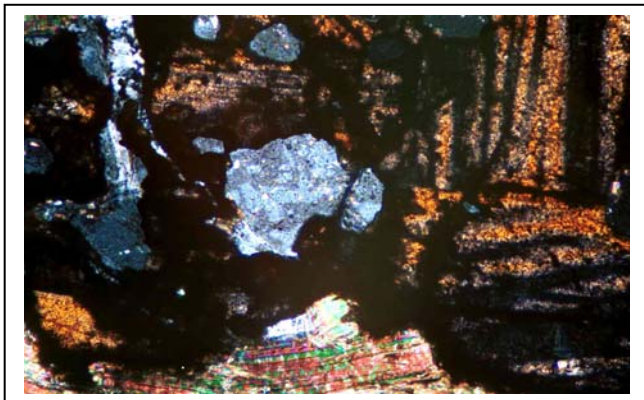
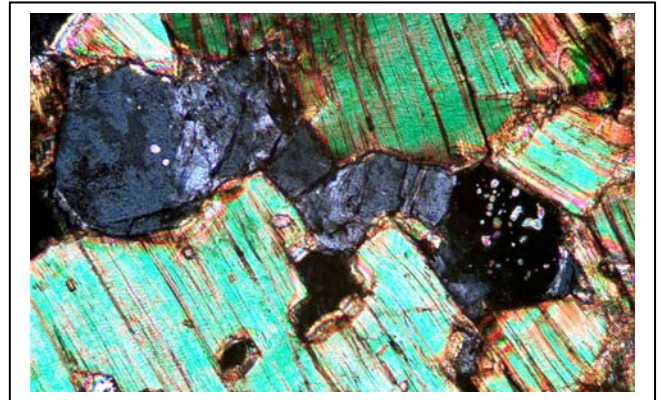
Fotomicrografia 4.32 – Amostra 5 – cristal prismático de apatita (ap) exibindo inclusões fluidas tubulares e arredondadas alinhadas segundo o eixo maior da apatita bem como pontuações de carbonato (cb). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.





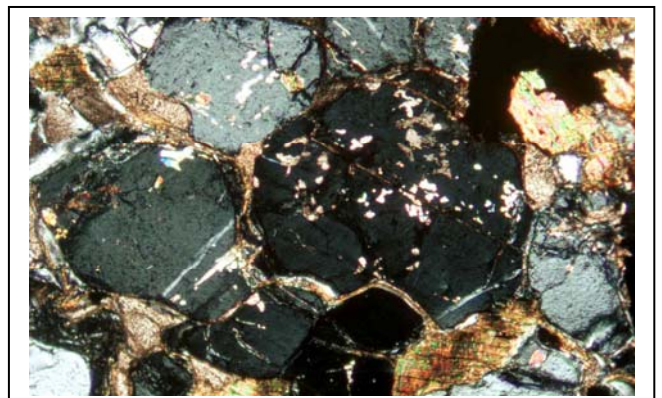
Fotomicrografia 4.33 – Amostra 1 – Cristal prismático de apatita (ap) incluído em piroxênio (px). Aumento de 50x – LTP – nicóis cruzados

Fotomicrografia 4.34 – Amostra 1 – Cristais anédricos e hexagonais de apatita (ap) incluídos em mineral micáceo (mc). Note pontuações de carbonato (cb) na apatita. Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados



Fotomicrografia 4.35 – Amostra 1 – Cristais anédricos de apatita (ap) incluídos em perovskita (pv0). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.

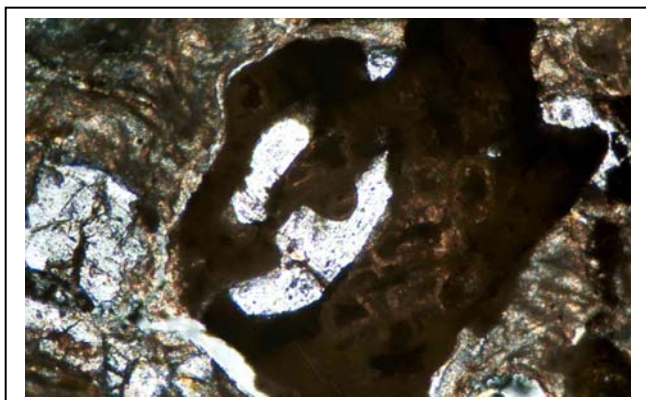
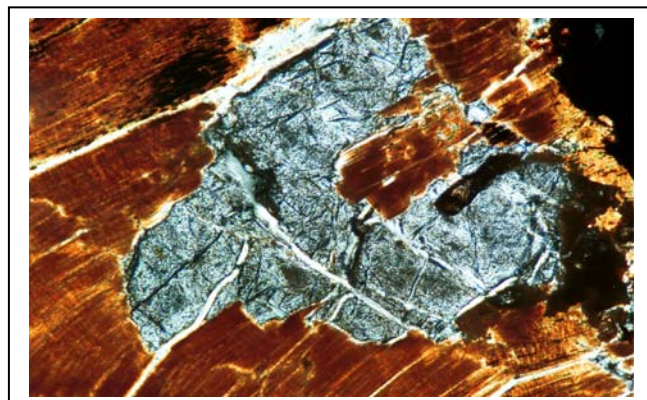
Fotomicrografia 4.36 – Amostra 9 – Agregados de apatita (ap) cortados por vênulas de carbonato (cb) e com pontuações de carbonato. Aumento de 50 x – LTP – nicóis cruzados





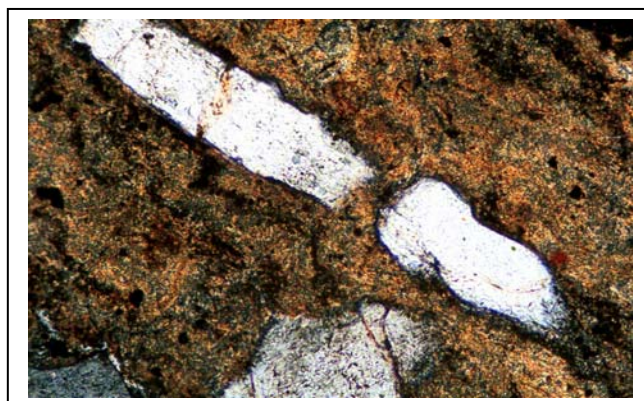
Fotomicrografia 4.37 – Amostra 12 – Cristãos prismáticos de apatita (ap) em contato com magnetita (mt), mineral micáceo (mc) e perovskita (pv). Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados

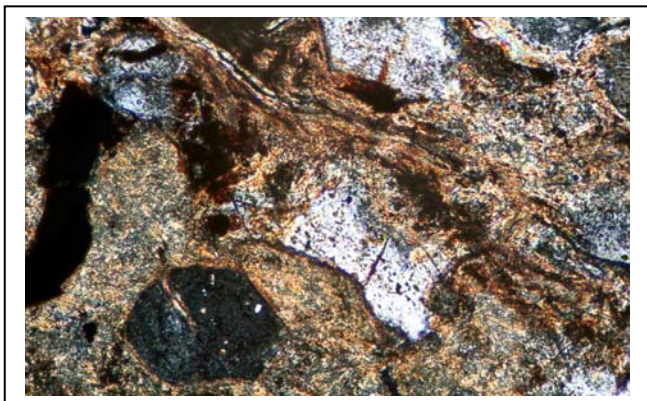
Fotomicrografia 4.38 – Amostra 12 – Cristal de apatita (ap) incluído em mineral micáceo (mc). Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados



Fotomicrografia 4.39 – Amostra 11 – Cristais de apatita (ap) incluídos em perovskita (pv) intensamente alterada para anatásio. Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados

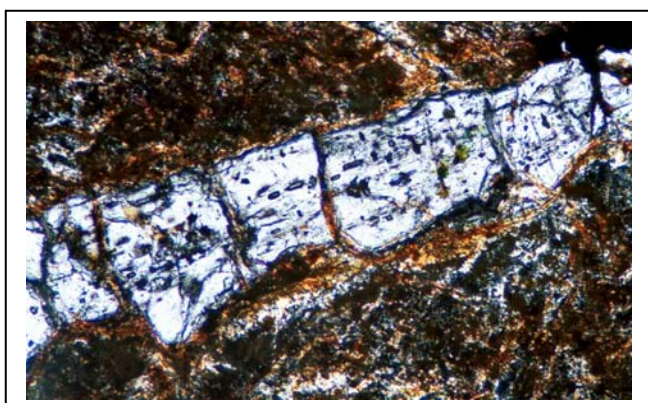
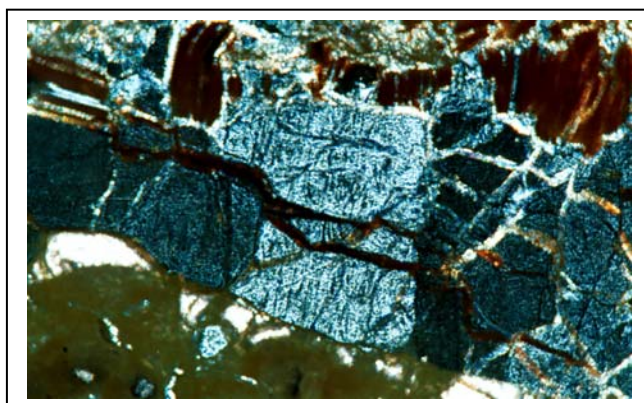
Fotomicrografia 4.40 – Amostra 11 – Cristal prismático de apatita (ap) em meio a massa de nontronita (no). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados





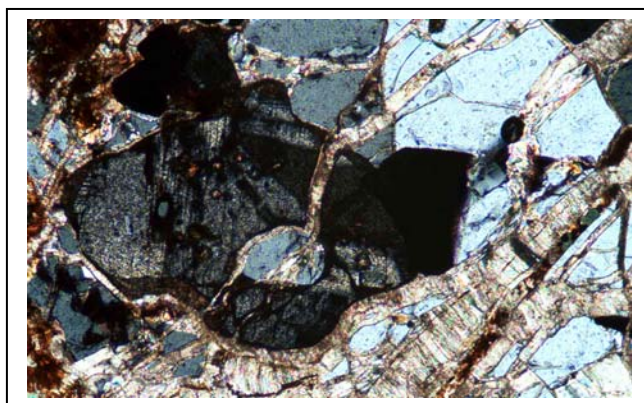
Fotomicrografia 4.41 – Amostra 11 – Cristais de apatita (ap) anédricos e hexagonais em meio a massa de nontronita (no). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.

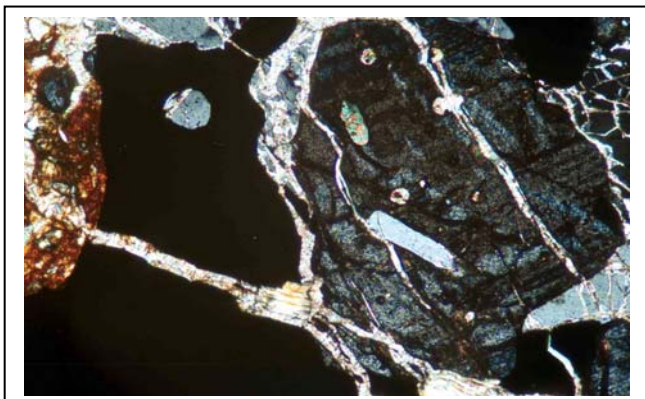
Fotomicrografia 4.42 – Amostra 12 - Cristais de apatita (ap) mostrando fraturas percoladas por goethita (gt). Aumento de 63x – LTP – nicóis cruzados.



Fotomicrografia 4.43 – Amostra 12 – Cristal de apatita (ap) mostrando inclusões fluidas tubulares, alinhadas segundo comprimento do cristal. Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.

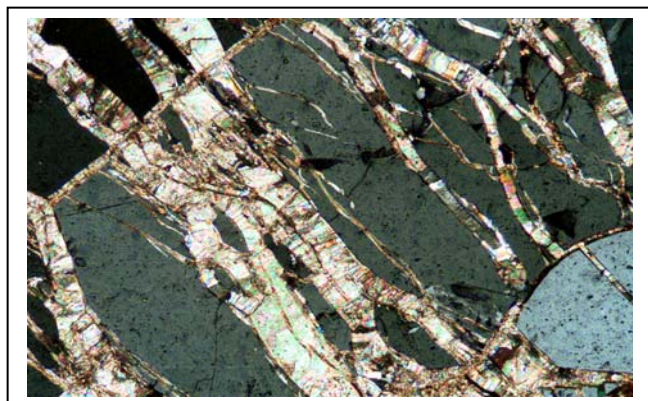
Fotomicrografia 4.44 – Amostra 6 – Detalhe de cristal de apatita (ap) incluído em perovskita (pv) e agregados de cristais de apatita cortados por venulações abundantes de carbonato (cb). Aumento de 100x – LTO – nicóis cruzados.





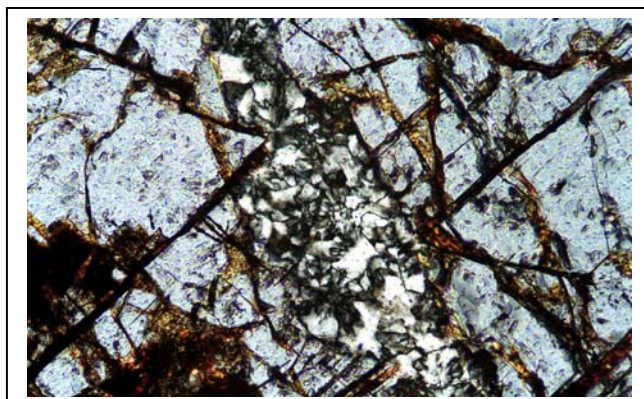
Fotomicrografia 4.45 – Amostra 6 – Cristais de apatita (ap) incluídos em magnetita (mt) e perovskita (pv). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados

Fotomicrografia 4.46 – Amostra 7 – Detalhe de cristal de apatita (ap) incluído em mineral micáceo (mc) ambos cortados por abundantes vênulas de carbonato (cb). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados



Fotomicrografia 4.47 – Amostra 6 – Detalhe de cristal subédrico de apatita (ap) cortado por vênulas de carbonato (cb). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados

Fotomicrografia 4.48 – Amostra 8 – Detalhe de cristal de apatita (ap) com fraturas percoladas por goethita (gt) e venulações de quartzo (qzo). Aumento de 100x – LTP – nicóis cruzados.



4.3.3 – Composição mineralógica por fração granulométrica

A composição mineralógica global de cada amostra da mina foi obtida através da integração da percentagem mineral de cada fração granulométrica e suas respectivas massas obtidas através da análise granulométrica. A percentagem em cada fração foi resultante da combinação dos dados obtidos através de três técnicas analíticas: análises químicas (cálculos estequiométricos), microscopia óptica (contagem de aproximadamente 1000-1500 partículas por fração granulométrica em uma malha regular) e difração de raios-X. Os resultados são apresentados por grupos de rochas.

- **CLINOPIROXENITOS POUCO ALTERADOS (AMOSTRAS 2, 5 e 10)**

As amostras 2 e 5 pertencentes a este tipo de minério são compostas principalmente por piroxênio (diopsídio), magnetita, carbonatos (calcita e dolomita) e minerais micáceos (camada mista do tipo flogopita/vermiculita e vermiculita), quantidade menor de apatita, perovskita e anatásio, ocorrendo ainda quantidade minoritária de ilmenita, goethita, quartzo, clorita e anfibólio. A amostra 10, apesar de ser constituída dos mesmos minerais, apresenta quantidades percentuais diferentes, sendo a apatita e os carbonatos abundantes. O piroxênio (diopsídio) ocorre em menor quantidade e encontra-se geralmente parcialmente alterado para um anfibólio de cor amarelada. As Tabelas 4.4 a 4.6 apresentam a composição mineralógica de cada amostra.

Tabela 4.4 – Composição mineralógica estimada para a amostra 2

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)											
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo	clo	af
+0,210	22,0	4	31	<1	2	15	3	33	6	3	<1	raro	<1
-0,210 + 0,149	20,8	6	25	<1	2	9	4	39	8	8	<1	raro	-
-0,149 + 0,105	14,5	7	21	raro	1	8	4	41	10	10	<1	-	<1
-0,105 + 0,074	10,9	8	18	<1	1	6	5	43	10	12	<1	<1	<1
-0,074 + 0,037	12,5	9	15	<1	1	3	7	42	10	16	<1	<1	<1
-0,037	19,4	7	13	<1	1	1	6	41	8	21	<1	raro	<1
Total calc.	100,0	6	21	<1	1	8	5	39	8	11	<1	<1	<1

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos; qtzo = quartzo; clo = clorita e af = anfibólio.

Tabela 4.5 – Composição mineralógica estimada para a amostra 5

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)											
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo	clo	af
+0,210	17,9	6	24	<1	<1	6	<1	45	15	6	-	-	raro
-0,210 + 0,149	21,7	8	22	<1	<1	5	<1	44	12	9	raro	raro	-
-0,149 + 0,105	15,3	9	18	raro	<1	5	1	41	12	13	-	-	-
-0,105 + 0,074	10,9	10	16	<1	<1	9	1	38	15	14	-	-	-
-0,074 + 0,037	12,9	11	12	<1	<1	6	<1	36	16	21	raro	-	-
-0,037	21,3	7	10	<1	<1	10	<1	28	17	29	-	-	-
Total calc.	100,0	8	17	<1	<1	7	<1	39	14	15	raro	raro	raro

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos; qtzo = quartzo; clo = clorita e af = anfibólio.

Tabela 4.6 – Composição mineralógica estimada para a amostra 10

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)									
		ap	mt	il	go	pv	at	px/af	mc	cb	qtzo
+0,210	7,3	17	16	<1	2	5	1	16	12	26	5
-0,210 + 0,149	15,3	20	18	<1	1	5	1	16	7	27	5
-0,149 + 0,105	18,6	22	18	<1	2	4	2	17	5	29	4
-0,105 + 0,074	13,0	25	15	<1	1	3	1	15	5	32	3
-0,074 + 0,037	14,8	25	14	raro	<1	3	<1	14	7	34	2
-0,037	31,0	19	13	raro	<1	5	<1	17	8	36	<1
Total calc.	100,0	21	15	<1	1	4	1	16	7	32	3

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px/af = piroxênio/anfibólio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos e qtzo = quartzo.

A apatita (mineral útil) varia de 6-8% em peso (amostras 2 e 5) até aproximadamente 21% em peso (amostra 10), verificando-se que ao longo da granulometria, sua proporção em peso aumenta da fração mais grossa (+0,210mm) em direção às frações mais finas (-0,074 + 0,037mm), diminuindo na fração -0,037mm. A apatita ocorre de forma granular e possui aspecto principalmente límpido, apesar de alguns grãos apresentarem inclusões fluidas e inclusões de carbonato. Recobrimento parcial por hidróxidos de ferro é incipiente ou mesmo inexistente, ocorrendo em menos de 3% dos grãos de apatita. Cristais de apatita cortados por venulações de carbonatos ou, às vezes, de quartzo podem ser observados em praticamente todas as frações granulométricas, havendo uma diminuição em direção às frações mais finas, onde aumenta o índice de liberação da apatita. O índice de liberação da apatita na fração -0,210 + 0,149mm varia entre 87% a 91%. Maiores detalhes sobre a forma de ocorrência da apatita podem ser visualizados no Anexo 1.

A magnetita constitui aproximadamente 15-21% em peso das amostras e sua proporção em peso possui tendência de diminuir da fração mais grossa (+0,210mm) para a fração mais fina (-0,037mm). Os carbonatos mostram comportamento inverso ao da magnetita, com conteúdos variando entre 11-15% (amostras 2 e 5) até 32% (amostra 10). O conteúdo de perovskita varia pouco nas amostras 5 e 10 (total de 4-7%), porém na amostra 2 observa-se uma tendência de diminuição para os finos, com proporção em peso variando entre 15 e 1%. O piroxênio, mineral de ganga abundante, e os minerais micáceos não variam muito ao longo da granulometria e mostram comportamento variado em cada amostra.

- **CLINOPIROXENITOS MICÁCEOS (AMOSTRAS 1, 4 e 9)**

As amostras 1 e 9 pertencentes a este tipo de minério são compostas principalmente por piroxênio (diopsídio), magnetita, minerais micáceos (camada mista do tipo flogopita/vermiculita e vermiculita) e apatita, quantidade menor de perovskita e anatásio, ocorrendo ainda quantidade minoritária de ilmenita, goethita, quartzo e carbonatos. Alguns grãos de piroxênio (diopsídio) encontram-se parcialmente alterados para anfibólio. A amostra 4 diferencia-se das demais pela presença de granada (melanita), quantidade mais abundante de carbonatos e minerais micáceos e menos abundante de apatita, magnetita e piroxênio. Quantidade minoritária de óxido de Mn, Ba e Fe, titanita e argilomineral podem ser observados na amostra 4. As Tabelas 4.7 a 4.9 apresentam a composição mineralógica de cada amostra.

Tabela 4.7 – Composição mineralógica estimada para a amostra 1

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)									
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo
+0,210	13,3	10	22	raro	<1	6	1	43	20	<1	<1
-0,210 + 0,149	23,1	16	23	raro	<1	6	3	38	14	<1	<1
-0,149 + 0,105	18,5	19	20	raro	<1	5	3	38	16	<1	<1
-0,105 + 0,074	11,8	18	17	<1	<1	4	3	39	19	<1	<1
-0,074 + 0,037	12,1	20	15	<1	<1	3	4	37	18	<1	<1
-0,037	21,2	15	17	raro	<1	5	4	37	25	1	<1
Total calc.	100,0	16	19	<1	<1	5	3	38	19	<1	<1

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos e qtzo = quartzo.

Tabela 4.8 – Composição mineralógica estimada para a amostra 4

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)										
		ap	mt	go	pv	at	px	mc	cb	gra	qtzo	af
+0,210	4,5	11	8	<1	11	4	12	31	9	11	1	2
-0,210 + 0,149	7,2	10	7	1	6	3	14	40	9	7	1	1
-0,149 + 0,105	9,4	9	8	<1	7	2	18	32	10	13	<1	1
-0,105 + 0,074	12,1	9	11	<1	7	2	16	30	10	14	<1	1
-0,074 + 0,037	22,2	10	12	<1	8	2	10	27	14	16	<1	1
-0,037	44,6	8	9	<1	4	3	19	28	16	11	1	1
Total calc.	100,0	9	10	<1	6	3	16	29	13	12	1	1

ap = apatita; mt = magnetita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos; gra = granada; qtzo = quartzo e af = anfibólio.

Tabela 4.9 – Composição mineralógica estimada para a amostra 9

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)									
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo
+0,210	10,1	11	24	<1	raro	8	<1	29	35	<1	1
-0,210 + 0,149	18,7	15	32	<1	raro	10	3	29	16	<1	2
-0,149 + 0,105	19,2	16	29	<1	raro	8	3	30	15	<1	2
-0,105 + 0,074	12,8	17	21	<1	raro	7	4	29	14	<1	2
-0,074 + 0,037	14,2	16	18	raro	raro	6	2	31	14	1	3
-0,037	25,0	12	19	raro	raro	8	3	33	19	2	1
Total calc.	100,0	14	24	<1	raro	8	3	30	18	1	2

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos e qtzo = quartzo.

A apatita (mineral útil) varia de 14-16% em peso (amostras 1 e 9) diminuindo para aproximadamente 9% em peso (amostra 4). Nas amostras 1 e 9, verifica-se que, ao longo da granulometria, a proporção em peso da apatita aumenta da fração mais grossa (+0,210mm) em direção às frações mais finas (-0,105 +0,037mm), diminuindo na fração -0,037mm. Na amostra 4 observa-se uma tendência inversa da proporção em peso da apatita, que varia entre 11-8%, com exceção da fração -0,074 +0,037mm, onde o teor de apatita eleva-se para 10%. Assim como observado no tipo de minério clinopiroxenito pouco alterado, a apatita ocorre de forma granular e possui aspecto principalmente límpido, apesar de alguns grãos apresentarem inclusões fluidas e inclusões de carbonato. Recobrimento parcial por hidróxidos de ferro é incipiente ou mesmo inexistente, ocorrendo em menos de 3% dos grãos de apatita. Cristais de apatita cortados por venulações de carbonatos podem ser observados na amostra 4 e, às vezes, também na amostra 9. Nessa última amostra, ocorrem também vênulas de quartzo

cortando a apatita. O índice de liberação da apatita na fração $-0,210 +0,149\text{mm}$ varia entre 93% a 97% (amostras 1 e 9, respectivamente), abaixando para 84% na amostra 4.

A magnetita constitui aproximadamente 10-24% em peso das amostras e sua proporção em peso, nas amostras 1 e 9, possui tendência de aumento até a fração $+0,149\text{mm}$, com diminuição em direção às frações mais finas ($-0,074\text{mm} +0,037\text{mm}$), seguida de um pequeno aumento na fração $-0,037\text{mm}$. Na amostra 4, a magnetita mostra um comportamento inverso, com conteúdos variáveis entre 7-12% em peso. A proporção em peso de carbonatos na amostra 4 varia entre 9-16%, com tendência a aumento para os finos. Nas amostras 1 e 9, os carbonatos também possuem tendência de aumento para os finos, porém sua proporção em peso é bem menor, variando entre <1% até no máximo 2%. O conteúdo de perovskita varia pouco nas amostras 1 e 9 (total de 5-8%), porém na amostra 4 observa-se uma maior variação de sua proporção em peso ao longo da granulometria, sendo observado comportamento semelhante à magnetita. A granada mostra proporção em peso variando entre 7-16% e comportamento ao longo da granulometria semelhante à magnetita e perovskita. O piroxênio não varia muito ao longo da granulometria, mostrando proporção em peso de 16% na amostra 4 e variando entre 30-38% (amostras 1 e 9). Os minerais micáceos possuem proporção em peso variando entre 18-19% (amostras 1 e 9) até 29% (amostra 4), apresentando comportamento variado ao longo da granulometria nas três amostras.

• **CLINOPIROXENITOS ARGILIZADOS (AMOSTRAS 11 e 12)**

A amostra 11 é composta principalmente por apatita, magnetita e nontronita (argilomineral esmectítico), quantidade menor de anatásio e minerais micáceos (camada mista do tipo flogopita/vermiculita), ocorrendo ainda quantidade minoritária de ilmenita, goethita, perovskita, piroxênio, quartzo e carbonatos. A amostra 12 é constituída principalmente de apatita, magnetita e minerais micáceos (camada mista do tipo biotita/vermiculita), quantidade menor de nontronita e anatásio, ocorrendo ainda quantidade minoritária de ilmenita, goethita, perovskita, piroxênio, titanita, quartzo e carbonatos. Verifica-se que a mineralogia das duas amostras é semelhante, diferindo-se apenas na quantidade de minerais micáceos, apatita e nontronita. As Tabelas 4.10 e 4.11 apresentam a composição mineralógica de cada amostra.

Tabela 4.10 – Composição mineralógica estimada para a amostra 11

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)										
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	arg	cb	qtzo
+0,210	15,7	34	47	1	1	3	7	1	1	4	raro	<1
-0,210 + 0,149	12,3	40	38	<1	2	3	8	1	2	6	<1	<1
-0,149 + 0,105	11,0	39	32	raro	2	1	12	1	2	11	<1	<1
-0,105 + 0,074	8,3	36	29	<1	1	1	8	1	5	18	<1	raro
-0,074 + 0,037	11,0	34	26	<1	2	1	8	<1	7	20	1	<1
-0,037	41,8	15	3	<1	1	1	8	<1	15	52	2	raro
Total calc.	100,0	28	22	1	1	2	8	1	8	28	1	<1

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; arg = argilomineral; cb = carbonatos e qtzo = quartzo.

Tabela 4.11 – Composição mineralógica estimada para a amostra 12

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)										
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	arg	cb	qtzo
+0,210	24,8	12	33	<1	<1	3	11	0	38	2	raro	0
-0,210 + 0,149	13,9	20	28	<1	1	2	9	0	37	2	raro	raro
-0,149 + 0,105	10,8	23	24	<1	1	3	10	raro	35	3	raro	raro
-0,105 + 0,074	7,9	27	20	<1	2	3	10	raro	35	3	raro	raro
-0,074 + 0,037	8,7	29	14	<1	1	2	11	raro	36	5	1	0
-0,037	33,9	9	8	<1	1	<1	15	raro	38	26	2	raro
Total calc.	100,0	16	20	<1	1	2	12	raro	37	11	1	raro

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; arg = argilomineral; cb = carbonatos e qtzo = quartzo.

A apatita (mineral útil) na amostra 11 constitui 28% em peso, verificando-se um aumento da proporção em peso da fração +0,210mm para a fração +0,149mm, seguido de uma tendência de diminuição em direção aos finos. Na amostra 12 a proporção em peso da apatita aumenta da fração +0,210mm (12%) até a fração -0,074 +0,037mm (29%), seguido de uma queda na fração -0,037mm, onde o teor é de aproximadamente 9%. A apatita ocorre de forma granular e possui aspecto principalmente límpido, apesar de alguns grãos apresentarem inclusões fluidas e inclusões de carbonato. Na amostra 12 predominam grãos de apatita porosos e com inclusões fluidas e não foi observado inclusões de carbonato. Recobrimento parcial por hidróxidos de ferro é incipiente ou mesmo inexistente, ocorrendo em menos de 5% dos grãos de apatita. Não foram observados cristais de apatita cortados por venulações de carbonatos. O índice de liberação da apatita na fração -0,210 +0,149mm varia entre 92% a 95%.

A magnetita constitui aproximadamente 20-22% em peso das amostras e ao longo da granulometria sua proporção em peso possui tendência de diminuição em direção às frações mais finas. A perovskita e anatásio constituem aproximadamente 2% e 8-12% em peso, respectivamente nas amostras e não variam muito ao longo da granulometria. Na amostra 11 os minerais micáceos constituem aproximadamente 8% em peso e mostram tendência de aumento para os finos. Já na amostra 12, a proporção em peso dos minerais micáceos não varia muito ao longo da granulometria e eles constituem aproximadamente 37% em peso. A nontronita apresenta tendência de aumento em direção às frações mais finas e constitui aproximadamente 11% na amostra 12, aumentando para cerca de 28% na amostra 11.

• **CLINOPIROXENITOS RICOS EM MAGNETITA E PEROVSKITA (AMOSTRAS 3, 6, 7 e 8)**

As amostras 3, 6, 7 e 8 pertencentes a este tipo de minério são compostas principalmente por magnetita, carbonatos (calcita e dolomita), perovskita e apatita, com quantidade menor de piroxênio (diopsídio), minerais micáceos (camada mista do tipo flogopita/vermiculita e vermiculita), goethita, anatásio e quartzo, ocorrendo ainda quantidade minoritária de ilmenita, hematita e pirita. Raros grãos de argilomineral podem ser observados. As Tabelas 4.12 a 4.15 apresentam a composição mineralógica de cada amostra.

Tabela 4.12 – Composição mineralógica estimada para a amostra 3

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)										
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo	he
+0,210	15,7	13	35	raro	5	20	5	5	4	10	1	raro
-0,210 + 0,149	22,6	17	27	raro	4	18	6	10	6	13	<1	raro
-0,149 + 0,105	16,4	20	25	raro	3	15	6	14	6	15	raro	-
-0,105 + 0,074	11,9	23	22	<1	4	14	6	14	6	16	-	raro
-0,074 + 0,037	13,4	28	16	<1	5	13	3	8	7	22	-	raro
-0,037	20,1	17	15	<1	5	19	1	5	7	27	-	raro
Total calc.	100,0	19	23	<1	4	17	4	9	6	17	<1	raro

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos; qtzo = quartzo e he = hematita.

Tabela 4.13 – Composição mineralógica estimada para a amostra 6

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)										
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo	he
+0,210	29,8	8	36	raro	5	18	4	7	4	13	8	raro
-0,210 + 0,149	18,2	15	29	raro	4	17	4	10	7	10	5	raro
-0,149 + 0,105	13,0	18	27	raro	3	14	3	11	9	18	3	raro
-0,105 + 0,074	9,7	19	20	raro	2	10	5	11	8	20	2	0
-0,074 + 0,037	11,2	20	17	<1	1	10	3	12	7	29	1	0
-0,037	18,1	15	15	raro	<1	5	5	12	6	33	<1	0
Total calc.	100,0	14	26	raro	3	13	4	10	6	19	4	raro

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos; qtzo = quartzo e he = hematita.

Tabela 4.14 – Composição mineralógica estimada para a amostra 7

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)									
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo
+0,210	26,8	8	25	<1	3	24	6	7	2	17	8
-0,210 + 0,149	18,0	14	23	<1	1	20	4	9	4	22	5
-0,149 + 0,105	13,3	18	20	<1	1	15	4	9	6	21	4
-0,105 + 0,074	9,3	20	15	<1	1	13	4	8	5	21	3
-0,074 + 0,037	11,0	21	13	<1	1	11	3	8	5	34	2
-0,037	21,6	14	14	<1	1	14	2	9	5	40	4
Total calc.	100,0	14	19	<1	2	17	4	8	4	26	5

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos e qtzo = quartzo.

Tabela 4.15 – Composição mineralógica estimada para a amostra 8

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)									
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo
+0,210	19,5	9	31	raro	2	22	6	10	4	13	6
-0,210 + 0,149	20,7	12	28	raro	1	19	5	11	5	19	2
-0,149 + 0,105	16,8	16	25	raro	<1	19	4	11	7	18	1
-0,105 + 0,074	10,9	19	20	raro	1	15	5	12	7	18	1
-0,074 + 0,037	11,9	21	17	raro	<1	14	1	14	6	24	1
-0,037	20,2	13	16	raro	<1	15	1	16	5	30	5
Total calc.	100,0	14	23	raro	1	18	4	12	5	20	3

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos e qtzo = quartzo.

A apatita (mineral útil) constitui aproximadamente 14-19% em peso das amostras, verificando-se que ao longo da granulometria sua proporção em peso aumenta da fração mais grossa (+0,210mm) em direção às frações mais finas (-0,074 +0,037mm), diminuindo na fração -0,037mm. Assim como observado nos tipos de minérios clinopiroxenito pouco alterado e clinopiroxenito micáceo, a apatita ocorre de forma

granular e possui aspecto principalmente límpido, apesar de alguns grãos apresentarem inclusões fluidas e inclusões de carbonato. Recobrimento parcial por hidróxidos de ferro é incipiente e ocorre em menos de 2% dos grãos de apatita. Cristais de apatita cortados por venulações de carbonatos e, às vezes, também de quartzo são muito comuns, geralmente com uma tendência da diminuição das vênulas em direção às frações mais finas. O índice de liberação da apatita na fração $-0,210 +0,149\text{mm}$ varia entre 90% a 92% nas amostras 3 e 6, abaixando para 82%-87% nas amostras 7 e 8.

A magnetita constitui aproximadamente 19-26% em peso das amostras e ao longo da granulometria sua proporção em peso possui tendência de diminuição em direção às frações mais finas. A perovskita constitui aproximadamente 13-18% das amostras e possui comportamento semelhante ao da magnetita, apesar de nas amostras 3, 7 e 8 aumentar um pouco sua proporção em peso da fração $-0,074 +0,037\text{mm}$ para a fração $-0,037\text{mm}$. A proporção em peso de carbonatos varia entre 17-26%, com tendência a aumento para os finos. O piroxênio mostra proporção em peso variando entre 8-12% das amostras e apresenta comportamento variado, apesar de uma tendência de pequeno aumento em direção às frações mais finas na maioria das amostras. Os minerais micáceos possuem proporção em peso variando entre 4-6% e não variam muito ao longo da granulometria.

4.3.4 – Sumário

- De acordo com as características mineralógicas e grau de alteração das amostras de minério estudadas, os clinopiroxenitos foram divididos em quatro grupos: clinopiroxenitos pouco alterados (amostras 2, 5 e 10); clinopiroxenitos micáceos (amostras 1, 4 e 9); clinopiroxenitos argilizados (amostras 11 e 12); clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (amostras 3, 6, 7 e 8).
- Os clinopiroxenitos possuem granulação predominante média a grossa, textura granular e são compostos por quantidades variadas de diopsídio parcialmente alterado, ou não, para anfibólio, magnetita, apatita, carbonatos (calcita e dolomita), minerais micáceos (filossilicatos de camadas mistas – flogopita/vermiculita,

vermiculita pura e, às vezes, clorita), perovskita/anatásio, bem como quartzo, ilmenita e goethita. Os clinopiroxenitos argilizados possuem quantidade abundante de esmectita do tipo nontronita e a amostra 4 (clinopiroxenito micáceo) mostra abundante granada do tipo melanita.

- Os cristais de apatita observados em todos os tipos de minério estudados são relativamente semelhantes. Possuem granulação variando entre 0,02mm a 6,0mm (com exceção dos clinopiroxenitos argilizados, onde foram observados cristais de até 2,5cm), forma preferencialmente anédrica, porém ocorrendo também cristais prismáticos e hexagonais, superfície de corte lisa e geralmente são límpidos, apesar de alguns mostrarem inclusões fluidas arredondadas e tubulares e inclusões principalmente de carbonato. Somente na amostra 12 (clinopiroxenito argilizado), a apatita possui aspecto principalmente poroso e não foi observada inclusão de carbonato. A apatita encontra-se disseminada no minério, ocupando os espaços intergranulares dos demais minerais ou como inclusões na magnetita, piroxênio/anfibólio, minerais micáceos, perovskita e goethita. Nos clinopiroxenitos pouco alterados, micáceos (exceção da amostra 1) e ricos em magnetita e perovskita, grande parte dos cristais de apatita encontram-se cortados por venulações de carbonato e, às vezes, de quartzo.
- Com exceção das amostras de clinopiroxenitos argilizados e da amostra 1 (clinopiroxenito micáceo), os carbonatos ocorrem principalmente sob a forma de venulações cortando os demais minerais constituintes dos clinopiroxenitos, ou ainda como inclusões na apatita e, mais raramente, disseminados pela rocha. As amostras de clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (3, 6, 7 e 8) e a amostra 10 (clinopiroxenito pouco alterado) possuem os maiores teores de carbonatos. A Tabela 4.16 resume suas formas de ocorrência em cada amostra estudada.

Tabela 4.16 – Formas de ocorrência dos carbonatos nos clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG

Tipo de rocha	Amostra	Forma de ocorrência dos carbonatos
clinopiroxenito pouco alterado	2	<ul style="list-style-type: none"> • principalmente em vênulas • ocorre também como inclusões na apatita
	5	<ul style="list-style-type: none"> • principalmente em vênulas • ocorre também como inclusões na apatita
	10	<ul style="list-style-type: none"> • principalmente em vênulas • ocorre também como inclusões na apatita
clinopiroxenito micáceo	1	<ul style="list-style-type: none"> • inclusões na apatita
	4	<ul style="list-style-type: none"> • principalmente em vênulas • ocorre também como inclusões na apatita
	9	<ul style="list-style-type: none"> • em vênulas • nos espaços intergranulares dos demais minerais • como inclusões na apatita
clinopiroxenito argilizado	11	<ul style="list-style-type: none"> • inclusões na apatita
	12	<ul style="list-style-type: none"> • não foi observado carbonato na lâmina petrográfica
clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita	3	<ul style="list-style-type: none"> • principalmente em vênulas • ocorre também como inclusões na apatita
	6	<ul style="list-style-type: none"> • principalmente em vênulas • ocorre também como inclusões na apatita
	7	<ul style="list-style-type: none"> • principalmente em vênulas • em agregados de cristais granulares disseminados • como inclusões na apatita
	8	<ul style="list-style-type: none"> • principalmente em vênulas • em agregados de cristais granulares disseminados • como inclusões na apatita

- Estudos das amostras por fração granulométrica indicou que, em quase todas elas (exceção as amostras 4 e 11), a proporção em peso da apatita aumenta da fração mais grossa (+0,210mm) em direção às frações mais finas (-0,074 +0,037mm), diminuindo na fração -0,037mm.

4.4 – ANÁLISES QUÍMICAS

4.4.1 – Análises químicas totais

Com o objetivo de se obter a caracterização química das amostras totais referentes às rochas selecionadas para este estudo, aflorantes na Mina de Tapira, foram feitas determinações analíticas englobando análises quantitativas de elementos maiores, elementos traços e elementos terras-raras (ETR). Todos os elementos estão expressos em porcentagem e os resultados mostrados na Tabela 4.17 são decorrentes de várias técnicas analíticas descritas no item 2.4.2.

Os resultados analíticos são consistentes com a mineralogia identificada em cada amostra de minério, o que indica uma boa representatividade para as mesmas. Os clinopiroxenitos pouco alterados (amostras 2 e 5) apresentam o menor teor de P_2O_5 (~3,4%) dentre todas as amostras, sendo exceção a amostra 10 que possui um teor bastante elevado (P_2O_5 ~9,6%). Os grupos de minérios que mostram os valores mais elevados de P_2O_5 são os clinopiroxenitos argilizados (6,37 - 11,80) e os clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (5,89 - 8,96). Estes valores são consistentes com a porcentagem de apatita observada nessas amostras.

Com relação ao teor de Fe_2O_3 , existe uma certa homogeneidade entre os tipos de minérios estudados, com valores variando entre 12,1% até 19,5%, sendo exceção os clinopiroxenitos argilizados, que apresentam valores em torno de 26%. Esses valores mais elevados nesse tipo de minério podem ser explicados pela presença de um argilomineral do tipo nontronita (argila rica em ferro), além de abundante magnetita, essa última observada em todas as amostras estudadas. A amostra 12 (clinopiroxenito argilizado) possui quantidade abundante do filossilicato de camada mista do tipo biotita/vermiculita, o que contribui também para o aumento no teor de Fe_2O_3 .

Tabela 4.17 – Análise química dos clinopiroxenitos da Mina de Tapira-MG

Elementos (% em peso)	Nº da Amostra											
	2	5	10	1	4	9	11	12	3	6	7	8
P ₂ O ₅	3,42	3,44	9,60	6,84	3,85	5,29	11,80	6,37	8,96	6,87	5,91	5,89
Fe ₂ O ₃	16,80	13,80	12,1	14,7	15,2	19,5	26,30	26,83	17,70	19,30	13,90	17,40
MgO	10,30	11,90	4,63	11,9	11,3	8,58	1,32	6,15	7,80	5,68	5,25	5,15
CaO	24,4	25,20	31,1	20,3	20,8	16,8	16,80	11,3	28,10	26,60	27,30	27,4
Al ₂ O ₃	1,11	1,75	0,70	2,43	3,44	1,72	4,26	5,87	0,66	0,78	0,40	0,41
SiO ₂	26,04	27,58	19,3	30,7	26,8	34,1	16,8	23,56	13,48	18,49	19,30	15,5
TiO ₂	7,57	3,31	3,72	7,03	6,34	9,88	11,8	12,04	12,80	10,20	14,30	17,6
Na ₂ O	1,33	0,89	0,50	0,45	0,10	0,37	0,10	0,43	0,94	0,20	0,14	0,12
K ₂ O	0,41	0,18	0,51	0,70	1,50	0,25	0,18	1,46	0,22	0,088	0,18	0,11
MnO	0,23	0,20	0,24	0,19	0,24	0,23	0,43	0,31	0,20	0,28	0,24	0,23
BaO	0,052	0,072	0,40	0,055	0,14	0,042	0,16	0,14	0,043	0,054	0,21	0,10
SrO	0,17	0,13	0,73	0,23	0,27	0,18	0,23	0,25	0,34	0,24	0,34	0,25
ZrO ₂	0,14	0,17	0,013	0,051	0,10	0,044	0,10	0,09	0,074	0,048	0,06	0,07
ThO ₂	0,005	0,005	0,035	<0,005	<0,005	<0,005	0,017	<0,005	0,014	0,009	0,009	0,009
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,012	0,010	0,020	0,010	0,009	0,011	0,024	0,011	0,02	0,016	0,013	0,01
Nb ₂ O ₅	0,11	0,062	0,10	0,097	0,070	0,090	0,17	0,08	0,16	0,11	0,11	0,12
La ₂ O ₃	0,11	0,057	0,14	0,11	0,070	0,12	0,21	0,081	0,18	0,13	0,15	0,17
CeO ₂	0,22	0,11	0,35	0,23	0,16	0,24	0,43	0,16	0,37	0,28	0,34	0,38
Pr ₆ O ₁₁	0,024	0,011	0,040	0,025	0,017	0,030	0,043	0,018	0,042	0,03	0,037	0,042
Nd ₂ O ₃	0,081	0,040	0,15	0,083	0,060	0,090	0,15	0,059	0,14	0,10	0,13	0,15
Sm ₂ O ₃	0,012	0,005	0,022	0,014	0,008	0,013	0,022	0,009	0,021	0,015	0,019	0,021
Eu ₂ O ₃	<0,002	<0,002	0,005	<0,002	<0,002	0,003	0,006	<0,002	0,004	0,003	0,004	0,004
Gd ₂ O ₃	0,006	0,004	0,010	0,010	<0,004	0,007	0,012	0,005	0,011	0,008	0,009	0,010
Dy ₂ O ₃	<0,004	<0,004	<0,004	0,007	<0,004	<0,004	0,007	<0,004	0,006	<0,004	<0,004	0,005
F	0,14	0,13	0,25	0,24	0,23	0,14	0,21	0,60	0,24	0,22	0,14	0,13
P.F.	9,01	9,75	16,3	3,64	9,57	4,19	8,98	6,04	9,75	11,40	13,30	10,8
CaO/P ₂ O ₅	7,13	7,33	3,24	2,97	5,40	3,18	1,42	1,77	3,14	3,87	4,62	4,65
Total	102,06	98,81	100,96	100,04	100,27	101,92	100,52	101,86	102,28	101,15	101,79	102,08

Amostras 2, 5 e 10 – clinopiroxenito pouco alterado; amostras 1, 4 e 9 – clinopiroxenito micáceo; amostras 11 e 12 – clinopiroxenito argilizado; amostras 3, 6, 7 e 8 – clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita.

Obs.: os resultados dos elementos terras-raras desta tabela foram obtidos pelo método Kevex.

Os valores de MgO variam bastante entre as amostras estudadas (1,32% até 11,90%) e estão relacionados com a presença de diversos minerais (diopsídio, camadas mistas, vermiculita, dolomita e anfibólio). Os grupos de minérios que apresentam os menores valores de MgO são os clinopiroxenitos argilizados (1,32 - 6,15%) e os clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (5,15 - 7,80%). Os clinopiroxenitos pouco alterados e micáceos mostram valores de MgO entre 8,58% - 11,90%, sendo exceção a amostra 10 de clinopiroxenito pouco alterado que possui valor de ~4,6%. Isto é explicado pela menor quantidade de diopsídio presente nessa amostra, além de sua alteração parcial para anfibólio.

Com relação aos valores de CaO, observa-se que existe variação significativa entre os teores analisados (11,3% - 31,10%), estando esse elemento também relacionado com a presença de diversos minerais, tais como: apatita, perovskita, diopsídio e carbonatos. Os teores de CaO mais elevados ocorrem nos clinopiroxenitos pouco alterados (24,4 - 31,1%) e nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (26,6 - 28,1%). Nos clinopiroxenitos pouco alterados o CaO reflete a ocorrência de abundante diopsídio, juntamente com perovskita, carbonato e apatita. Já para os clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita, os valores elevados de CaO são confirmados pela presença de quantidade abundante de perovskita, carbonatos e apatita, além de pouco diopsídio. O menor teor de CaO apresentado pelos clinopiroxenitos argilizados (11,3 - 16,8%) decorre da presença de pouquíssimo carbonato e piroxênio nesse tipo de minério.

Verificam-se pelos dados acima que, como a mineralogia das diferentes amostras é similar, variando somente a porcentagem, muitas vezes os valores de alguns elementos maiores são semelhantes, como por exemplo CaO (amostras 2, 5, 10, 3, 6, 7 e 8) e MgO (amostras 2, 5, 1 e 4), apesar das amostras estarem em grupos de minérios distintos. Isso é explicado pelo fato de um mesmo elemento, como por exemplo o Ca estar presente em minerais distintos, tais como apatita, perovskita, diopsídio, carbonatos, titanita e granada. Esse fato impossibilita a separação dos tipos de minérios levando em consideração somente os teores da maioria dos elementos maiores analisados.

Os teores de Al_2O_3 variam entre 0,40 - 5,87% e estão relacionados com a presença de minerais micáceos (principalmente camadas mistas e vermiculita), bem como argilomineral, granada e fosfatos secundários aluminosos. Esses últimos foram identificados na amostra 12, como produtos de alteração do anatásio, através da técnica de MEV (item 4.5). Os maiores teores são observados nos clinopiroxenitos argilizados (4,26 - 5,87%), devido ao seu grau de alteração, sendo refletido pela presença de abundante argilomineral, minerais micáceos e fosfatos secundários e nos clinopiroxenitos micáceos (1,72 - 3,44%), em função da ocorrência de abundantes minerais micáceos. Os menores teores de Al_2O_3 (0,4 - 0,78%) ocorrem nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita.

Os valores de SiO_2 variam entre 13,48 - 34,1%, sendo os menores valores observados nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita, devido à pequena quantidade de silicatos (cerca de 15 - 20% em peso das amostras), sendo identificados como minerais micáceos, piroxênio e quartzo. Os clinopiroxenitos micáceos exibem os maiores valores de SiO_2 (26,8 - 34,1%) refletindo a presença de vários silicatos, principalmente diopsídio, minerais micáceos e granada (amostra 4), que geralmente constituem cerca de 50% ou mais dos minerais dessas rochas, bem como quantidade minoritária de anfibólio e quartzo.

Os teores de TiO_2 também variam bastante entre as amostras (3,31 - 17,6%). Esta variação é devido à presença dos minerais perovskita, magnetita titanífera, anatásio, ilmenita, e localmente fosfatos secundários, titanita, granada e minerais micáceos. Os teores mais elevados estão presentes nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (10,2 - 17,6%) e nos clinopiroxenitos argilizados (11,8 - 12,04%).

A tabela 4.18 apresenta o conteúdo dos ETR expressos em ppm para os diversos tipos de minérios estudados, bem como a somatória dos ETR leves e pesados, o conteúdo total dos ETR e as razões ETR leves/pesados, lantânio (La)/samário (Sm) e lantânio (La)/itérbio (Yb), sendo as duas últimas normalizadas para condritos. Estão apresentados os valores de ETR obtidos por espectrometria de emissão por plasma induzido (ICP) por serem bastante semelhantes com os resultados da espectrometria de energia de raios-X por excitação de raios gama (Kevex) e abrangerem um número maior

de elementos. Os resultados obtidos por espectrometria de energia de raios-X estão apresentados na Tabela 4.17, porém, expressos em óxidos. Os valores utilizados para normalização são de Evensen *et al.* (1978), que calcularam as abundâncias médias em condritos representativos das abundâncias solares, e contêm os seguintes teores em ppm: La (0,2446), Ce (0,6379), Pr (0,09637), Nd (0,4738), Sm (0,1540), Eu (0,05802), Gd (0,2043), Dy (0,25410), Er (0,1660) e Yb (0,1651).

Tabela 4.18 – Análise química dos clinopiroxenitos da Mina de Tapira-MG
– elementos das terras-raras

Elementos (ppm)	Nº da amostra											
	2	5	10	1	4	9	11	12	3	6	7	8
La	900,0	450,0	1100,0	800,0	1120,0	930,0	1520,0	645,0	1370,0	1110,0	1200,0	1280,0
Ce	1620,0	780,0	2320,0	1480,0	1130,0	1670,0	2800,0	1200,0	2520,0	1970,0	2300,0	2550,0
Pr	-	-	-	150,0	120,0	-	-	-	-	-	-	-
Nd	640,0	300,0	1040,0	560,0	440,0	620,0	1000,0	450,0	1000,0	780,0	920,0	980,0
Sm	122,0	61,0	205,0	120,0	110,0	125,0	205,0	92,0	195,0	155,0	170,0	195,0
Eu	27,0	13,0	40,0	24,0	17,0	25,0	42,0	20,0	41,0	33,0	33,0	37,0
Gd	70,0	48,0	97,0	94,0	75,0	64,0	99,0	55,0	98,0	82,0	77,0	89,0
Dy	32,0	19,0	47,0	30,0	24,0	29,0	57,0	26,0	44,0	37,0	35,0	38,0
Er	16,0	17,0	28,0	14,0	12,0	19,0	33,0	21,0	28,0	29,0	20,0	27,0
Yb	6,4	5,6	8,3	5,3	4,7	5,8	12,0	6,7	7,5	6,9	6,3	6,5
ETRL	3282,0	1591,0	4665,0	3110,0	2920,0	3345,0	5525,0	2387,8	5085,0	4015,0	4590,0	5005,0
ETRP	124,4	89,6	180,3	143,3	115,7	117,8	243,0	108,7	177,5	154,9	138,3	160,5
(ETR) _{total}	3433,4	1693,6	4885,3	3277,3	3052,7	3487,8	5810,0	2516,5	5303,5	4202,9	4761,3	5202,5
ETRL/ETRP	26,4	17,8	25,9	21,7	25,2	28,4	22,7	22,0	28,7	25,9	33,2	31,2
(La/Sm) _n	4,65	4,65	3,38	4,20	6,41	4,68	4,67	4,41	4,42	4,51	4,44	4,13
(La/Yb) _n	94,9	54,3	89,5	101,9	160,8	108,2	85,5	65,0	123,3	108,6	128,6	132,9

Amostras 2, 5 e 10 – clinopiroxenitos pouco alterados; amostras 1, 4 e 9 – clinopiroxenitos micáceos; amostras 11 e 12 – clinopiroxenitos argilizados; amostras 3, 6, 7 e 8 – clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita.

Obs.: O método analítico utilizado foi espectrometria de emissão por plasma induzido (ICP).

A figura 4.15 mostra as curvas dos ETR normalizadas para condritos para os diversos tipos de minérios estudados.

A razão ETRL/ETRP para os clinopiroxenitos varia entre 17,8 a 33,2, indicando enriquecimento em elementos de terras-raras leves para essas rochas. Essa elevada razão entre ETRL e ETRP é refletida nas curvas de abundância de ETR, que apresentam inclinação negativa. Esses padrões de curvas de ETR tipicamente enriquecidos em

ETRL em relação aos ETRP são característicos de complexos alcalinos-carbonatíticos. Segundo Cullers & Graf *apud* Henderson (1984) os carbonatitos possuem o maior conteúdo de terras-raras (Σ ETR= 72 - 15.515ppm) e razão ETRL/ETRP $(La/Lu)_n = 7,1 - 1240$) de todos os outros tipos de rochas. As rochas silicáticas alcalinas associadas com carbonatitos (comumente rochas ultramáficas-máficas das séries urtito-ijolito-melteigito-piroxenito e nefelina-sienito) apresentam um conteúdo menor de terras-raras e razão ETRL/ETRP menor ou similar do que os carbonatitos associados. A distribuição de ETR nas séries ijolito associadas com carbonatitos assemelha-se com o conteúdo de ETR dos kimberlitos.

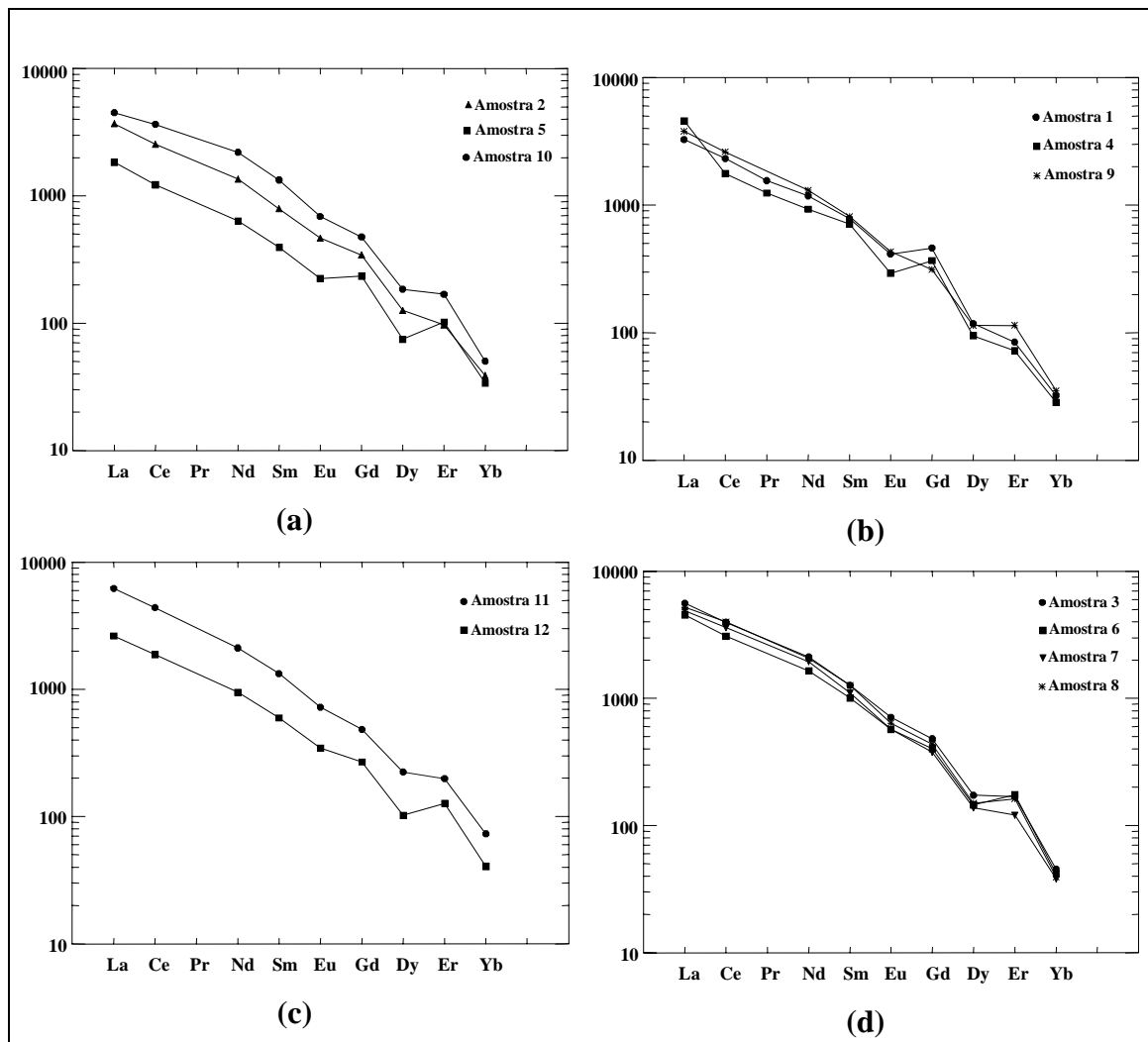


Figura 4.15 – Curvas de ETR, normalizadas para condritos (a) clinopiroxenitos pouco alterados; (b) clinopiroxenitos micáceos; (c) clinopiroxenitos argilizados; (d) clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita da Mina de Tapira-MG. Valores de normalização de Evensen *et al.* (1978).

Com relação às rochas alcalinas de Araxá, os valores normalizados de lantânio situam-se entre 1500 e 9000 decrescendo para valores de lutécio entre 1 e 30. Para as rochas alcalinas de Catalão, o padrão de distribuição dos ETR começa com valores de lantânio normalizados para condritos entre 800 e 26000 e termina com valores de itérbio aproximadamente 7 (Morteani & Preinfalk, 1996). Os clinopiroxenitos de Tapira-MG mostraram valores normalizados de lantânio entre 1800 e 6300, estando dentro dos valores para complexos alcalino-carbonatíticos.

A razão $(La/Sm)_n$ é quase homogênea para os diversos tipos de minérios, variando entre 3,38 a 6,31 (porém com valor mais comum em torno de 4,5), mostrando um comportamento relativamente constante dos ETRL para esses diferentes tipos de rochas.

O conteúdo total dos elementos das terras-raras é mais elevado nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (4202,9 - 5303,5ppm); amostra 11 (5810,0ppm) pertencente aos clinopiroxenitos argilizados e amostra 10 (4885,3ppm) pertencente aos clinopiroxenitos pouco alterados. Isso pode ser explicado pelo fato dessas rochas apresentarem maior quantidade de perovskita e/ou apatita, minerais esses considerados como principais portadores dos ETR no Complexo carbonatítico de Tapira (Soubiès *et al.*, 1991; Vieira, 1997 e Brod, 1999). Outros minerais portadores de ETR identificados por MEV (item 4.5) são a monazita (principalmente amostras 10 e 11), fosfatos secundários do grupo da crandalita (amostra 12) e do rabdofânio (amostras 11 e 12) e escasso carbonato de Sr, Ca e ETR (amostra 8).

4.4.2 – Análises químicas por fração granulométrica

Todas as doze amostras coletadas na mina de Tapira foram caracterizadas quimicamente por frações granulométricas, sendo feitas análises quantitativas de praticamente todos os elementos analisados nas amostras globais. As análises de todos os teores por faixa granulométrica encontram-se no Anexo 3, onde os elementos analisados estão expressos em porcentagem ponderal. O balanço granuloquímico foi feito somente nos principais elementos e pode ser visualizado nas Tabelas 4.19 a 4.30 e Figuras 4.16 a 4.39.

Os resultados analíticos mostram que os teores de P_2O_5 são variáveis para as 12 amostras, porém para os clinopiroxenitos pouco alterados (amostras 2, 5 e 10), clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (amostras 3, 6, 7 e 8), clinopiroxenitos micáceos (amostras 1 e 9) e clinopiroxenito argilizado (amostra 12), observa-se uma tendência geral de aumento da fração +0,210mm em direção à fração -0,074 +0,037mm, seguido de sua diminuição na fração mais fina (-0,037mm). As amostras 11 (clinopiroxenito argilizado) e 4 (clinopiroxenito micáceo) são exceções, sendo verificado uma tendência de diminuição do teor de P_2O_5 das frações mais grossas (+0,210mm e +0,149mm) para a fração mais fina (-0,037mm). Essa tendência observada em todas as amostras é bastante coerente com a porcentagem de apatita encontrada nessas frações granulométricas. A fração -0,074 +0,037mm, que possui o maior teor de P_2O_5 para quase todas as amostras (exceção das amostras 4 e 11) é responsável por cerca de 14-17% do total de P_2O_5 contido nas mesmas.

Nota-se que em praticamente todas as amostras (exceção da amostra 4), o comportamento do teor de CaO é muito semelhante ao do P_2O_5 . Nas amostras de clinopiroxenitos pouco alterados (2, 5 e 10) os teores de CaO variam entre 19,80-26,20% (fração +0,210mm) e 24,40-33,30% (fração -0,074 +0,037mm), observando-se uma tendência de aumento para os finos. Na fração -0,037mm, o teor de CaO diminui na amostra 10 e aumenta nas amostras 2 e 5. Nas amostras de clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (3, 6, 7 e 8) os teores de CaO variam entre 19,60-22,80% (fração +0,210mm) e 29,20-31,00% (fração -0,074 +0,037mm), verificando-se uma tendência de aumento para os finos. Na fração -0,037mm, o teor de CaO diminui nas amostras 3, 7 e 8 e aumenta na amostra 6. Na amostra 12 (clinopiroxenito argilizado), o teor de CaO segue essa mesma tendência, variando entre 9,72% (fração +0,210mm) e 19,30% (fração -0,074 +0,037mm). Na amostra 11, o teor de CaO comporta-se de forma contrária às outras amostras, havendo uma tendência de diminuir das frações mais grossas para as mais finas. Nas amostras 1 e 9 de clinopiroxenitos micáceos, o teor de CaO aumenta da fração +0,210mm (14,40-18,10%) até a fração -0,149 +0,105mm (20,00-22,40%), diminuindo em direção às frações mais finas. Na amostra 4, o CaO possui um comportamento mais aleatório, sendo semelhante ao comportamento do Fe_2O_3 e TiO_2 na mesma. Isso pode ser explicado pela presença dos minerais perovskita

e granada do tipo melanita, que apresentam comportamento semelhante e possuem esses elementos em suas estruturas.

Os teores de Fe_2O_3 e TiO_2 nas amostras de clinopiroxenitos pouco alterados, argilizados e ricos em magnetita e perovskita possuem uma tendência geral de decréscimo da fração mais grossa (+0,210mm) para a fração mais fina (-0,037mm). As amostras de clinopiroxenitos micáceos (1, 4 e 9) possuem um comportamento diferente com relação à esses óxidos, sendo observado para as amostras 1 e 9 um aumento do Fe_2O_3 da fração +0,210mm para a fração seguinte (-0,210 +0,149mm), seguido da diminuição do teor até à fração -0,074 +0,037mm. No caso do TiO_2 , o teor aumenta da fração +0,210mm para a fração -0,149 +0,105mm, seguido de sua diminuição em direção à fração mais fina (-0,037mm). Comportamento semelhante pode ser verificado para o teor de TiO_2 na amostra 10. Para a amostra 4 verifica-se uma diminuição do teor de Fe_2O_3 e TiO_2 da fração +0,210mm para a fração +0,149mm, seguido de uma tendência de aumento do teor em direção à fração -0,074 +0,037mm. Na fração mais fina (-0,037mm) os teores de Fe_2O_3 e TiO_2 diminuem novamente. O comportamento do Fe_2O_3 é bastante coerente com a porcentagem de magnetita e granada, principais minerais portadores de ferro nessa amostra.

Vale ressaltar que os teores dos óxidos de terras raras (OTR) seguem aproximadamente a mesma tendência do TiO_2 em todas as 12 amostras. Esse fato pode ser explicado pela íntima associação entre esses dois elementos, uma vez que a perovskita consiste no principal hospedeiro de ETR nessas amostras.

Com relação ao teor de MgO verificam-se pelos resultados que, para as amostras de clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (3, 6, 7 e 8), os teores variam entre 3,5-4,5% (fração +0,210mm) e 6,6-9,5% (fração -0,037mm), existindo uma tendência de aumento para os finos. Essa mesma tendência pode ser observada somente na amostra 11 (clinopiroxenito argilizado). Nas demais amostras o comportamento do MgO é variado.

Os teores de Al_2O_3 para as amostras de clinopiroxenitos pouco alterados (2, 5 e 10) e clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (3, 6, 7 e 8) apresentam valores relativamente próximos entre as frações e são $<2\%$ e $<1\%$, respectivamente. Nas amostras de clinopiroxenitos argilizados (amostras 11 e 12), o Al_2O_3 possui comportamento inverso nas duas amostras, isto é, na amostra 11 ele aumenta da fração mais grossa (0,73% – fração +0,210mm) para a fração mais fina (7,65% – fração -0,037mm) e na amostra 12, o teor de Al_2O_3 diminui da fração mais grossa (5,3% – fração +0,210mm) em direção às frações mais finas (3,57% – fração -0,074 +0,037mm), aumentando na fração abaixo de 0,037mm (6,16%). Observa-se, no entanto, que em ambas amostras o Al_2O_3 apresenta seu maior teor na fração abaixo de 0,037mm, fato esse explicado pela maior concentração da nontronita (argilomineral) nessa fração. Nas amostras de clinopiroxenitos micáceos, o Al_2O_3 apresenta comportamento variado, apresentando valores entre 2,15 e 3,41%.

Com relação ao SiO_2 , observa-se que para as amostras de clinopiroxenitos pouco alterados (2, 5 e 10) e micáceos (1, 4 e 9), o comportamento dos teores é relativamente semelhante ao do MgO nessas amostras, fato esse explicado pela mineralogia desses litotipos. Nessas rochas os silicatos predominantes são o piroxênio (diopsídio) e as micas (flogopita/vermiculita), minerais esses possuindo o MgO em sua composição. Nos demais grupos de rochas o comportamento do SiO_2 é variado.

4.4.3 – Sumário

- Os menores teores de P_2O_5 (cerca de 3,4%), o que corresponde a aproximadamente 8% de apatita, ocorrem nas amostras 2 e 5 de clinopiroxenitos pouco alterados. Os maiores teores foram observados nas amostras 10 – clinopiroxenito pouco alterado (~9,6%) e 11 – clinopiroxenito argilizado (~11,8%), o que corresponde a cerca de 23% e 28% de apatita, respectivamente. Em termos de grupos de rochas, os clinopiroxenitos argilizados e os ricos em magnetita e perovskita mostram os valores mais elevados de P_2O_5 .

- Todas as 12 amostras de clinopiroxenitos apresentam um enriquecimento em ETRL em relação aos ETRP, feição essa característica de complexos alcalino-carbonatíficos.
- Os teores mais elevados em ETR foram observados na amostra 11 – clinopiroxenito argilizado (cerca de 0,6%), amostra 10 – clinopiroxenito pouco alterado (cerca de 0,5%) e nas amostras 3, 6, 7 e 8 – clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (cerca de 0,4 - 0,5%). Esse fato está relacionado à maior quantidade de perovskita e/ou apatita presente nessas amostras, minerais esses principais portadores de ETR em Tapira. Nas amostras 10 e 11 observa-se também monazita como mineral portador de ETR.
- Com exceção dos clinopiroxenitos argilizados que podem ser identificados pelo alto teor em Al_2O_3 (>4%), os outros 3 grupos de minérios estudados não podem ser separados com base somente nos teores da análise química, pois a maioria dos elementos maiores apresentam valores semelhantes. Isto pode ser explicado pelo fato de que tipos litológicos distintos são compostos praticamente pelos mesmos minerais, porém em proporções diferentes e, esses minerais, apesar de estarem em grupos diversos são, porém, portadores dos mesmos elementos químicos (por exemplo CaO está presente na estrutura da apatita, diopsídio, perovskita, carbonatos, granada e monazita).
- Através dos estudos por fração granulométrica verificou-se que o teor de P_2O_5 na maioria das amostras (exceção as amostras 4 e 11) possui tendência geral de aumento da fração mais grossa (+0,210mm) em direção às frações mais finas (-0,074 +0,037mm), seguido de sua diminuição na fração -0,037mm. O maior teor de P_2O_5 concentra-se então na fração -0,074 +0,037mm, sendo essa fração responsável por cerca de 14-17% do total de P_2O_5 . Verifica-se também, que a maior porcentagem de distribuição em massa de P_2O_5 está geralmente na fração -0,037mm, ou seja, em um material muito fino de recuperação mais difícil.

- **Clinopiroxenitos pouco alterados**

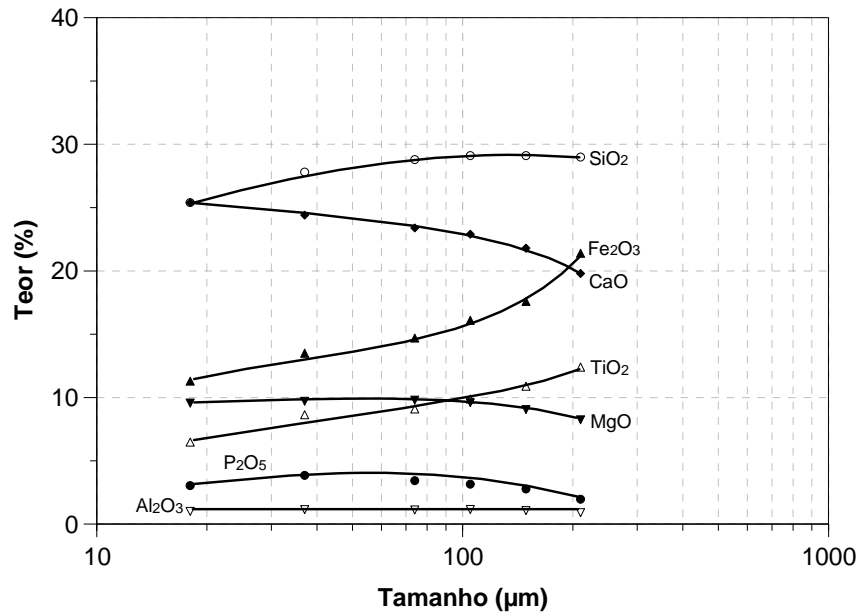


Figura 4.16 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 2 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.

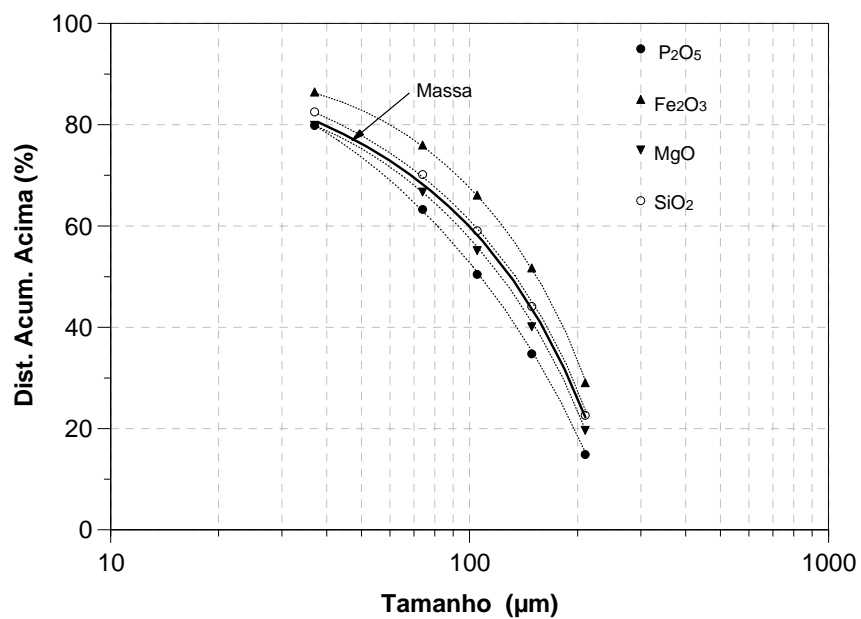


Figura 4.17 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 2 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.

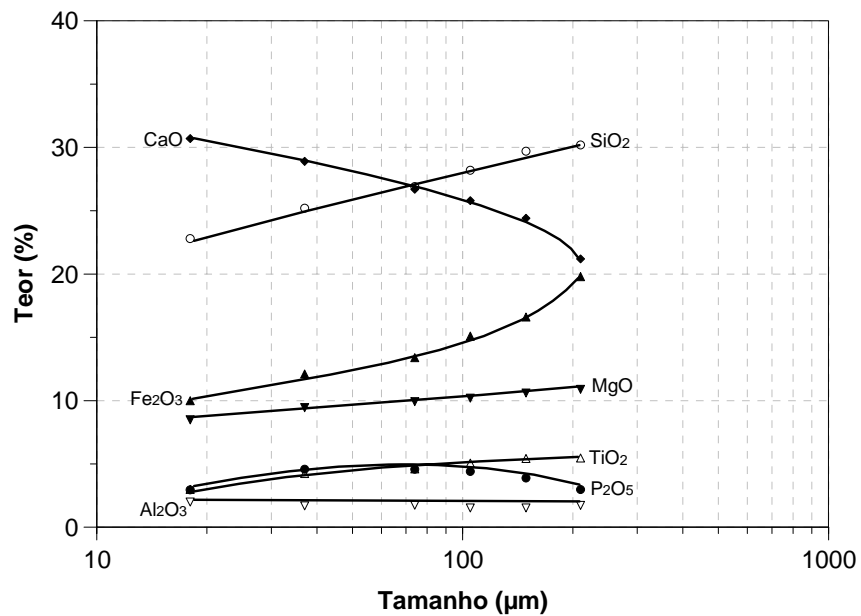


Figura 4.18 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 5 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.

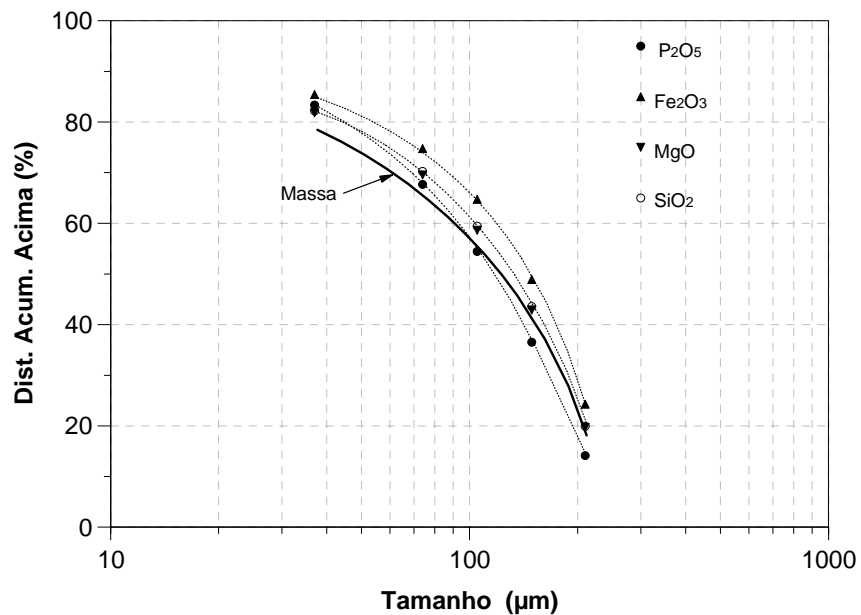


Figura 4.19 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 5 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.

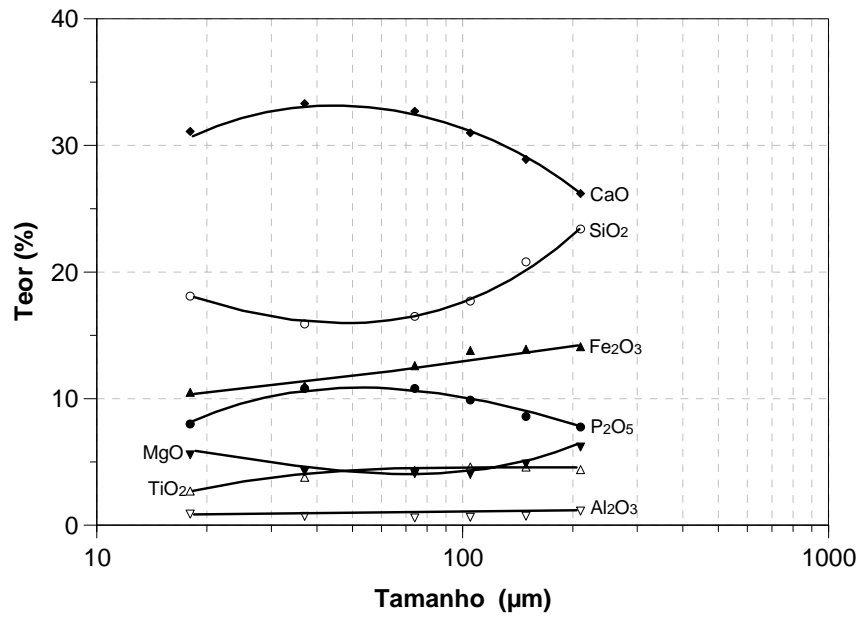


Figura 4.20 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 10 (clinopiroxênio pouco alterado) da mina de Tapira-MG.

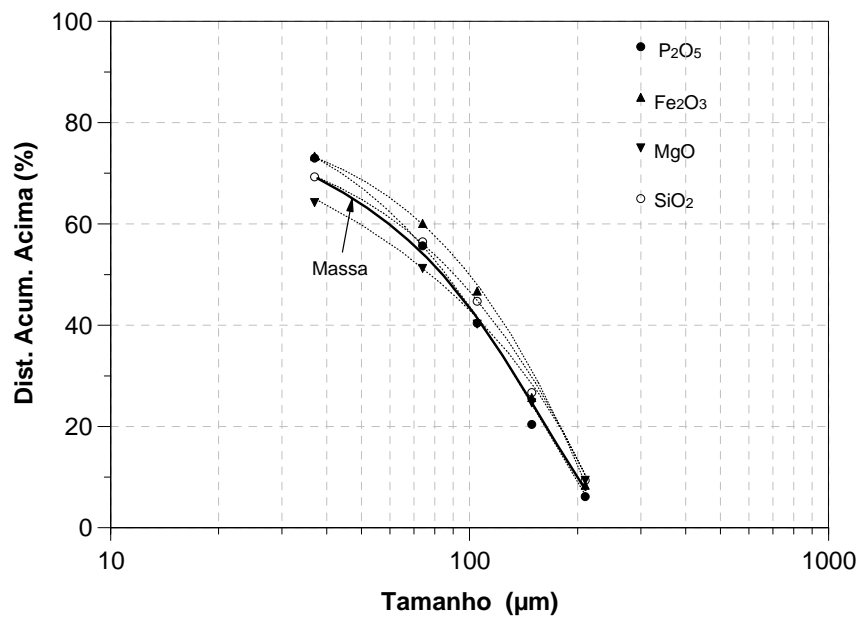


Figura 4.21 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 10 (clinopiroxênio pouco alterado) da mina de Tapira-MG.

- **Clinopiroxenitos micáceos**

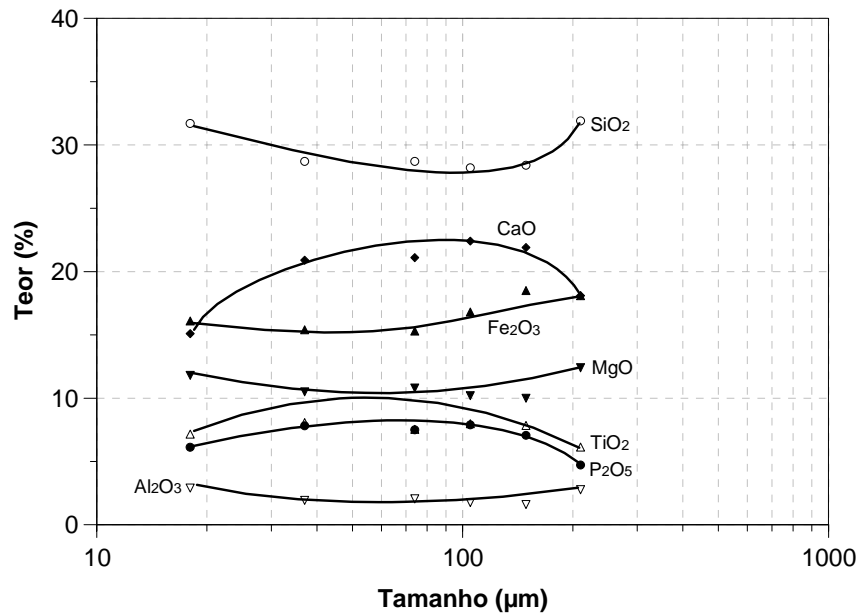


Figura 4.22 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 1 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.

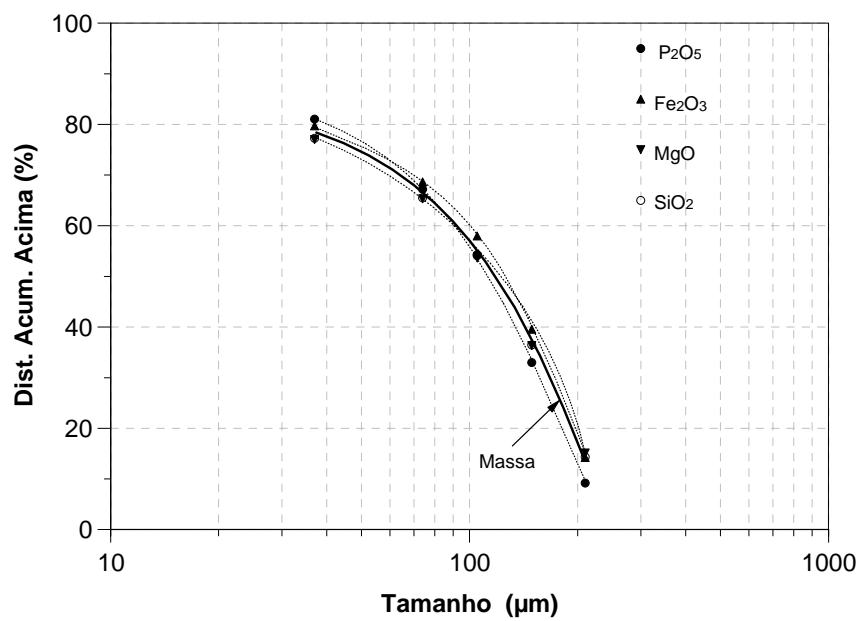


Figura 4.23 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 1 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.

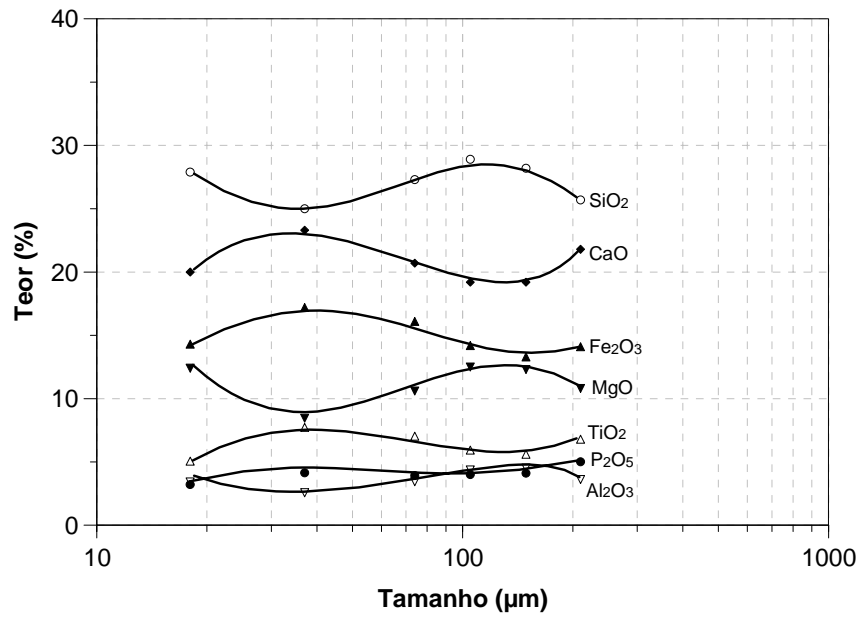


Figura 4.24 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 4 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.

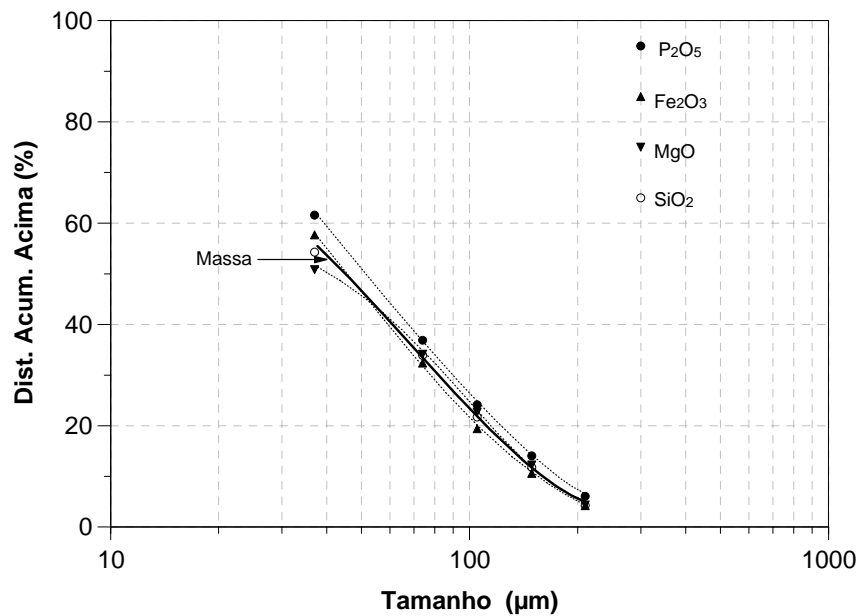


Figura 4.25 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 4 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.

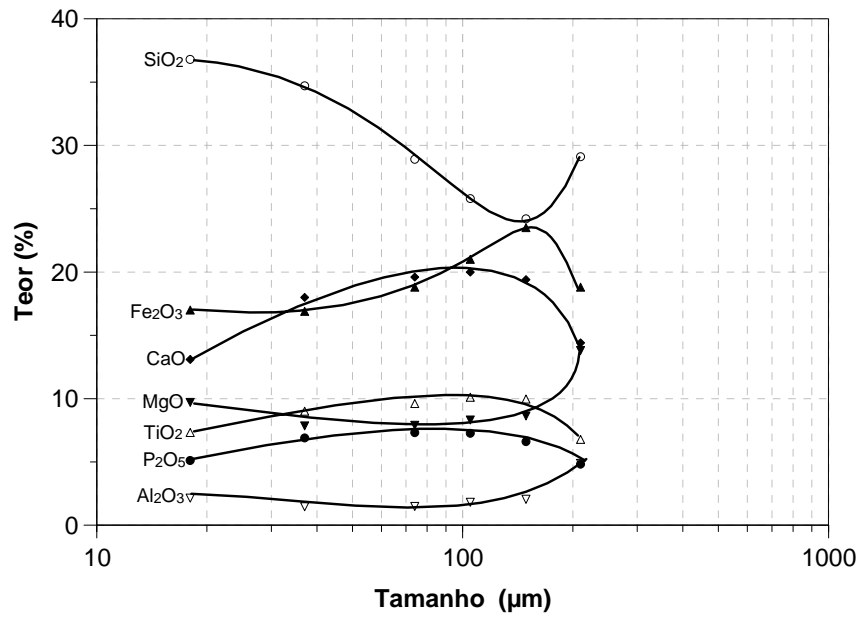


Figura 4.26 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 9 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.

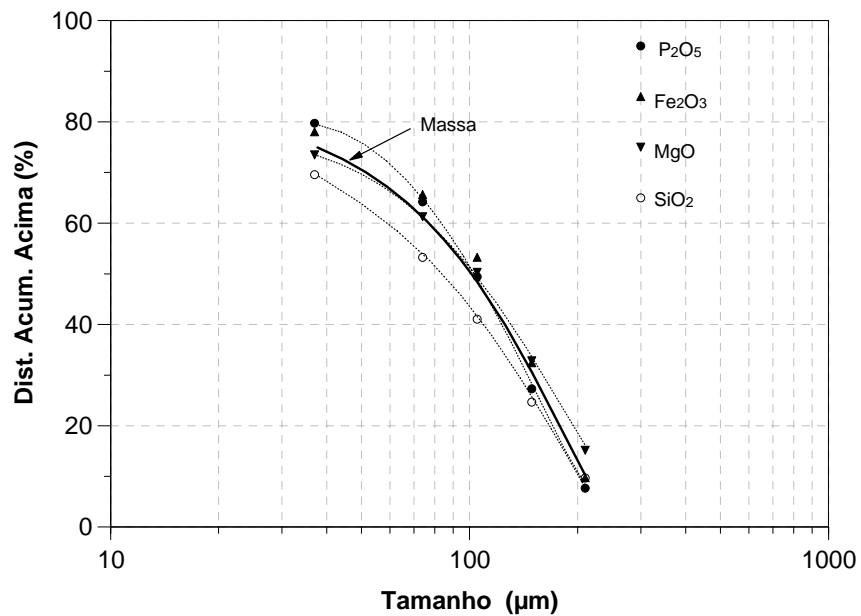


Figura 4.27 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 9 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.

- **Clinopiroxenitos argilizados**

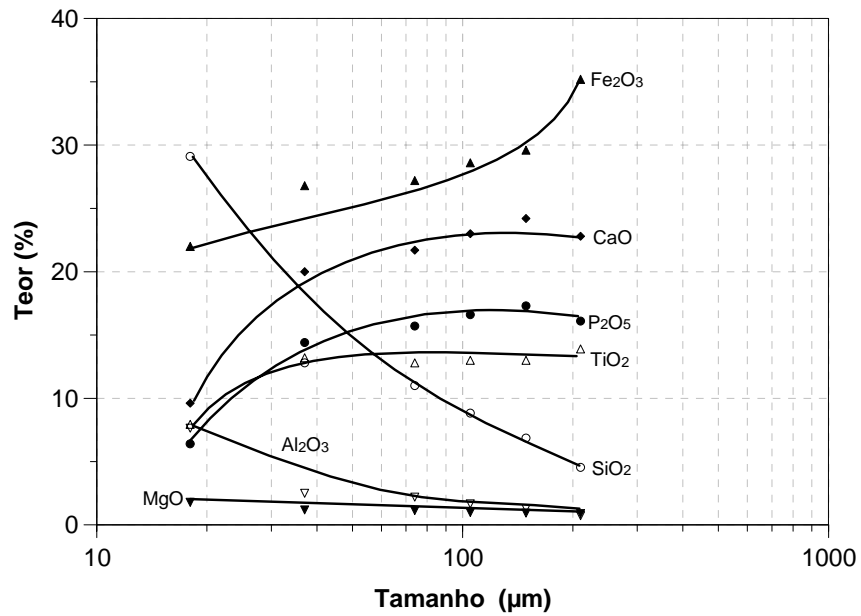


Figura 4.28 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 11 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.

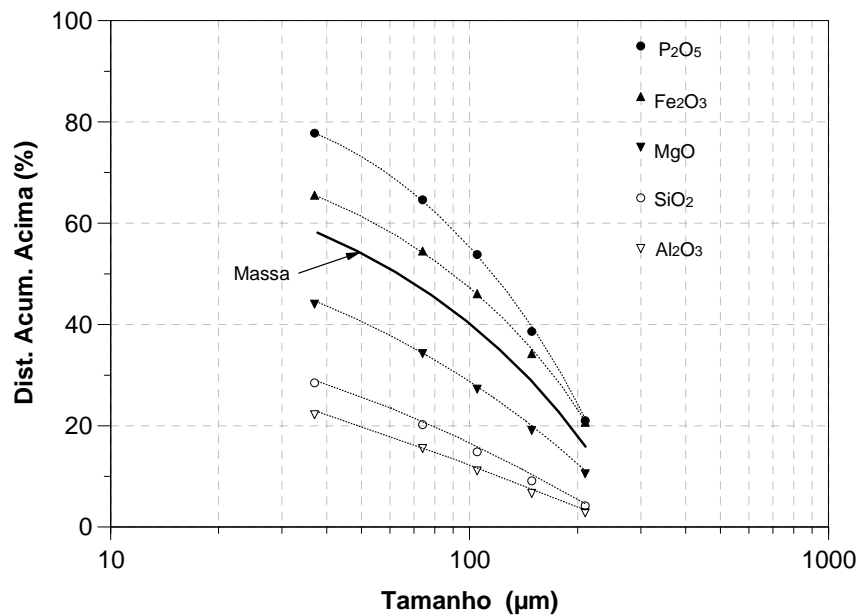


Figura 4.29 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 11 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.

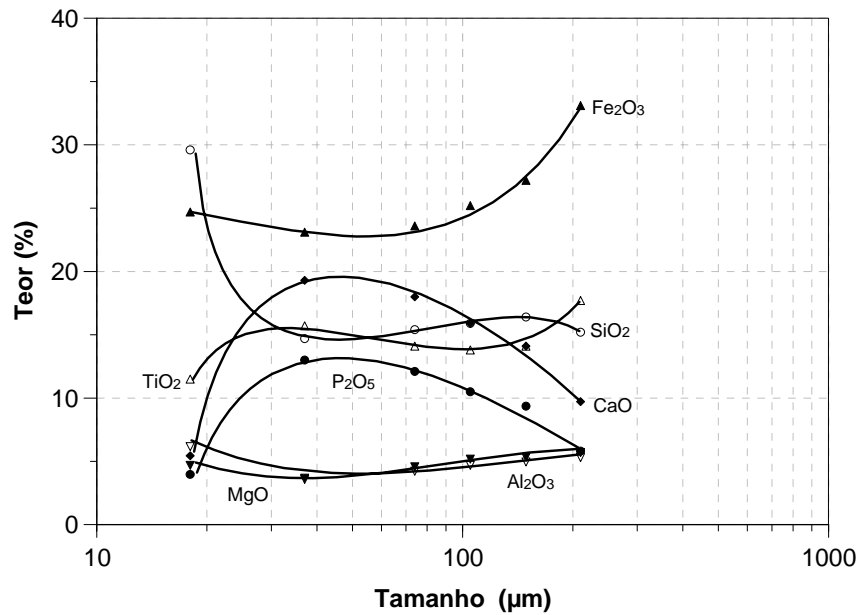


Figura 4.30 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 12 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.

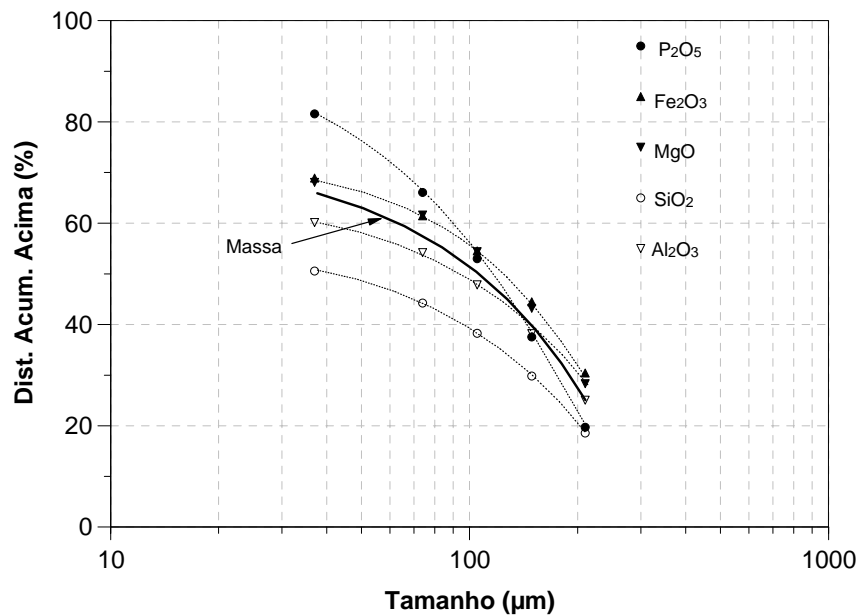


Figura 4.31 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 12 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.

- **Clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita**

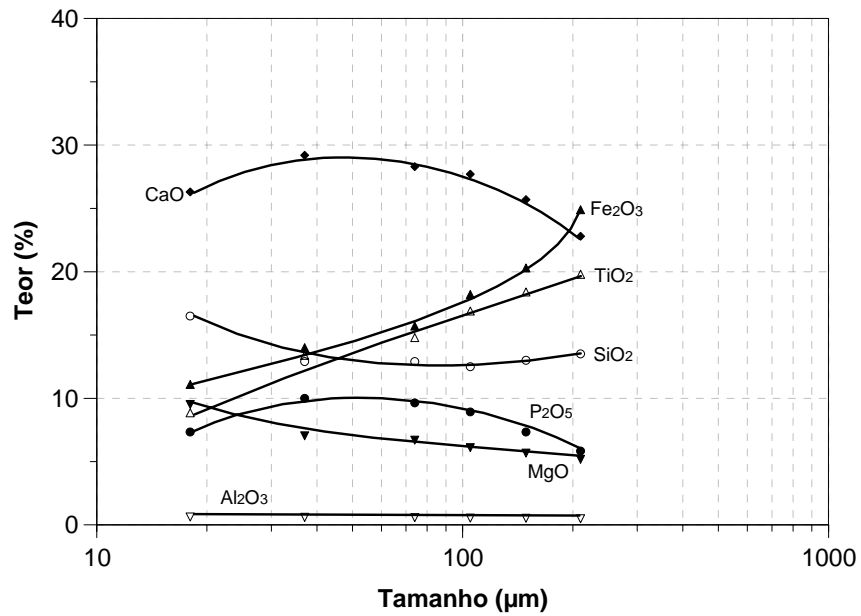


Figura 4.32 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 3 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.

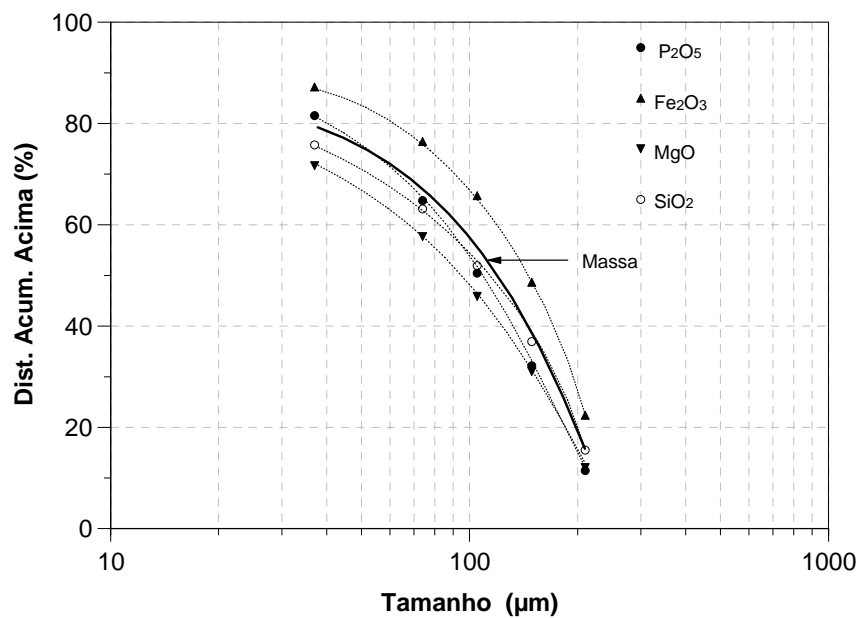


Figura 4.33 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 3 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.

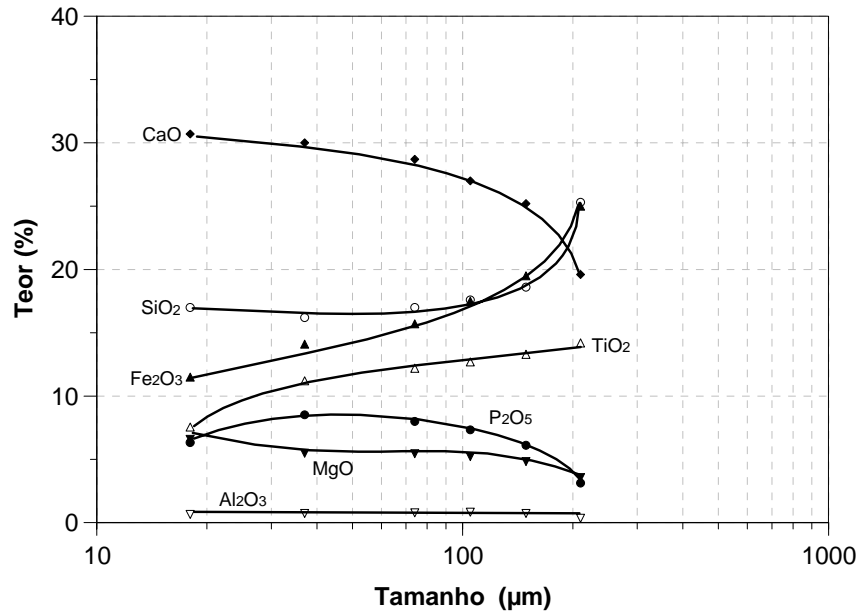


Figura 4.34 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 6 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.

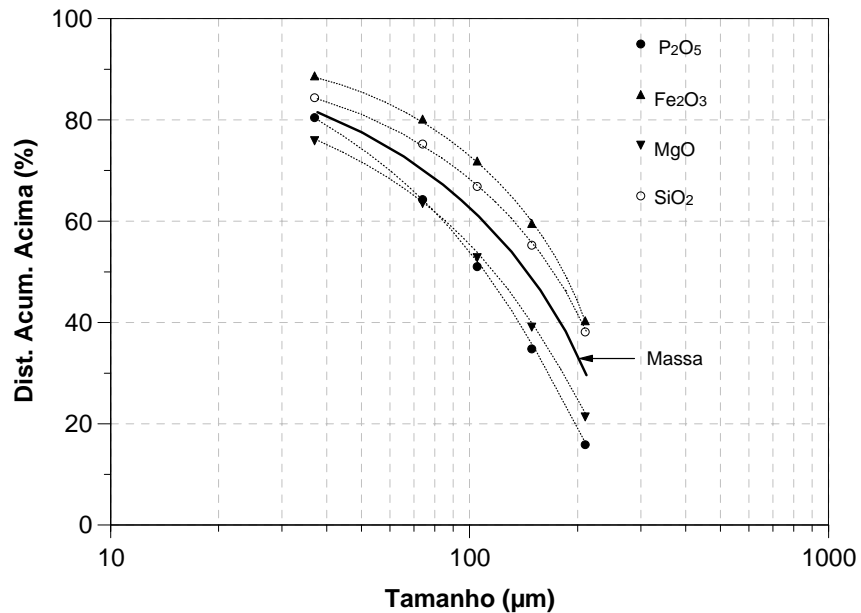


Figura 4.35 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 6 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.

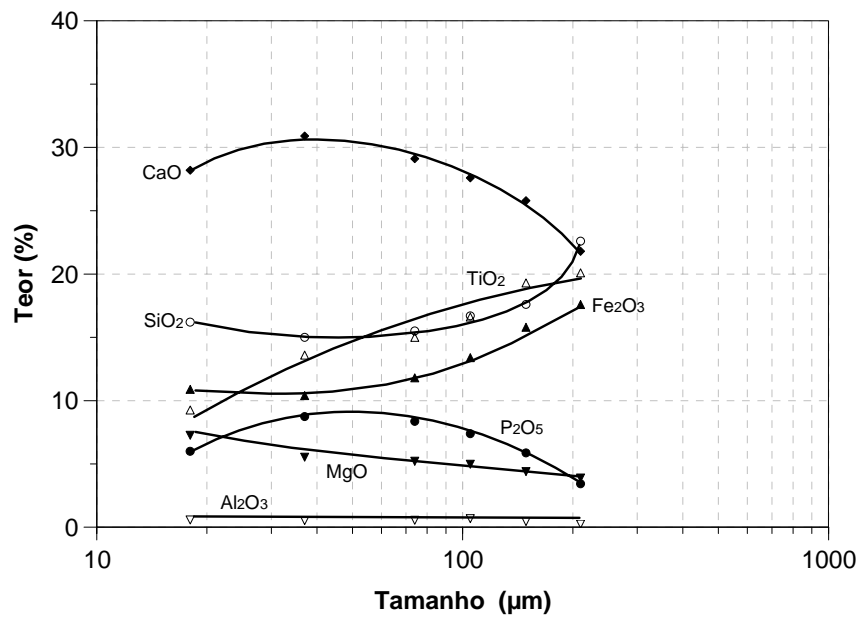


Figura 4.36 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 7 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.

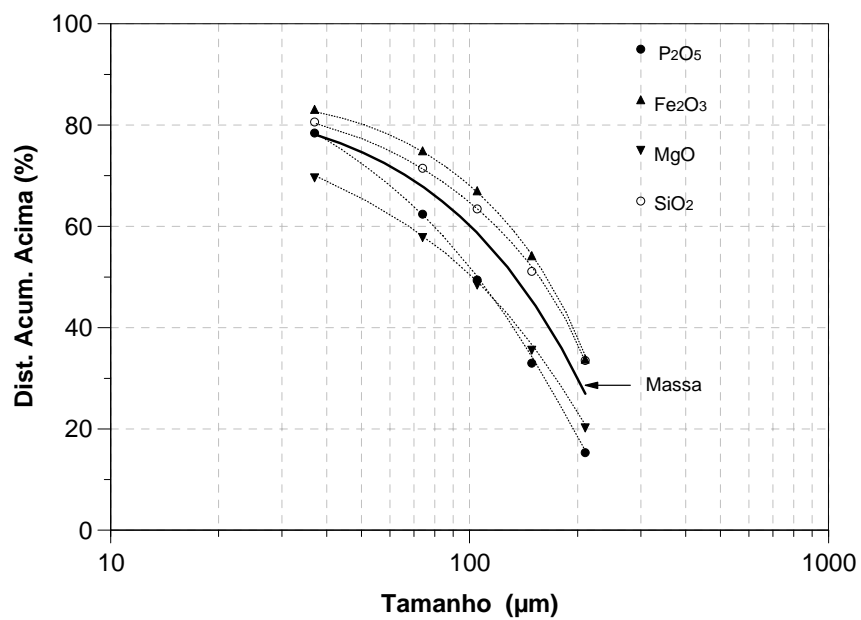


Figura 4.37 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 7 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.

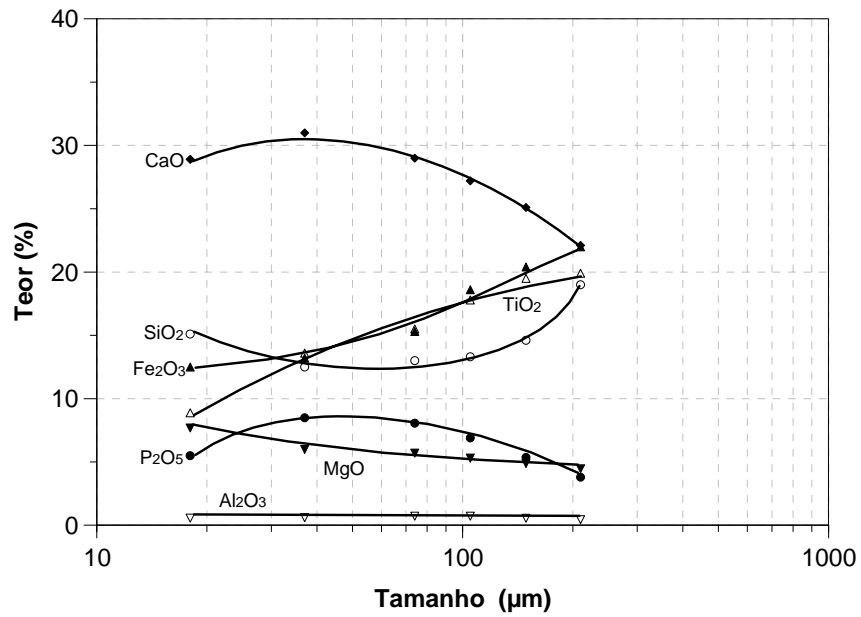


Figura 4.38 – Distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da amostra 8 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.

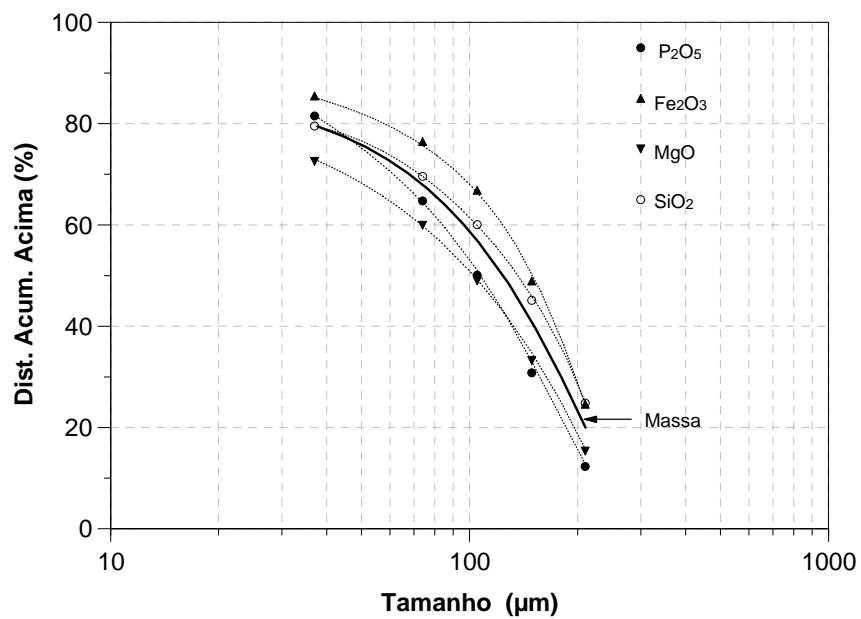


Figura 4.39 – Distribuição acumulada em massa e de alguns elementos constituintes da amostra 8 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.

4.5 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O estudo das 12 amostras da mina de Tapira por microscopia eletrônica de varredura teve como objetivo principal um maior detalhamento da apatita, verificando sua forma, composição química, zoneamento, identificação de inclusões finíssimas e associação com os demais minerais de ganga, em especial com os carbonatos.

Apesar da ênfase no mineral útil apatita, esta técnica foi utilizada também para caracterizar algumas feições interessantes presentes no minério de Tapira, tais como: magnetita com lamelas de exsolução de ilmenita; recobrimento parcial a total de silicatos por hidróxido de ferro nas amostras de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita; associação entre minerais micáceos, granada (melanita) e perovskita na amostra 4 (clinopiroxenito micáceo); caracterização do argilomineral presente no clinopiroxenito argilizado; verificação da presença de fosfatos secundários associados com anatásio; identificação de outros minerais portadores de ETR, além da perovskita e apatita.

A análise das amostras por microscopia eletrônica de varredura geralmente confirmou algumas das feições mais comuns já observadas ao microscópio óptico, porém com um detalhamento maior. Foi confirmada a presença somente de apatita primária em todas as amostras de minério estudadas, isto é, não se detectou apatita secundária e nem fosfatos secundários como produtos de sua alteração.

Os resultados são apresentados por grupos de rochas através de eletronicografias das feições consideradas mais interessantes, acompanhadas de microanálises EDS utilizadas para identificação das diversas fases minerais presentes no minério de Tapira.

- **CLINOPIROXENITO POUCO ALTERADO (AMOSTRAS 2, 5 e 10)**

A apatita presente nesse tipo de minério possui forma essencialmente granular, superfície lisa e aspecto principalmente límpido, apesar de inclusões fluidas tubulares e arredondadas serem freqüentes nas amostras 2 e 5 e ocorrerem localmente na amostra

10. Grãos de apatita com inclusões de calcita e, às vezes, de monazita e ilmenita são observados (Figuras 4.40 e 4.41a).

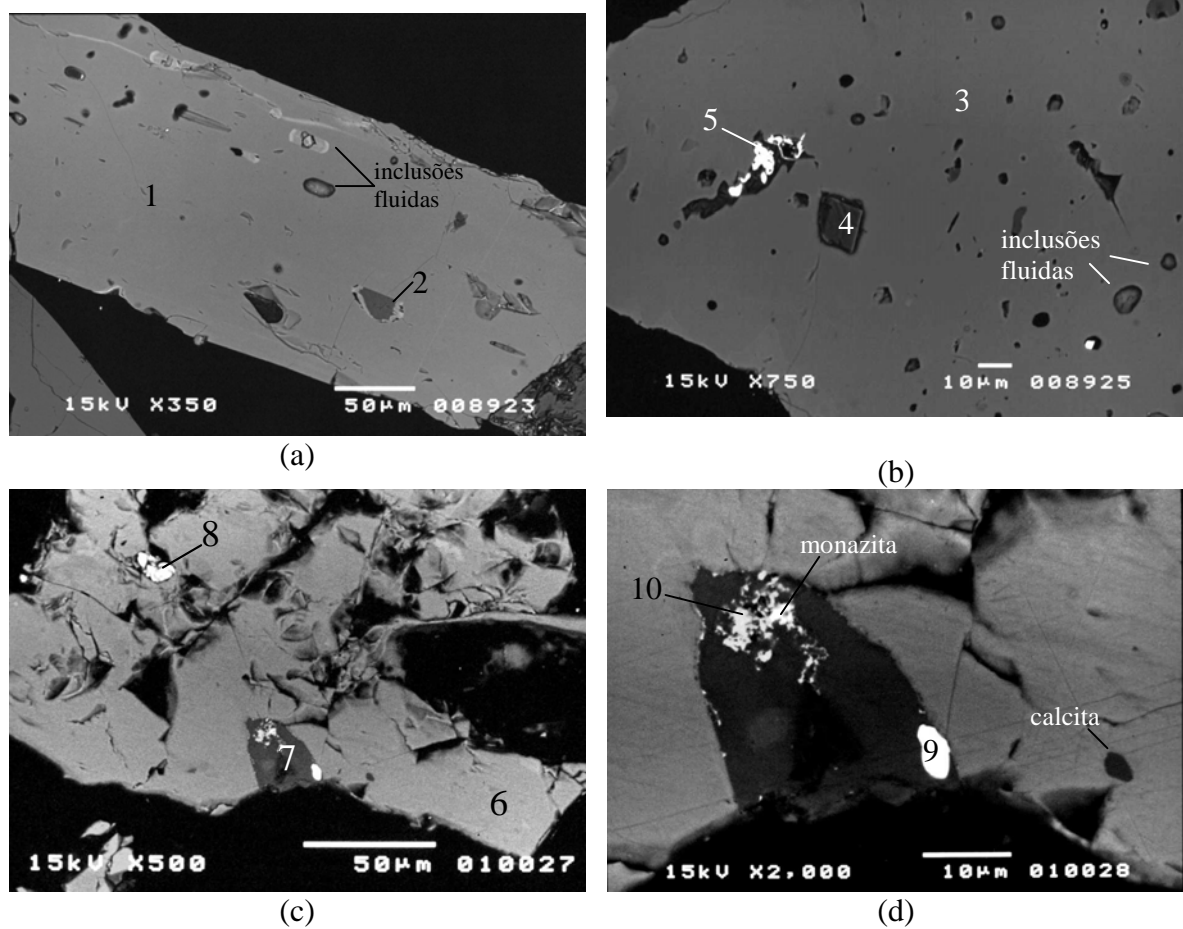
São comuns grãos de apatita cortados por venulações compostas somente por quartzo ou calcita ou vênulas compostas por calcita + quartzo, calcita + dolomita ou ainda calcita + calcita magnésiana (Figuras 4.41b, c e d e 4.42a, b e c). Localmente os minerais das venulações apresentam impregnação incipiente de goethita. As vênulas possuem direções diversas, se entrecortam e ocupam as fissuras entre os cristais de apatita, porém não havendo rotação dos fragmentos.

Vale mencionar que o carbonato incluso nos cristais de apatita foi identificado somente como calcita. As análises mostram que a calcita apresenta teores de MgO variando entre 1,40 a 6,70%.

A técnica de microscopia eletrônica de varredura permitiu reconhecer nesse tipo de minério a presença local de inclusões na calcita de possível zirconolita – $(Ca, Ce, Nd)Zr(Ti, Fe)O_7$, monazita, barita e de um óxido de Fe e Nb (Figuras 4.40d e 4.42b e c). Como não foi encontrado na literatura nenhum óxido com as proporções de Fe e Nb obtidas pela microanálise, foi apenas indicado os valores observados.

A Figura 4.42 d mostra um grão de apatita associado com perovskita, esta última com inclusões de calcita.

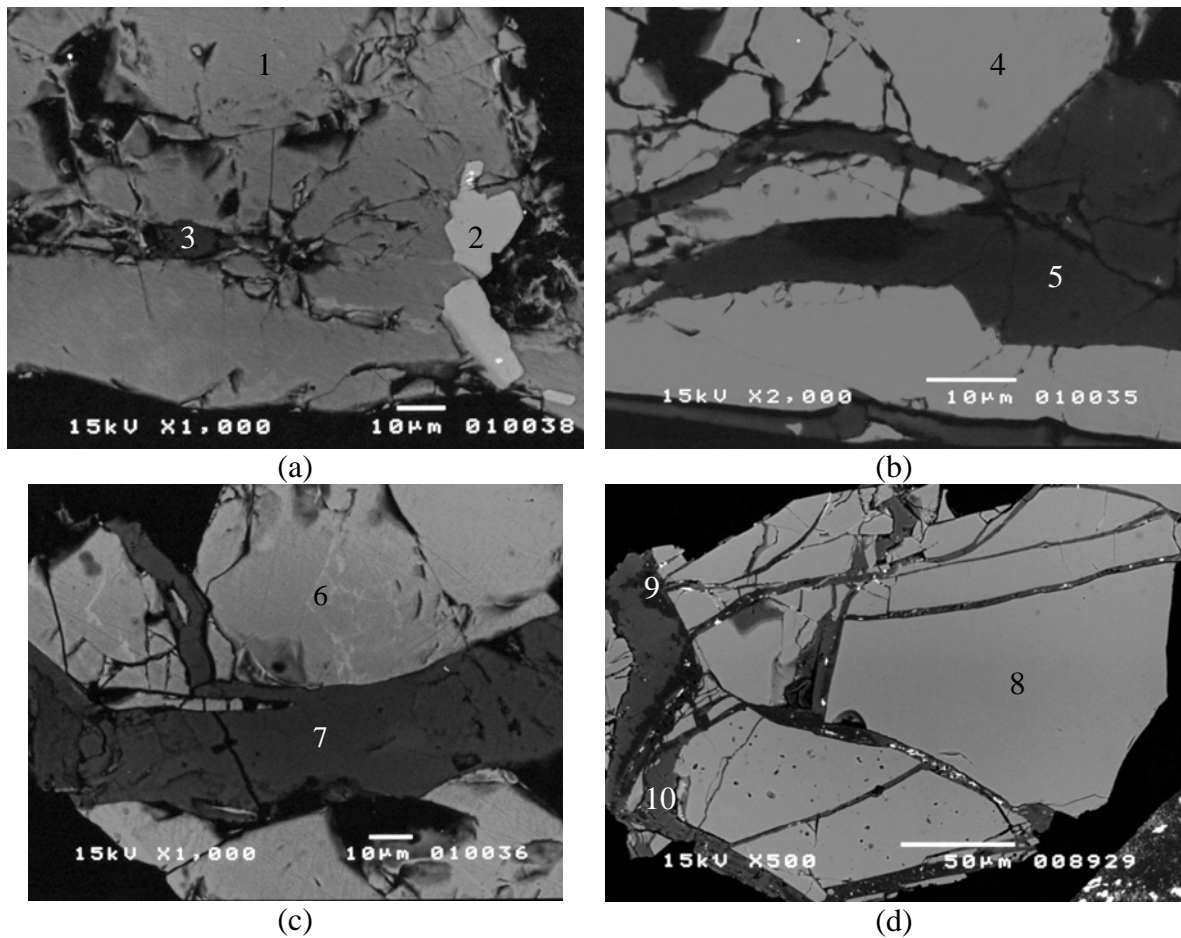
Vale mencionar que a monazita, presente na amostra 10, apresenta tório em sua composição.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	Nb ₂ O ₅	CO ₂	SO ₃	TiO ₂	ThO ₂	Interpretação
1	55,8	-	0,8	0,0	2,5	0,1	0,1	40,4	0,3	-	-	-	-	-	apatita
2	52,4	-	0,7	2,6	0,8	0,5	0,4	-	-	-	42,6	-	-	-	calcita
3	55,4	-	0,0	0,0	2,9	0,2	0,2	41,2	0,1	-	-	-	-	-	apatita
4	53,6	0,2	0,0	1,8	0,0	0,2	2,2	-	-	-	42,0	-	-	-	calcita
5	6,9	-	-	0,1	3,8	-	3,8	37,5	47,9	-	-	-	-	-	monazita
6	51,0	-	0,0	0,0	2,8	0,6	0,0	42,9	2,7	-	-	-	0,0	-	apatita
7	54,7	0,0	-	2,1	0,0	0,0	0,3	-	-	-	42,9	-	-	-	calcita
8	4,5	-	0,0	0,3	7,2	8,0	0,2	36,5	40,2	-	-	-	-	3,1	monazita
9	4,3	-	-	-	0,4	61,3	-	-	-	-	-	34,0	-	-	barita
10	1,7	-	7,6	1,9	-	-	74,1	-	-	12,2	-	-	2,5	-	óx. Fe e Nb

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

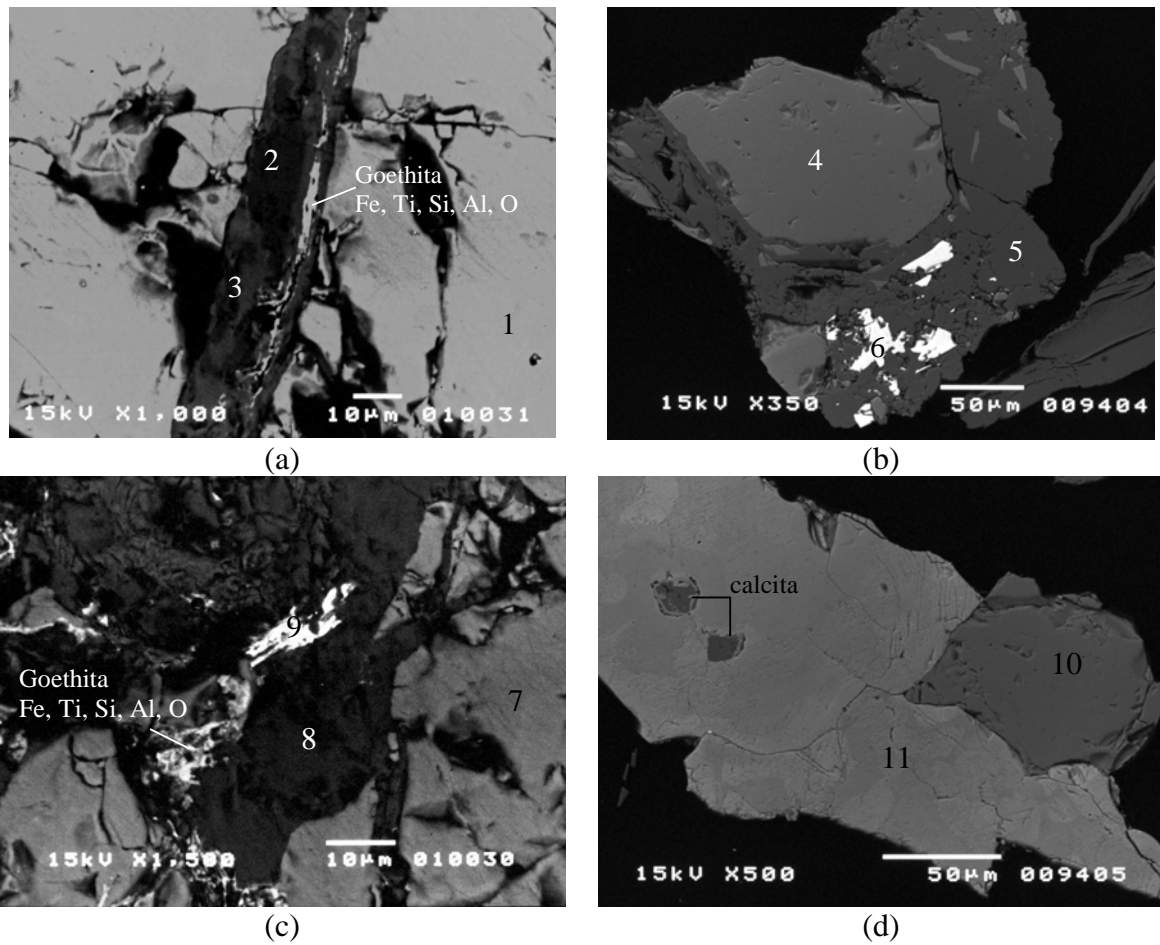
Figura 4.40 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito pouco alterado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões fluidas e inclusão de calcita (am2). (b): apatita com inclusões fluidas e inclusão de calcita e monazita (am2). (c): apatita com inclusão de calcita e monazita (am10). (d): ampliação de uma região da foto anterior mostrando inclusões na calcita de barita, monazita e de um óxido de Fe e Nb.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	TiO ₂	Interpretação
1	51,5	-	0,9	0,2	2,8	0,1	0,2	42,0	2,1	-	0,2	apatita
2	0,7	4,0	-	-	-	-	43,9	-	-	-	51,4	ilmenita
3	50,9	0,3	-	3,2	0,8	2,1	-	-	-	42,7	-	calcita
4	50,0	-	0,0	0,2	3,9	0,0	0,0	43,5	2,3	-	0,1	apatita
5	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
6	51,6	-	0,0	0,1	2,8	0,0	0,0	43,1	2,4	-	0,0	apatita
7	54,5	0,1	-	2,0	0,0	0,1	0,5	-	-	42,8	-	calcita
8	54,8	-	0,0	0,1	2,6	0,3	0,0	41,5	0,7	-	-	apatita
9	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
10	55,0	0,0	-	1,4	0,1	-	0,1	-	-	43,4	-	calcita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 4.41 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito pouco alterado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusão de calcita e de ilmenita (am10). (b): apatita cortada por vênulas de quartzo (am10). (c): apatita cortada por vênulas de calcita (am10). (d): apatita cortada por vênulas de calcita + quartzo (am2).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	ThO ₂	ZrO ₂	TiO ₂	Interpretação
1	51,9	-	0,0	0,0	2,8	0,0	0,1	42,9	2,2	-	-	-	0,1	apatita
2	32,3	3,2	-	17,3	0,1	0,0	1,8	-	-	45,2	-	-	-	dolomita
3	54,0	0,0	-	1,9	0,0	0,0	1,7	-	-	42,4	-	-	-	calcita
4	54,8	-	0,0	0,0	2,6	0,0	0,1	41,6	0,8	-	-	-	0,1	apatita
5	51,5	0,0	-	2,7	3,7	0,1	1,5	-	-	40,4	-	-	-	calcita
6	11,2	-	-	0,1	0,3	-	6,3	-	7,2	-	0,9	38,9	35,1	zirconolita
7	55,4	-	0,8	0,1	1,4	0,4	0,0	39,1	2,7	-	-	-	0,0	apatita
8	51,2	0,4	-	6,7	0,1	0,0	1,4	-	-	40,2	-	-	-	calcita
9	22,0	-	-	-	-	-	-	32,7	34,1	-	11,2	-	-	monazita
10	56,9	-	0,0	0,0	1,3	0,2	0,0	40,9	0,7	-	-	-	-	apatita
11	38,7	-	-	0,1	0,9	-	1,2	-	1,2	-	-	-	57,9	perovskita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 4.42 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito pouco alterado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênula de calcita + dolomita (am10). (b): apatita cortada por vênula de calcita; nota-se inclusão de zirconolita na calcita (am5). (c): apatita cortada por vênulas de calcita, nota-se monazita incluída na calcita (am10). (d): apatita associada com perovskita (am5).

- **CLINOPIROXENITO MICÁCEO (AMOSTRAS 1, 4 e 9)**

A apatita presente nesse tipo de minério possui forma também essencialmente granular, superfície lisa e aspecto geralmente límpido, apesar de inclusões fluidas serem freqüentes na amostra 4 e local nas amostras 1 e 9.

Grãos de apatita com inclusões arredondadas de calcita são muito freqüentes nas amostras 1 e 9 (Figura 4.43a). Inclusões de calcita foram também observadas na ilmenita, porém de local ocorrência. Na amostra 4, as inclusões de carbonato na apatita são pouco freqüentes, sendo este identificado principalmente como estroncianita e raramente calcita (Figura 4.43 b e c). As microanálises de estroncianita indicaram a presença de Ca (até 25% de CaO), Ba (até 20% de BaO) e raramente Na (cerca de 2% de Na₂O) substituindo o Sr.

Brod (1999) identificou no Complexo de Tapira a presença de estroncianita como inclusão na calcita ou mais raramente na dolomita, como o resultado de um re-equilíbrio subsolidus de carbonatos primários, com a exsolução de fases ricas em elementos traços. Segundo análises EDS apresentadas por Brod (*op. cit.*) a estroncianita de Tapira é rica em bário (até 18,6% de BaO) e em cálcio (até 18,4% de CaO).

Localmente ocorrem grãos de apatita com inclusões de mineral micáceo, possível zirconolita, piroxênio e ilmenita (amostras 1 e 9) ou apresentando inclusões de anatásio, perovskita e de um silicato de Ca e Na (amostra 4) (Figuras 4.43b e d e 4.46).

Vênulas de calcita cortando grãos de apatita foram observadas na amostra 4 (Figura 4.44 a) e vênulas de quartzo na amostra 9 (Figura 4.44c).

Alguns tipos de associações da apatita com os minerais da ganga, tais como apatita associada com magnetita e ilmenita; apatita associada com piroxênio, ambos cortados por vênulas de quartzo; apatita associada com perovskita e apatita inclusa em granada podem ser observadas nas Figuras 4.44b, c e d, 4.45a e b e 4.46a.

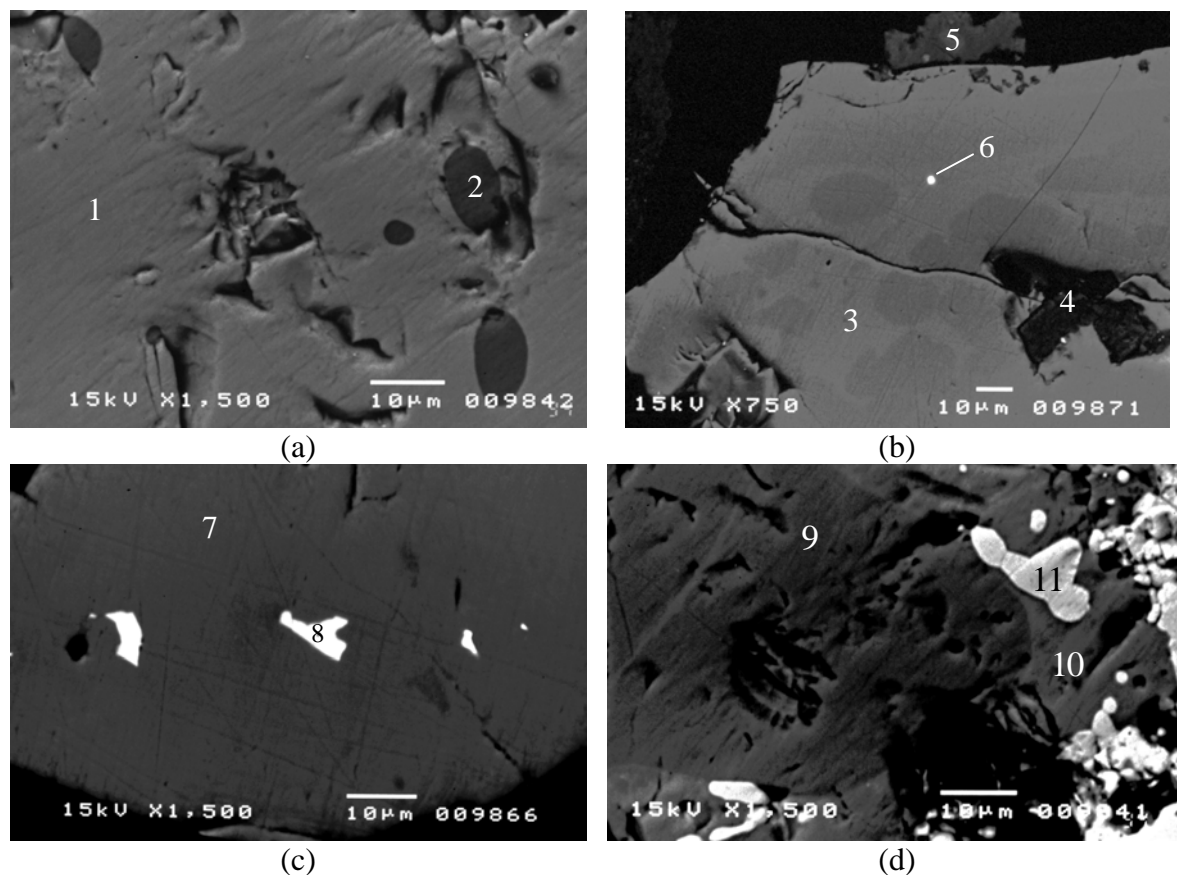
A técnica de microscopia eletrônica de varredura permitiu verificar na amostra 4 a íntima associação dos filossilicatos de camadas mistas (FCM) com perovskita e granada. Magnetita e cromomagnetita foram observadas localmente em associação com a granada, destacando-se porém a associação de apatita com granada (Figuras 4.45b e c e 4.46a). A feição mais comum é a presença de grãos de apatita inclusos na granada.

Algumas análises EDS da granada podem ser visualizadas na Tabela 4.31. Através dessas análises a granada presente na amostra 4 é classificada como do tipo andradita – $\text{Ca}_3(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2 \text{Si}_3\text{O}_{12}$, sendo rica em Ca (34,13 - 37,82% de CaO), pobre em Al (<2,36% de Al_2O_3) e com teores de TiO_2 variando entre 0,35% até 14,02%. Deer *et al.* (1992) verificou através de evidências estruturais e experimentais que o Ti na andradita está principalmente na posição octaédrica substituindo o Fe^{3+} , sendo o nome melanita usado para variedades de andradita com $\text{Fe}^{3+} > \text{Ti}$ e o nome schorlomita para os tipos onde $\text{Fe}^{3+} < \text{Ti}$. Segundo Deer *et al.* (*op. cit.*) essa divisão ocorre a ~15% de TiO_2 . De acordo com as análises EDS da granada presente na amostra 4 da mina de Tapira, verifica-se a presença somente do tipo melanita.

Tabela 4.31 – Microanálises por EDS de granada da amostra 4 da mina de Tapira-MG

Análise	1	2	3	4	5	6	7
	% peso analisada						
SiO_2	30,89	28,72	29,65	30,03	29,07	31,17	33,34
TiO_2	2,44	6,85	7,63	2,37	5,91	0,35	3,20
Al_2O_3	0,43	0,79	0,00	1,34	0,40	0,79	1,57
FeO	28,73	25,83	25,19	28,52	28,48	30,54	25,63
CaO	37,50	37,82	37,54	37,74	36,13	37,15	36,26

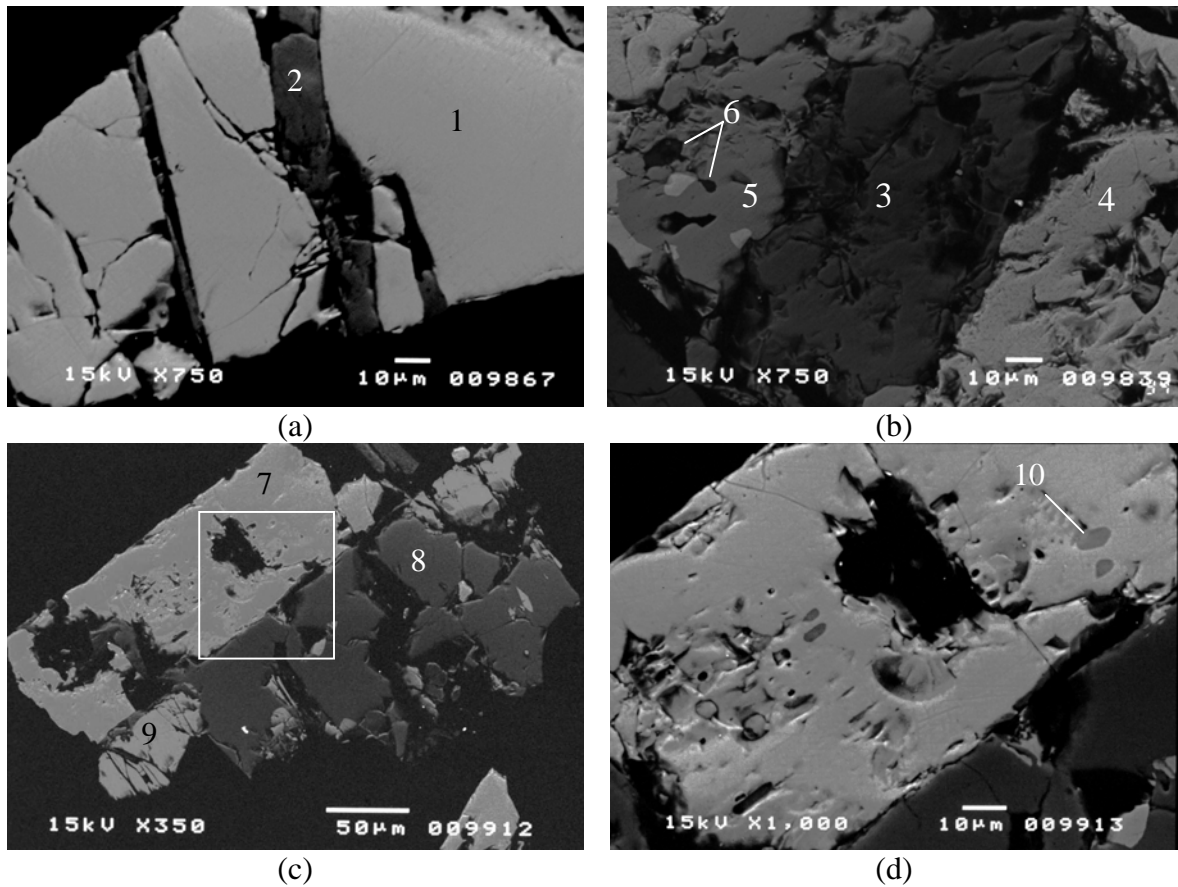
Vale mencionar a presença localizada de grãos de apatita com tonalidades de cinza diferentes, refletindo teores variados de elementos de terras-raras ou estrôncio (Figura 4.43d), o que pode indicar mais de uma geração de apatita.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	54,6	-	0,4	0,5	0,8	0,4	0,0	41,3	1,9	-	-	-	0,1	apatita
2	53,6	0,1	-	1,3	1,1	1,4	0,4	-	-	42,1	-	-	-	calcita
3	51,7	-	0,0	0,0	3,3	0,0	0,1	43,9	0,9	-	-	-	0,0	apatita
4	3,2	-	55,4	12,9	0,0	0,3	23,9	-	1,0	-	2,8	-	0,5	piroxênio
5	54,7	0,3	-	0,0	1,1	0,8	0,3	-	-	42,8	-	-	-	calcita
6	22,9	-	-	-	25,7	20,2	-	-	-	31,2	-	-	-	estroncianita
7	55,8	-	0,4	0,1	1,3	0,3	0,1	40,1	1,9	-	-	-	0,0	apatita
8	23,1	-	-	-	27,4	18,3	-	-	-	31,2	-	-	-	estroncianita
9	52,8	-	0,9	0,1	2,7	0,3	0,4	42,2	0,6	-	-	-	0,0	apatita escura
10	53,7	-	0,3	0,1	0,8	0,0	0,4	40,4	3,4	-	-	-	0,9	apatita clara
11	1,2	2,6	0,2	0,8	-	-	42,2	-	-	-	0,1	0,2	52,7	ilmenita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

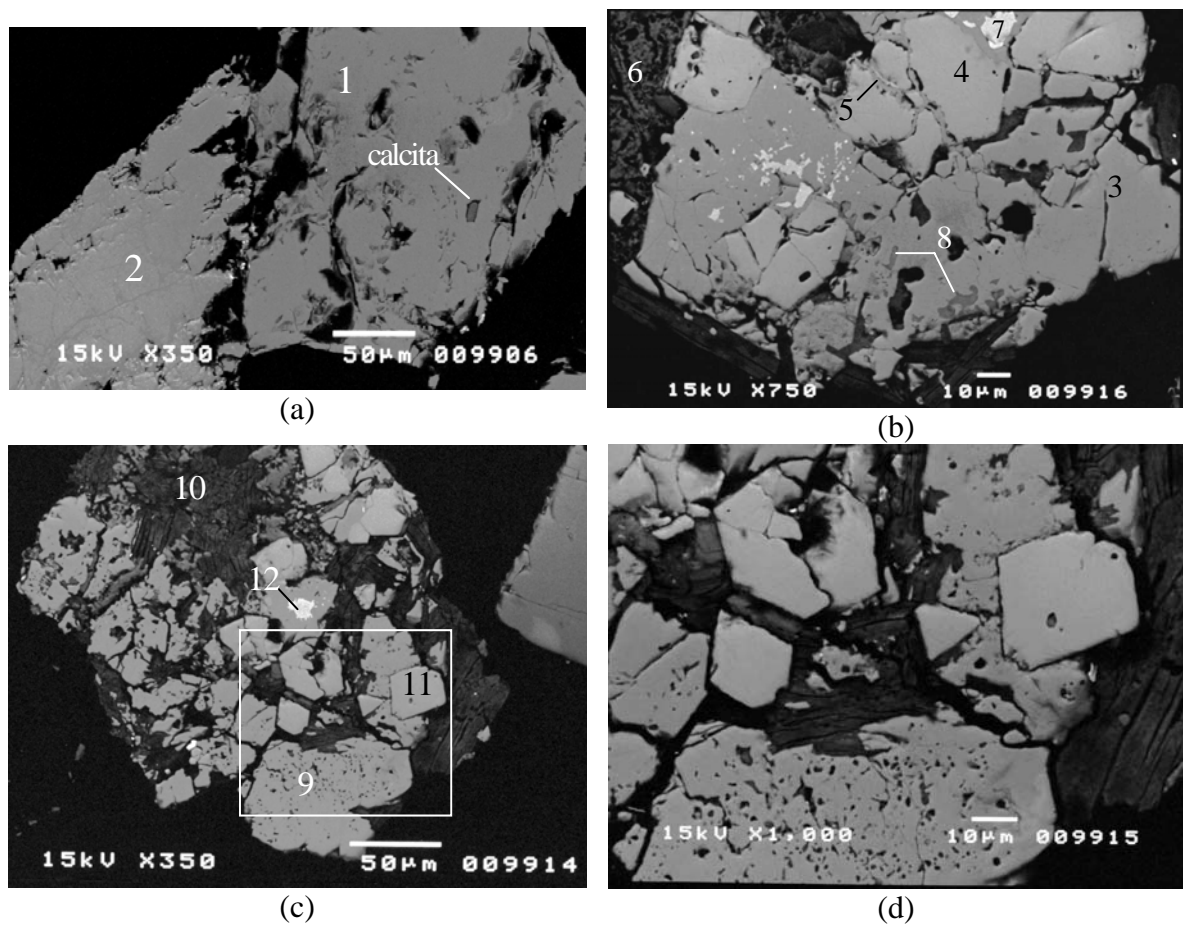
Figura 4.43 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito micáceo (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de calcita (am1). (b): apatita com calcita na borda e inclusões de piroxênio e estroncianita (am4). (c): apatita com inclusões de estroncianita (am4). (d): apatita com inclusões de ilmenita; notam-se tonalidades de cinza diferentes na apatita em função de teores variáveis de ETR (am1).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	52,1	-	0,0	0,1	3,0	0,0	0,0	43,5	1,2	-	-	0,1	apatita
2	55,3	0,0	-	0,8	0,0	0,2	0,3	-	-	43,4	-	-	calcita
3	51,9	-	-	0,1	2,8	0,2	-	43,8	1,0	-	-	0,1	apatita
4	-	-	-	0,8	-	-	97,4	-	-	-	-	1,8	magnetita
5	-	2,2	-	-	-	-	47,3	-	-	-	-	50,5	ilmenita
6	53,8	0,2	-	0,7	1,2	1,8	-	-	-	42,2	-	-	calcita
7	53,2	-	0,0	0,1	2,5	0,0	0,1	43,2	0,7	-	-	0,1	apatita
8	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
9	26,4	-	53,0	13,6	0,0	0,0	5,7	-	-	-	0,3	0,9	diopsídio
10	54,6	0,3	-	0,4	0,6	1,1	0,1	-	-	42,9	-	-	calcita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

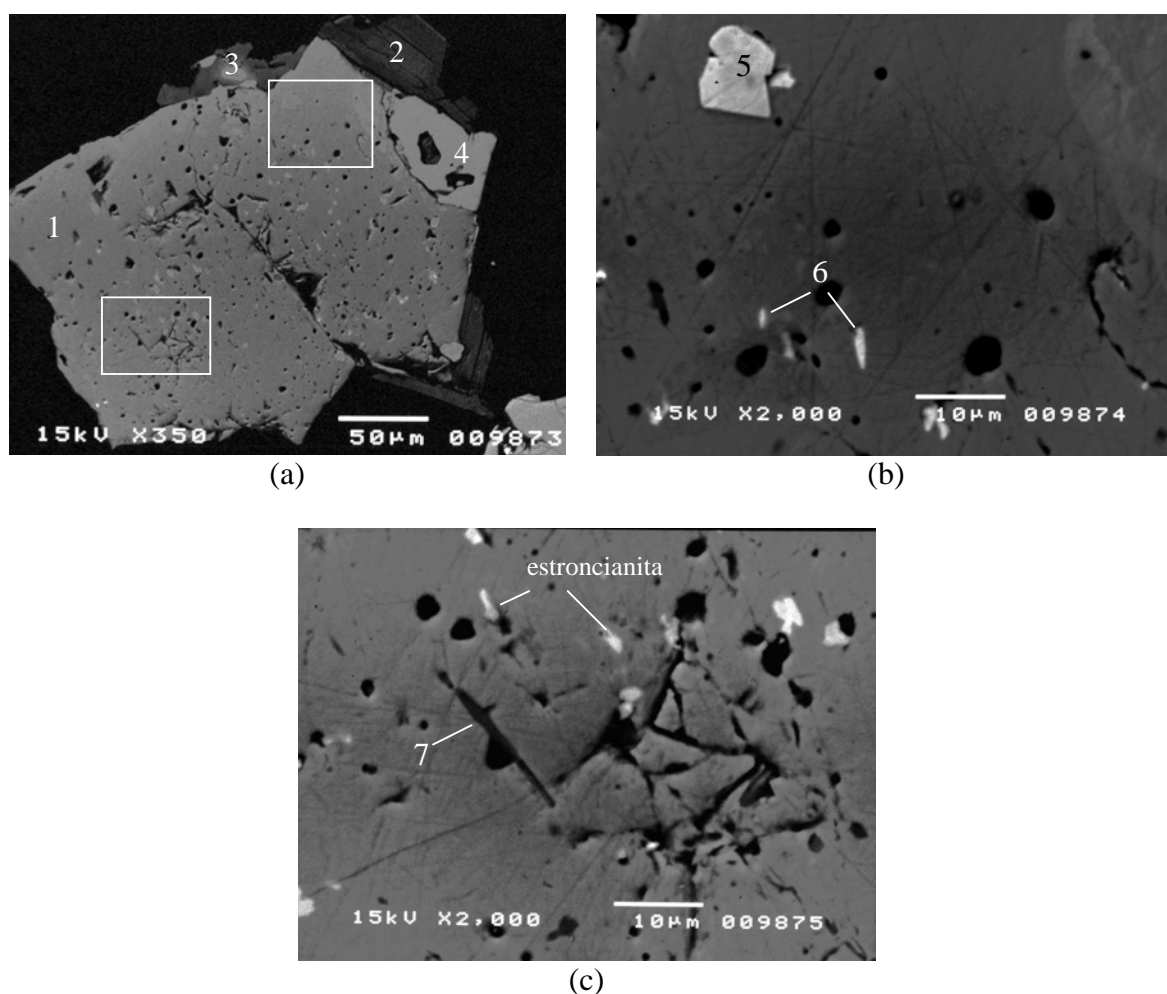
Figura 4.44 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito micáceo (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênulas de calcita (am4) (b): apatita associada com magnetita e ilmenita; notam-se inclusões de calcita na ilmenita (am1). (c): apatita associada com quartzo e piroxênio (am9). (d): ampliação de uma região da foto anterior mostrando inclusões de calcita na apatita (am9).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	56,8	-	0,3	0,0	0,9	0,0	0,1	41,1	0,8	-	-	-	0,0	apatita
2	34,7	-	0,2	0,0	0,4	0,0	1,1	-	3,2	-	-	-	60,4	perovskita
3	34,1	-	35,5	1,4	-	-	24,8	-	-	0,1	2,4	-	1,7	granada
4	37,7	-	0,0	0,1	0,6	0,0	1,5	-	4,0	0,1	-	-	56,0	perovskita
5	4,7	-	3,5	-	-	-	6,1	-	-	-	-	-	85,7	anatásio
6	0,8	0,1	45,4	24,8	-	-	8,3	-	-	6,2	11,2	-	3,2	FCM
7	1,7	1,6	0,9	1,1	-	-	90,2	-	-	-	-	-	4,5	magnetita
8	50,6	-	0,0	0,1	5,8	0,1	0,8	42,2	0,4	-	-	-	0,0	apatita
9	37,0	-	33,9	-	-	-	25,9	-	-	-	1,5	-	1,7	granada
10	2,3	-	45,9	25,2	-	-	9,6	-	-	4,3	10,0	-	2,7	FCM
11	36,1	-	0,5	0,3	0,6	0,0	1,9	-	4,2	-	0,4	-	56,0	perovskita
12	0,5	-	-	2,4	-	-	66,2	-	-	-	-	25,6	5,3	Cr-magnetita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 4.45 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito micáceo (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com perovskita; nota-se inclusão de calcita na apatita (am9). (b): apatita inclusa em granada com associação de perovskita/anatásio e filossilicato de camadas mistas – FCM (am4). (c): granada associada com perovskita e FCM (am4). (d): ampliação de uma região da foto anterior.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Interpretação
1	55,6	-	0,4	0,2	1,2	0,4	0,2	41,0	0,9	-	0,1	-	-	0,0	apatita
2	1,3	-	45,0	22,8	0,0	0,0	10,6	-	0,1	-	11,7	-	5,8	2,7	FCM
3	54,9	0,3	-	1,1	0,0	0,5	0,2	-	-	43,0	-	-	-	-	calcita
4	34,2	-	25,7	-	-	-	25,7	-	-	-	0,4	-	-	14,0	granada
5	37,7	-	0,0	0,0	0,6	0,0	1,5	-	4,0	-	-	-	0,1	56,0	perovskita
6	25,3	-	-	-	30,6	10,7	-	-	-	31,2	-	2,2	-	-	estroncianita
7	40,2	-	41,5	-	-	-	-	13,2	-	-	-	5,1	-	-	silicato de Ca e Na

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 4.46 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito micáceo (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita porosa associada com FCM, granada e calcita (am4). (b): ampliação de uma região da foto anterior mostrando inclusão de perovskita na apatita e inclusões de estroncianita. (c): ampliação de uma outra região da foto anterior onde podem ser visualizadas inclusões finíssimas de estroncianita e de um silicato de Ca e Na.

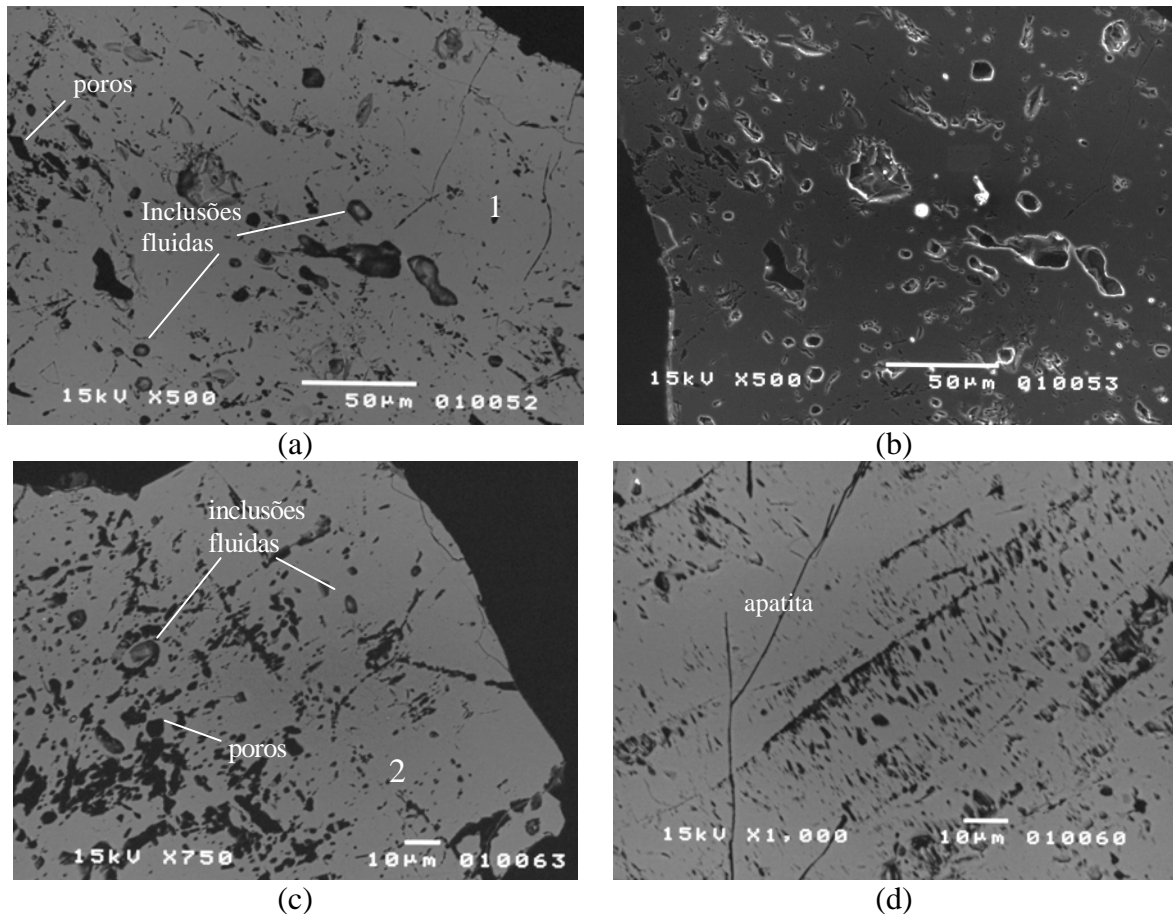
• CLINOPIROXENITO ARGILIZADO (AMOSTRAS 11 e 12)

A apatita presente nesse tipo de minério possui forma também essencialmente granular, superfície lisa na amostra 11 e aspecto principalmente poroso na amostra 12, sendo comum a presença de inclusões fluidas nesta última (Figura 4.47). A porosidade observada pode ser explicada pelo posicionamento menos profundo da amostra 12 na mina (banco 1240), estando a mesma mais intemperizada, indicando início de dissolução. Grãos de apatita com inclusões de calcita, anquerita, monazita, possível zirconolita, barita, feldspato potássico, ilmenita e nontronita são freqüentes somente na amostra 11 (Figuras 4.48 e 4.49a, b e c). Algumas inclusões foram identificadas como um óxido de Zr e Ca, podendo tratar-se de uma variação da zirconolita ou mesmo outro mineral, como por exemplo a calzirtita ($\text{CaZr}_3\text{TiO}_9$). Porém, as microanálises não mostraram titânio na composição do mineral ficando difícil sua identificação correta. Nesta mesma amostra foram observados grãos de anatásio parcialmente alterados para monazita/fosfato do grupo do rabdofânio (Figura 4.49d).

Alguns tipos de associações da apatita com os minerais da ganga, tais como apatita associada com ilmenita, perovskita e magnetita, são observados na Figura 4.50. Assim como observado nos outros tipos de minério, a magnetita presente nessas amostras apresenta abundantes lamelas de exsolução de ilmenita (Figura 4.50). Na amostra 12 foi possível verificar a presença de fosfato secundário aluminoso pertencente ao grupo da crandalita como produto de alteração do anatásio (Figura 4.51), bem como monazita/fosfato do grupo do rabdofânio. Em alguns locais as análises são características desses fosfatos secundários e, em outros, sua presença é indicada pelos teores de Al_2O_3 e P_2O_5 nas análises de anatásio. A crandalita e fosfato do grupo do rabdofânio foram identificados em Tapira por Soubières *et al.* (1991) e Vieira (1997). Quando as microanálises obtidas não corresponderam a nenhum desses minerais, utilizou-se o nome geral de fosfato secundário.

A técnica de microscopia eletrônica de varredura permitiu reconhecer que o argilomineral presente nas amostras 11 e 12 é a nontronita (argilomineral rico em ferro), pertencente ao grupo das esmectitas. Neste caso específico, as amostras analisadas

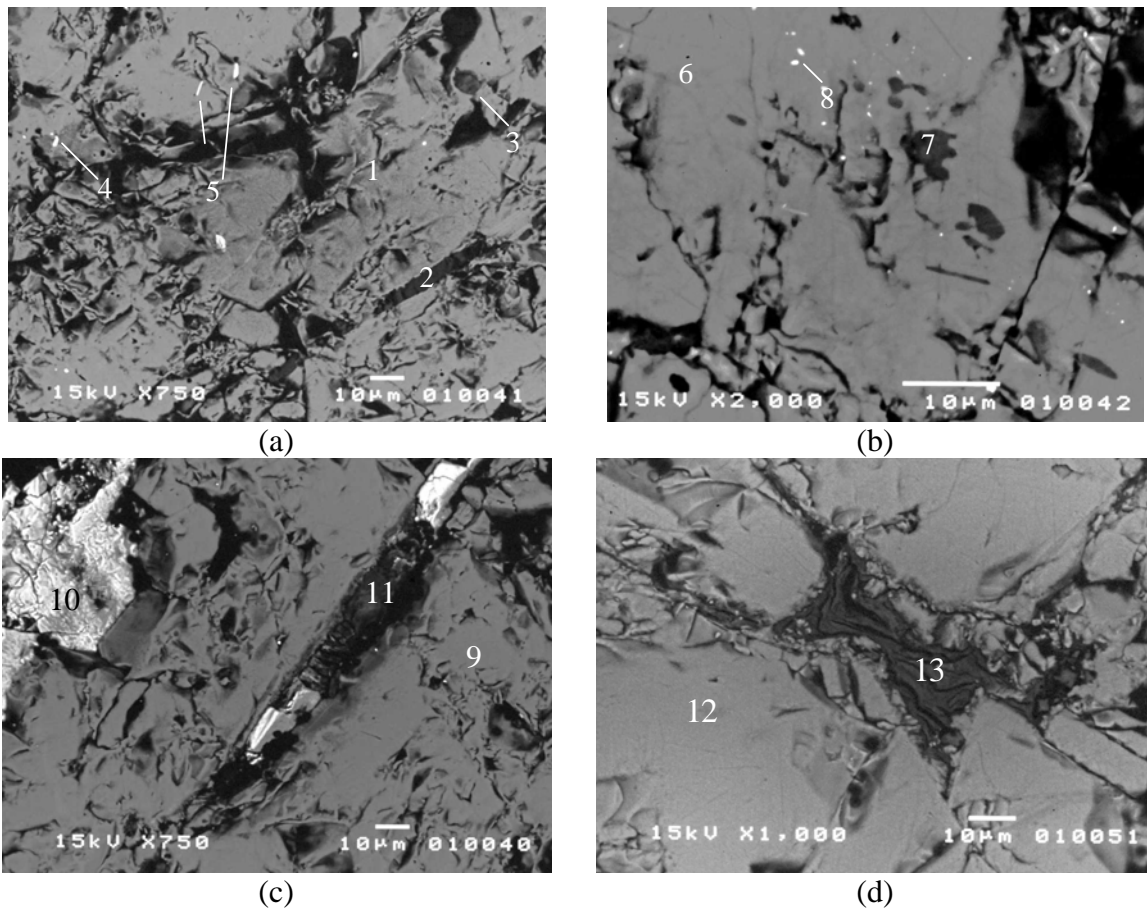
estavam na forma de pó, colocadas diretamente sobre uma fita de carbono e recobertas por uma película também de carbono. A estrutura do argilomineral nas duas amostras é observada na Figura 4.52. Nota-se que apesar do argilomineral apresentar praticamente a mesma composição nas duas amostras, sua estrutura é bastante diferente.



Área	CaO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	56,4	0,3	0,2	1,3	0,0	0,1	40,8	0,4	0,0	0,1	0,3	apatita
2	53,0	0,0	0,0	3,2	0,1	0,0	42,7	1,0	0,0	0,0	0,0	apatita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

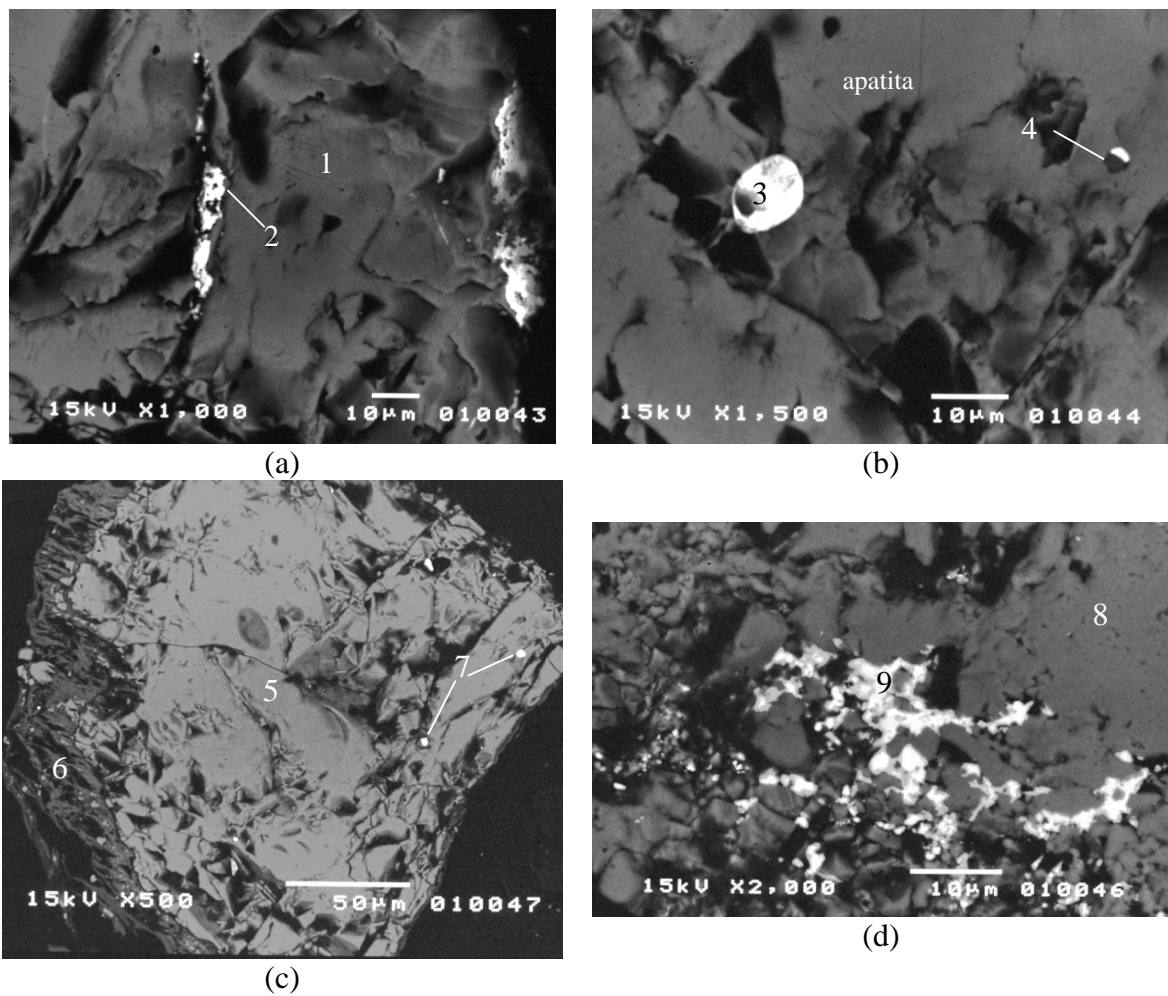
Figura 4.47 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito argilizado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER – a, c e d e imagem de elétrons secundários – IES – b). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita porosa com inclusões fluidas (am12). (b): mesma foto anterior ressaltando os poros e as inclusões fluidas (c): apatita porosa com inclusões fluidas (am12). (d): outra região da apatita porosa apresentada em c, mostrando alinhamento dos poros (am12).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	UO ₂	TiO ₂	Interpretação
1	56,5	-	0,5	0,0	0,8	0,3	0,1	41,2	0,5	-	0,0	0,0	-	-	0,0	apatita
2	-	-	65,1	-	-	-	-	-	-	-	17,7	17,2	-	-	-	K-feldspato
3	29,6	1,9	-	6,6	0,0	0,0	19,8	-	-	42,1	-	-	-	-	-	anquerita
4	19,7	-	0,7	0,2	2,0	1,1	0,0	34,2	41,5	-	0,0	0,2	-	-	0,4	monazita
5	25,3	-	-	-	-	-	5,7	-	-	-	-	-	38,5	3,5	27,0	zirconolita
6	56,3	-	0,3	0,0	1,0	0,0	0,0	41,2	1,0	-	0,0	0,0	-	-	0,1	apatita
7	54,0	1,1	-	1,0	0,0	0,8	0,7	-	-	42,4	-	-	-	-	-	calcita
8	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70,0	-	-	óx. Zr e Ca
9	53,0	-	0,8	0,1	2,6	0,1	0,1	41,6	1,4	-	0,1	0,0	-	-	0,2	apatita
10	-	2,7	0,1	0,1	-	-	44,5	-	-	-	-	0,1	-	-	52,5	ilmenita
11	2,3	-	52,7	5,7	-	-	31,3	-	-	-	3,3	4,7	-	-	-	nontronita
12	56,5	-	0,4	0,0	1,0	0,0	0,1	41,9	0,1	-	0,0	0,0	-	-	0,0	apatita
13	2,4	-	57,6	2,7	-	-	24,3	-	-	-	-	13,0	-	-	-	nontronita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

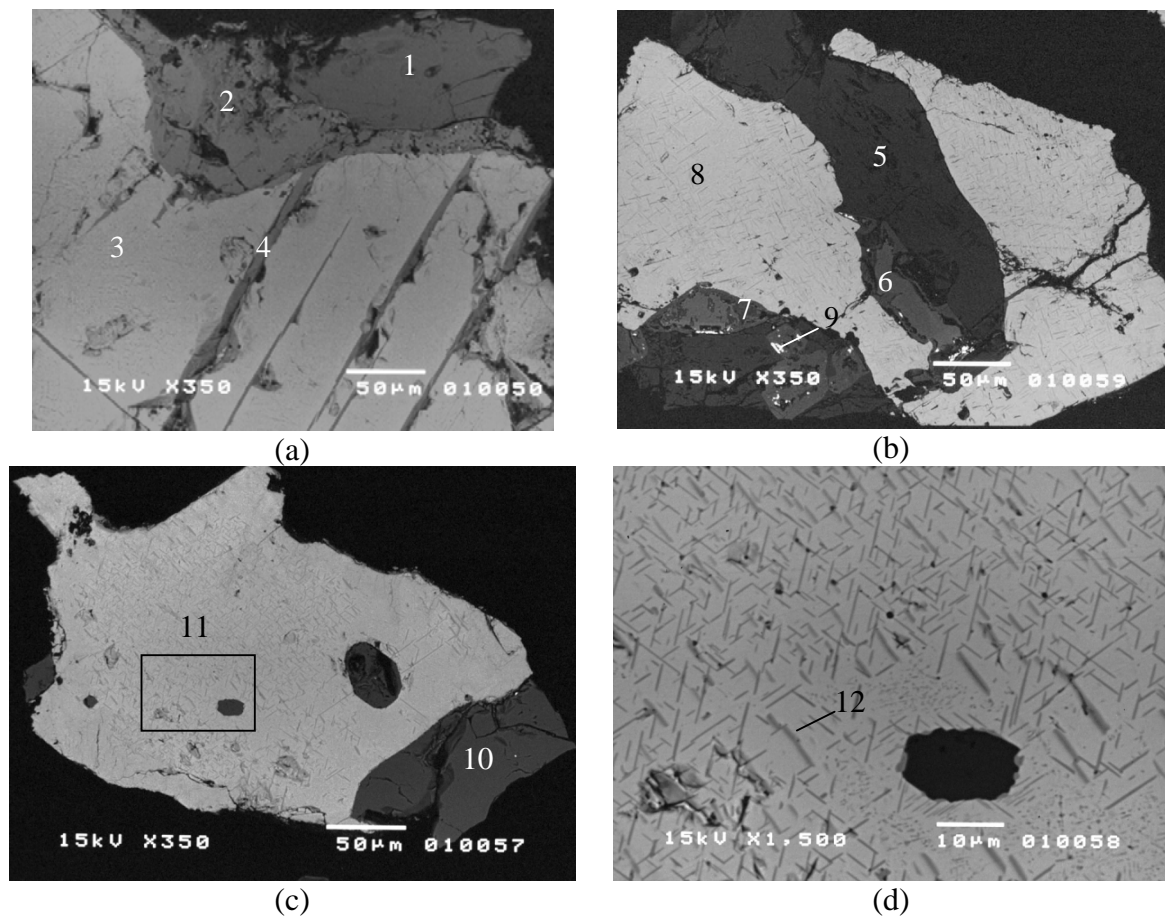
Figura 4.48 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito argilizado (amostra 11 – fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de feldspato potássico, monazita, zirconolita e anquerita. (b): apatita com inclusões de calcita e de um óxido de Zr e Ca. (c): apatita com inclusões de ilmenita e nontronita. (d): apatita com inclusão de nontronita.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	Interpretação
1	55,7	-	0,3	0,1	1,2	0,3	0,1	41,7	0,6	-	0,0	0,0	0,0	-	apatita
2	11,9	-	0,6	0,1	1,7	1,1	0,2	37,6	46,0	-	0,1	0,0	0,7	-	monazita
3	1,0	-	-	-	-	65,8	-	-	-	-	-	-	-	33,2	barita
4	50,9	3,5	-	0,5	0,0	3,5	1,5	-	-	40,0	-	-	-	-	calcita
5	56,1	-	0,7	0,1	1,1	0,3	0,1	40,0	1,5	-	0,0	0,1	0,0	-	apatita
6	3,5	-	60,6	3,7	-	-	29,3	-	-	-	-	2,9	-	-	nontronita
7	2,3	-	-	-	-	65,0	-	-	-	-	-	-	-	32,7	barita
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,0	-	anatásio
9	6,5	-	0,8	0,1	1,7	0,0	0,2	31,7	51,4	-	0,0	0,0	7,5	-	monazita/rabodofana

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

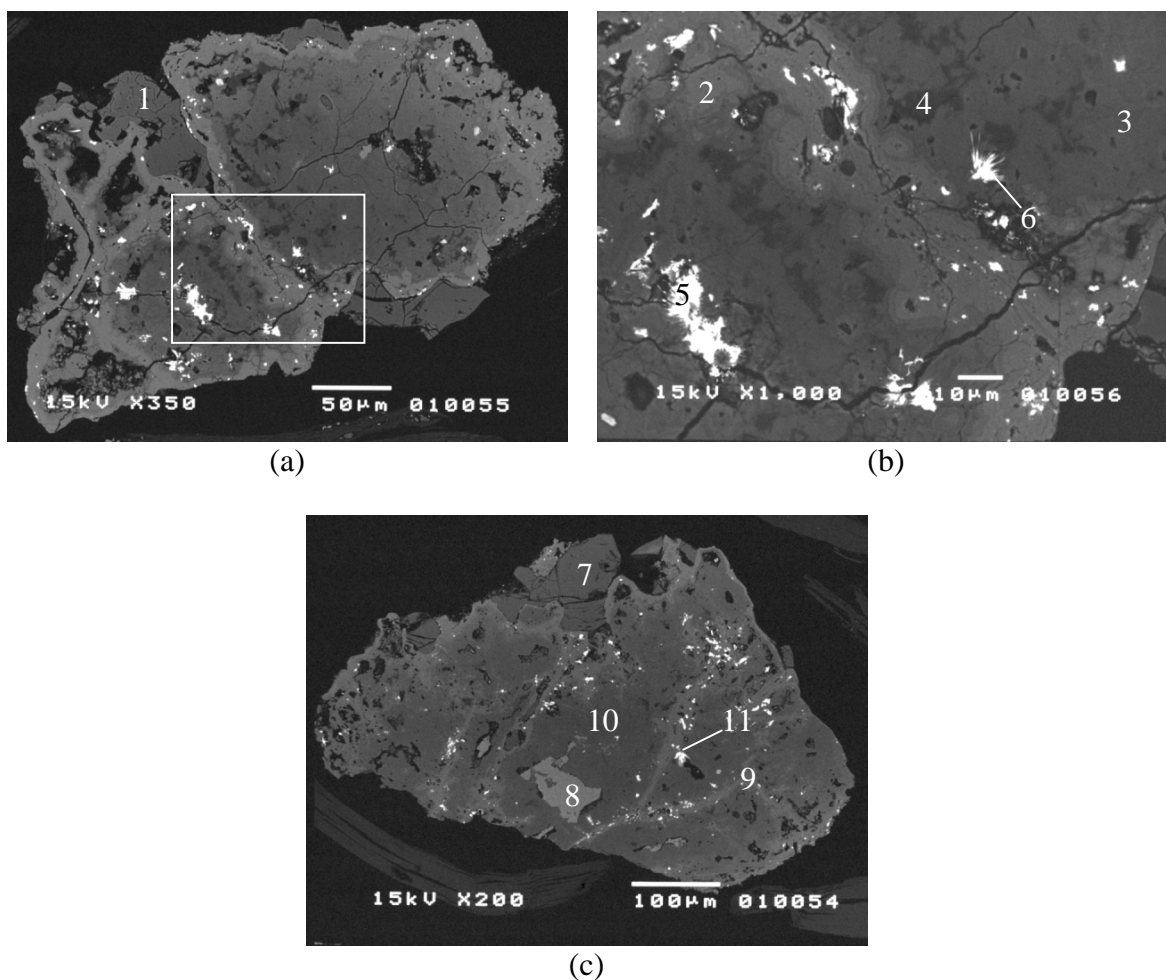
Figura 4.49 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito argilizado (amostra 11 – fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de monazita. (b): outra região da apatita apresentada em (a), mostrando inclusões de barita e de calcita. (c): apatita associada com nontronita e com inclusões finíssimas de barita. (d): anatásio com inclusões de monazita/fosfato do grupo do rabdofânio.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	ThO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	53,3	-	0,0	0,0	2,9	0,0	0,7	42,4	0,3	-	0,1	0,0	0,2	apatita
2	34,5	-	0,0	0,0	0,2	0,0	1,7	-	3,5	0,5	0,2	0,3	59,1	perovskita
3	-	0,8	0,1	2,4	-	-	91,1	-	-	-	-	0,5	5,1	magnetita
4	-	4,0	0,3	9,4	-	-	28,6	-	-	-	-	0,3	57,4	ilmenita
5	56,5	-	0,1	0,0	1,5	0,2	0,6	40,7	0,2	-	0,1	0,0	0,1	apatita
6	38,3	-	0,1	0,1	0,8	0,0	0,7	-	1,2	0,1	0,0	0,1	58,6	perovskita
7	-	0,1	2,0	0,2	-	-	2,5	-	-	-	-	0,4	94,8	anatásio
8	-	0,8	0,2	0,4	-	-	94,9	-	-	-	-	0,2	3,5	magnetita
9	4,8	-	0,8	0,0	1,5	0,0	3,2	20,9	53,1	-	0,1	1,4	14,2	fosfato sec.
10	53,0	-	0,0	0,1	2,9	0,0	0,4	43,0	0,5	-	0,1	0,0	0,0	apatita
11	-	0,3	0,2	0,4	-	-	95,6	-	-	-	-	0,1	3,4	magnetita
12	-	4,6	0,1	2,8	-	-	53,8	-	-	-	-	0,1	38,6	ilmenita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

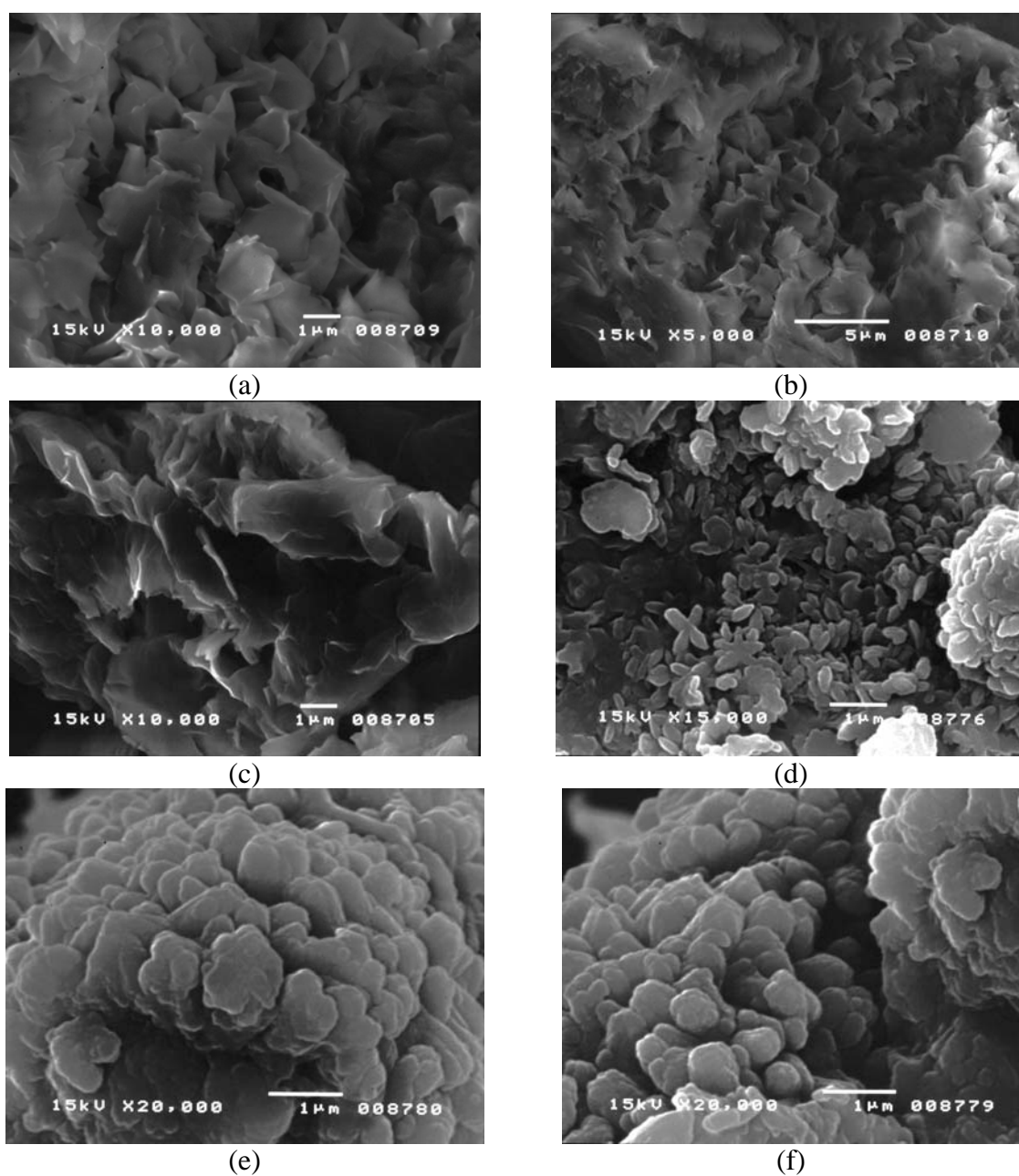
Figura 4.50 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito argilizado (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com perovskita; nota-se magnetita com exsolução de ilmenita (am11). (b): apatita associada com perovskita/anatásio e magnetita (am12). (c): apatita inclusa e na borda de magnetita (am12). (d): ampliação de uma região da foto anterior com detalhe para exsolução de ilmenita na magnetita.



Área	CaO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	56,4	0,3	0,0	1,4	0,0	0,1	41,2	0,1	0,1	0,1	0,3	apatita
2	0,6	1,3	0,0	0,4	0,0	6,4	1,2	0,0	0,1	0,8	89,2	anatásio
3	0,4	0,4	0,0	0,4	0,0	2,4	4,8	0,0	0,0	5,6	86,0	anatásio alterado
4	7,1	0,0	0,0	4,5	3,2	0,4	35,4	5,9	0,1	31,4	12,0	crandalita
5	6,3	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	39,4	50,1	0,0	0,4	2,3	monazita/rabodofana
6	7,1	0,0	0,0	3,5	0,9	0,0	37,0	35,4	0,1	11,7	4,2	fosfato secundário
7	53,3	0,0	0,0	2,8	0,0	0,1	43,2	0,3	0,0	0,0	0,3	apatita
8	39,4	0,1	0,0	0,6	0,0	0,6	-	1,1	0,1	0,1	58,0	perovskita
9	-	0,8	-	-	-	3,0	-	-	-	1,1	95,1	anatásio
10	-	-	-	-	-	-	3,9	-	-	6,3	89,8	anatásio alterado
11	6,6	0,0	0,4	1,0	0,0	0,0	39,0	40,1	0,0	1,4	11,5	monazita/rabodofana

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 4.51 – Eletromicrografias do clinopiroxenito argilizado (am12 – fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise de cada miniárea pode ser observada na tabela acima. (a): apatita associada com anatásio parcialmente alterado para fosfato secundário do grupo da crandalita e monazita/rabodofana. (b): ampliação de uma região da foto anterior (c): apatita associada com anatásio; notam-se restos de perovskita e inclusões de monazita/rabodofana no anatásio.



Amostra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	total	Interpretação
11 *	52,2	1,2	14,0	27,9	1,1	3,6	0,0	0,0	100,0	nontronita
11**	40,7	0,9	10,9	21,8	0,9	2,8	0,0	0,0	78,0	nontronita
12 *	48,5	2,7	6,1	35,9	2,6	2,2	0,3	1,7	100,0	nontronita
12 **	37,8	2,1	4,7	28,0	2,1	1,7	0,3	1,3	78,0	nontronita

* análise calcinada ** valores obtidos considerando-se 22% de água estimada, à partir da literatura.

Figura 4.52 – Eletromicrografias do argilomineral nontronita presente nas amostras de clinopiroxenito argilizado obtidas no MEV (imagem de elétrons secundários – IES). As microanálises EDS, obtidas como uma média de 15 miniáreas analisadas por amostra, são mostradas na tabela acima. (a), (b) e (c): amostra 11. (d), (e) e (f): amostra 12.

- **CLINOPIROXENITO RICO EM MAGNETITA E PEROVSKITA (AMOSTRAS 3, 6, 7 e 8)**

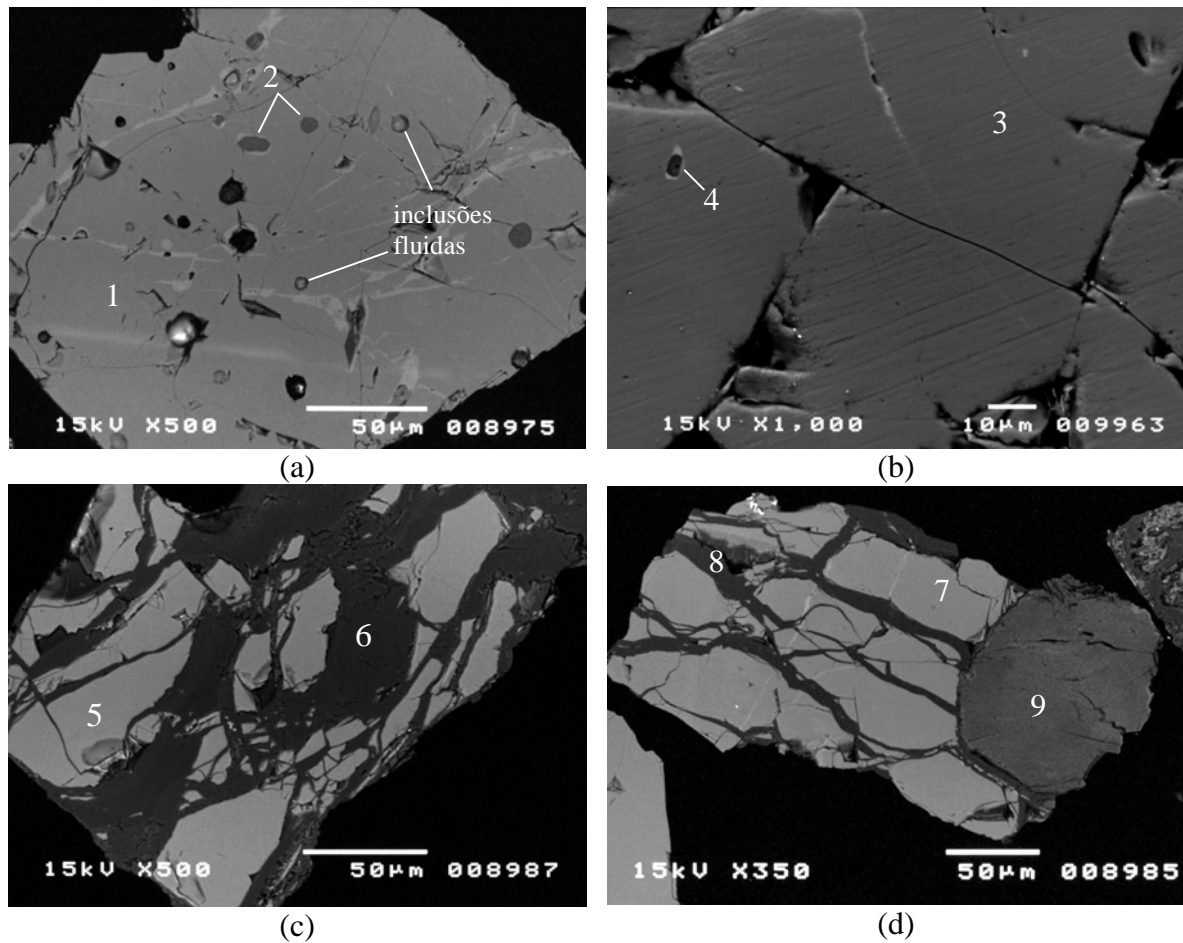
A apatita presente nesse tipo de minério possui forma essencialmente granular, superfície lisa e aspecto geralmente límpido. Grãos de apatita com inclusões de calcita e/ou inclusões fluidas, apesar de pouco freqüentes, podem ser localmente observados (Figura 4.53a e b). Vale ressaltar que a apatita presente neste grupo de minério possui o aspecto mais límpido comparado com a apatita dos outros grupos de rochas.

Destaca-se nessas amostras a presença de grande quantidade de grãos de apatita cortados por venulações somente de quartzo ou somente de carbonatos (calcita ou dolomita) ou quartzo + carbonatos. Estas vênulas possuem direções variadas, entrecortando-se e podem apresentar um zonamento de calcita e dolomita (Figuras 4.53c e d, 4.54 e 4.55a, b e c). Escasso carbonato de (Sr,Ca) (La,Ce,Nd) foi observado na amostra 8 incluso em calcita, podendo tratar-se de ancilita (Figura 4.54d). Nessa mesma amostra observou-se, como alteração da perovskita, um óxido de titânio enriquecido em terras- raras, podendo tratar-se de anatásio ou outra espécie mineral.

Alguns tipos de associações da apatita com os minerais da ganga são mostrados nas Figuras 4.55d, 4.56 e 4.57a.

A Figura 4.57a e b mostra um grão de magnetita com lamelas de exsolução de ilmenita, feição esta bastante comum em todos os 12 tipos de minérios estudados. Observa-se, pelas microanálises EDS apresentadas, que a ilmenita presente sob a forma de lamelas possui elevado teor de MgO (~12%).

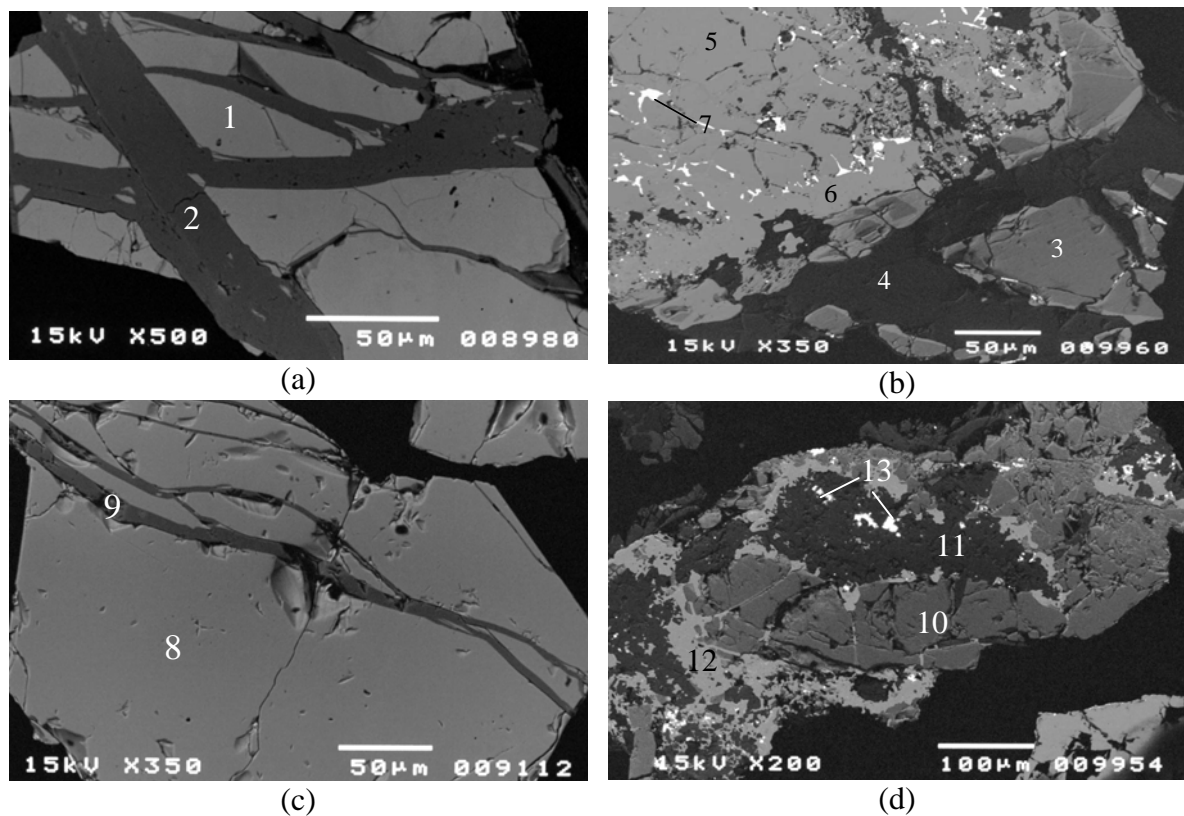
A técnica de microscopia eletrônica de varredura permitiu reconhecer nesse tipo de minério que a goethita observada em microscopia óptica ocorre principalmente como uma película recobrando grãos de silicatos e/ou carbonatos (Figura 4.57c e d). Isto muitas vezes dificulta a quantificação destas fases por microscopia óptica.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	54,9	-	0,5	0,1	0,9	0,1	0,3	43,0	0,1	-	-	0,1	-	apatita
2	54,5	-	0,2	0,8	0,1	0,0	-	-	-	44,4	-	-	-	calcita
3	56,3	-	0,7	0,1	1,0	0,4	0,1	40,5	0,7	-	0,1	0,1	-	apatita
4	54,5	0,5	-	1,3	-	0,8	0,2	-	-	42,7	-	-	-	calcita
5	55,1	-	0,5	0,0	1,0	-	-	42,9	0,5	-	-	-	-	apatita
6	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
7	55,2	-	0,8	0,0	1,0	-	0,1	42,4	0,5	-	-	-	-	apatita
8	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
9	0,8	-	39,2	26,6	5,4	0,8	5,3	-	-	-	7,4	13,5	1,0	FCM

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

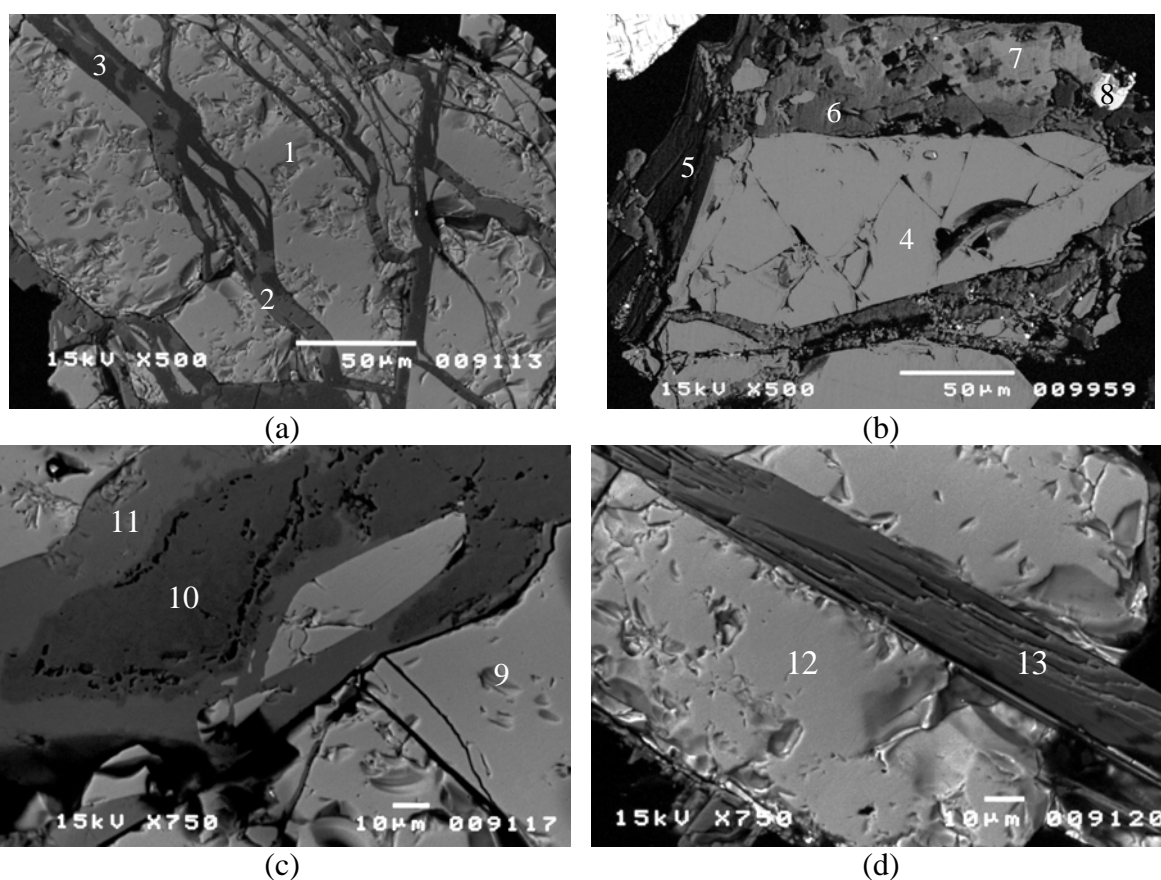
Figura 4.53 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões fluidas e inclusões de calcita (am3). (b): apatita com inclusão de calcita (am8). (c): apatita cortada por vênulas de quartzo (am3). (d): apatita cortada por vênulas de quartzo e associada com FCM (am3).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	55,1	-	0,8	0,0	1,1	-	-	42,6	0,4	-	-	-	apatita
2	29,6	-	0,7	20,5	0,6	0,6	0,4	-	-	47,6	-	-	dolomita
3	54,4	-	0,6	0,1	2,3	-	0,1	42,3	0,1	-	0,1	-	apatita
4	33,1	0,7	-	17,0	0,7	0,5	2,2	-	-	45,8	-	-	dolomita
5	38,0	-	0,1	0,0	0,4	-	0,8	-	2,4	-	0,2	58,1	perovskita
6	-	1,6	0,2	0,7	-	-	44,3	-	-	-	0,1	53,1	ilmenita
7	4,1	-	-	-	-	-	1,5	-	22,0	-	-	72,4	anatásio com ETR
8	57,8	-	0,5	-	0,8	-	0,2	40,1	0,4	-	-	0,2	apatita
9	55,6	-	0,3	0,8	0,1	0,1	0,0	-	-	43,1	-	-	calcita
10	53,8	-	1,1	0,1	2,7	0,2	0,2	41,9	-	-	-	-	apatita
11	53,0	0,5	-	0,7	-	4,5	0,1	-	-	41,2	-	-	calcita
12	0,5	2,0	-	1,0	-	-	43,5	-	-	-	-	52,9	ilmenita
13	4,2	-	-	-	23,1	-	-	-	63,0	9,7	-	-	ancilita (?)

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

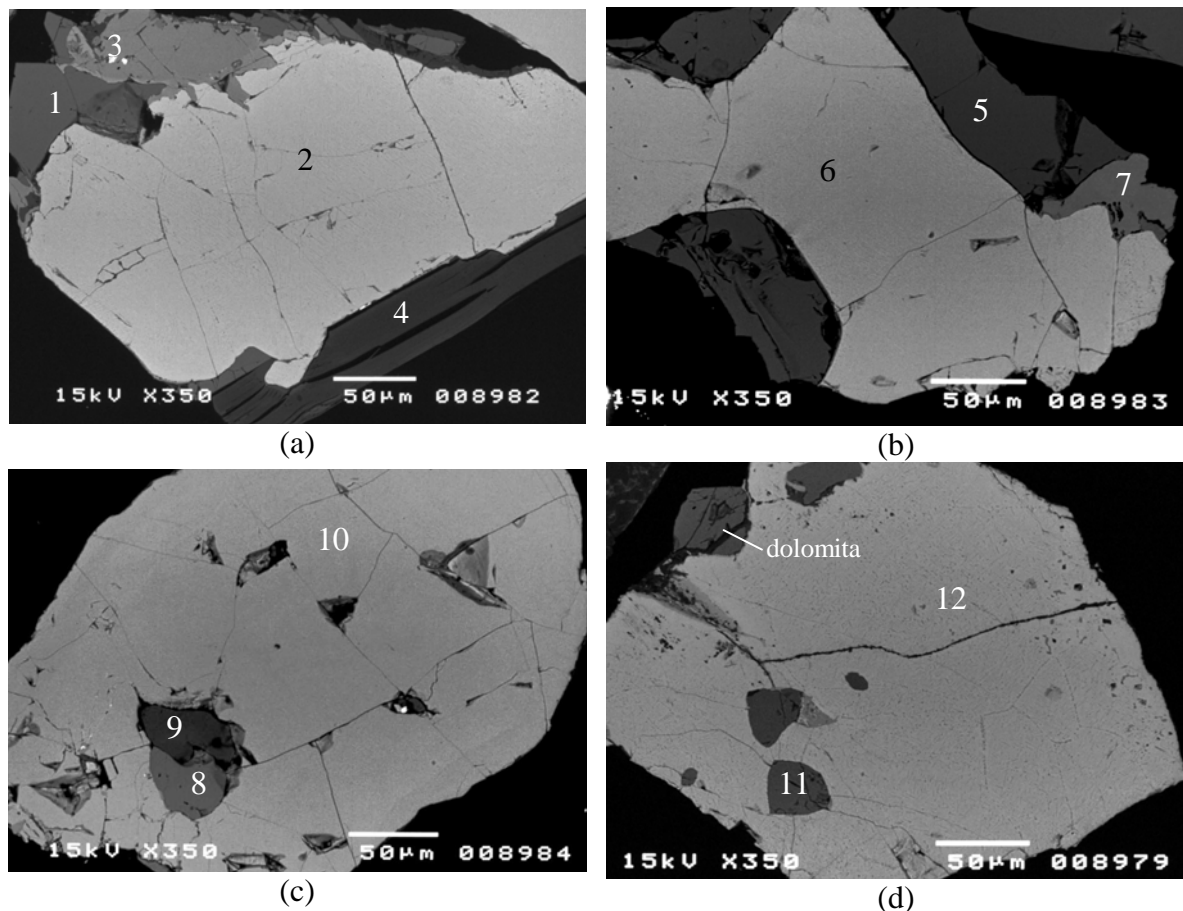
Figura 4.54 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênulas de dolomita (am3). (b): apatita cortada por vênula de dolomita; nota-se associação da apatita com perovskita alterada nas bordas para ilmenita e para anatásio (?) com ETR (am8). (c): apatita cortada por vênulas de calcita (am6). (d): apatita cortada por vênulas de calcita e associada com ilmenita; nota-se inclusão na calcita de provável ancilita (am8).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	57,0	-	0,2	0,1	1,1	-	0,2	39,3	2,1	-	-	0,0	0,0	apatita
2	54,4	-	0,8	1,7	0,3	-	-	-	-	42,7	0,1	0,0	-	calcita
3	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
4	53,2	-	-	-	2,3	0,4	0,1	42,9	1,0	-	-	0,0	0,1	apatita
5	2,6	-	49,4	26,5	-	0,2	7,7	-	0,6	-	0,1	11,3	1,6	vermiculita
6	34,8	0,0	-	16,5	0,3	0,2	1,5	-	-	46,7	-	-	-	dolomita
7	54,3	-	-	1,7	0,2	0,7	0,5	-	-	42,6	-	-	-	calcita
8	-	2,5	0,3	2,1	-	-	37,6	-	-	-	-	0,2	57,3	ilmenita
9	57,8	-	0,5	0,1	-	-	-	41,0	0,6	-	0,0	-	-	apatita
10	35,7	-	-	16,0	0,6	-	0,2	-	-	47,4	-	-	-	dolomita
11	55,6	-	0,2	1,1	0,2	-	0,2	-	-	42,6	-	-	0,1	calcita
12	56,9	-	0,2	-	0,9	0,1	0,1	41,0	0,6	-	0,1	0,1	-	apatita
13	13,8	-	61,3	18,5	-	-	4,0	-	0,1	-	1,4	-	0,9	piroxênio

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

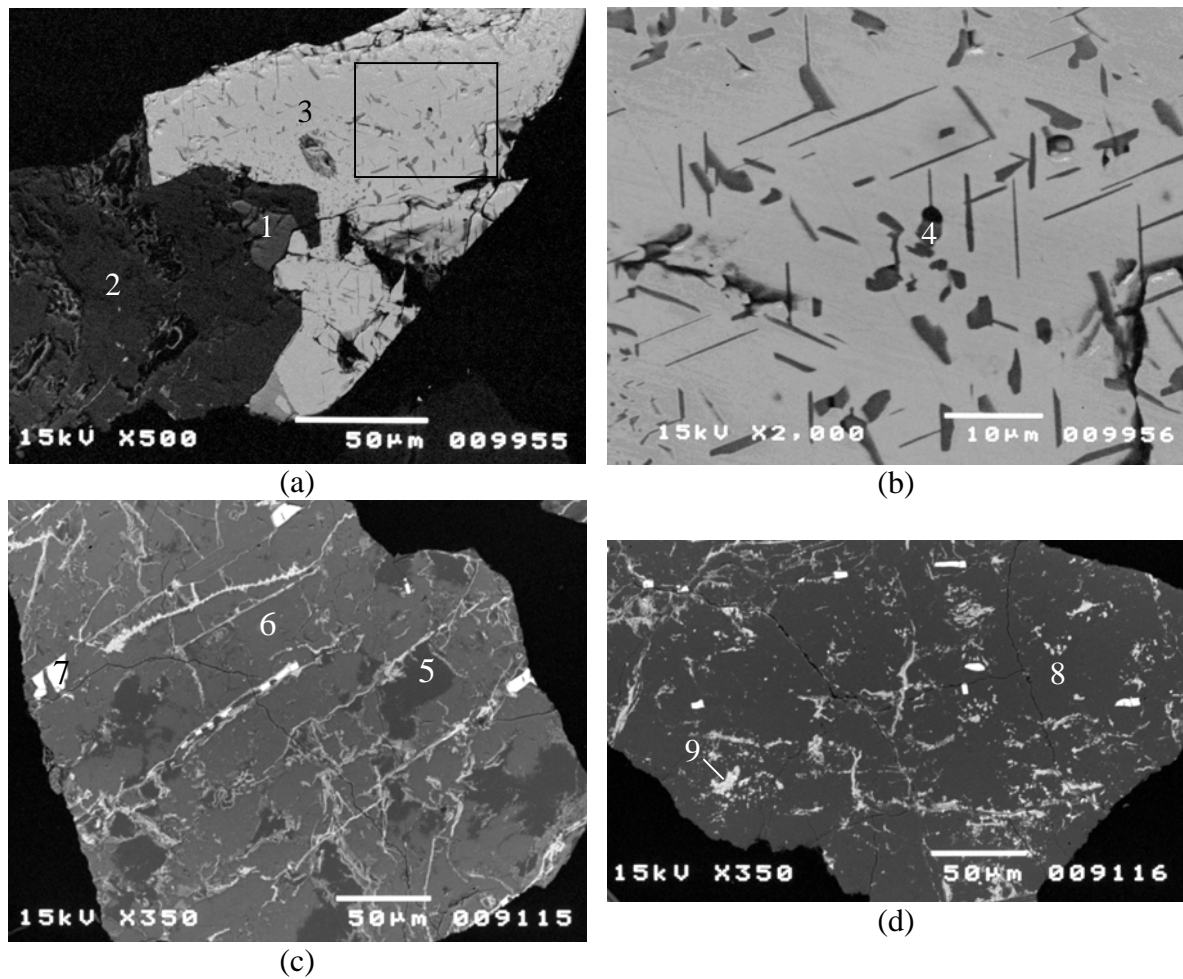
Figura 4.55 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênulas de calcita + quartzo (am6). (b): apatita associada com vermiculita e cortada por vênulas de calcita + dolomita (am8). (c): apatita cortada por vênulas de calcita + dolomita (am6). (d): apatita associada com piroxênio (am6).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	55,7	-	0,2	0,0	1,0	-	-	42,9	0,2	-	-	-	apatita
2	0,0	0,8	0,0	4,0	-	-	88,1	-	-	-	0,1	7,0	magnetita
3	38,4	-	0,2	0,0	0,3	-	1,0	-	2,8	0,0	0,1	57,2	perovskita
4	0,5	0,1	44,6	29,6	-	-	5,8	-	-	4,9	13,0	1,5	FCM
5	55,0	-	0,8	0,1	1,0	-	-	42,9	0,2	-	-	-	apatita
6	0,0	1,1	0,0	5,0	-	-	85,0	-	-	-	0,4	8,5	magnetita
7	38,4	-	-	0,1	0,3	-	1,1	-	2,7	-	-	57,4	perovskita
8	55,1	-	0,8	0,0	1,1	-	-	42,6	0,4	-	-	-	apatita
9	0,8	0,1	43,8	28,3	-	-	6,2	-	-	5,3	13,4	2,1	FCM
10	39,2	-	0,4	0,2	0,5	-	0,6	-	1,2	-	0,4	57,4	perovskita
11	55,1	-	0,8	0,0	1,1	-	-	42,6	0,4	-	-	-	apatita
12	-	-	0,4	4,4	-	-	87,6	-	-	-	0,6	7,0	magnetita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 4.56 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com magnetita, perovskita e FCM (am3). (b): apatita associada com magnetita e perovskita. (am3). (c): apatita e FCM, ambos inclusos em perovskita (am3). (d): apatita associada com magnetita (am3).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	53,8	-	-	-	2,4	0,2	1,1	42,2	0,3	-	-	0,0	apatita
2	51,5	-	-	2,7	3,7	0,1	1,6	-	-	40,4	-	-	calcita
3	-	0,6	0,2	1,8	-	-	94,7	-	-	-	0,3	2,4	magnetita
4	-	5,4	0,1	12,6	-	-	34,8	-	-	-	0,0	47,1	ilmenita
5	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
6	55,8	-	-	0,6	0,1	0,1	0,4	-	-	43,0	-	-	calcita
7	0,7	-	0,2	1,1	0,2	-	96,9	-	-	-	0,2	0,7	goethita
8	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
9	0,3	-	0,7	0,7	0,2	-	97,4	-	-	-	0,2	0,5	goethita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 4.57 – Eletronmicrografias do clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com calcita e magnetita (am8). (b): ampliação de uma região da magnetita mostrando lamelas de exsolução de ilmenita (am8). (c): calcita e quartzo parcialmente recobertos por goethita (am6). (d): quartzo recoberto por goethita (am6).

4.5.1 – SUMÁRIO

- A técnica de microscopia eletrônica de varredura permitiu a confirmação de que a apatita presente nas 12 amostras de minério estudadas da mina de Tapira-MG é primária, não sendo observados apatita secundária e fosfatos secundários provenientes de sua alteração. A presença local de diferentes tons de cinza nos cristais de apatita pode indicar mais de uma geração.
- O carbonato presente como inclusão na apatita foi identificado como calcita na maioria das amostras, sendo exceção a amostra 4 (clinopiroxenito micáceo), onde esse foi identificado como principalmente estroncianita. Na amostra 11, foi identificada escassa inclusão de anquerita na apatita. O carbonato presente como venulações possui composição de calcita, dolomita ou calcita magnesianana.
- A apatita pode apresentar inclusões locais de monazita, ilmenita, zirconolita – $(Ca, Ce, Nd)Zr (Ti, Fe)O_7$, piroxênio, mineral micáceo (filossilicato de camada mista do tipo flogopita/vermiculita), anatásio, perovskita e barita. Na amostra 11, ocorrem também inclusões na apatita de feldspato potássico e de nontronita.
- A calcita das venulações pode apresentar inclusões de monazita, barita, zirconolita e de um carbonato de $(Sr,Ca) (La,Ce,Nd)$ – provável ancilita.
- Fosfato secundário aluminoso do grupo da crandalita foi identificado somente na amostra 12 como produto de alteração do anatásio. Observa-se também, como alteração do anatásio, um fosfato não aluminoso rico em terras-raras do tipo monazita/rabdofana nas amostras 11 e 12.
- A granada identificada na amostra 4 possui teor de TiO_2 variando entre <1% a 14%, sendo identificada como andradita do tipo melanita.
- A ilmenita presente sobre a forma de lamelas de exsolução na magnetita apresenta teores de MgO variando entre 2,8% até 12,5%.

4.6 – MICROANÁLISES QUÍMICAS (WDS)

Microanálises químicas (WDS) foram realizadas em algumas fases minerais presentes nas amostras da mina de Tapira para melhor detalhamento de suas composições químicas, permitindo uma identificação mais precisa dos mesmos. Em função da mineralogia das rochas ultramáficas (clinopiroxenitos) de Tapira ser muito variada, foram escolhidos apenas os minerais predominantes.

As microanálises apresentadas foram obtidas através de uma média de vários pontos analisados por mineral em cada amostra e, sempre que possível, foi calculada a unidade de fórmula para cada um dos minerais.

A seguir, serão apresentadas as composições químicas obtida para o piroxênio, minerais micáceos (filossilicato de camadas mistas e vermiculita), carbonatos, magnetita, perovskita e apatita.

- **CLINOPIROXÊNIO**

O clinopiroxênio corresponde a um mineral presente em quase todas as amostras estudadas, variando de um constituinte essencial (clinopiroxenitos pouco alterados e clinopiroxenitos micáceos) ou aparecendo em menores proporções (clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita). Nas amostras de clinopiroxenitos argilizados, não foi possível analisar o clinopiroxênio devido a sua alteração intensa ou total substituição.

A Tabela 4.32 mostra as microanálises obtidas em cada amostra, juntamente com a fórmula estrutural. A fórmula foi calculada com base em 6 oxigênios e os valores de Fe_2O_3 foram calculados por balanço de carga.

Os resultados indicam que o clinopiroxênio presente nos diversos tipos de clinopiroxenitos da mina de Tapira trata-se de diopsídio ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$).

Tabela 4.32 – Análises de clinopiroxênio em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG

Amostra	2	5	10	1	4	9	3
Mineral	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio
	% peso analisada						
SiO ₂	52,80	53,70	54,65	52,78	53,10	53,67	52,24
TiO ₂	0,74	0,47	0,35	0,92	0,69	0,37	0,98
Al ₂ O ₃	0,98	0,54	0,06	0,80	0,45	0,41	1,46
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Fe ₂ O ₃	3,59	0,00	0,16	1,36	0,00	0,14	0,00
MgO	15,62	15,95	16,29	15,68	15,66	15,36	15,57
CaO	24,76	24,87	24,43	24,82	24,45	24,13	24,92
MnO	0,09	0,12	0,11	0,08	0,09	0,16	0,09
FeO	0,24	3,12	2,57	2,23	3,37	3,78	3,34
Na ₂ O	0,32	0,35	0,54	0,34	0,43	0,66	0,35
K ₂ O	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
total	99,15	99,14	99,18	99,03	98,27	98,71	98,98
	Número de íons na base de 6 (O)						
Si	1,94	1,98	2,01	1,95	1,98	1,99	1,94
Al	0,04	0,02	0,00	0,03	0,02	0,01	0,06
total	1,99	2,00	2,01	1,99	2,00	2,00	2,00
Al	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Ti	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03
Fe ³⁺	0,10	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Mg	0,86	0,88	0,89	0,86	0,87	0,85	0,86
Fe ²⁺	0,01	0,10	0,08	0,07	0,11	0,12	0,10
total	0,99	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
Ca	0,98	0,98	0,96	0,98	0,98	0,96	0,99
Na	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,05	0,03
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
total	1,00	1,01	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02

Amostras 2, 5 e 10 – clinopiroxenitos pouco alterados

Amostras 1, 4 e 9 – clinopiroxenitos micáceos

Amostra 3 – clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita

* valores de Fe₂O₃ calculados por balanço de carga

• MINERAIS MICÁCEOS

Os minerais micáceos estão presentes em todas as amostras de clinopiroxenitos coletadas na mina de Tapira, variando de abundante em algumas amostras (clinopiroxenitos micáceos) ou ocorrendo em menor quantidade (amostras de clinopiroxenitos pouco alterados, ricos em magnetita e perovskita e argilizados).

Os minerais micáceos apresentam diferentes graus de alteração, variando de filossilicatos de camadas mistas (FCM) do tipo flogopita/vermiculita (amostras 1 a 11) ou biotita/vermiculita (amostra 12) até vermiculita pura. Flogopita pura ocorre em quantidade minoritária e só foi identificada por difração de raios-X nas amostras 2, 3 e 5.

Os resultados de microanálises encontram-se na Tabela 4.33 e indicaram que a maioria dos minerais micáceos analisados em todas as amostras tratam-se de misturas de filossilicatos, compostos por proporções variadas de flogopita e vermiculita (amostras 1 a 11) ou biotita/vermiculita (amostra 12). Como trata-se de uma mistura de mais de um mineral, não foi calculada sua fórmula estrutural. A identificação do mineral micáceo como flogopita e não biotita nas amostras de 1 a 11 foi definida pela utilização de diagrama triangular para classificação de micas, cujas terminações são Al, Mg e Fe_{total}. A alteração da flogopita para vermiculita é evidenciada nas análises químicas principalmente pela diminuição do K₂O que possui valor em torno de 9 - 10% para uma flogopita pura e nos camadas mistas apresentaram valores entre 3,3-6,2%.

Nas amostras 5, 10, 3, 6, 7 e 8 as análises indicaram a presença de vermiculita pura (notar os valores muito baixos de K₂O), confirmando os dados obtidos por difração de raios-X. A Tabela 4.34 apresenta as análises de vermiculita, juntamente com o cálculo da fórmula estrutural.

Uma característica comum das vermiculitas analisadas consiste na insuficiência de Al para preencher as posições tetraédricas, sendo utilizado o Fe³⁺ para completá-las. Essa feição é comum em micas de rochas alcalinas e carbonatitos e foi observada por Brod

(1999) nas análises de flogopita do Complexo alcalino de Tapira e por Morbidelli *et al.* (1995) em flogopita e biotita de vários complexos alcalino-carbonatíticos do Brasil. Estudos cristalóquímicos de Brigatti *et al.* (1996) em flogopitas de Tapira indicaram que a principal substituição tetraédrica é $^{(IV)}\text{Fe}^{3+} \Leftrightarrow ^{(IV)}\text{Al}$.

Tabela 4.33 – Análises de FCM em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG

Amostra	2	5	10	1	4	9
	% peso analisada					
SiO ₂	37,75	39,10	37,27	39,03	40,58	36,69
TiO ₂	1,74	1,83	0,40	1,88	2,84	1,96
Al ₂ O ₃	12,37	13,01	6,18	11,58	9,98	11,61
FeO	10,13	9,18	9,63	7,22	7,43	8,39
MnO	0,18	0,10	0,10	0,09	0,07	0,11
MgO	24,17	23,36	23,93	23,32	21,87	21,79
CaO	0,45	0,54	0,76	0,63	0,70	0,55
Na ₂ O	0,75	0,47	0,34	0,14	0,03	0,44
K ₂ O	5,13	4,71	3,26	4,15	5,51	4,84
F	0,13	0,28	0,04	0,11	0,38	0,08
Total	92,74	92,47	81,88	88,12	89,24	86,43
Amostra	3	6	7	8	11	12
	% peso analisada					
SiO ₂	38,00	38,64	41,02	40,65	40,19	37,24
TiO ₂	1,71	1,29	1,41	0,16	2,58	3,73
Al ₂ O ₃	11,58	11,87	11,21	4,48	10,86	10,22
FeO	4,67	5,31	5,29	14,20	6,59	19,02
MnO	0,06	0,04	0,03	0,16	0,09	0,20
MgO	25,00	25,91	24,51	22,65	20,07	13,60
CaO	0,62	0,36	0,69	0,84	0,56	0,38
Na ₂ O	0,30	0,23	0,86	0,69	0,46	1,21
K ₂ O	4,85	3,70	3,70	4,11	4,72	6,16
F	0,19	0,14	0,21	0,14	0,18	0,20
Total	86,91	87,44	88,82	88,01	86,21	91,89

* Amostras de 1 a 11 correspondem a camadas mistas do tipo flogopita/vermiculita

**Amostra 12 corresponde a camada mista do tipo biotita/vermiculita

Tabela 4.34 – Análises de vermiculita em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG

Amostra	5	10	3	6	7	8
Mineral	vermiculita	vermiculita	vermiculita	vermiculita	vermiculita	vermiculita
	% peso analisada					
SiO ₂	37,07	42,42	37,80	38,77	39,71	39,92
TiO ₂	1,25	0,63	1,11	1,02	1,43	0,30
Al ₂ O ₃	11,58	7,73	12,04	10,67	10,95	9,50
Fe ₂ O ₃	1,80	3,05	3,05	2,30	1,10	3,05
MgO	25,07	24,43	27,95	27,37	26,09	24,73
CaO	0,79	1,23	0,70	0,32	0,56	0,57
MnO	0,08	0,08	0,05	0,07	0,08	0,13
FeO	6,35	4,58	1,66	4,53	4,80	7,48
Na ₂ O	0,23	2,03	0,13	0,07	0,50	1,61
K ₂ O	0,09	0,15	0,20	0,19	0,34	0,27
F	0,10	0,10	0,23	0,10	0,16	0,23
H ₂ O	15,42	15,87	15,70	15,78	15,80	15,70
total	99,83	102,30	100,62	101,19	101,52	103,48
	Número de íons na base de 22 (O)					
Si	5,73	6,37	5,69	5,85	5,97	6,01
Al	2,11	1,37	2,14	1,90	1,94	1,69
Fe ³⁺	0,16	0,27	0,17	0,25	0,10	0,30
total	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ti	0,15	0,07	0,13	0,12	0,16	0,03
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Mg	5,05	4,94	6,07	5,64	5,29	4,75
Fe ²⁺	0,72	0,52	0,20	0,52	0,55	0,80
Fe ³⁺	0,05	0,08	0,18	0,01	0,03	0,04
total	5,93	5,62	6,58	6,30	6,04	5,64
Mg	0,72	0,52	0,20	0,52	0,55	0,80
Fe ²⁺	0,10	0,05	0,01	0,05	0,06	0,14
Ca	0,13	0,20	0,11	0,05	0,09	0,09
Na	0,07	0,59	0,04	0,02	0,15	0,47
K	0,02	0,03	0,04	0,04	0,07	0,05
total	1,04	1,39	0,40	0,68	0,90	1,56
F	0,05	0,05	0,11	0,05	0,08	0,11
OH	3,95	3,95	3,89	3,95	3,92	3,89
total	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
H ₂ O	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00

Amostras 5 e 10 – clinopiroxenitos pouco alterados

Amostras 3, 6, 7 e 8 – clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita

• CARBONATOS

Os carbonatos ocorrem em todas as amostras de clinopiroxenitos estudadas, variando de raros (amostras 1 e 9 – clinopiroxenitos micáceos e amostras 11 e 12 – clinopiroxenitos argilizados) até abundantes (clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita, clinopiroxenitos pouco alterados e amostra 4 – clinopiroxenito micáceo). Eles ocorrem principalmente sob a forma de vênulas submilimétricas a milimétricas cortando os minerais em direções diversas, podendo estar sozinhos ou junto com quartzo. Outras formas de ocorrência dos carbonatos são: cavidades (drusas), inclusões nos cristais de apatita ou ainda disseminados pela rocha.

As microanálises químicas (WDS) confirmaram a composição dos carbonatos como calcita e dolomita, já identificados por difração de raios-X, sendo verificado que a dolomita é mais abundante nas amostras de clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita, apesar de haver um predomínio da calcita. As imagens de elétrons retroespalhados observadas no MEV durante as microanálises mostraram que muitas vezes ocorre um zonamento composicional nas vênulas, sendo essas constituídas por calcita e dolomita.

A Tabela 4.35 apresenta as microanálises de carbonatos com o cálculo da fórmula estrutural. Foram analisadas somente as amostras onde os carbonatos ocorrem em maior quantidade.

Os resultados obtidos mostraram que o conteúdo de MgO na calcita varia de 0,13% até 7,40%. Ting *et al.*, 1994 *apud* Brod, 1999 evidenciaram que conteúdos de MgO acima de 3% em calcita de carbonatito são bastante comuns. Esses mesmos autores identificaram a presença de inclusões de calcita em cristais de apatita do carbonatito de Sukulu, Uganda, e as interpretaram parte como de origem primária (formadas antes da apatita) e parte como inclusões de fusão, baseados em experimentos de aquecimento.

Tabela 4.35 – Análises de carbonatos em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG

Amostra	2	5	10	4	3	3	3	6	6	7	8
Mineral	calcita	calcita	calcita	calcita	calcita	calcita	dolomita	calcita	dolomita	calcita	calcita
	%peso analisada						magnesiânica				
MnO	0,00	0,01	0,29	0,20	0,02	0,31	0,45	0,00	0,23	0,00	0,01
MgO	1,52	1,53	0,54	0,13	1,72	7,40	20,48	2,80	22,68	0,92	0,88
CaO	53,70	53,45	52,35	54,84	52,55	45,69	30,76	52,93	30,38	55,54	55,85
FeO	0,06	0,05	0,34	0,10	0,71	1,14	0,77	0,04	0,00	0,02	0,17
SrO	0,00	0,00	0,68	0,26	0,13	0,24	0,26	0,00	0,26	0,00	0,00
BaO	0,00	0,03	0,55	0,01	0,04	0,06	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02
CO ₂	44,72	44,93	45,26	44,45	44,83	45,17	47,27	44,22	46,45	43,52	43,06
total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Número de íons na base de 6 (O)										
Mn	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
Mg	0,07	0,08	0,03	0,01	0,08	0,36	0,95	0,14	1,05	0,05	0,04
Ca	1,90	1,88	1,85	1,95	1,86	1,59	1,02	1,87	1,01	1,99	2,01
Fe ²⁺	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Sr	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
total	1,97	1,96	1,92	1,97	1,96	1,99	2,00	2,01	2,06	2,03	2,06
C	2,01	2,02	2,04	2,02	2,02	2,00	2,00	1,99	1,97	1,98	1,97

Amostras 2, 5 e 10 – clinopiroxenito pouco alterado; Amostra 4 – clinopiroxenito micáceo;
Amostras 3, 6, 7 e 8 – clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita

Uma das características comuns de calcita e dolomita de carbonatitos e rochas associadas consiste no alto teor de elementos traços, tais como Sr e Ba, quando comparados com carbonatos de rochas sedimentares e hidrotermais. Porém, a composição química de cada carbonato varia durante a evolução dos carbonatitos. No caso da calcita, por exemplo, ela torna-se progressivamente empobrecida em elementos traços com o decréscimo da temperatura, tendendo a sua composição ideal CaCO₃ nos estágios tardios (Brod, 1999). Os resultados encontrados mostram que os teores de SrO na calcita variam entre 0,00%-0,68% (<1%) e os teores de BaO variam entre 0,00%-0,55%, sendo portanto, relativamente baixos. Na dolomita, os teores de SrO são da ordem de 0,26% e BaO varia de 0,00-0,01%. Isso pode ser explicado pelo fato dos carbonatos ocorrerem principalmente sob a forma de venulações, ou seja, foram formados em estágios tardios da evolução.

• MAGNETITA

A magnetita corresponde ao mineral opaco mais abundante nos clinopiroxenitos estudados, sendo analisadas uma a duas amostras por tipo de minério. Os resultados das análises de microsonda podem ser visualizados na Tabela 4.36.

Tabela 4.36 – Análises de magnetita em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG

Amostra	2	1	4	3	7	12
Mineral	Magnetita	Magnetita	Magnetita	Magnetita	Magnetita	Magnetita
% peso analisada						
SiO ₂	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02
TiO ₂	5,47	0,84	8,02	8,02	1,92	2,84
Al ₂ O ₃	0,50	0,10	0,32	0,36	0,27	0,15
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
Fe ₂ O ₃	64,50	67,10	62,00	64,70	67,00	66,30
MgO	1,37	0,39	2,49	3,79	0,99	0,37
CaO	0,01	0,01	0,07	0,01	0,01	0,00
MnO	0,79	0,39	1,10	0,87	0,14	0,37
FeO	26,50	29,50	23,31	21,95	28,62	28,96
total	99,19	98,38	97,36	99,73	98,97	99,02
Número de íons na base de 32 (O)						
Si	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Al	0,18	0,04	0,11	0,12	0,10	0,05
Ti	1,23	0,20	1,81	1,75	0,44	0,65
Fe ³⁺	14,53	15,71	13,96	14,09	15,43	15,28
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	15,95	15,96	15,90	15,97	15,97	15,99
Mn	0,20	0,10	0,28	0,21	0,04	0,10
Mg	0,61	0,18	1,11	1,63	0,45	0,17
Fe ²⁺	6,64	7,68	5,84	5,31	7,32	7,42
Ca	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
total	7,45	7,96	7,25	7,17	7,82	7,68

Amostra 2 – clinopiroxenito pouco alterado; Amostras 1 e 4 – clinopiroxenito micáceo;
 Amostras 3 e 7 – clinopiroxenitos rico em magnetita e perovskita;
 Amostra 12 – clinopiroxenito argilizado

A magnetita mostra alteração incipiente a localmente intensa para hematita (martitização), sendo observadas em todas as amostras estudadas lamelas de exsolução de ilmenita. Pelos dados obtidos, os conteúdos de elementos menores na magnetita dos

clinopiroxenitos de Tapira são: TiO_2 (0,84% - 8,02%); Al_2O_3 (0,10% - 0,50%); MnO (0,14% - 1,10%); MgO (0,37% - 3,79%) e Cr_2O_3 (0,00% - 0,01%).

- **PEROVSKITA**

A perovskita está presente nas 12 amostras de clinopiroxenitos, apresentando teores que variam entre 2% a 18% em peso e corresponde ao principal mineral primário de titânio. Os maiores teores de perovskita ocorrem nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (13 - 18%) e os menores teores são observados nos clinopiroxenitos argilizados (~2%), neste último caso, em função de intensa alteração da perovskita, principalmente para anatásio. A perovskita aparece em cristais geralmente subédricos/euédricos disseminados pelos clinopiroxenitos e, via de regra, em associação com magnetita. Apresenta alteração para anatásio, incipiente a avançada, sendo localmente observadas também ilmenita e titanita como produtos de sua alteração. A Tabela 4.37 apresenta as microanálises obtidas em algumas das amostras estudadas.

A fórmula estrutural de uma perovskita ideal é tida como ABO_3 . Segundo Mitchell (1996), embora a composição essencial da perovskita ser CaTiO_3 , a maioria das análises mostram consideráveis substituições do Ca^{2+} por ETR^{3+} , Na^+ , K^+ , Sr^{2+} , Pb^{2+} e Ba^{2+} e do Ti^{4+} por Nb^{5+} , Ta^{5+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Th^{4+} e Zr^{4+} resultando em soluções sólidas complexas entre várias composições dos membros finais. Os minerais da série da perovskita são: perovskita – CaTiO_3 ; loparita ($\text{Na}_{0,5}\text{Ce}_{0,5}$) TiO_3 ; lueshita – NaNbO_3 , macedonita – PbTiO_3 ; latrapita $\text{Ca}(\text{Fe}_{0,5}\text{Nb}_{0,5})\text{O}_3$ e tausonita – SrTiO_3 .

Segundo Mitchell (1996) a perovskita é um dos principais minerais hospedeiros de elementos terras-raras (principalmente elementos terras-raras leves) em rochas alcalinas e todas as perovskitas naturais apresentam esses elementos em concentrações que variam de quantidades traços, menores até maiores. A variedade rica em ETR chama-se loparita e consiste em um mineral distinto de terras-raras, sendo os outros tipos complexas soluções sólidas entre a loparita e outras composições sem ETR.

Observa-se, pelos resultados, que a perovskita corresponde ao principal mineral portador de ETR dos clinopiroxenitos, evidenciando a associação entre os ETR e o

titânio durante a evolução do magma. O somatório dos óxidos de terras-raras analisados varia de 2,93% a 3,49%. Resultados semelhantes foram encontrados por Brod (1999).

Tabela 4.37 – Análises de perovskita em clinopiroxenitos da mina de Tapira-MG

Amostra	2	1	4	3	12
Mineral	perovskita	perovskita	perovskita	perovskita	perovskita
	% peso analisada				
TiO ₂	55,78	55,67	55,38	55,51	55,31
CaO	38,10	38,04	38,08	38,72	39,13
MgO	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FeO	1,07	1,17	1,32	1,15	1,04
MnO	0,02	0,04	0,05	0,02	0,02
Na ₂ O	0,28	0,34	0,29	0,04	0,12
SrO	0,71	0,72	0,65	0,64	0,65
Y ₂ O ₃	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03
La ₂ O ₃	0,76	0,74	0,81	0,74	0,66
Ce ₂ O ₃	1,75	1,65	1,88	1,64	1,51
Pr ₂ O ₃	0,12	0,11	0,18	0,12	0,21
Nd ₂ O ₃	0,59	0,54	0,62	0,55	0,55
Nb ₂ O ₃	0,84	0,80	0,90	0,75	0,46
total	100,09	99,85	100,24	99,93	99,68
	Número de íons na base de 3 (O)				
Ca	0,95	0,95	0,95	0,97	0,98
Sr	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Y ³⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
La ³⁺	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ce ³⁺	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Pr ³⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nd ³⁺	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Na	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01
total	0,99	1,00	1,01	1,00	1,02
Ti	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ²⁺	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nb ⁵⁺	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
total	1,00	1,00	1,01	1,00	0,99

Amostra 2 – clinopiroxenito pouco alterado

Amostras 1 e 4 – clinopiroxenito micáceo

Amostra 3 – clinopiroxenitos rico em magnetita e perovskita

Amostra 12 – clinopiroxenito argilizado

Observa-se, pelos dados obtidos, que os conteúdos de elementos menores na perovskita dos clinopiroxenitos de Tapira são: Nb₂O₃ (0,46% - 0,90%); SrO (0,64% - 0,72%); FeO

(1,04% - 1,32%); MnO (0,02% - 0,05%); MgO (0,01% - 0,02%), Na₂O (0,04% - 0,34%) e Y₂O₃ (0,03% - 0,05%).

Através das microanálises, verifica-se que os minerais do grupo da perovskita presentes nos clinopiroxenitos da mina de Tapira possuem composição próxima ao membro final perovskita, tendendo para composição Ce-perovskita.

• APATITA

A apatita consiste no mineral de maior interesse deste trabalho, uma vez que corresponde ao mineral útil de fósforo do minério da mina de Tapira. Ela ocorre em todas as amostras de clinopiroxenitos estudadas, com teores variando de 6 a 28% em peso.

As Tabelas 4.38 e 4.39 mostram a média das microanálises obtidas em cada amostra, juntamente com a fórmula estrutural calculada com base em 26 oxigênios. Os resultados de todas as microanálises encontram-se no Anexo 5.

As microanálises indicam substituições no sítio do cátion Ca²⁺ principalmente por Sr²⁺ e ERT³⁺, sendo observados também Na⁺, Mg²⁺ e Fe²⁺; no grupo PO₄²⁻ tem-se alguma substituição por SiO₄⁴⁻; foi indicada também substituição no sítio monovalente F⁻, sendo parcialmente ocupado por OH⁻. Estudo por espectrometria de infravermelho indicou também a presença de CO₃²⁻ na estrutura da apatita substituindo PO₄²⁻. Através das microanálises WDS, juntamente com EIV, classifica-se a apatita dos minérios estudados como carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita. Resultado semelhante foi indicado por Cruz & Cheney (1976).

Os conteúdos de SrO na apatita das amostras de clinopiroxenitos pouco alterados (amostras 2, 5 e 10) variam de 0,76% a 1,61%; nos clinopiroxenitos micáceos (amostras 1, 4 e 9) tem-se valores entre 0,71% a 2,23%; nos clinopiroxenitos argilizados (amostras 11 e 12) variam de 0,83% a 1,37% e nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (amostras 3, 6, 7 e 8) tem-se valores entre 0,62% a 1,98%. Através das

Amostras 11 e 12 – clinopiroxenito argilizado

Amostras 3, 6, 7 e 8 – clinopiroxenitos rico em magnetita e perovskita

Os conteúdos médios de óxidos de terras-raras analisados (La_2O_3 , Ce_2O_3 , Nd_2O_3 e Pr_2O_3) na apatita das amostras de clinopiroxenitos pouco alterados variam de 0,44% a 0,77% nas amostras 2 e 5, elevando para 1,93% na amostra 10; nos clinopiroxenitos micáceos (amostras 1, 4 e 9) têm-se valores entre 0,54% a 1,45%; nos clinopiroxenitos argilizados (amostras 11 e 12) os teores variam de 0,28% a 0,60% e nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita têm-se valores entre 0,26% a 0,33% nas amostras 3, 6 e 7, aumentando para 1,47% na amostra 8.

Com relação ao conteúdo de F da apatita nas amostras de clinopiroxenitos pouco alterados têm-se valores entre 1,03% a 2,01%; nos clinopiroxenitos micáceos observam-se teores entre 0,77% a 2,42%; nos clinopiroxenitos argilizados valores entre 0,75% a 1,72% e nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita os teores variam entre 0,74% a 1,85%.

Estudos de diversos autores, tais como Deer *et al.* (1981), McClellan & Lehr (1969) e Lenharo (1994), apresentados no item revisão bibliográfica, falam sobre o efeito das substituições iônicas nas propriedades ópticas da apatita, em sua estabilidade (solubilidade) e em sua estrutura (modificações nos parâmetros de cela unitária e na densidade do mineral).

Cruz & Cheney (1976), Rodrigues (1992) e Lenharo (1994) determinaram os parâmetros de cela unitária das apatitas de Tapira, sendo verificada uma expansão dos eixos “a” e “c”. De acordo com Kriedler, 1967 *apud* Lacout *et al.*, 1998 a substituição na posição do cátion Ca por um elemento maior do tipo Sr e ETR provoca aumento simultâneo dos dois parâmetros. A fixação do ânion CO_3^{2-} na posição do ânion PO_4^{3-} causa diminuição do eixo “a” e aumento do eixo “c” e a substituição do flúor por um ânion maior possui o menor efeito e causa expansão do eixo “a” e contração do eixo “c”, sendo o parâmetro “a” mais sensível às mudanças do que o parâmetro “c”.

Com relação à estabilidade da apatita, a substituição do ânion PO_4^{3-} por CO_3^{2-} possui um efeito desestabilizador em sua estrutura, tornando-a mais instável (mais solúvel). A incorporação do F aumenta a estabilidade, sendo a fluorapatita o tipo menos solúvel. A hidroxiapatita ocupa a posição intermediária.

Como todas as apatitas estudadas mostram substituições do cátion Ca^{2+} principalmente por Sr^{2+} e ERT^{3+} , sendo observados também Na^+ , Mg^{2+} e Fe^{2+} ; do grupo PO_4^{2-} por SiO_4^{4-} e CO_3^{2-} (indicado pelo método espectrometria de infravermelho) e do sítio monovalente F^- por OH^- , os efeitos nos parâmetros de cela unitária e na estabilidade serão conflitantes. Vale mencionar que a substituição do Ca^{2+} por Sr^{2+} aumenta a densidade da apatita.

4.6.1 – SUMÁRIO

- As microanálises por WDS confirmam os resultados de difração de raios-X, indicando que os minerais micáceos tratam-se principalmente de filossilicatos de camadas mistas (FCM) do tipo flogopita/vermiculita ou biotita/vermiculita (amostra 12), ocorrendo também vermiculita pura. Os valores de K_2O nas análises dos FCM variam entre 3,3 - 6,2%, valores esses inferiores a uma flogopita/biotita pura (~9 – 10% de K_2O); estes teores caem para perto de zero na vermiculita pura.
- Os carbonatos das venulações possuem composição de calcita, dolomita e localmente de calcita magnesiana. Os resultados mostram que a calcita apresenta teores de MgO variando entre 0,13% até 7,4%.
- A magnetita possui teores de TiO_2 entre 0,8% até 8%.
- As análises do mineral do grupo da perovskita indicam que o mesmo possui composição próxima ao membro final perovskita, sendo observadas substituições do cátion Ca^{2+} por ETR^{3+} , Na^+ e Sr^+ e do Ti^{4+} por Nb^{5+} e Fe^{2+} . A perovskita corresponde ao principal mineral portador de ETR nos clinopiroxenitos (2,93 a 3,49% de óxidos de terras-raras).

- A apatita presente nas 12 amostras de clinopiroxenitos da mina de Tapira é classificada como carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita. As microanálises indicam substituições no sítio do cátion Ca^{2+} principalmente por Sr^{2+} e Er^{3+} , sendo observados também Na^+ , Mg^{2+} e Fe^{2+} ; do grupo PO_4^{2-} por SiO_4^{4-} ; e do sítio monovalente F^- por OH^- . Estudo por espectrometria de infravermelho indicou também a presença de CO_3^{2-} na estrutura da apatita substituindo PO_4^{2-} .
- Os teores dos óxidos de terras-raras na apatita possuem valores variando entre 0,26% e 0,77% na maioria das amostras, sendo exceção a apatita da amostra 10 – clinopiroxenito pouco alterado (1,93%), das amostras 1 e 9 – clinopiroxenito micáceo (1,00% e 1,45%, respectivamente) e da amostra 8 – clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (1,47%).

5 – RESULTADOS DOS CONCENTRADOS DE APATITA OBTIDOS DAS AMOSTRAS DA MINA

5.1 – INTRODUÇÃO

A obtenção de concentrados purificados de apatita através das 12 amostras de minério coletadas na mina de Tapira teve como objetivo o estudo mais detalhado deste mineral, dando enfoque a verificação dos tipos de apatita presentes, sua composição mais precisa e as relações com os minerais da ganga. Foram estudadas somente amostras totais dos concentrados, não sendo os mesmos separados por faixas granulométricas. As amostras dos concentrados possuem a mesma identificação das amostras da mina a partir da qual foram geradas, acrescida da letra C. Os resultados dos concentrados serão apresentados por grupos de rochas definidos anteriormente.

5.2 – COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS CONCENTRADOS E CARACTERÍSTICAS DA APATITA

A composição mineralógica dos concentrados foi obtida através da combinação das técnicas analíticas: difração de raios-X, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Os concentrados produzidos são compostos basicamente por apatita, apresentando como contaminantes principalmente os carbonatos (calcita e dolomita), com quantidades minoritárias de diopsídio, perovskita/anatásio, goethita e mineral micáceo. Em alguns concentrados ocorrem ainda quartzo, ilmenita, magnetita, titanita e granada. Os resultados por amostras encontram-se na Tabela 5.1 e as Figuras 5.1 a 5.4 apresentam difratogramas típicos dos concentrados de cada grupo de minério estudado da mina de Tapira.

Através das observações ao microscópio óptico e eletrônico fica confirmada a presença somente de apatita primária nos concentrados produzidos através das 12 amostras de minério da mina de Tapira. Conforme descrito no item 4.3, a apatita possui forma essencialmente granular e aspecto principalmente límpido, apesar de inclusões fluidas e inclusões de carbonatos serem observadas em alguns grãos.

Tabela 5.1 – Composição mineralógica estimada para os concentrados de apatita (% em peso)

Minerais	Amostras											
	C2	C5	C10	C1	C4	C9	C11	C12	C3	C6	C7	C8
Apatita	94	94	93	97	92	97	97	96	94	94	96	94
Carbonato	5	5	6	2	5	2	2	<1	3	4	3	4
Perovskita	<1	<1	raro	raro	<1	raro	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Anatásio	<1	<1	raro	raro	<1	raro	<1	raro	<1	<1	<1	<1
Magnetita	raro	-	raro	raro	raro	-	raro	-	-	raro	raro	raro
Ilmenita	raro	-	-	raro	-	-	-	-	-	-	-	-
Goethita	<1	raro	<1	raro	raro	-	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Diopsídio	raro	<1	raro	<1	<1	<1	-	raro	raro	-	raro	<1
Mica	raro	-	raro	raro	<1	raro	raro	-	-	-	raro	raro
Granada	-	-	-	-	<1	-	-	-	-	-	-	-
Titanita	-	-	-	-	-	-	-	<1	-	-	-	-
Quartzo	-	-	<1	-	-	<1	-	<1	<1	-	-	<1

Amostras C2, C5 e C10 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos pouco alterados; amostras C1, C4 e C9 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos micáceos; amostras C11 e C12 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos argilizados; amostras C3, C6, C7 e C8 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita.

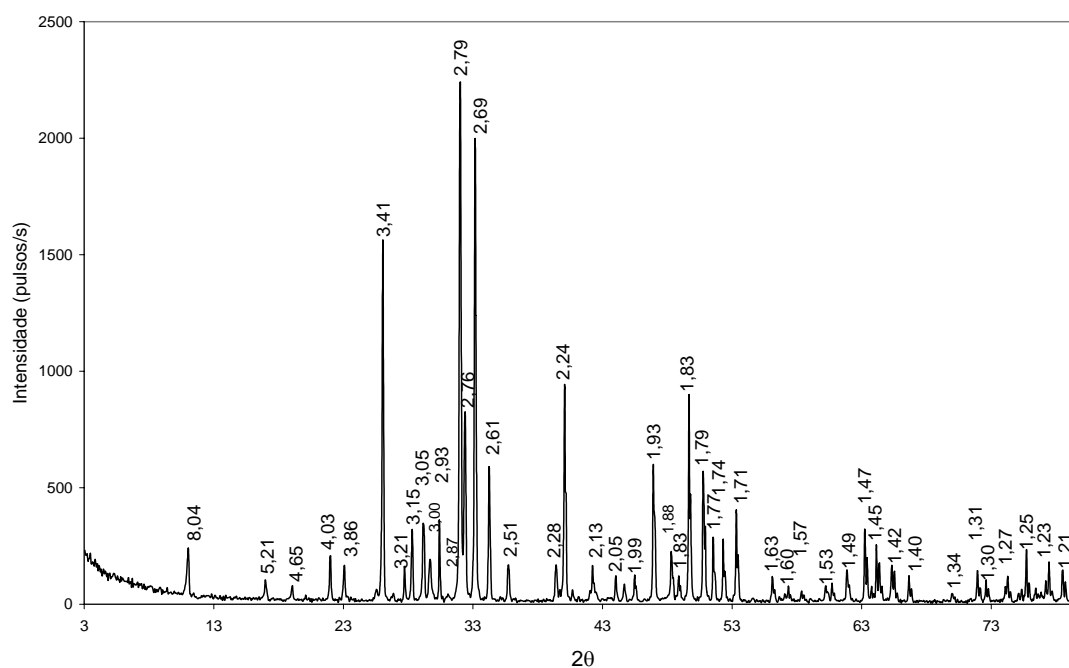


Figura 5.1 – Difratograma de concentrado purificado de apatita proveniente da amostra 2 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG.

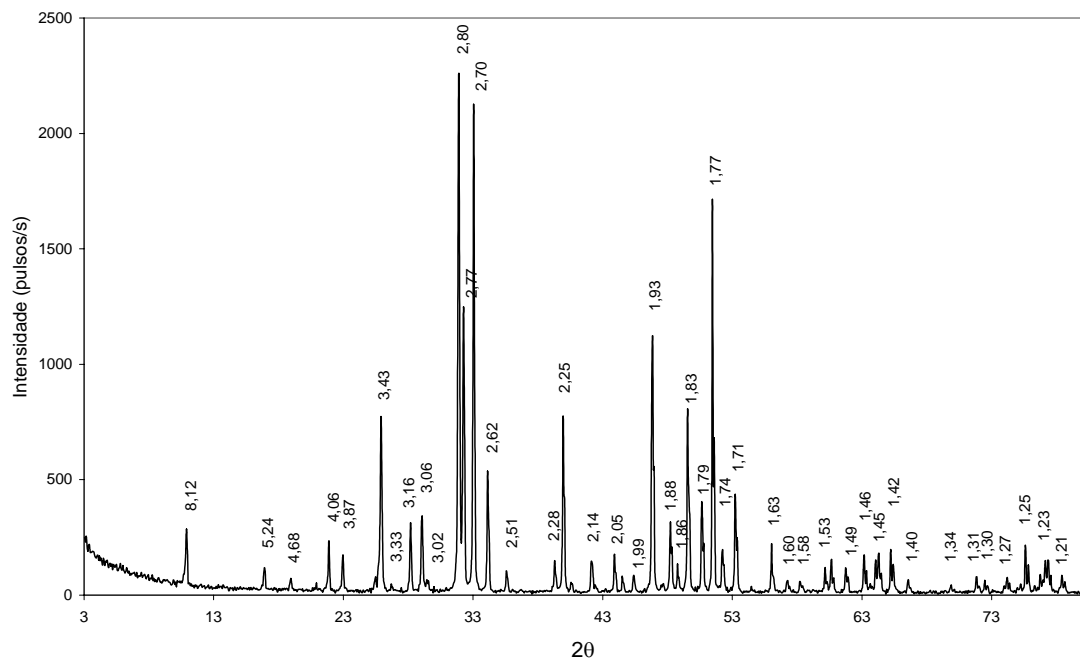


Figura 5.2 – Difratoograma de concentrado purificado de apatita proveniente da amostra 9 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG.

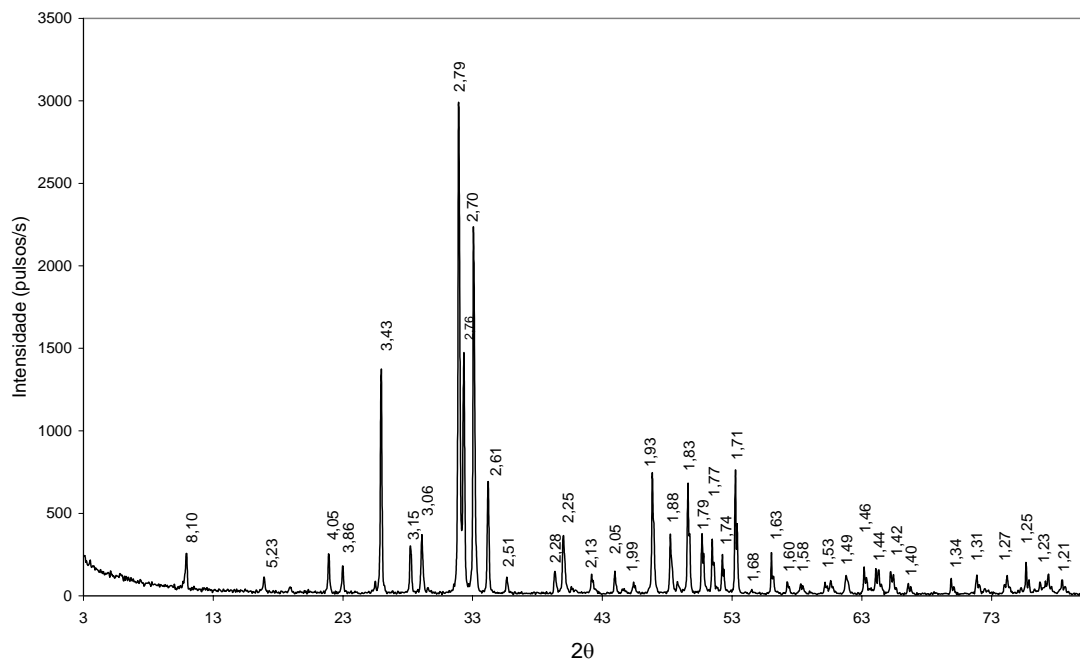


Figura 5.3 – Difratoograma de concentrado purificado de apatita proveniente da amostra 11 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG.

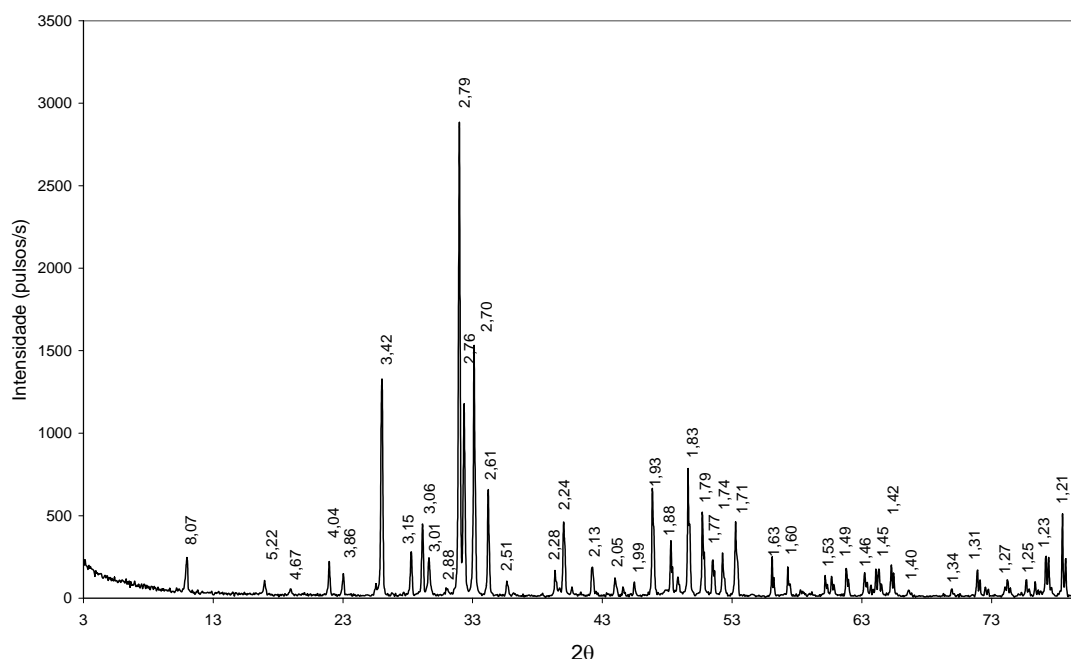


Figura 5.4 – Difratograma de concentrado purificado de apatita proveniente da amostra 6 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG.

Nos concentrados C2, C5 e C10 produzidos a partir das amostras de minério do tipo clinopiroxenitos pouco alterados, a presença de inclusões fluidas na apatita é comum e inclusões de calcita são observadas apenas localmente. Estudo ao microscópio eletrônico de varredura identificou escassa inclusão de estroncianita e anfibólio em apatita da amostra C10. Inclusões de monazita (principalmente amostra C10) e barita são também localmente observadas. Grãos de apatita cortados por venulações de carbonato e, às vezes, de carbonato mais quartzo, são freqüentes. Os carbonatos presentes nesses concentrados ocorrem principalmente como vênulas, aparecendo apenas episodicamente como grãos liberados. Recobrimento parcial da apatita por goethita é raro.

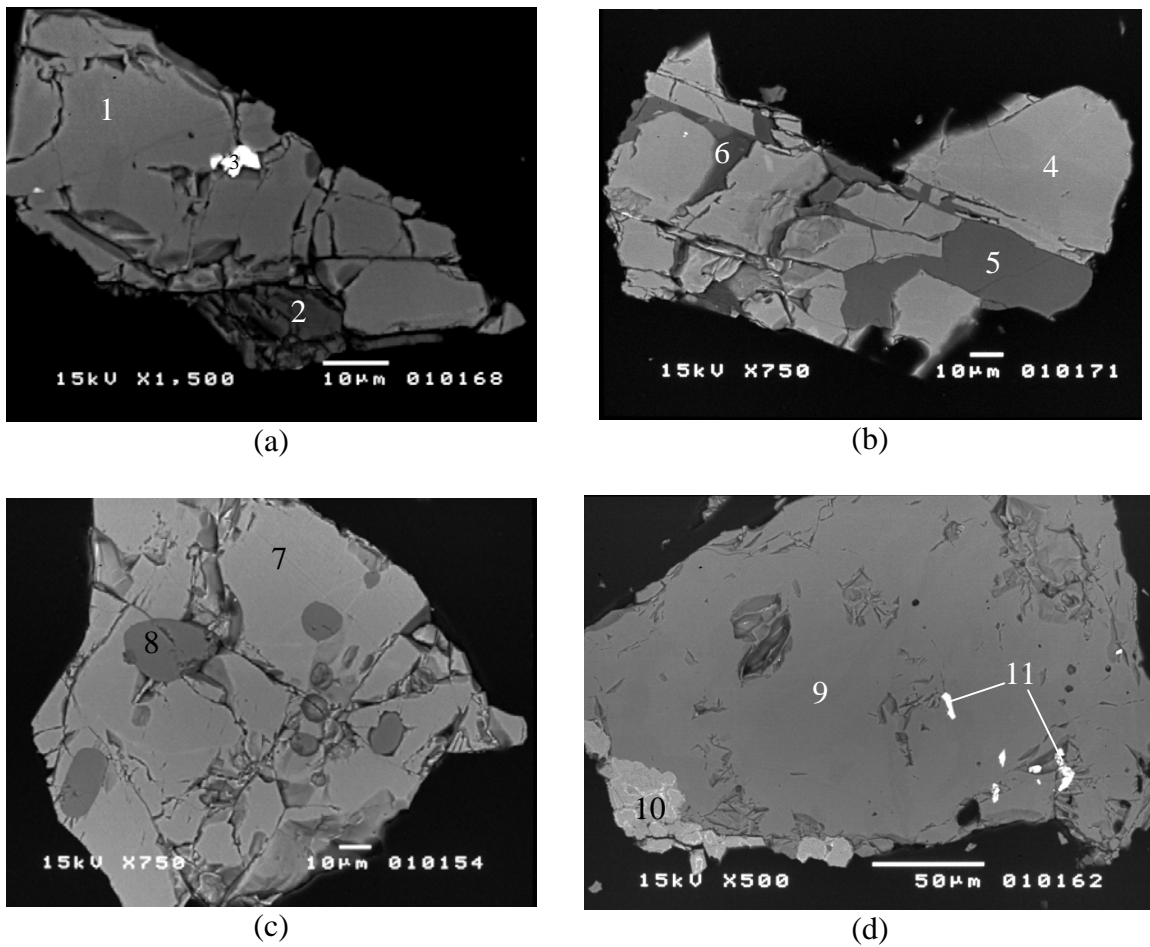
Nos concentrados C1, C4 e C9 produzidos a partir das amostras de minério do tipo clinopiroxenitos micáceos, a presença de inclusões fluidas na apatita é comum nas amostras C4 e C9 e local na amostra C1. Inclusões de calcita são freqüentes nos grãos de apatita das amostras C1 e C9 e, na amostra C4, o carbonato incluído na apatita consiste principalmente em estroncianita e aparece apenas localmente. Inclusões de

barita, monazita e ilmenita são também observadas. Escassa inclusão de zirconolita aparece na amostra C4. Os carbonatos presentes nesses concentrados ocorrem como vênulas cortando os cristais de apatita na amostra C4 e localmente na amostra C9; como inclusões na apatita nas amostras C1, C4 e C9 ou como grãos liberados. Na amostra C9 ocorrem também vênulas de quartzo cortando cristais de apatita. Recobrimento parcial da apatita por goethita é raro.

Nos concentrados C11 e C12 produzidos através das amostras de minério do tipo clinopiroxenitos argilizados, a presença de inclusões fluidas na apatita é comum e inclusões de calcita ocorrem apenas localmente nos grãos de apatita da amostra C11. Nesta amostra, o carbonato ocorre também como grão liberado. Alguns grãos de apatita da amostra C11 apresentam também inclusões de barita, monazita, feldspato potássico e nontronita. Destaca-se no concentrado C12 o aspecto poroso da apatita, sendo pouco comum a presença de grãos com superfície lisa. Recobrimento parcial da apatita por goethita é episódico.

Nos concentrados C3, C6, C7 e C8 produzidos a partir das amostras de minério do tipo clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita, a presença de inclusões fluidas na apatita é local nas amostras C3 e C7 e comum nas amostras C6 e C8. Inclusões de calcita são observadas apenas localmente. Grãos de apatita cortados por venulações de calcita, dolomita ou calcita mais dolomita são frequentes. Os carbonatos são também observados como grãos liberados. Recobrimento parcial da apatita por goethita é raro. De todos os concentrados, a apatita pertencente a este grupo de amostras possui o aspecto mais límpido, porém é comum estar cortada por vênulas de carbonatos. Holandita e/ou romanechita, zirconolita e barita ocorrem localmente como inclusões ou em associação aos carbonatos das vênulas.

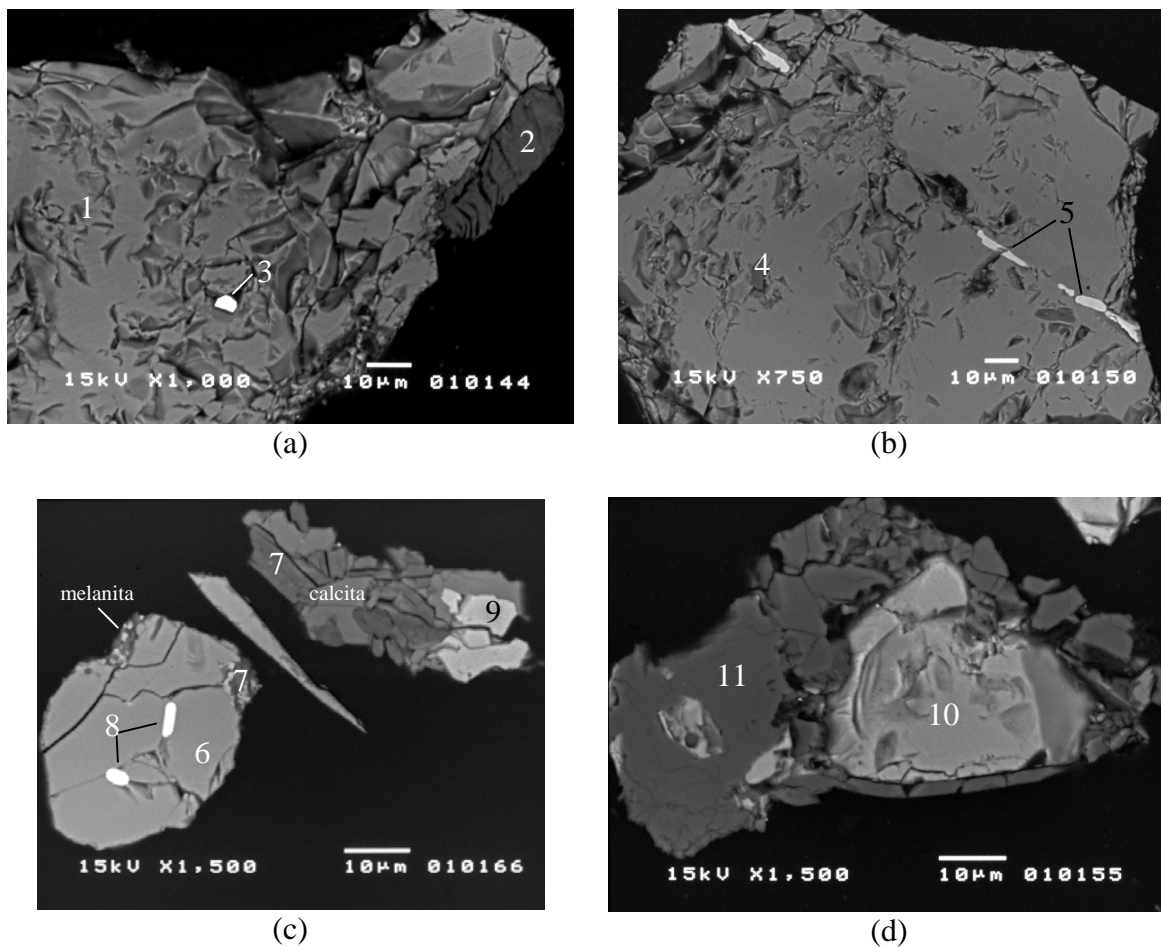
Algumas características da apatita e associação com minerais da ganga são apresentados nas Figuras 5.5 a 5.8, obtidas no MEV através de imagens de elétrons retroespalhados.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Interpretação
1	55,8	-	0,9	0,0	1,9	0,0	0,2	38,7	2,4	-	-	-	0,0	apatita
2	54,1	0,0	-	3,0	0,0	0,0	0,4	-	-	42,5	-	-	-	calcita
3	2,0	-	-	-	1,8	61,3	-	-	-	-	-	34,1	0,8	barita
4	57,5	-	0,2	0,0	1,5	0,4	0,1	38,4	1,9	-	-	-	0,0	apatita
5	53,5	0,2	-	2,1	0,0	1,1	1,1	-	-	41,9	-	-	-	calcita
6	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
7	57,5	-	0,4	0,0	1,1	0,5	0,0	39,7	0,8	-	-	-	0,0	apatita
8	54,6	0,4	-	0,3	1,2	0,5	0,1	-	-	42,8	-	-	-	calcita
9	57,8	-	0,0	0,0	1,5	0,2	0,0	39,4	0,9	-	-	-	0,2	apatita
10	35,4	-	0,2	0,0	0,9	0,0	1,2	-	0,5	-	-	-	61,8	perovskita
11	9,9	0,0	-	0,1	23,2	35,6	0,0	-	-	31,2	-	-	-	estroncianita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

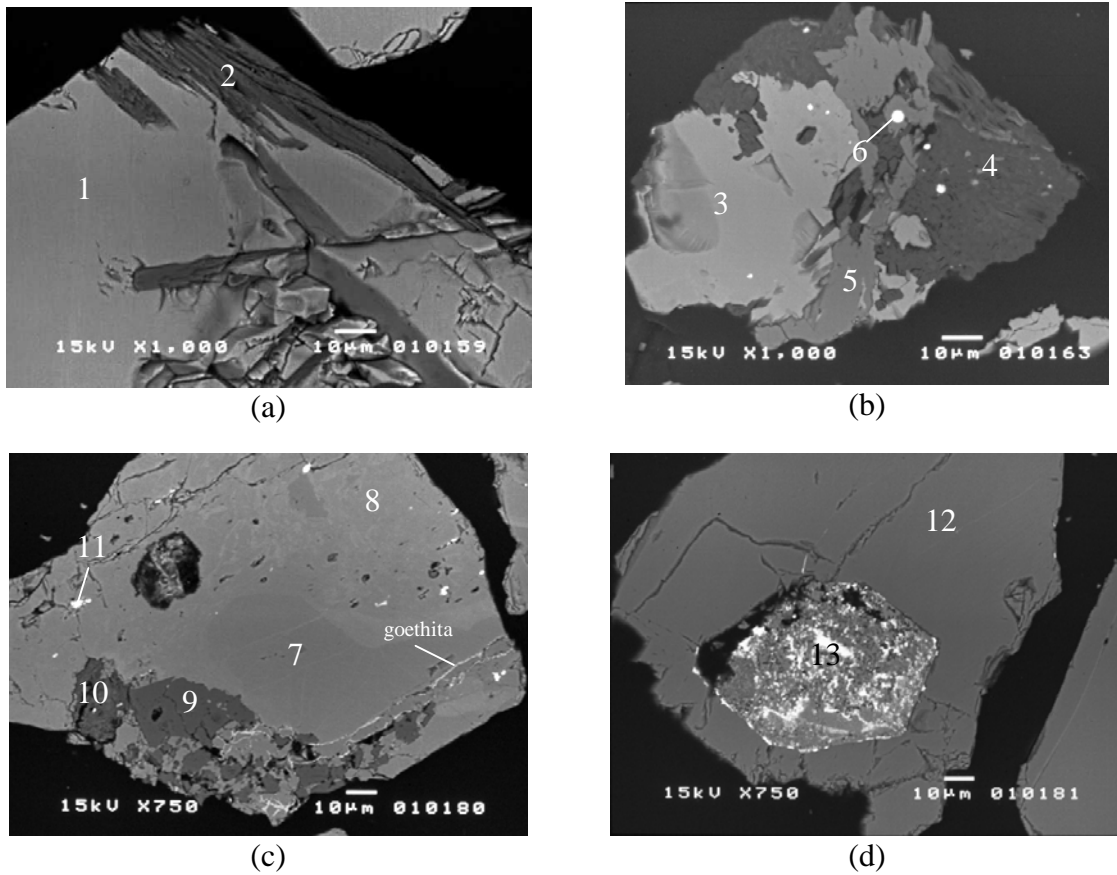
Figura 5.5 – Eletronmicrografias dos concentrados C10, C4 e C9 obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com calcita e com inclusão de barita (am C10). (b): apatita cortada por vênulas de calcita mais quartzo (am C10). (c): apatita com inclusões de calcita (am C9). (d): apatita associada com perovskita e com inclusões de estroncianita (am C4).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	SO ₃	ThO ₂	ZrO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	57,3	-	0,1	0,0	1,0	0,3	0,2	39,9	1,1	-	-	-	-	-	0,0	apatita
2	1,9	-	43,6	19,7	-	-	12,8	-	-	-	-	-	6,6	12,7	2,7	FCM
3	1,5	-	-	-	1,1	64,3	-	-	-	33,1	-	-	-	-	-	barita
4	55,2	-	0,0	0,0	0,7	0,0	0,2	39,6	4,2	-	-	-	-	-	0,0	apatita
5	1,5	5,3	-	1,9	-	-	38,6	-	-	-	-	-	-	-	52,7	ilmenita
6	58,5	-	0,2	0,2	0,4	0,0	0,3	40,2	0,2	-	-	-	-	-	0,0	apatita
7	-	-	45,3	21,4	-	-	12,8	-	-	-	-	-	7,1	13,4	-	FCM
8	14,2	-	3,9	0,9	-	-	8,3	-	-	-	6,8	45,9	-	-	19,9	zirconolita
9	36,4	-	31,9	2,8	-	-	25,8	-	-	-	-	-	-	1,5	1,6	melanita
10	58,8	-	0,1	0,0	0,7	0,0	0,2	40,0	0,2	-	-	-	-	-	0,0	apatita
11	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

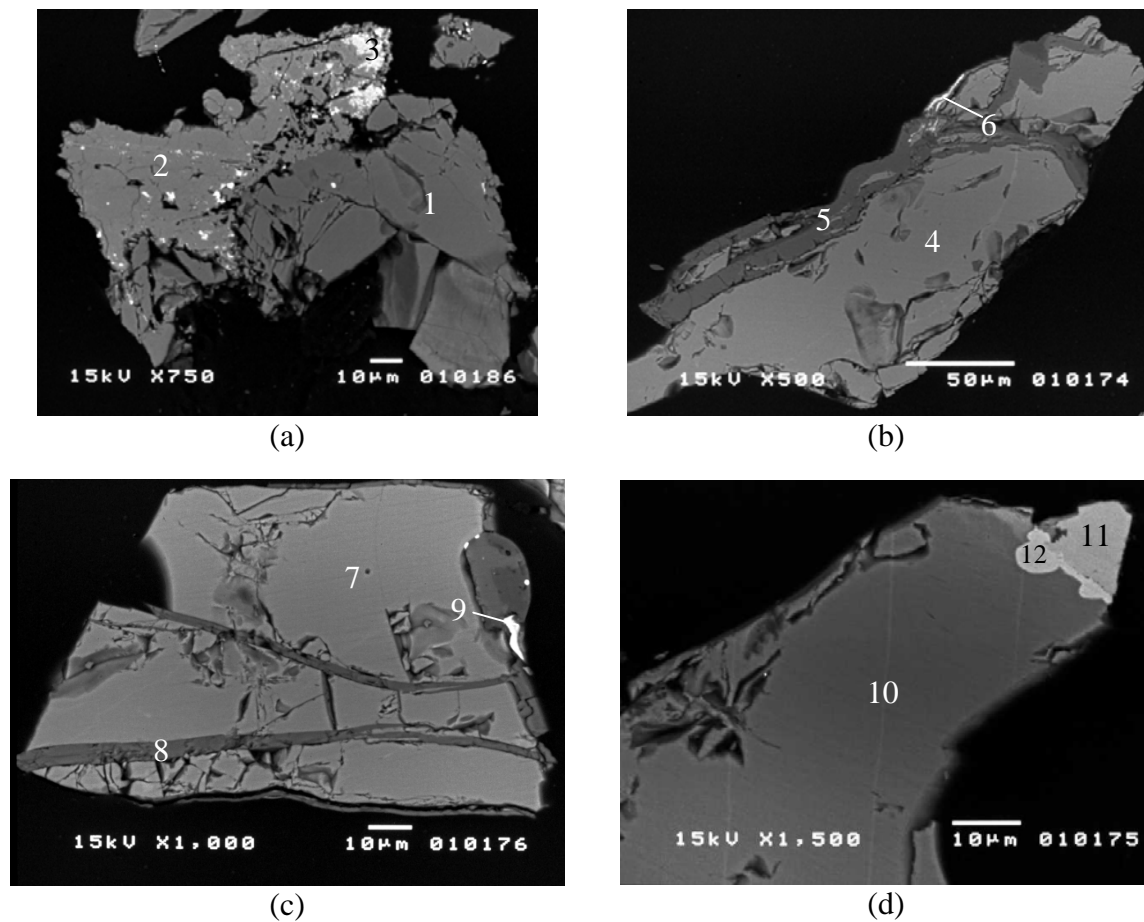
Figura 5.6 – Eletronmicrografias dos concentrados C1, C4 e C9 obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com FCM e com inclusão de barita (am C1). (b): apatita com inclusões de ilmenita (am C1). (c): apatita associada com FCM e melanita e com inclusões de zirconolita; nota-se também melanita em associação com calcita e FCM (am C4). (d): apatita cortada por vênula de quartzo (am C9).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	ZrO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	57,9	-	0,2	0,1	0,9	0,0	0,0	40,3	0,5	-	-	-	-	0,0	apatita
2	30,3	-	51,9	12,0	-	-	5,6	-	-	-	-	-	0,2	-	piroxênio
3	58,7	-	0,0	0,0	0,9	0,4	0,0	39,5	0,5	-	-	-	-	0,0	apatita
4	2,2	-	59,5	33,1	-	-	4,2	-	-	-	-	-	1,0	-	anfíbólio
5	55,3	0,4	-	0,3	0,0	0,4	0,2	-	-	43,4	-	-	-	-	calcita
6	4,3	-	23,5	-	-	-	-	-	-	-	69,2	-	-	3,0	zircão
7	57,9	-	0,2	0,1	0,9	0,0	0,3	40,5	0,0	-	-	-	-	0,0	apatita escura
8	57,1	-	0,0	0,0	1,2	0,0	0,1	40,2	1,1	-	-	-	-	0,3	apatita clara
9	-	-	63,7	-	-	-	-	-	-	-	-	19,9	16,4	-	feldspato-K
10	3,7	-	53,9	2,3	-	-	36,3	-	-	-	-	-	3,8	-	nontronita
11	14,0	-	0,6	0,0	1,2	3,4	0,1	30,9	49,8	-	-	-	-	0,0	monazita
12	57,5	-	0,4	0,0	1,1	0,0	0,2	39,1	1,7	-	-	-	-	0,0	apatita
13	8,9	-	0,3	0,1	0,9	1,9	0,6	31,2	50,6	-	-	-	-	5,4	monazita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 5.7 – Eletromicrografias dos concentrados C4, C9 e C11 obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com piroxênio (amC9). (b): apatita associada com calcita e anfíbólio; notam-se inclusões de zircão (amC4). (c): apatita com inclusões de monazita, feldspato potássico e nontronita; notam-se na apatita regiões com tonalidades diferentes devido à variações nos teores de Sr e ETR (amC11). (d): apatita com inclusão de monazita (amC11).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	57,6	-	0,4	0,1	1,4	0,0	0,0	38,7	1,1	-	-	-	0,7	apatita
2	1,4	-	0,4	0,3	0,6	0,0	6,6	3,1	1,7	-	-	1,2	84,6	anatásio
3	2,3	-	4,5	0,0	0,8	0,0	1,2	4,6	24,9	-	-	0,1	61,5	anatásio alterado (?)
4	59,3	-	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	39,8	0,0	-	-	-	0,0	apatita
5	54,9	0,1	-	1,9	0,0	0,0	0,0	-	-	43,1	-	-	-	calcita
6	11,1	53,9	3,5	1,7	-	15,6	14,2	-	-	-	-	-	-	holandita ou romanechita
7	57,5	-	0,0	-	0,9	0,0	0,4	39,9	1,2	-	-	-	0,1	apatita
8	54,6	0,0	-	2,5	0,0	0,0	0,0	-	-	42,9	-	-	-	calcita
9	15,8	-	-	-	-	-	3,7	-	-	-	39,5	-	41,0	zirconolita
10	57,7	-	0,2	0,0	0,9	0,6	0,1	39,8	0,7	-	-	-	0,0	apatita
11	38,7	-	0,1	0,0	0,5	0,0	0,7	-	2,4	-	-	-	57,6	perovskita
12	1,2	3,2	0,0	3,7	-	-	37,4	-	-	-	-	0,2	54,2	ilmenita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 5.8 – Eletronmicrografias dos concentrados C7 e C11 obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com anatásio (am C11). (b): apatita cortada por vênulas de calcita; nota-se inclusão na calcita de holandita ou romanechita (am C7). (c): apatita cortada por venulações de calcita; nota-se na calcita inclusão de zirconolita (am C7). (d): apatita associada com perovskita parcialmente alterada para ilmenita (am C7).

5.3 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Com o objetivo de se obter a caracterização química das amostras totais dos concentrados foram feitas determinações analíticas englobando análises quantitativas de elementos maiores, elementos traços e elementos de terras-raras (ETR). Todos os elementos estão expressos em porcentagem ponderal e os resultados mostrados na Tabela 5.2 são decorrentes de várias técnicas analíticas descritas no item 3.3.2.

Os resultados analíticos mostram que os concentrados produzidos estão relativamente puros, com teores de P_2O_5 variando entre 38,2 a 40,7%. A presença de pequenas quantidades de Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Na_2O , K_2O , MnO e BaO indica a existência de contaminantes, identificados por difração de raios-X, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura como carbonatos (calcita, dolomita e localmente estroncianita), quartzo, minerais micáceos, diopsídio, perovskita/anatásio, magnetita, goethita, granada, titanita, feldspato potássico, nontronita, anfibólio, zircão, monazita, holandita e/ou romanechita, zirconolita, barita e ilmenita.

Através da relação CaO/P_2O_5 é possível verificar a presença ou não de fosfatos secundários não-apatíticos e também a presença de outros minerais de cálcio, como por exemplo os carbonatos, uma vez que a relação estequiométrica teórica para uma flúor-apatita é de 1,318 (McClellan, 1980). Uma relação superior a 1,318 pode indicar a presença de carbonatos no concentrado ou de carbonato-apatita, significando um excesso de CaO devido aos carbonatos ou déficit de P_2O_5 , em função de sua substituição por CO_2 na carbonato-apatita. Os concentrados C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9 e C12 mostram esta relação um pouco superior ou próxima ao índice teórico de 1,318, o que pode ser explicado pela presença de CO_2 substituindo P_2O_5 na estrutura da apatita em todas as amostras, pela técnica de espectrometria de infravermelho, o que acarreta um decréscimo de P_2O_5 ; ou pela presença de carbonatos identificados, por difração de raios-X e microscopia óptica. As amostras C10 e C11 apresentam uma relação um pouco inferior ao valor teórico, o que seria sugestivo da presença de fosfatos secundários não apatíticos. Porém, esses minerais não foram identificados. No caso da

amostra 11, isto pode ser explicado pela ausência de carbonatos e presença de outros cátions (como por exemplo Sr e ETR) substituindo o CaO. Já no caso da amostra 10, apesar da presença de carbonatos, a explicação seria pela presença de valores mais elevados de ETR e Sr que substituiriam o CaO, causando talvez um maior decréscimo deste cátion. Nestas duas amostras, ocorre também CO₂ substituindo P₂O₅ na estrutura da apatita, o que diminuiria um pouco o teor de P₂O₅.

Os valores de F (0,75 a 1,60%) e SrO (0,85 a 1,50) indicam a presença desses elementos na estrutura da apatita, o que já foi confirmado pelas microanálises químicas (WDS) em cristais de apatita. A relação teórica F/P₂O₅ para uma fluorapatita ideal é 0,089 (McClellan, 1980). Através dos resultados na Tabela 5.2 verifica-se que os valores obtidos para todas as amostras são mais baixos (0,019 a 0,041), o que sugere que o tipo presente trata-se de uma hidroxi-fluorapatita. A presença do grupo iônico OH na estrutura da apatita presente nos 12 concentrados foi confirmada através da técnica de espectrometria de infravermelho.

A tabela 5.3 apresenta o conteúdo dos ETR expressos em ppm para os 12 concentrados de apatita, bem como a somatória dos ETR leves e pesados, o conteúdo total dos ETR e as razões ETR leves/pesados, lantânio (La)/samário (Sm) e lantânio (La)/itérbio(Yb), sendo as duas últimas normalizadas para condritos. Estão apresentados os valores de ETR obtidos por espectrometria de emissão por plasma induzido (ICP) por serem bastante semelhantes com os resultados da espectrometria de energia de raios-X por excitação de raios gama (Kevex) e abrangerem um número maior de elementos. Os resultados obtidos por espectrometria de energia de raios-X estão apresentados na Tabela 5.2, porém, expressos em óxidos. Os valores utilizados para normalização são de Evensen *et al.* (1978).

Tabela 5.2 – Análise química dos concentrados de apatita de Tapira-MG

Elementos (%) em peso)	Nº da Amostra											
	C2	C5	C10	C1	C4	C9	C11	C12	C3	C6	C7	C8
P ₂ O ₅	39,5	39,8	39,2	40,1	38,2	40,1	40,1	39,0	39,7	38,9	40,7	39,7
Fe ₂ O ₃	0,10	<0,10	0,26	0,170	0,54	0,17	0,25	0,24	0,11	<0,10	0,10	0,17
MgO	0,27	0,20	0,28	0,20	0,49	0,24	0,12	0,11	0,53	0,32	0,23	0,38
CaO	52,7	52,5	50,6	52,7	51,7	53,3	51,8	52,1	53,7	52,3	53,7	52,8
Al ₂ O ₃	<0,10	<0,10	0,13	<0,10	<0,10	<0,10	0,15	0,18	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
SiO ₂	0,51	0,45	0,77	0,36	1,33	0,67	0,42	1,09	0,65	0,29	0,35	0,61
TiO ₂	0,15	0,10	<0,10	0,11	0,44	0,11	0,15	1,41	0,21	<0,10	<0,10	0,16
Na ₂ O	0,10	0,11	0,33	0,16	0,11	0,15	0,13	<0,10	0,10	<0,10	0,12	0,10
K ₂ O	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
MnO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
BaO	0,010	0,024	0,12	0,016	0,011	0,016	0,030	0,013	0,010	0,020	0,12	0,028
SrO	1,00	0,92	1,40	0,93	1,50	0,90	0,87	1,20	0,89	0,93	0,92	0,85
ZrO ₂	0,007	0,017	0,008	0,005	0,015	0,006	0,010	0,008	0,008	0,003	0,007	0,006
Y ₂ O ₃	0,030	0,034	0,040	0,042	0,030	0,030	0,043	0,008	0,013	0,016	0,015	0,008
Nb ₂ O ₅	0,002	0,005	0,006	0,003	0,007	0,001	0,004	0,008	0,002	0,002	0,001	0,002
La ₂ O ₃	0,098	0,22	0,35	0,20	0,16	0,14	0,22	0,082	0,073	0,092	0,096	0,064
CeO ₂	0,16	0,40	0,92	0,37	0,34	0,24	0,37	0,14	0,12	0,15	0,18	0,11
Pr ₆ O ₁₁	0,014	0,033	0,09	0,033	0,032	0,02	0,033	0,010	0,009	0,012	0,015	0,098
Nd ₂ O ₃	0,063	0,15	0,43	0,16	0,15	0,095	0,16	0,048	0,046	0,058	0,074	0,047
Sm ₂ O ₃	0,011	0,022	0,06	0,025	0,022	0,015	0,025	0,007	0,008	0,009	0,011	0,007
Eu ₂ O ₃	0,003	0,007	0,015	0,007	0,006	0,006	0,008	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003
Gd ₂ O ₃	0,009	0,017	0,04	0,02	0,014	0,015	0,022	0,007	0,008	0,009	0,009	0,007
Dy ₂ O ₃	0,006	0,009	0,017	0,01	0,006	0,009	0,012	0,004	0,006	0,005	0,004	0,004
F	1,15	0,75	1,25	1,15	1,20	0,95	1,20	1,60	0,90	0,85	1,05	0,95
P.F.	2,78	2,19	2,62	1,43	1,73	1,78	1,69	1,49	1,37	2,68	2,30	2,40
F/ P ₂ O ₅	0,029	0,019	0,032	0,029	0,031	0,024	0,030	0,041	0,023	0,022	0,026	0,024
CaO/P ₂ O ₅	1,334	1,319	1,291	1,314	1,353	1,329	1,292	1,336	1,353	1,344	1,319	1,329
CaO/1,318	39,98	39,83	38,39	39,98	39,23	40,44	39,30	39,53	40,74	39,68	40,74	40,06
Ap- P ₂ O ₅	0,48	0,03	-0,81	-0,12	1,03	0,34	-0,80	0,53	1,04	0,78	0,04	0,36
Total	98,67	97,96	98,94	98,20	98,23	98,96	97,82	98,76	98,47	96,65	100,01	98,50

Amostras C2, C5 e C10 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos pouco alterados; amostras C1, C4 e C9 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos micáceos; amostras C11 e C12 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos argilizados; amostras C3, C6, C7 e C8 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita.

Obs.: os resultados dos elementos terras-raras desta tabela foram obtidos pelo método Kevex.

Tabela 5.3 – Análise química dos concentrados de apatita de Tapira-MG – elementos das terras-raras

Elementos (ppm)	Nº da amostra											
	C2	C5	C10	C1	C4	C9	C11	C12	C3	C6	C7	C8
La	710,0	1570,0	2520,0	1410,0	1150,0	1050,0	1500,0	580,0	560,0	750,0	750,0	520,0
Ce	1020,0	2510,0	5850,0	2390,0	2150,0	1510,0	2220,0	820,0	790,0	1060,0	1220,0	780,0
Pr	135,0	245,0	545,0	245,0	220,0	180,0	255,0	110,0	120,0	135,0	160,0	125,0
Nd	440,0	1000,0	2930,0	1085,0	1010,0	650,0	1030,0	330,0	350,0	460,0	555,0	360,0
Sm	75,0	160,0	470,0	175,0	155,0	110,0	175,0	56,0	61,0	82,0	87,0	58,0
Eu	26,0	51,0	120,0	56,0	45,0	37,0	58,0	15,0	21,0	27,0	29,0	21,0
Gd	69,0	136,0	283,0	139,0	113,0	100,0	150,0	44,0	59,0	108,0	74,0	53,0
Dy	46,0	88,0	145,0	81,0	62,0	60,0	93,0	25,0	37,0	46,0	42,0	31,0
Er	18,0	38,0	55,0	31,0	25,0	25,0	38,0	14,0	15,0	22,0	18,0	14,0
Yb	9,3	18,0	17,0	13,0	9,2	10,0	17,0	4,1	7,1	9,6	7,3	6,2
ETRL	2380,0	5485,0	12315	5305,0	4685,0	3500,0	5180,0	1896,0	1881,0	2487,0	2772,0	1843,0
ETRP	142,3	280,0	500	264,0	209,2	195,0	298,0	87,1	118,1	185,6	141,3	104,2
(ETR) _{total}	2548,3	5816,0	12935	5625,5	4939,2	3732,0	5536,0	1998,1	2020,1	2699,6	2941,3	1968,2
ETRL/ETRP	16,7	19,6	24,6	20,1	22,4	17,9	17,4	21,8	15,9	13,4	19,6	17,7
(La/Sm) _n	5,96	6,18	3,38	5,07	4,67	6,01	5,40	6,52	5,78	5,76	5,43	5,65
(La/Yb) _n	51,5	58,9	100,1	73,2	84,4	70,9	59,6	95,50	53,2	52,7	69,3	56,6

Amostras C2, C5 e C10 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos pouco alterados; Amostras C1, C4 e C9 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos micáceos; Amostras C11 e C12 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos argilizados; amostras C3, C6, C7 e C8 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita.

Obs.: O método analítico utilizado foi espectrometria de emissão por plasma induzido (ICP).

A figura 5.9 mostra as curvas dos ETR normalizadas para condritos para os 12 concentrados de apatita de Tapira obtidos através dos minérios estudados.

A razão ETRL/ETRP para a apatita varia entre 13,4 a 24,6, indicando enriquecimento em elementos de terras-raras leves para esse mineral. Essa elevada razão entre ETRL e ETRP é refletida nas curvas de abundância de ETR, que apresentam inclinação negativa. Esses padrões de curvas de ETR tipicamente enriquecidos em ETRL em relação aos ETRP são característicos de apatitas de complexos alcalinos-carbonatíficos.

Estudos de Lenharo (1994) em concentrados de apatita de Tapira apresentaram conteúdos totais de ETR variando entre 1570ppm a 5223ppm e razões ETRL/ETRP entre 16 e 33. Dutra & Formoso (1991) obtiveram em apatita de Tapira valores totais de ETR entre 1400-1500ppm e razão ETRL/ETRP em torno de 14 e 17.

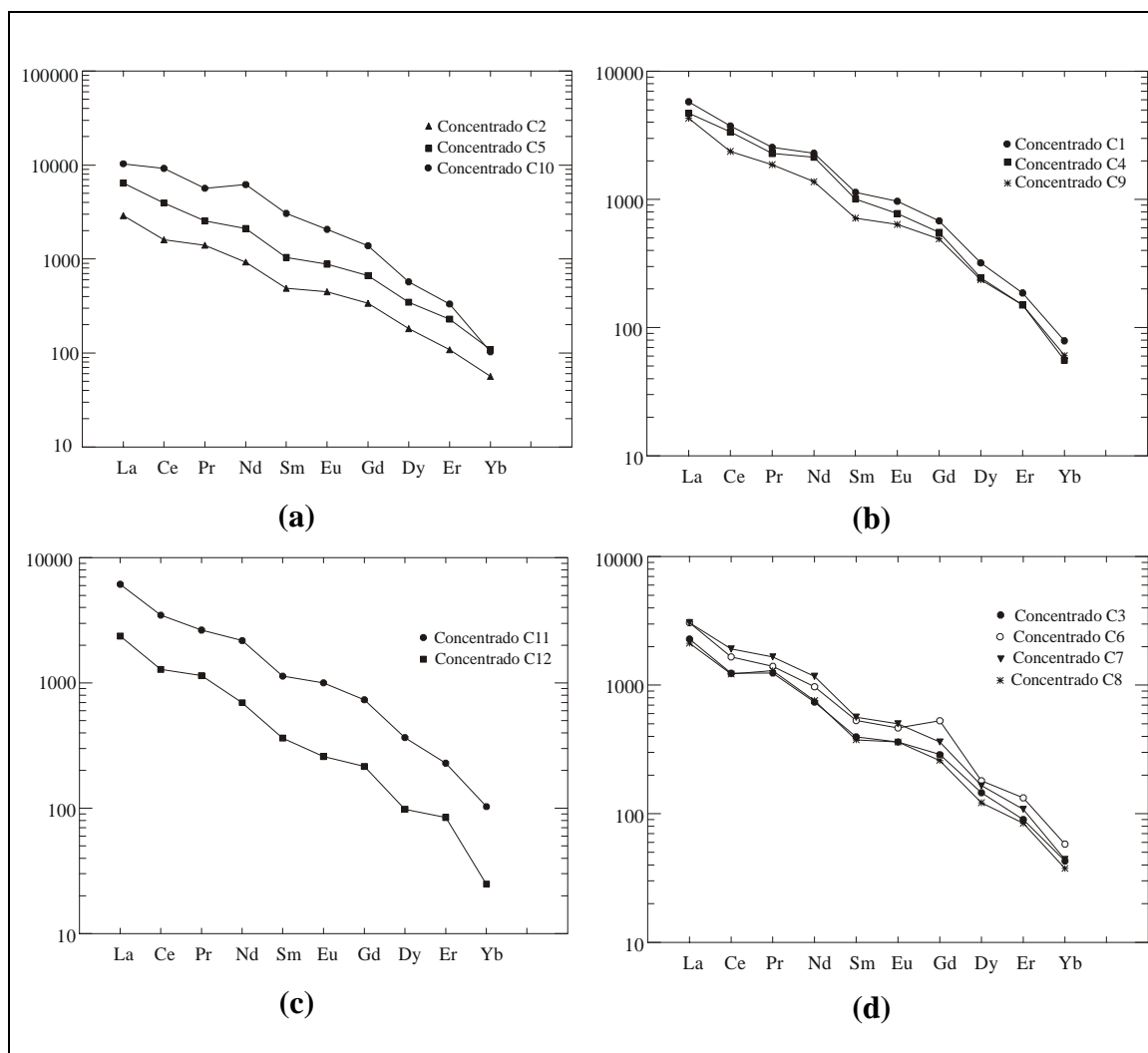


Figura 5.9 – Curvas de ETR, normalizadas para condritos (a) – concentrados de apatita obtidos de clinopiroxenitos pouco alterados; (b) – concentrados de apatita obtidos de clinopiroxenitos micáceos; (c) – concentrados de apatita obtidos de clinopiroxenitos argilizados; (d) – concentrados de apatita obtidos de clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita da Mina de Tapira-MG. Valores de normalização de Evensen *et al.* (1978).

A razão $(La/Sm)_n$ é quase homogênea para a apatita de diversos tipos de minérios, variando entre 4,67 a 6,53 (sendo exceção a amostra 10, cujo valor da razão $(La/Sm)_n$ é 3,38), mostrando um comportamento relativamente constante dos ETRL para esses diferentes tipos de rochas.

O conteúdo total dos elementos das terras-raras é mais elevado na apatita dos concentrados C5 e C10 – clinopiroxenitos pouco alterados (5816ppm e 12935ppm, respectivamente), concentrados C1 e C4 – clinopiroxenitos micáceos (5626ppm e 4939ppm, respectivamente) e concentrado C11 – clinopiroxenito argilizado (5536ppm).

Os concentrados de apatita obtidos a partir dos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita apresentam os menores teores de ETR (1968ppm a 2941ppm).

5.4 – ESPECTROMETRIA DE INFRAVERMELHO (EIV)

A espectrometria de infravermelho foi utilizada nos concentrados de apatita como uma técnica complementar para verificação da presença dos grupos iônicos OH^- e CO_3^{2-} na estrutura da apatita. As posições das bandas de deformação (em número de onda – cm^{-1}) obtidas para as doze amostras estudadas podem ser visualizadas na Tabela 5.4. As Figuras 5.10 a 5.13 apresentam um espectro de concentrados de apatita em cada grupo de minério estudado.

Os espectros de todos os 12 concentrados obtidos através das amostras de minério da mina de Tapira indicaram claramente a presença dos grupos iônicos OH^- e CO_3^{2-} .

Através da literatura, verifica-se que a presença do grupo OH na estrutura de uma hidroxiapatita pura causa o aparecimento da banda de vibração axial em $3560\text{-}3570\text{cm}^{-1}$ e de vibração angular em $630\text{-}635\text{cm}^{-1}$. Porém, estudos de Santos & Clayton (1995) e Comodi *et al.* (1999) verificaram que ocorre um deslocamento nas bandas de vibração do OH quando o flúor está também presente na estrutura da apatita. Segundo dados de Comodi *et al.* (1999), a hidróxi-fluorapatita presente em leucitito da região de Abruzzi (Itália) apresenta as vibrações do grupo OH em 3536 e 739cm^{-1} , que representa uma interação típica da ligação O-H-F em uma OH-F-apatita.

O grupo iônico OH^- nos 12 concentrados de Tapira foi indicado pela banda de vibração axial em $3539\text{-}3546\text{cm}^{-1}$ e de vibração angular em $718\text{-}737\text{cm}^{-1}$, indicando a presença também de F na estrutura da apatita, o que já havia sido verificado através das técnicas de análises químicas (eletrodo seletivo) e microanálises WDS.

Tabela 5.4 – Grupos iônicos com suas respectivas bandas de absorção presentes nos espectros de infravermelho dos concentrados de apatita de Tapira-MG

Amostra	Grupo PO ₄				Grupo OH		Grupo CO ₃	
	v ₁	v ₃	v ₁ + v ₃	v ₄			v ₂	v ₃
C2	961	1092-1042	1991-2003-2080	602-571	3542	722	880	1466-1416
C5	961	1092-1038	1991-2003-2080	602-575	3542	718	876	1462-1420
C10	961	1092-1038	1995-2003-2080	602-571	3539	737	876	1466-1420
C1	961	1092-1042	1995-2003-2080	602-575	3546	725	880	1462-1420
C4	961	1092-1042	1995-2006-2080	602-571	3539	737	876	1462-1420
C9	961	1092-1042	1991-2006-2080	602-571	3542	722	880	1466-1420
C11	961	1092-1038	1995-2003-2080	602-571	3542	722	880	1462-1420
C12	961	1092-1042	1995-2006-2080	606-575	3539	737	880	1466-1420
C3	961	1092-1042	1991-2003-2080	602-571	3542	725	880	1466-1420
C6	961	1092-1042	1991-2003-2080	602-571	3542	722	880	1466-1420
C7	961	1092-1042	1991-2003-2080	602-571	3542	722	880	1466-1420
C8	961	1092-1042	1991-2003-2080	602-571	3542	725	880	1466-1420

Amostras C2, C5 e C10 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos pouco alterados; Amostras C1, C4 e C9 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos micáceos; Amostras C11 e C12 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos argilizados; amostras C3, C6, C7 e C8 – concentrados obtidos através dos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita.

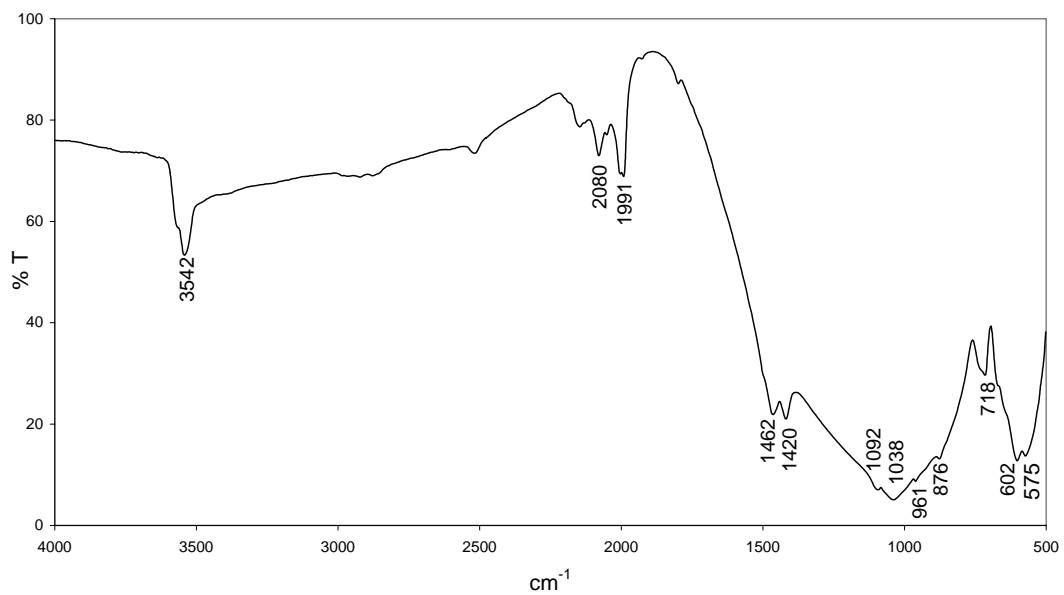


Figura 5.10 – Espectro de infravermelho (transmissão) da apatita de Tapira-MG (amostra C5).

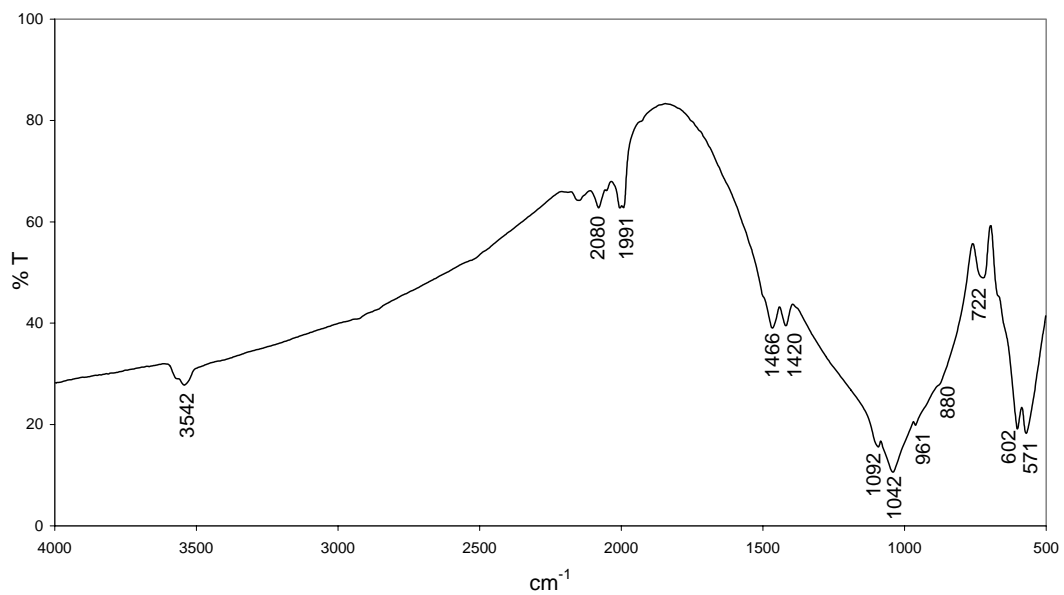


Figura 5.11 – Espectro de infravermelho (transmissão) da apatita de Tapira-MG (amostra C9).

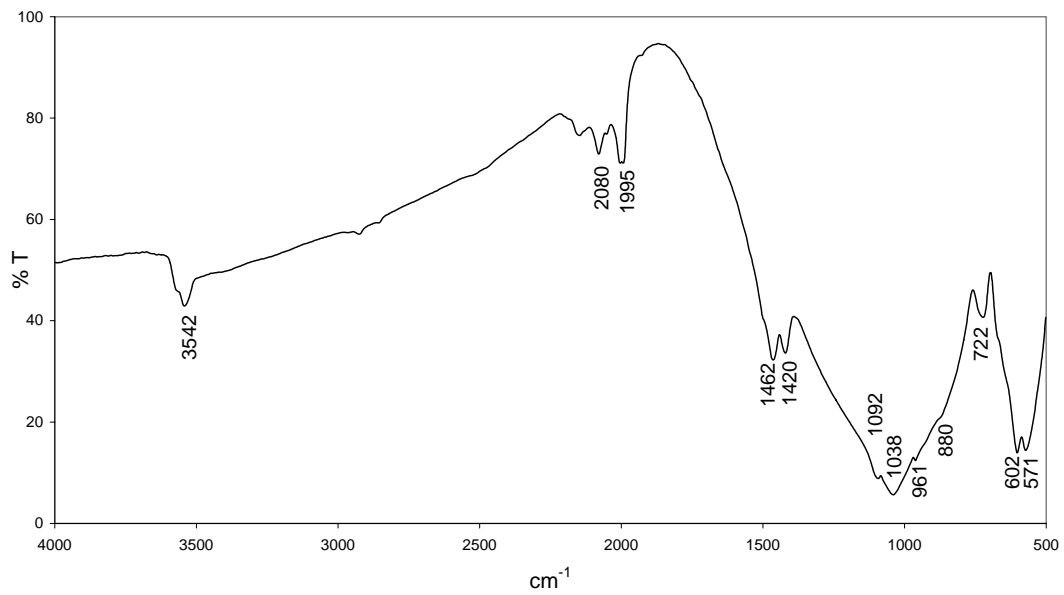


Figura 5.12 – Espectro de infravermelho (transmissão) da apatita de Tapira-MG (amostra C11).

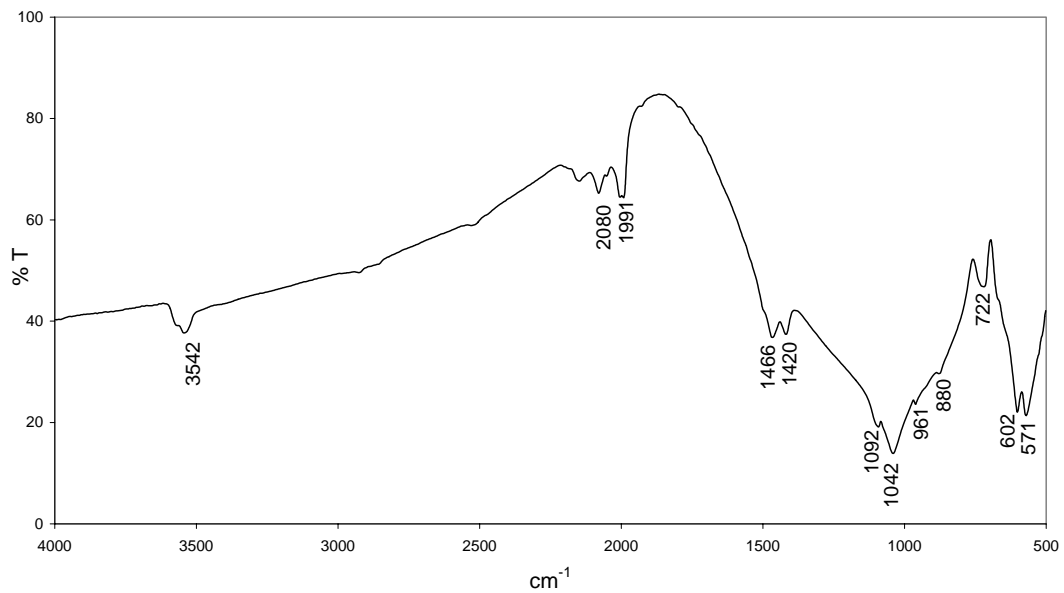


Figura 5.13 – Espectro de infravermelho (transmissão) da apatita de Tapira-MG (amostra C7).

A presença do grupo iônico CO_3^{2-} na estrutura da apatita é garantida pelas bandas em $860\text{-}885\text{cm}^{-1}$, $1420\text{-}1430$ e $1455\text{-}1465\text{ cm}^{-1}$ (estiramento em carbonato-apatita do tipo B) ou em $1465\text{-}1542\text{ cm}^{-1}$ (estiramento em carbonato-apatita do tipo A). A identificação do carbonato na estrutura da apatita através do espectro de infravermelho pode ser distinguida dos minerais carbonatos pelo dubleto na região de 1440cm^{-1} . O espectro infravermelho do mineral calcita é caracterizado pela presença de uma banda forte e abaulada, com máximo próximo de 1440cm^{-1} – estiramento assimétrico (ν_3), além de outros picos em 1800cm^{-1} , 872cm^{-1} e 710cm^{-1} .

O grupo iônico CO_3^{2-} na estrutura da apatita foi identificado em todos os 12 concentrados de Tapira, através da presença do dubleto em torno de $1416\text{-}1420$ e $1462\text{-}1466\text{ cm}^{-1}$, indicando tratar-se de carbonato-apatita do tipo B, isto é, os íons carbonato estão substituindo os íons fosfato. Observa-se também uma banda em torno de $876\text{-}880\text{cm}^{-1}$.

Estudos de Santos & Clayton (1995) para determinação do conteúdo de carbonato em apatita de alta temperatura através da técnica de infravermelho foram aplicados em apatitas do complexo alcalino de Jacupiranga-SP e mostraram que a banda em torno de 880cm^{-1} foi observada somente em amostras em que o conteúdo de CO_2 era maior do que 0,2% em peso. Segundo esses autores o conteúdo de CO_2 parece ser dependente do ambiente geológico da apatita e é maior em apatitas presentes em rochas relacionadas a processos metassomáticos. Duas amostras de apatita provenientes da mina de Tapira em rochas cuja mineralogia principal é apatita, flogopita e magnetita foram estudadas por Santos & Clayton (1995) e apresentaram 0,67% de CO_2 . Estudos exploratórios desses mesmos autores em apatitas sintéticas sugerem que apatitas formadas na presença de carbonatos apresentam, em geral, conteúdos de CO_2 acima de 0,3% em peso, ao passo que apatitas formadas na presença de fluidos com $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ possuem conteúdos de CO_2 abaixo deste valor. Isto indica que o conteúdo de CO_2 na apatita depende não só do total de C no fluido, mas também da forma como esse C ocorre no fluido.

Através dos resultados obtidos pela técnica de infravermelho, juntamente com os resultados de análises químicas e microanálises (WDS), conclui-se que a apatita

presente nos 12 concentrados provenientes das amostras dos minérios da mina de Tapira trata-se de carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita. Vale mencionar que a apatita observada nesses concentrados através de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura é essencialmente primária. Estudos de Rodrigues (1992) e Lenharo (1994) em apatita de Tapira-MG apresentaram valores semelhantes para as bandas de vibração dos grupos iônicos PO_4^{3-} , OH^- e CO_3^{2-} . Porém, segundo Lenharo (1994), o grupo iônico CO_3^{2-} estaria presente somente em apatita secundária, classificada como carbonato-fluorapatita com contribuição de estrôncio. Segundo esta autora, a apatita primária seria classificada como estrôncio-hidróxi-fluorapatita.

5.5 – SUMÁRIO

- Os concentrados produzidos a partir das 12 amostras de clinopiroxenitos da mina de Tapira são compostos basicamente por apatita, apresentando como contaminantes principalmente os carbonatos (calcita e dolomita), com quantidades minoritárias de diopsídio, perovskita/anatásio, goethita e mineral micáceo. Em alguns concentrados, ocorrem ainda quartzo, ilmenita, magnetita, titanita e granada.
- Os carbonatos ocorrem nos concentrados principalmente como vênulas cortando os cristais de apatita, sendo exceção as amostras C1, C11 e C12. Aparecem também como inclusão na apatita ou como grãos liberados. O carbonato incluso na apatita foi identificado como calcita, ocorrendo estroncianita apenas na amostra C4 e localmente na amostra C10. Na amostra C12, não foi observada inclusão de carbonato na apatita.
- Estudos ao microscópio eletrônico de varredura indicaram que alguns grãos de apatita podem apresentar inclusões de monazita, barita, anfibólio, zirconolita e ilmenita. Na amostra C11, foram observadas também inclusões de feldspato potássico e de nontronita.

- A apatita dos concentrados C3, C6, C7 e C8 apresenta o aspecto mais límpido de todas as apatitas, porém é comum nessas amostras, grãos de apatita cortados por vênulas de calcita, dolomita ou calcita mais dolomita.
- A apatita apresenta um enriquecimento em ETRL em relação aos ETRP, com razão ETRL/ETRP entre 13,4 a 24,6. O conteúdo total dos elementos das terras-raras na apatita das 12 amostras varia entre 1968ppm a 12935ppm, sendo mais elevado na apatita dos concentrados C5 e C10 – clinopiroxenitos pouco alterados (5816ppm e 12935ppm, respectivamente), concentrados C1 e C4 – clinopiroxenitos micáceos (5626ppm e 4939ppm, respectivamente) e concentrado C11 – clinopiroxenito argilizado (5536ppm). Os concentrados de apatita obtidos a partir dos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita apresentam os menores teores de ETR (1968ppm a 2941ppm).
- Comparando o conteúdo total de ETR nos concentrados de apatita e aqueles obtidos nas amostras de rocha total, verifica-se que os concentrados C2, C3, C6, C7 e C8 apresentam valores de ETR_{total} inferiores às rochas da qual são provenientes, em função da predominância de perovskita sobre a apatita nesses clinopiroxenitos. As amostras dos concentrados C11 e C12 mostram valores de ETR_{total} ligeiramente inferiores aos valores de ETR_{total} dos clinopiroxenitos, apesar desses apresentarem porcentagens mais elevadas de apatita. Isso pode ser explicado pela presença de monazita e fosfatos secundários do grupo de rabdofânio e da crandalita nessas amostras, elevando o conteúdo total de ETR das mesmas.
- Estudos de espectrometria de infravermelho identificaram a presença dos grupos iônicos OH^- e CO_3^{2-} na estrutura da apatita de todos os 12 concentrados.

6 – RESULTADOS DAS AMOSTRAS DA USINA

6.1 – DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

6.1.1 – AMOSTRAS TOTAIS

Análises qualitativas por difração de raios-X foram realizadas nas amostras totais coletadas em diversos locais da usina de concentração de Tapira e encontram-se na Tabela 6.1. Os resultados mostram que durante o processamento industrial da pilha 912, a amostra da alimentação da usina (TC11-ROM) era composta por apatita, calcita, dolomita, diopsídio, mica, quartzo, magnetita, perovskita, anatásio, ilmenita e goethita. As amostras Al. Pré-class, Al. MN 01/02, ANG Friável, ANF Friável, ANG Granulado e ANF Granulado eram compostas pelos mesmos minerais, variando somente as proporções entre os mesmos, verificadas pelas diferentes intensidades dos picos de difração. Os concentrados CG e CGR eram constituídos basicamente de apatita, com pequenas quantidades de contaminantes, sendo identificados carbonatos (calcita e dolomita), mica, magnetita e quartzo. No concentrado CGR, observou-se também a presença de diopsídio e anatásio.

Verifica-se, que tanto a amostra da pilha que alimenta a usina (TC11-ROM) quanto as amostras das alimentações dos circuitos de flotação dos minérios friável e granulado possuem minerais portadores de cálcio, além da apatita, identificados como diopsídio, calcita, dolomita e perovskita. Destes minerais, somente a calcita e a dolomita ocorrem nos dois concentrados e baixíssima proporção de diopsídio foi identificada no CGR. Resultados similares foram encontrados por Mendes (1999) em um estudo de caracterização de pilhas com alta relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$. Este autor identificou também a presença de schorlomita como mineral portador de cálcio nas amostras das alimentações da flotação. Quantidade minoritária de schorlomita foi também identificada na amostra TC11-ROM, porém através das técnicas de microscopias óptica e eletrônica de varredura.

A presença principalmente de carbonatos nas amostras que alimentam a flotação prejudicam seu desempenho, devido ao comportamento muito semelhante desses minerais e da apatita, quando os coletores são os ácidos graxos.

Tabela 6.1 – Resultados de difração de raios-X em cada ponto de amostragem da usina de concentração de Tapira-MG

Minerais	Amostras								
	TC11 (ROM)	Al. Pré-class.	Al. MN 01/02	ANG Friável	ANF Friável	ANG Granulado	ANF Granulado	CG	CGR
Apatita	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Calcita	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Dolomita	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Diopsídio	X	X	X	X	X	X	X		X
Mica	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Quartzo	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Perovskita	X	X	X	X	X	X	X		
Anatásio	X	X	X	X	X	X	X		X
Ilmenita	X	X	X	X	X	X	X		
Magnetita	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Hematita	X	X	X	X	X	X	X		
Goethita	X	X	X	X	X	X		X	X

6.1.2 – FILOSSILICATOS

Assim como para as amostras da mina, foi feito um estudo de difração de raios-X mais detalhado dos filossilicatos presentes na amostra que alimenta a usina de concentração de Tapira-MG (TC11-ROM – pilha 912). Os minerais micáceos foram manualmente separados e devido à presença de micas com diferentes graus de alteração, foram feitos estudos separados nas mais frescas e nas mais alteradas. Foram gerados difratogramas de raios-X completos das amostras originais e difratogramas ampliados na faixa entre 3,01 e 14,99 graus da amostra original, da amostra após tratamento com etilenoglicol e após tratamento térmico. As Figuras 6.1 a 6.4 mostram os difratogramas de raios-X obtidos.

Os resultados obtidos indicam que os filossilicatos presentes na amostra TC11-ROM tratam-se de camadas mistas (flogopita/vermiculita) e vermiculita, ocorrendo ainda traços de clorita. De acordo com os estudos de Reynolds (1980), as camadas mistas são ordenadas e compostas por 60% de mica e 40% de vermiculita (pico em torno de 12 Å), sendo também observado o tipo composto por 40% de micas e 60% de vermiculita (pico em torno de 12,6 Å). O pico em torno de 24Å pertence também ao FCM flogopita/vermiculita e indica interestratificações muito ordenadas (Reynolds, 1980).

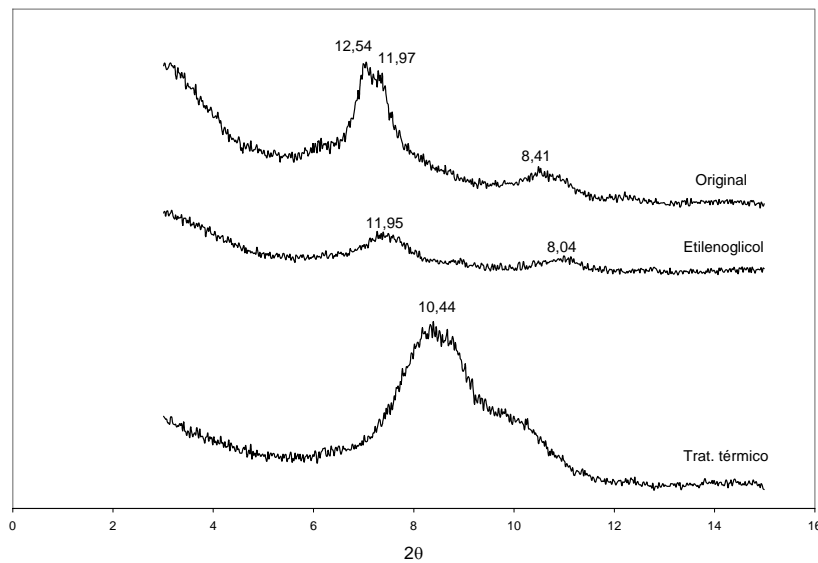


Figura 6.1 – Difratograma de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra TC11-ROM, com tratamento térmico e com etilenoglicol.

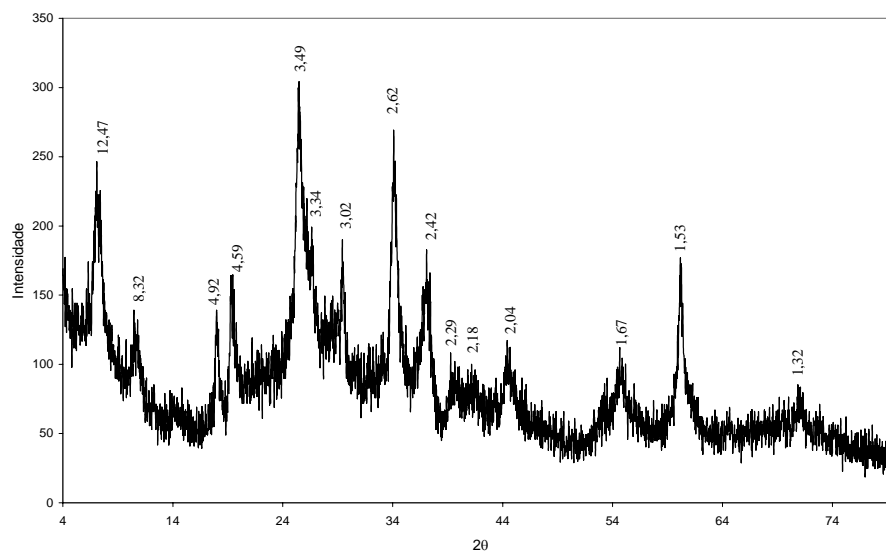


Figura 6.2 – Difratograma completo de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita) da amostra TC11-ROM.

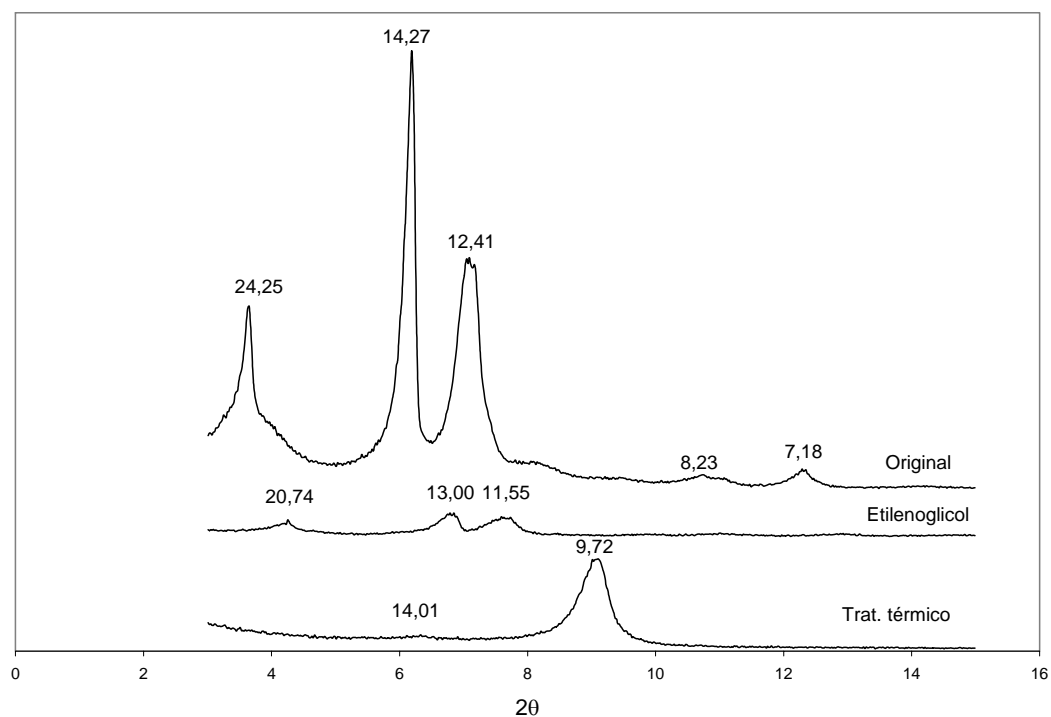


Figura 6.3 – Difratograma de filossilicatos do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita (traços) da amostra TC11-ROM, com tratamento térmico e com etilenoglicol.

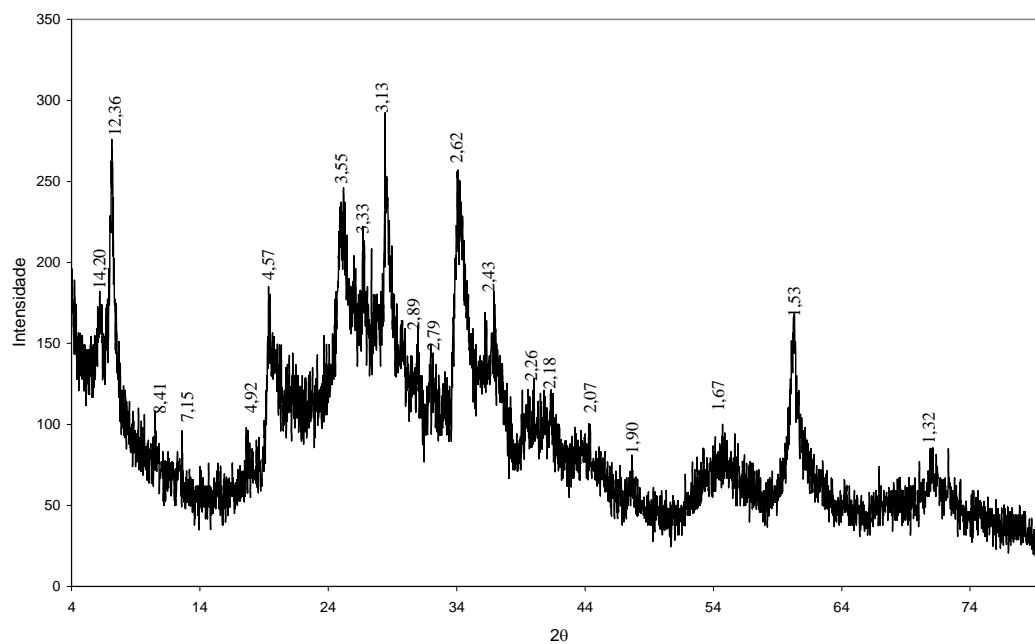


Figura 6.4 – Difratograma completo de filossilicato do tipo camada mista (flogopita/vermiculita), vermiculita e clorita da amostra TC11-ROM.

6.1.3 – FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Análises qualitativas por difração de raios-X foram realizadas nas frações granulométricas +0,210mm, -0,210 + 0,149mm, -0,149 + 0,105mm, -0,105 + 0,074mm, -0,074 + 0,037mm e -0,037mm das amostras TC11 (ROM), CG e CGR da pilha 912 da usina de concentração de Tapira-MG.

Os resultados para a amostra TC11 (ROM) são compatíveis com aqueles obtidos para a amostra total, indicando que o minério que alimenta a usina é composto por perovskita, apatita, minerais micáceos (camadas mistas – flogopita/vermiculita, vermiculita e/ou clorita), carbonatos (calcita e dolomita), diopsídio, magnetita, hematita, quartzo, anatásio, goethita e ilmenita.

Os concentrados grosso friável (CG) e granulado (CGR) são compostos predominantemente por apatita, aparecendo como contaminantes principalmente os carbonatos (calcita e dolomita), ocorrendo também quantidades minoritárias de diopsídio, minerais micáceos (camadas mistas – flogopita/vermiculita, vermiculita e/ou clorita), quartzo, anatásio/rutilo e magnetita.

6.2 – COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A composição mineralógica global das amostras TC11(ROM), CG (concentrado grosso friável) e CGR (concentrado granulado) da usina de Tapira-MG foi obtida da mesma forma utilizada para as amostras da mina, isto é, através da integração da percentagem mineral de cada fração granulométrica e suas respectivas massas obtidas através da análise granulométrica.

- **TC11 (ROM)**

A amostra TC11 (ROM) – (alimentação da usina – pilha 912) é composta principalmente por minerais micáceos (camada mista do tipo flogopita/vermiculita e vermiculita), magnetita, apatita e piroxênio (diopsídio), quantidade menor de

perovskita, anatásio e carbonatos (calcita e dolomita), ocorrendo ainda quantidade minoritária de ilmenita, goethita, quartzo, clorita, anfibólio, schorlomita, hematita e raríssima olivina (crisolita). A Tabela 6.2 apresenta a composição mineralógica desta amostra. Verificam-se pelos resultados que os minerais identificados são coerentes com a mineralogia observada em alguns dos tipos de minérios estudados da mina que compõem a pilha 912, isto é, clinopiroxenito pouco alterado (piroxenito compacto), clinopiroxenito micáceo (piroxenito semi-compacto) e clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (silexito).

Tabela 6.2 – Composição mineralógica estimada para a amostra TC11 (ROM)

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)											
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo	clo	af
+0,210	11,8	14	27	<1	3	7	6	15	22	4	5	raro	raro
-0,210 + 0,149	19,2	18	26	<1	2	9	5	15	18	6	5	-	-
-0,149 + 0,105	15,0	20	23	<1	2	9	4	17	16	6	4	-	-
-0,105 + 0,074	11,3	22	21	<1	1	8	4	16	19	7	4	raro	raro
-0,074 + 0,037	12,8	23	18	raro	1	6	5	15	19	8	3	-	<1
-0,037	29,9	15	19	raro	1	6	5	5	37	9	<1	-	-
Total calc.	100,0	18	22	<1	2	7	5	12	24	7	3	raro	raro

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos; qtzo = quartzo; clo = clorita e af = anfibólio.

A apatita (mineral útil) constitui aproximadamente 18% em peso da amostra, verificando-se que ao longo da granulometria sua proporção em peso aumenta da fração mais grossa (+0,210mm) em direção às frações mais finas (-0,074 + 0,037mm), diminuindo na fração -0,037mm. Esta mesma tendência foi observada na maioria das amostras da mina. As características físicas da apatita são semelhantes àquelas observadas para a apatita presente nas amostras da mina, ou seja, a apatita ocorre de forma granular e possui aspecto principalmente límpido, apesar de alguns grãos apresentarem inclusões fluidas e inclusões de carbonato. Recobrimento parcial por hidróxidos de ferro é incipiente ou mesmo inexistente, ocorrendo em menos de 2% dos grãos de apatita. Cristais de apatita cortados por venulações de carbonatos podem ser observados em todas as frações granulométricas, havendo uma diminuição em direção às frações mais finas, onde aumenta a liberação da apatita. Maiores detalhes sobre a forma de ocorrência da apatita podem ser visualizados no Anexo 2.

A magnetita constitui aproximadamente 22% em peso da amostra e sua proporção em peso possui tendência de diminuir da fração mais grossa (+0,210mm) para as frações mais finas. Os carbonatos mostram comportamento inverso ao da magnetita, com proporção em peso variando entre 4% (fração +0,210mm) até 9% (fração -0,037mm). O conteúdo de perovskita e anatásio variam pouco ao longo da granulometria, constituindo aproximadamente 7% e 5% em peso da amostra. O piroxênio também varia pouco da fração +0,210mm até a fração -0,074 +0,037mm (15-17% em peso), porém diminui bastante na fração -0,037mm (5% em peso). A proporção em peso de minerais micáceos até +0,105mm diminui de 22% para 16% e depois possui uma tendência de aumento em direção aos finos.

• Concentrados CG e CGR

As amostras CG (concentrado grosso friável) e CGR (concentrado granulado) são compostas principalmente por apatita, apresentando como contaminante principal os carbonatos (calcita e pouca dolomita), ocorrendo quantidade minoritária de magnetita, piroxênio, minerais micáceos, quartzo, perovskita/anatásio, ilmenita e goethita. As Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam a composição mineralógica de cada concentrado.

Tabela 6.3 – Composição mineralógica estimada para a amostra CG

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)									
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo
+0,210	4,6	95	<1	raro	<1	<1	raro	<1	<1	2	<1
-0,210 + 0,149	15,7	91	<1	<1	<1	1	raro	1	<1	4	raro
-0,149 + 0,105	20,8	89	<1	raro	raro	1	raro	2	<1	6	0
-0,105 + 0,074	16,8	82	1	<1	<1	<1	raro	3	<1	11	0
-0,074 + 0,037	23,1	80	1	raro	<1	1	raro	4	<1	13	0
-0,037	19,1	73	1	raro	<1	1	raro	6	2	15	1
Total calc.	100,0	83	1	raro	<1	1	raro	3	1	10	<1

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio; px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos e qtzo = quartzo.

Tabela 6.4 – Composição mineralógica estimada para a amostra CGR

Fração (mm)	% peso	Minerais (% peso)									
		ap	mt	il	go	pv	at	px	mc	cb	qtzo
+0,210	13,7	95	<1	raro	<1	<1	<1	<1	<1	1	<1
-0,210 + 0,149	16,9	92	<1	raro	<1	<1	<1	1	<1	3	<1
-0,149 + 0,105	17,3	88	<1	<1	<1	<1	<1	2	<1	5	raro
-0,105 + 0,074	13,7	81	1	<1	<1	<1	<1	3	<1	11	<1
-0,074 + 0,037	21,1	79	1	<1	<1	<1	<1	3	<1	15	raro
-0,037	17,3	72	1	raro	<1	<1	<1	4	1	19	<1
Total calc.	100,0	84	1	<1	<1	1	1	2	1	9	<1

ap = apatita; mt = magnetita; il = ilmenita; go = goethita; pv = perovskita; at = anatásio;
px = piroxênio; mc = minerais micáceos; cb = carbonatos e qtzo = quartzo.

A apatita constitui 83-84% em peso dos concentrados, verificando-se que ao longo da granulometria sua proporção em peso diminui da fração mais grossa (+0,210mm) em direção à fração mais fina (-0,037mm), ou seja, aumenta a quantidade dos contaminantes (principalmente carbonatos) à medida que o material torna-se mais fino. A apatita também ocorre de forma granular e possui aspecto principalmente límpido, apesar de alguns grãos apresentarem inclusões fluidas e inclusões de carbonato. Recobrimento parcial por hidróxidos de ferro é incipiente ou mesmo inexistente, ocorrendo em menos de 4% dos grãos de apatita. Cristais de apatita cortados por venulações de carbonatos ou de quartzo podem ser observados em praticamente todas as frações granulométricas, havendo uma diminuição em direção às frações mais finas, onde aumenta a liberação da apatita. Maiores detalhes sobre a forma de ocorrência da apatita podem ser visualizados no Anexo 2.

Observações feitas através do microscópio óptico nas diversas frações granulométricas dos concentrados mostram que, a partir da fração -0,210 + 0,149mm, os carbonatos ocorrem principalmente como grãos liberados. Esse fato indica que se fossem utilizados coletores com melhor seletividade entre apatita e carbonatos seria possível obter concentrados mais puros de apatita. A ausência completa de carbonatos nos concentrados é difícil, em função de parte destes minerais estarem presentes como finíssimas inclusões ou vênulas na apatita, o que necessitaria uma moagem intensa, para sua liberação.

6.3 – ANÁLISES QUÍMICAS

6.3.1 – ANÁLISES QUÍMICAS TOTAIS

Determinações analíticas englobando análises quantitativas de elementos maiores, elementos menores e elementos terras-raras (ETR) foram feitas nos diversos pontos escolhidos da usina de concentração de Tapira. Todos os elementos analisados estão expressos em porcentagem e podem ser visualizados na Tabela 6.5.

Os resultados analíticos mostram que as amostras das alimentações possuem valores aproximados de P_2O_5 (6,38 - 8,63%), com exceção da amostra ANG Friável, que apresentou um valor um pouco mais elevado (10,90%). O concentrado final possui teor médio de 34,21% de P_2O_5 .

Através das observações ao microscópio óptico e cálculos estequiométricos, verifica-se que os carbonatos (principalmente calcita e pequena quantidade de dolomita) são os minerais de cálcio de maior proporção no produto flotado, seguido do diopsídio. O elevado teor de carbonato (principalmente calcita) no concentrado é responsável pelo aumento da relação CaO/P_2O_5 (1,48), devido a problemas de seletividade entre a apatita e os carbonatos. Para uma fluorapatita pura, a relação estequiométrica teórica CaO/P_2O_5 é de 1,318 (McClellan, 1980). Os valores de F e SrO bem mais elevados nos concentrados CG e CGR, do que nas amostras das alimentações, indicam a presença destes elementos na estrutura da apatita, conforme já verificado por diversos autores (Cruz & Cheney, 1976; Lenharo, 1994; Santos, 1998) e confirmado neste trabalho, através das microanálises em cristais de apatita feitas em microsonda eletrônica (item 4.6).

A presença de pequena proporção de MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Na_2O , K_2O e MnO_2 indica a existência de contaminantes nos concentrados CG e CGR, identificados por difração de raios-X, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura como quartzo, minerais micáceos, carbonatos, perovskita/anatásio, diopsídio, magnetita e goethita. A presença de BaO nos concentrados (~0,06%) foi justificada pela ocorrência

de finíssimas inclusões de barita em alguns grãos de apatita, bem como raras inclusões nas vênulas de quartzo e calcita de um óxido de Mn e Ba (prováveis holandita e/ou romanechita) e de estroncianita. Foi também verificada a presença local de inclusões de monazita na apatita. Essas inclusões foram identificadas através da técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Os valores dos óxidos de terras-raras encontrados para as amostras das alimentações dos circuitos de minério granulado e friável da usina de Tapira (0,51% - 0,78% de óxidos de terras-raras – OTR) e para os concentrados CG (0,78% de OTR) e CGR (0,65% de OTR) são relativamente semelhantes, sendo observado apenas um pequeno enriquecimento nos concentrados. Estes valores refletem a presença de minerais portadores de ETR nas amostras das alimentações (principalmente perovskita, apatita e localmente monazita) e nos concentrados (essencialmente apatita e localmente monazita).

Como os concentrados são compostos principalmente por apatita, será considerado que os ETR analisados nas amostras CG e CGR estão presentes em sua estrutura, uma vez verificado por outros autores (Soubiès *et al.*, 1991 e Vieira, 1997) e por análises feitas neste trabalho que a apatita é um dos minerais portadores de ETR no complexo ultramáfico carbonatítico alcalino de Tapira-MG. A Tabela 6.6 apresenta o conteúdo dos ETR expressos em ppm para os concentrados, bem como a somatória dos ETR leves e pesados, o conteúdo total dos ETR e a razão ETR leves/pesados.

A razão ETRL/ETRP para concentrados varia entre 25 - 29, indicando enriquecimento em elementos de terras-raras leves para a apatita. Esta razão elevada entre ETRL e ETRP é refletida nas curvas de abundância de ETR, normalizadas para condritos, que apresentam inclinação negativa (Figura 6.5). Esses padrões de curvas de ETR, tipicamente enriquecidos em ETRL em relação aos ETRP, são característicos de apatita de complexos alcalinos-carbonatíticos (Dutra & Formoso, 1991; Lenharo, 1994). Deve ser ressaltado que estes dados são de concentrados da usina, onde a apatita presente é proveniente de diversos tipos litológicos presentes na mina.

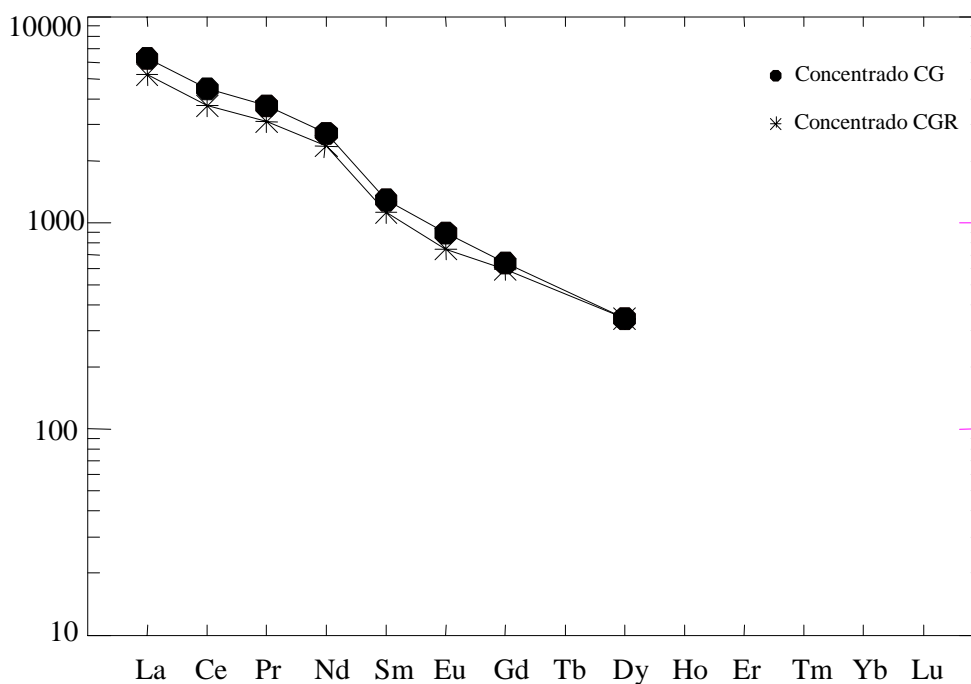
Tabela 6.5 – Análise química de cada ponto de amostragem da usina de concentração de Tapira-MG

Elementos (% em peso)	Nº da Amostra								
	TC11 (ROM)	Al. Pré- class.	Al. MN 01/02	ANG Friável	ANF Friável	ANG Granulado	ANF Granulado	CG	CGR
P ₂ O ₅	7,16	7,39	6,38	10,90	8,63	7,72	8,09	33,96	35,08
Fe ₂ O ₃	19,72	18,44	16,53	12,95	12,96	18,22	15,28	1,60	0,76
MgO	7,90	9,31	6,94	6,81	9,86	6,67	8,25	0,68	0,84
CaO	18,0	17,70	18,00	20,5	19,1	19,1	19,1	50,39	52,02
Al ₂ O ₃	3,08	3,64	1,90	2,10	3,79	1,40	2,14	0,36	0,20
SiO ₂	26,00	24,70	32,16	22,12	26,24	30,81	29,05	2,62	1,70
TiO ₂	8,50	9,15	7,30	11,81	8,96	8,74	8,27	1,60	0,53
Na ₂ O	0,67	0,67	1,28	1,09	0,70	0,77	0,95	0,80	0,32
K ₂ O	0,83	0,99	0,66	0,76	1,21	0,54	0,76	0,04	0,022
MnO ₂	0,46	<0,10	0,52	0,50	0,55	0,54	0,55	0,55	0,55
BaO	0,14	0,14	0,10	0,11	0,15	0,09	0,12	0,063	0,060
SrO	0,25	0,24	0,22	0,33	0,27	0,25	0,24	0,85	0,82
ZrO ₂	0,18	0,20	0,13	0,25	0,20	0,15	0,016	0,080	0,031
ThO ₂	0,013	0,017	0,012	0,019	0,015	0,013	0,011	0,015	0,017
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,019	0,020	0,016	0,027	0,021	0,017	0,019	0,042	0,037
Nb ₂ O ₅	0,12	0,14	0,11	0,18	0,13	0,13	0,12	0,026	0,009
La ₂ O ₃	0,12	0,14	0,11	0,17	0,13	0,13	0,12	0,18	0,15
CeO ₂	0,27	0,32	0,25	0,39	0,29	0,28	0,25	0,35	0,29
Pr ₆ O ₁₁	0,03	0,034	0,028	0,041	0,031	0,031	0,027	0,043	0,035
Nd ₂ O ₃	0,10	0,12	0,093	0,14	0,11	0,10	0,094	0,15	0,13
Sm ₂ O ₃	0,014	0,016	0,013	0,020	0,015	0,014	0,014	0,023	0,020
Eu ₂ O ₃	0,004	0,004	0,003	0,005	0,003	0,003	0,003	0,006	0,005
Gd ₂ O ₃	0,008	0,010	0,008	0,010	0,010	0,007	0,007	0,015	0,014
Dy ₂ O ₃	0,006	<0,004	<0,004	0,006	0,005	0,006	<0,004	0,010	0,010
F	0,28	0,30	0,26	0,20	0,34	0,28	0,46	1,08	1,04
P.F.	6,91	6,02	7,35	4,18	6,59	4,88	6,81	4,12	5,14
CaO/P ₂ O ₅	2,51	2,40	2,82	1,88	2,28	2,47	2,36	1,48	1,48
Total	100,78	99,71	100,37	95,62	100,31	100,89	100,75	99,65	99,93

Obs.: os resultados dos elementos terras-raras desta tabela foram obtidos pelo método Kevex.

Tabela 6.6 – Análise química dos concentrados CG e CGR da usina de concentração Tapira-MG – elementos das terras-raras

Elementos (ppm)	Nº da amostra	
	CG	CGR
La	1534,8	1279,0
Ce	2849,3	2360,8
Pr	356,0	289,8
Nd	1286,0	1114,5
Sm	198,3	172,5
Eu	51,8	43,2
Gd	130,1	121,5
Dy	87,1	87,1
ETRL	6224,4	5216,6
ETRP	217,2	208,6
(ETR) _{total}	6493,4	5468,4
ETRL/ETRP	28,7	25,0

Figura 6.5 – Curvas de ETR, normalizadas para condritos, dos concentrados da usina de concentração de Tapira-MG. Valores de normalização de Evensen *et al.* (1978).

O conteúdo total dos elementos das terras-raras na apatita dos concentrados varia entre 5468 - 6493ppm, com razões ETRL/ETRP de variando de 25,0 a 28,7.

6.3.2 – ANÁLISES QUÍMICAS POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Análises químicas quantitativas das amostras TC11 (ROM) e dos concentrados (CG – concentrado grosso friável e CGR – concentrado granulado) por frações granulométricas foram feitas em praticamente todos os elementos analisados nas amostras globais e os resultados encontram-se no Anexo 4. O balanço granuloquímico foi feito somente em alguns elementos e pode ser visualizado nas Tabelas 6.7 a 6.9.

Para a amostra TC11 (ROM), a análise granulométrica indica que cerca de 30% em peso constitui material passante em 0,037mm. A Figura 6.6 mostra a variação dos teores de SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , TiO_2 , P_2O_5 , MgO e Al_2O_3 com a granulometria, para a amostra TC11-ROM (pilha 912) que alimenta a usina de concentração de Tapira-MG. Note que os teores de P_2O_5 variam entre 6,6% (fração +0,210mm) e 9,64% (fração -0,074 +0,037mm), observando-se uma tendência de aumento para os finos, seguida de uma diminuição na fração -0,037mm. Esses teores são compatíveis com a porcentagem de apatita observada através da microscopia óptica. Os teores de CaO apresentam o mesmo comportamento que os teores de P_2O_5 , variando entre 17,20% (fração +0,210mm) e 22,00% (fração -0,074 +0,037mm), caindo para 14,10% na fração -0,037mm. O Fe_2O_3 apresenta comportamento contrário ao P_2O_5 e CaO , com teores variando entre 22,40% (fração +0,210mm) e 16,50% (fração -0,074 +0,037mm), seguido de um aumento na fração -0,037mm (19,20%). Essa variação química é refletida nos teores de magnetita, que é o principal mineral de ferro nessa amostra.

Os teores de Al_2O_3 variam pouco no intervalo +0,210mm até -0,074 +0,037mm, seguido de um aumento na fração mais fina (-0,037mm). Essa tendência é coerente com a porcentagem dos minerais micáceos, que são os principais portadores de alumínio nessa amostra. Os teores de TiO_2 apresentam uma tendência de aumento no intervalo +0,210mm até +0,149mm, seguido de uma diminuição em direção aos finos. Essa tendência é coerente com a porcentagem de perovskita nessa amostra.

A Figura 6.7 apresenta a distribuição em massa e dos elementos SiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 e MgO para a amostra da alimentação (TC11-ROM – pilha 912) da usina de concentração de Tapira-MG. Note que existe uma tendência desses elementos estarem concentrados na fração abaixo de 0,037mm.

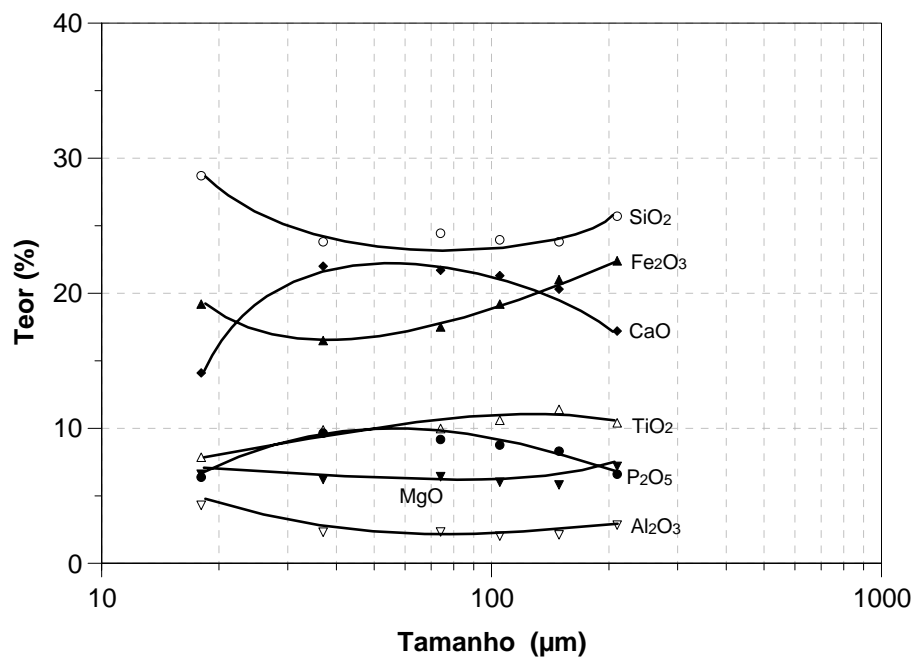


Figura 6.6 – Variação dos teores dos principais elementos na amostra da alimentação da usina de concentração de Tapira-MG (TC11-ROM – pilha 912).

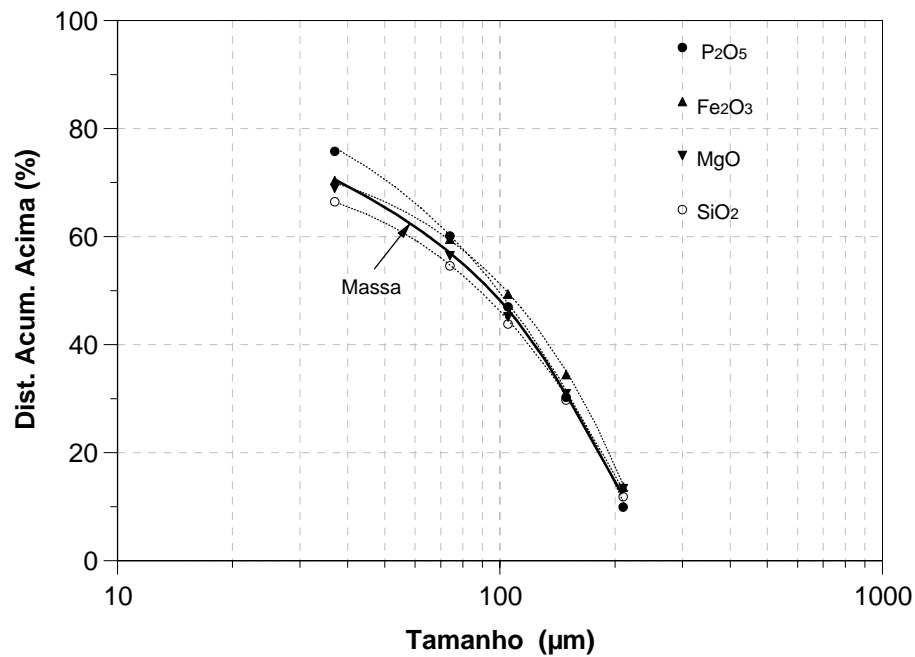


Figura 6.7 – Distribuição em massa dos principais elementos na amostra da alimentação da usina de concentração de Tapira-MG (TC11-ROM – pilha 912).

A Figura 6.8 mostra a distribuição granulométrica para os concentrados CG e CGR, onde fica claro que o CGR apresenta uma granulometria um pouco mais grossa que o CG. A análise granulométrica mostra que para o concentrado CG cerca de 19% em peso constituem material passante em 0,037mm e para o concentrado CGR esse valor é de cerca de 17%. A maior proporção em peso tanto para o CG quanto para o CGR está no intervalo granulométrico compreendido entre -0,074mm a +0,037mm, sendo de cerca de 23% para o CG e cerca de 21% para o CGR. Para o intervalo entre 0,210mm e 0,105mm, a proporção em peso aumenta de 4,61 a 20,84% para o CG e de 13,73 a 17,25% para o CGR, diminuindo no seguinte intervalo (-0,105 a 0,074mm).

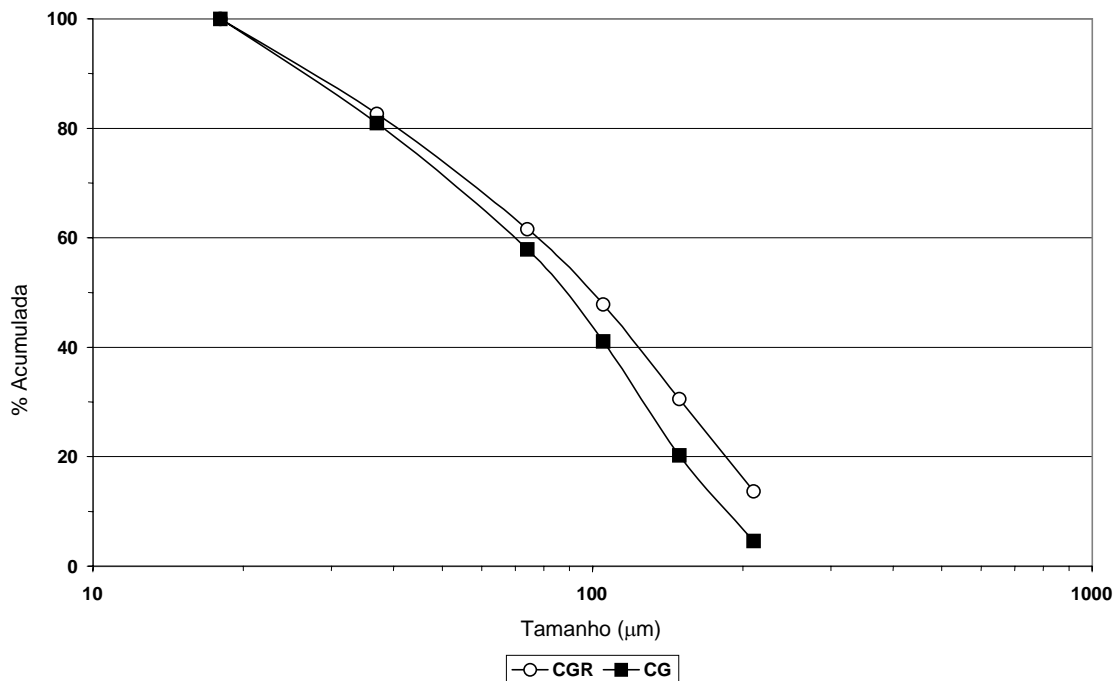


Figura 6.8 – Distribuições granulométricas das amostras de concentrados CG e CGR da usina de concentração de Tapira-MG, obtidas por peneiramento clássico.

As Figuras 6.9 a 6.12 mostram a distribuição dos teores dos principais elementos constituintes da apatita e dos principais contaminantes nas amostras do concentrado CG e CGR. Os teores de P_2O_5 variam entre 40,9% (fração +0,210mm) e 29,8% (fração -0,037mm) para o CG, observando-se uma tendência de diminuição para os finos. Esta mesma tendência é observada para o CGR, onde os teores de P_2O_5 variam entre 40,3% (fração +0,210mm) e 30,5% (fração -0,037mm). Esses valores são coerentes com a porcentagem de apatita obtida ao microscópio óptico, onde observa-se sua diminuição da fração mais grossa para as frações mais finas. A fração +0,210mm, que possui o maior teor de P_2O_5 para os dois concentrados, é responsável por cerca de 6% do total de P_2O_5 contido no CG e por cerca de 16% do total de P_2O_5 contido no CGR. Os teores de CaO para o CG variam entre 49,4% (fração +0,210mm) e 55,2% (fração -0,105 +0,074mm), observando-se uma tendência de aumento neste intervalo e depois um decréscimo para os finos. No concentrado CGR este mesmo comportamento foi

verificado, sendo os teores de CaO entre 51,6% (fração +0,210mm) e 55,7% (fração -0,105 +0,074mm).

Os teores de SrO para o CG estão compreendidos entre 1,1% (fração +0,210mm) e 0,73% (fração -0,037mm), apresentando tendência à diminuição em direção aos finos. Esta diminuição é também observada para o CGR, onde os teores variam entre 1,09% (fração +0,210mm) e 0,68% (fração -0,037mm). O comportamento do SrO é o mesmo observado para o P₂O₅. O flúor apresenta um comportamento mais irregular do que o SrO, porém também mostra seu menor teor na fração abaixo de 0,037mm (1,2% para os dois concentrados).

A distribuição de teores dos contaminantes Fe₂O₃, MgO, Al₂O₃, SiO₂ e TiO₂ nos dois concentrados mostra uma tendência de aumento do teor para as frações mais finas. Verifica-se que para o CG, existe também uma tendência desses elementos estarem concentrados na fração abaixo de 0,037mm, com exceção do TiO₂ que concentra-se mais no intervalo -0,074 +0,037mm. Já para o CGR os óxidos Fe₂O₃, SiO₂ e MgO estão mais concentrados no intervalo granulométrico entre -0,074 + 0,037mm e os óxidos Al₂O₃ e TiO₂ concentram-se mais na fração abaixo de 0,037mm.

As Figuras 6.13 a 6.14 mostram a distribuição em massa e distribuição acumulada de P₂O₅, Fe₂O₃, MgO, SiO₂ e Al₂O₃ nos concentrados CG e CGR.

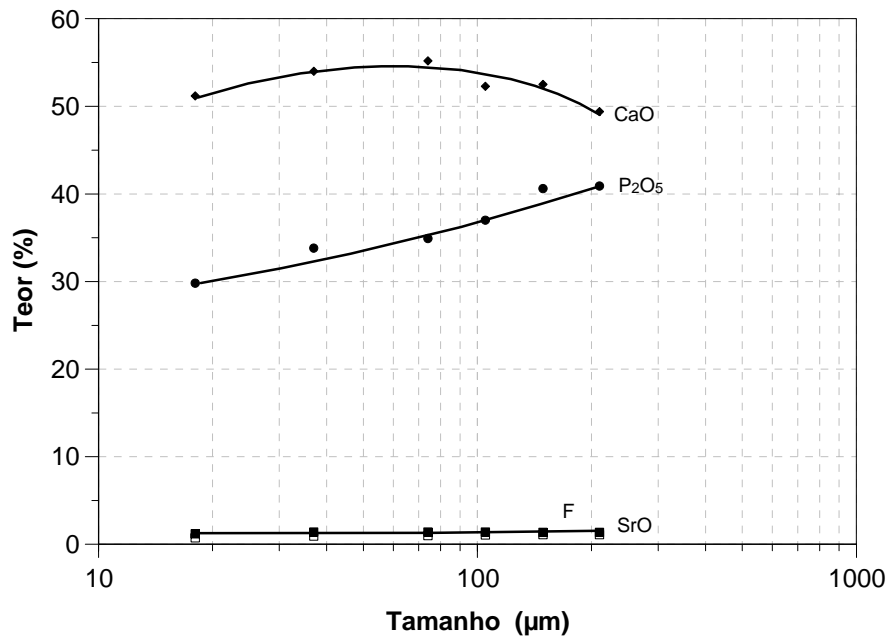


Figura 6.9 – Variação dos teores dos principais elementos constituintes da apatita no concentrado CG.

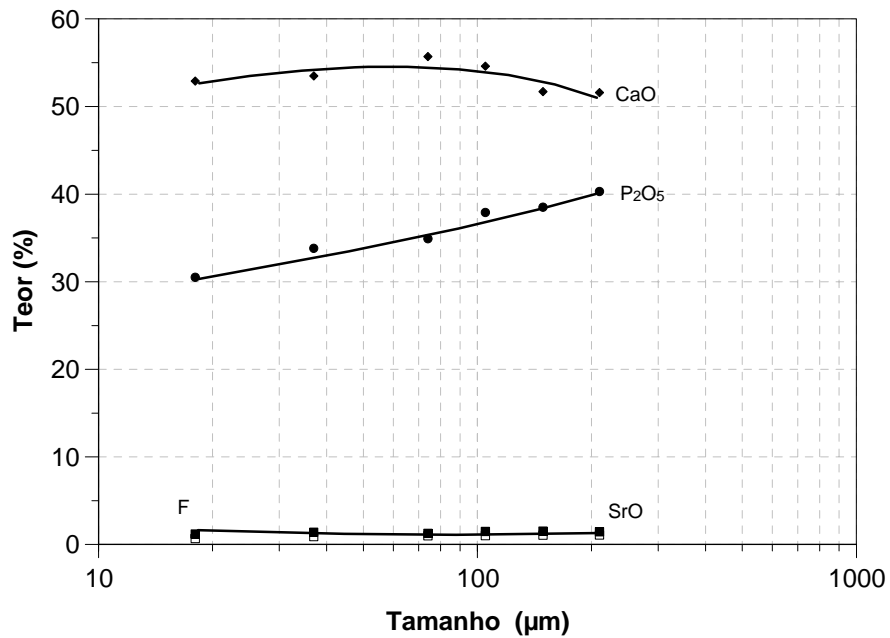


Figura 6.10 – Variação dos teores dos principais elementos constituintes da apatita no concentrado CGR.

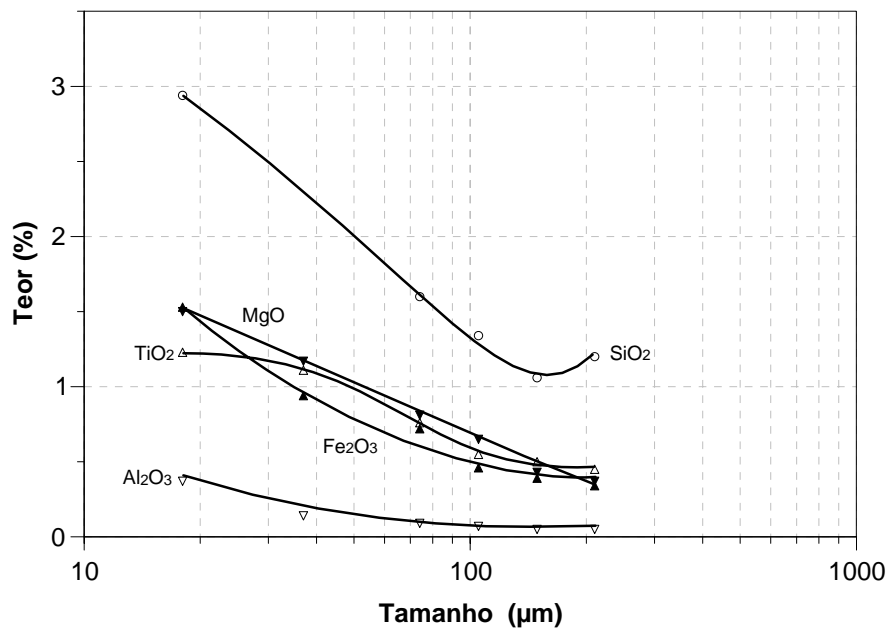


Figura 6.11 – Variação dos teores dos principais contaminantes no concentrado CG.

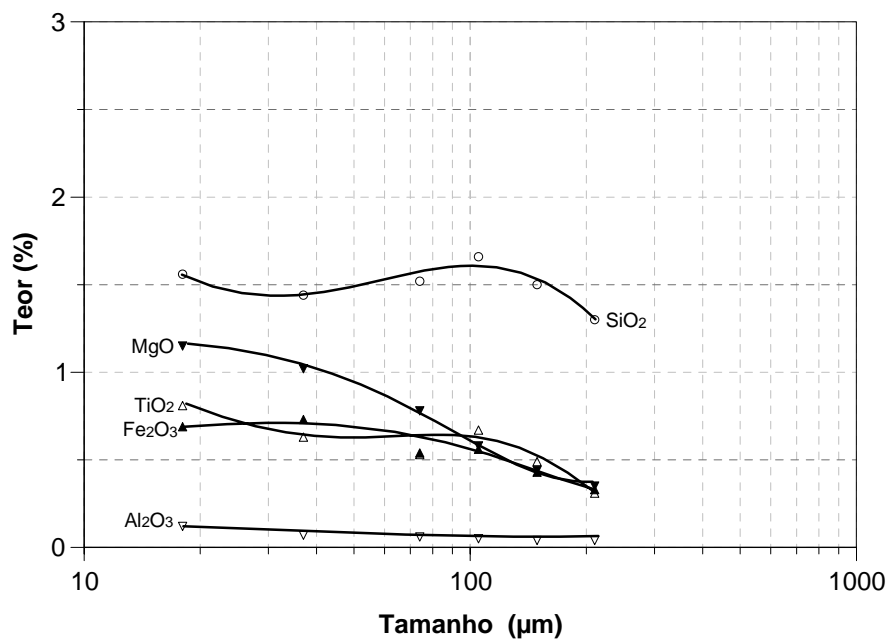


Figura 6.12 – Variação dos teores dos principais contaminantes no concentrado CGR.

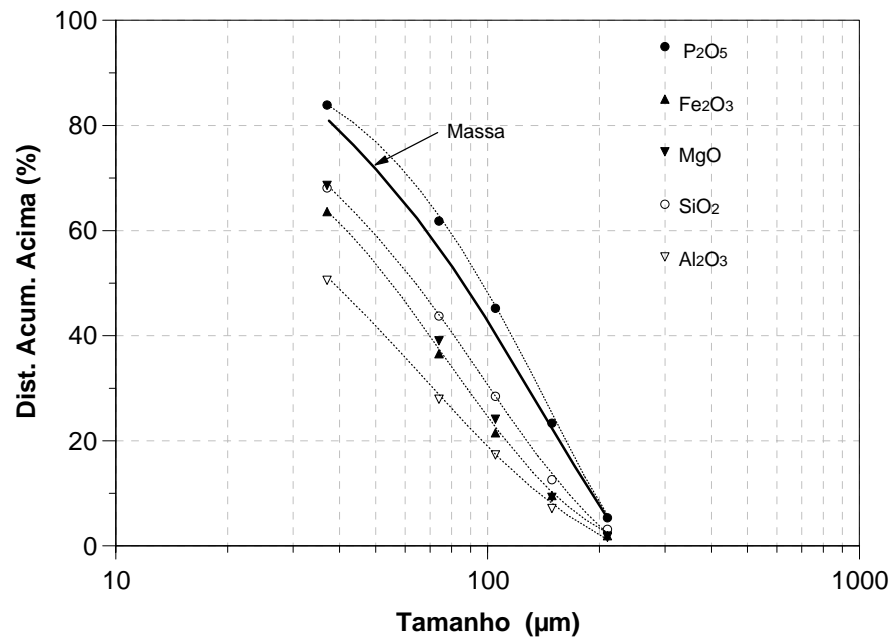


Figura 6.13 – Distribuição em massa e de alguns elementos no concentrado CG.

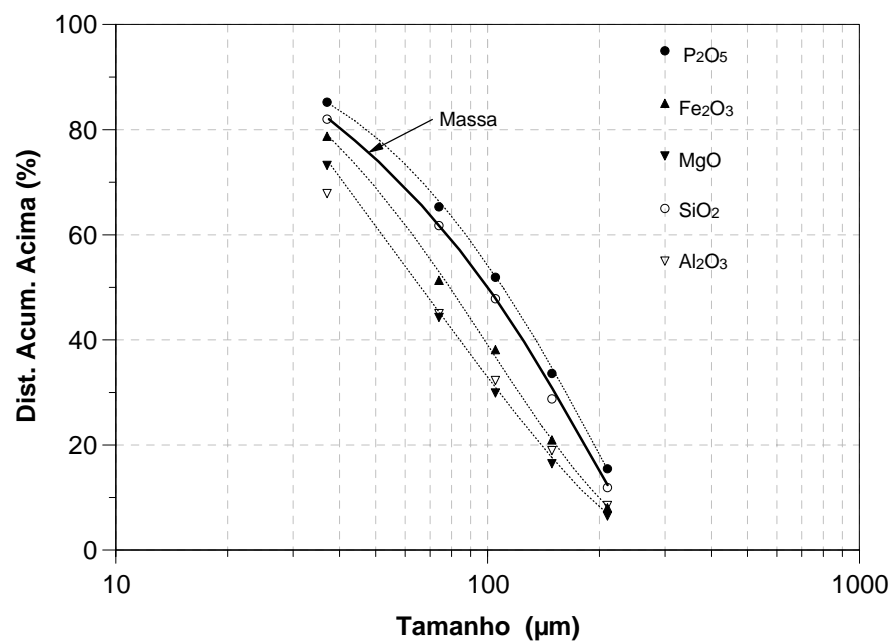


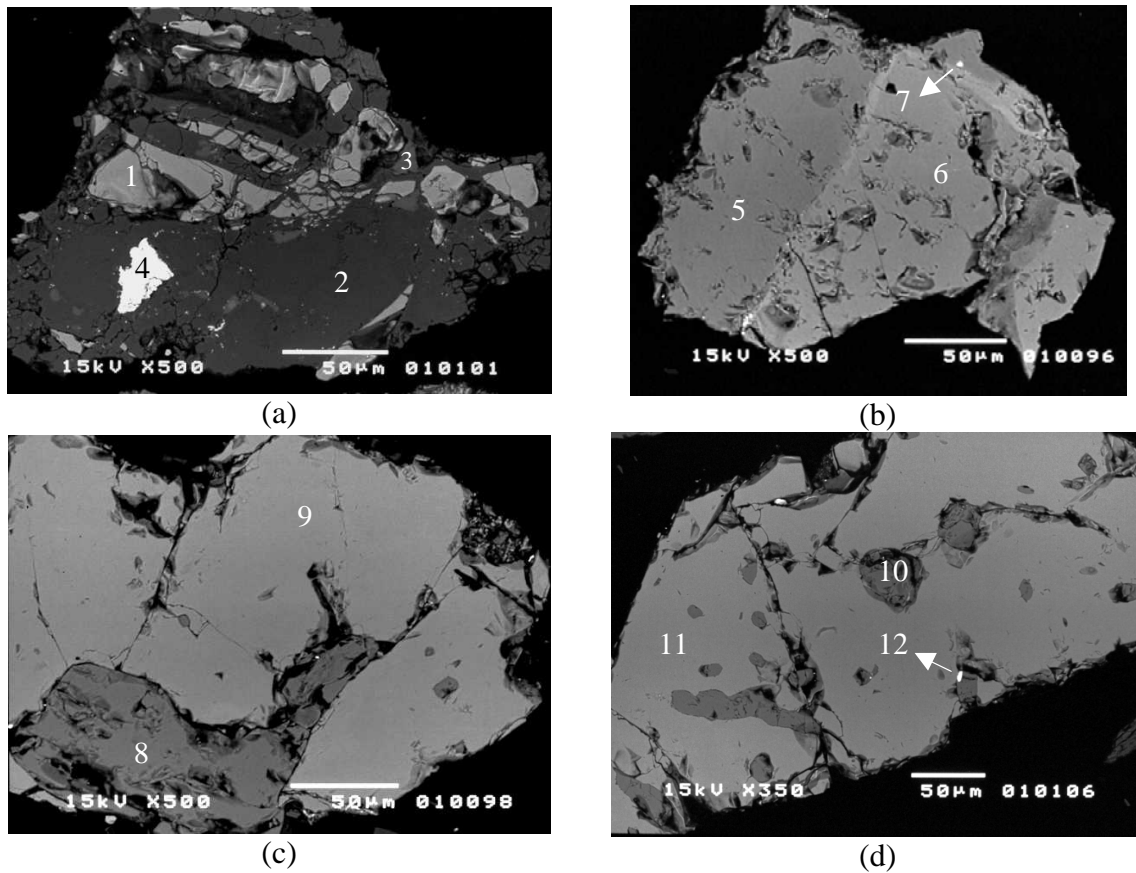
Figura 6.14 – Distribuição em massa e de alguns elementos no concentrado CGR.

6. 4 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise das amostras TC11 (ROM), CG e CGR por microscopia eletrônica de varredura teve como objetivo um maior detalhamento da apatita na tentativa de fazer uma comparação com as 12 amostras de minério da mina.

Na amostra da alimentação (TC11-ROM), a apatita mostra forma granular, aspecto límpido e superfície lisa. Cristais de apatita cortados por vênulas de calcita ou quartzo mais calcita são comuns (Figura 6.15a). Finíssimas inclusões de monazita foram observadas na apatita (Figura 6.15b).

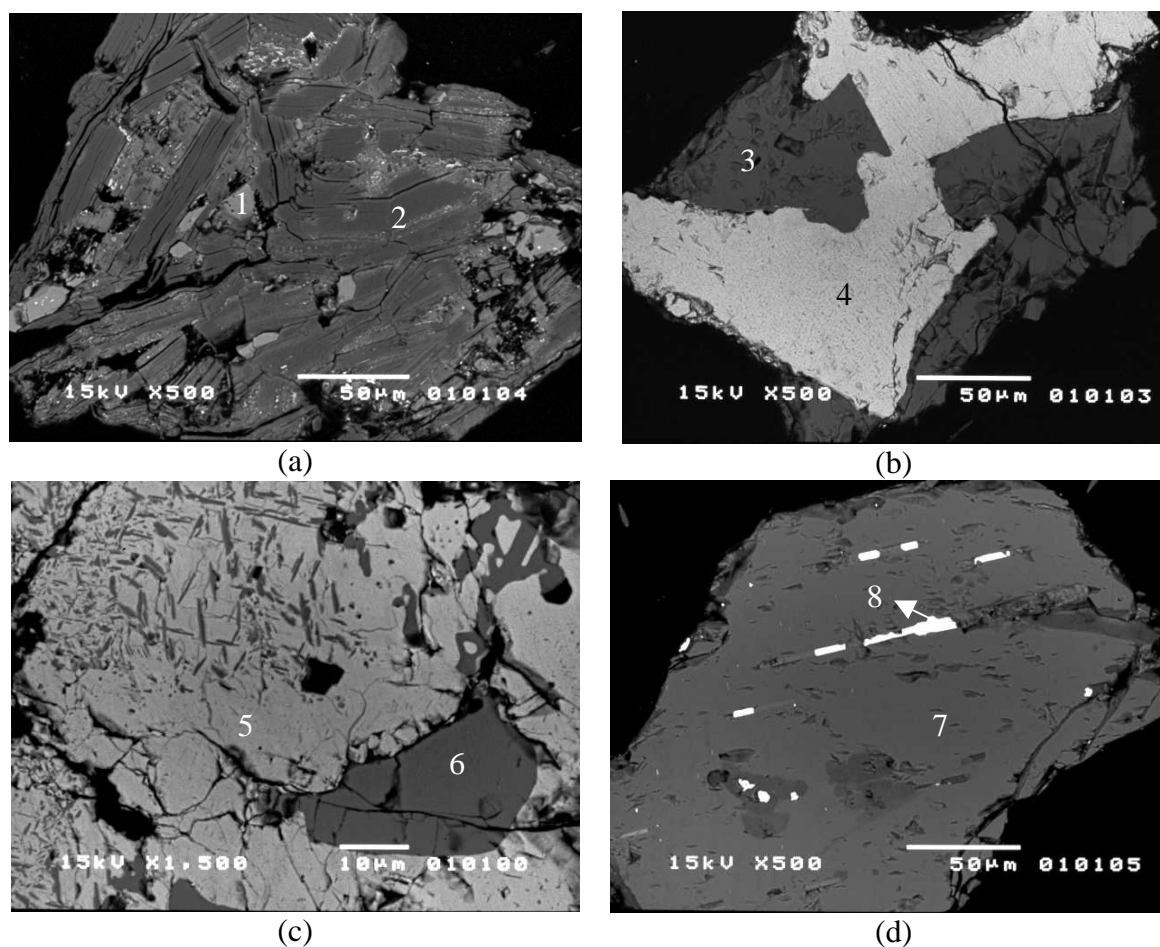
Alguns tipos de associações da apatita com os minerais da ganga podem ser observadas nas figuras 6.15c e d e 6.16a e b. A Figura 6.16c mostra um cristal de magnetita com inclusão e lamelas de exsolução de ilmenita, feição bastante comum em todas as 12 amostras de minério estudadas da mina de Tapira. Raro cristal de olivina do tipo crisolita foi identificado (Figura 6.16d).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	ZrO ₂	ThO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	56,2	-	0,1	0,0	1,3	-	0,1	39,9	2,4	-	-	-	-	-	apatita
2	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
3	54,4	0,0	-	0,6	2,0	-	0,2	-	-	42,7	-	-	-	-	calcita
4	-	0,2	0,4	0,2	-	-	98,7	-	-	-	-	-	0,0	0,5	magnetita
5	58,2	-	0,3	0,0	-	0,1	0,1	40,9	0,3	-	-	-	-	0,1	apatita escura
6	56,1	-	-	0,1	1,7	-	-	40,6	1,3	-	-	-	-	0,1	apatita clara
7	18,9	-	-	-	-	-	-	31,0	30,9	-	-	19,2	-	-	monazita
8	57,0	-	0,5	0,1	1,1	-	0,0	41,0	0,3	-	-	-	-	-	apatita
9	32,5	-	24,4	1,3	-	-	20,2	-	-	-	4,3	-	0,7	16,6	schorlomita
10	56,8	-	1,1	0,0	1,7	-	0,9	39,0	0,3	-	-	-	-	0,2	apatita
11	32,9	-	24,4	1,1	-	-	20,1	-	-	-	6,3	-	0,5	14,7	schorlomita
12	11,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	72,0	-	-	16,3	calzirtita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 6.15 – Eletronmicrografias da amostra TC11 – ROM (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita cortada por vênulas de quartzo + calcita; nota-se inclusão de magnetita na calcita. (b): apatita com tonalidades de cinza diferentes em função de variação nos teores de Sr e ETR; notam-se finíssimas inclusões de monazita. (c): apatita associada com granada do tipo schorlomita. (d): apatita inclusa em granada do tipo schorlomita; nota-se também finíssima inclusão de calzirtita.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	56,1	-	0,4	0,0	1,1	-	0,6	40,8	0,9	-	-	-	0,0	apatita
2	1,6	-	45,1	16,6	-	-	16,3	-	-	-	7,5	9,1	3,7	FCM
3	56,1	-	0,4	0,0	1,0	0,3	0,4	40,9	0,8	-	-	-	-	apatita
4	-	1,1	0,3	0,7	-	-	91,8	-	-	-	-	0,1	6,0	magnetita
5	-	0,1	0,2	1,1	-	-	97,0	-	-	0,1	-	0,6	0,9	magnetita
6	-	3,5	0,1	12,3	-	-	23,2	-	-	-	-	0,1	60,8	ilmenita
7	0,6	0,8	41,4	41,4	-	-	15,8	-	-	-	-	-	-	olivina
8	-	0,6	0,1	1,3	-	-	97,4	-	-	0,0	-	0,1	0,4	magnetita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 6.16 – Eletronmicrografias da amostra TC11 – ROM (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita inclusa em filossilicato de camadas mistas – FCM. (b): apatita associada com magnetita. (c): magnetita com inclusão e lamelas de exsolução de ilmenita. (d): olivina com inclusões alinhadas de magnetita.

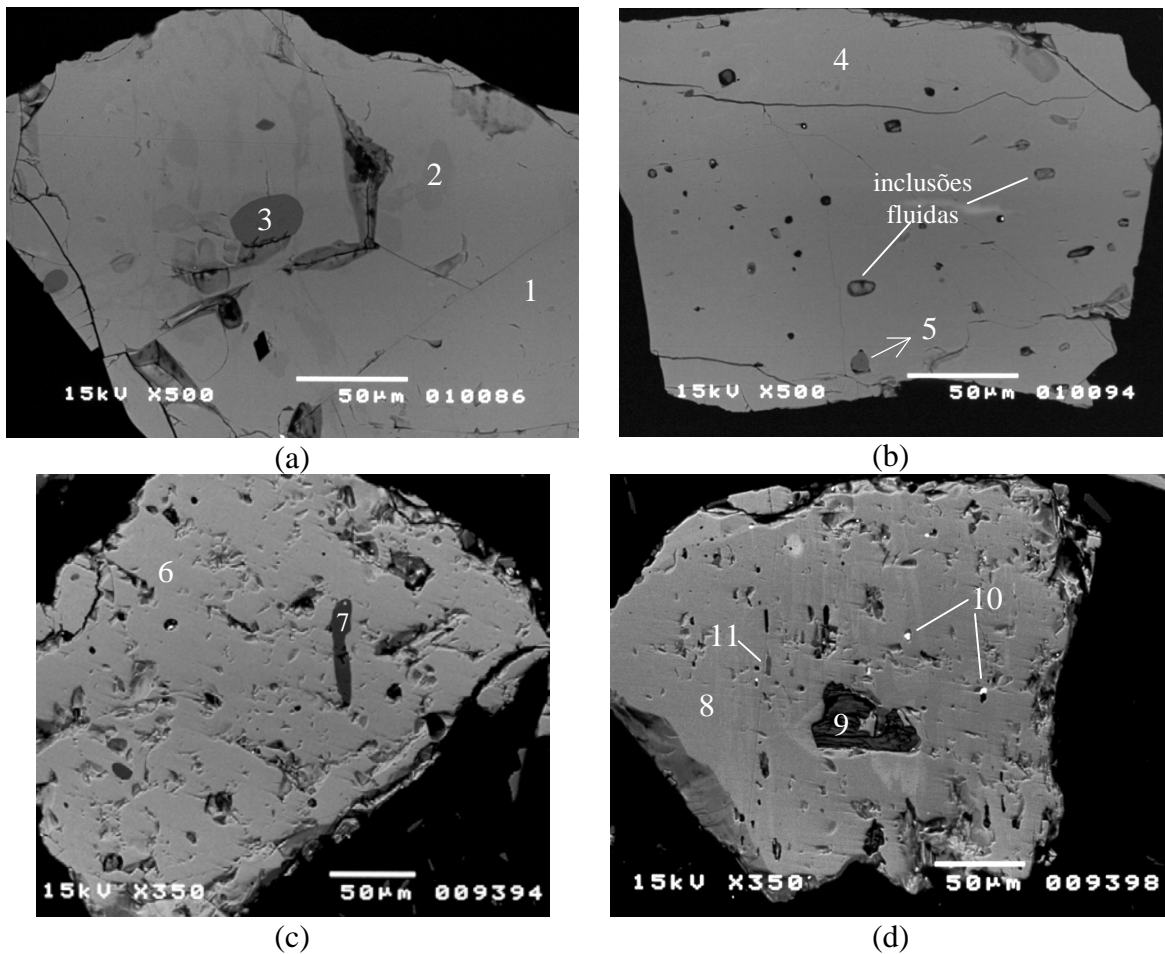
A apatita presente nos concentrados CG e CGR é proveniente de diversos tipos litológicos da mina de Tapira (capítulo 3), porém uma vez que alguns dos minérios estudados fazem parte da composição da pilha 912 (capítulo 3 – metodologia), suas características são semelhantes às aquelas apresentadas no item 4.5. Os cristais de apatita possuem forma granular, superfície lisa e aspecto principalmente límpido, sendo observadas em alguns grãos inclusões fluidas e inclusões de calcita (Figura 6.17a e b). Alguns grãos de apatita mostraram também inclusões de quartzo, barita, filossilicato de camadas mistas, flogopita e monazita (Figuras 6.17c e d e 6.18a, b e c).

Cristais de apatita cortados por venulações somente de carbonatos (calcita e dolomita) ou calcita mais quartzo são também observados (Figuras 6.18c e d e 6.19). Localmente, o carbonato das vênulas apresenta inclusões finíssimas de barita e estroncianita. Vale mencionar a presença local de um óxido de Mn e Ba (prováveis holandita e/ou romanechita) em vênula de quartzo mais calcita. Esse(s) mineral(is) foi(ram) identificado(s) também na amostra 4 (clinopiroxenito micáceo) e em amostras de clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita da mina de Tapira.

Localmente, a apatita mostra variação nas tonalidades de cinza, em função de diferentes teores de ETR e Sr (Figuras 6.17a, 6.18a e 6.20a). Observam-se também raros grãos de apatita primária em associação com apatita secundária, esta última mostrando superfície rugosa e recobrimento parcial por goethita.

6.5 – ESPECTROMETRIA DE INFRAVERMELHO (EIV)

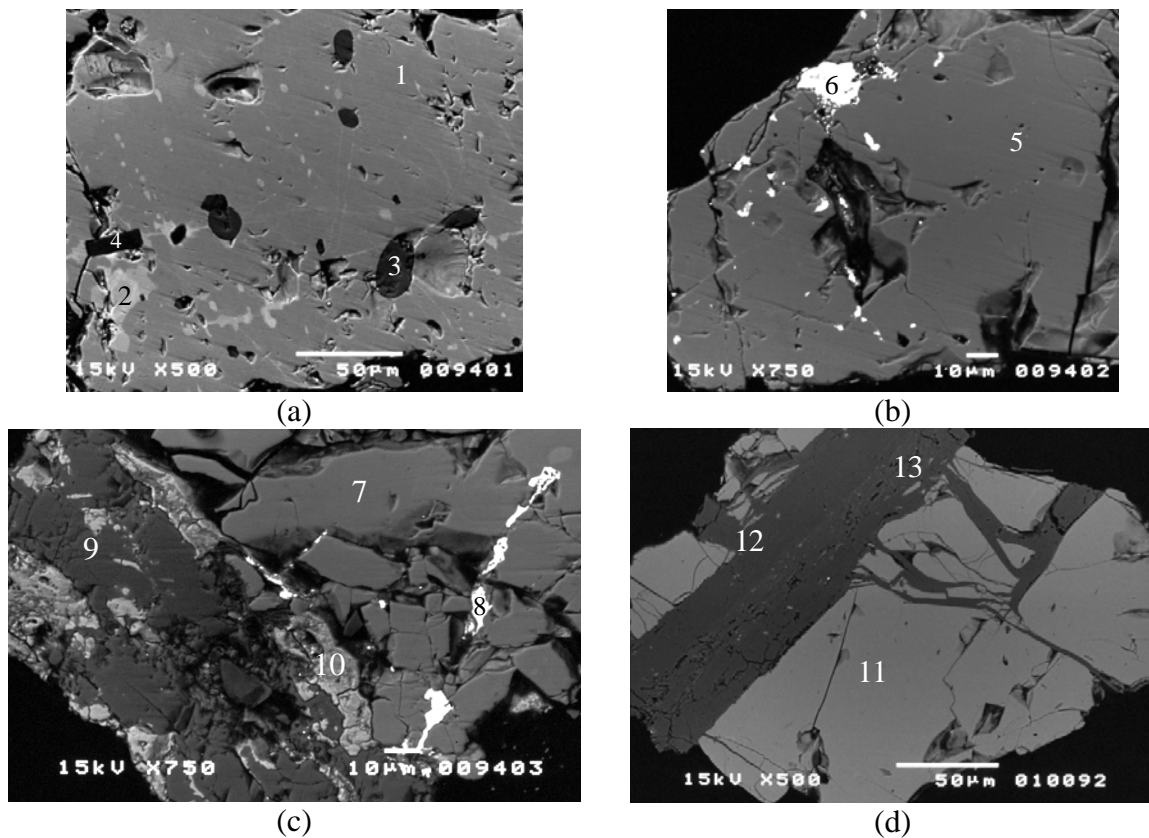
A espectrometria de infravermelho foi utilizada nos concentrados de apatita CG e CGR, provenientes da usina de Tapira como uma técnica complementar para verificação da presença dos grupos iônicos OH^- e CO_3^{2-} na estrutura da apatita e comparação com os resultados obtidos para os concentrados produzidos nesse trabalho, através das 12 amostras de minério coletadas na mina de Tapira. As posições das bandas de deformação (em número de onda – cm^{-1}) obtidas para os dois concentrados estudados podem ser visualizadas na Tabela 6.10 e as Figuras 6.21 e 6.22 apresentam os espectros obtidos.



Área	CaO	SO ₃	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	55,6	-	0,5	0,1	1,8	0,0	0,4	40,3	1,3	-	-	-	-	apatita clara
2	55,3	-	-	0,1	1,4	0,2	0,1	40,6	2,2	-	-	-	0,1	apatita escura
3	53,3	-	-	0,5	3,7	0,5	0,2	-	-	41,8	-	-	-	calcita
4	56,2	-	0,2	0,0	1,7	0,3	-	41,5	-	-	-	-	-	apatita
5	51,4	-	-	0,3	7,2	-	0,8	-	-	40,3	-	-	-	calcita
6	57,9	-	0,3	-	1,5	-	0,1	39,0	1,0	-	-	-	0,2	apatita
7	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
8	54,3	-	-	-	3,2	0,2	0,1	42,1	0,1	-	-	-	-	apatita
9	2,4	-	48,7	15,0	-	0,4	19,4	-	-	-	5,9	7,6	0,6	FCM
10	-	32,2	-	-	6,1	61,7	-	-	-	-	-	-	-	barita
11	57,4	-	-	0,0	-	0,3	0,1	-	-	42,2	-	-	-	calcita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

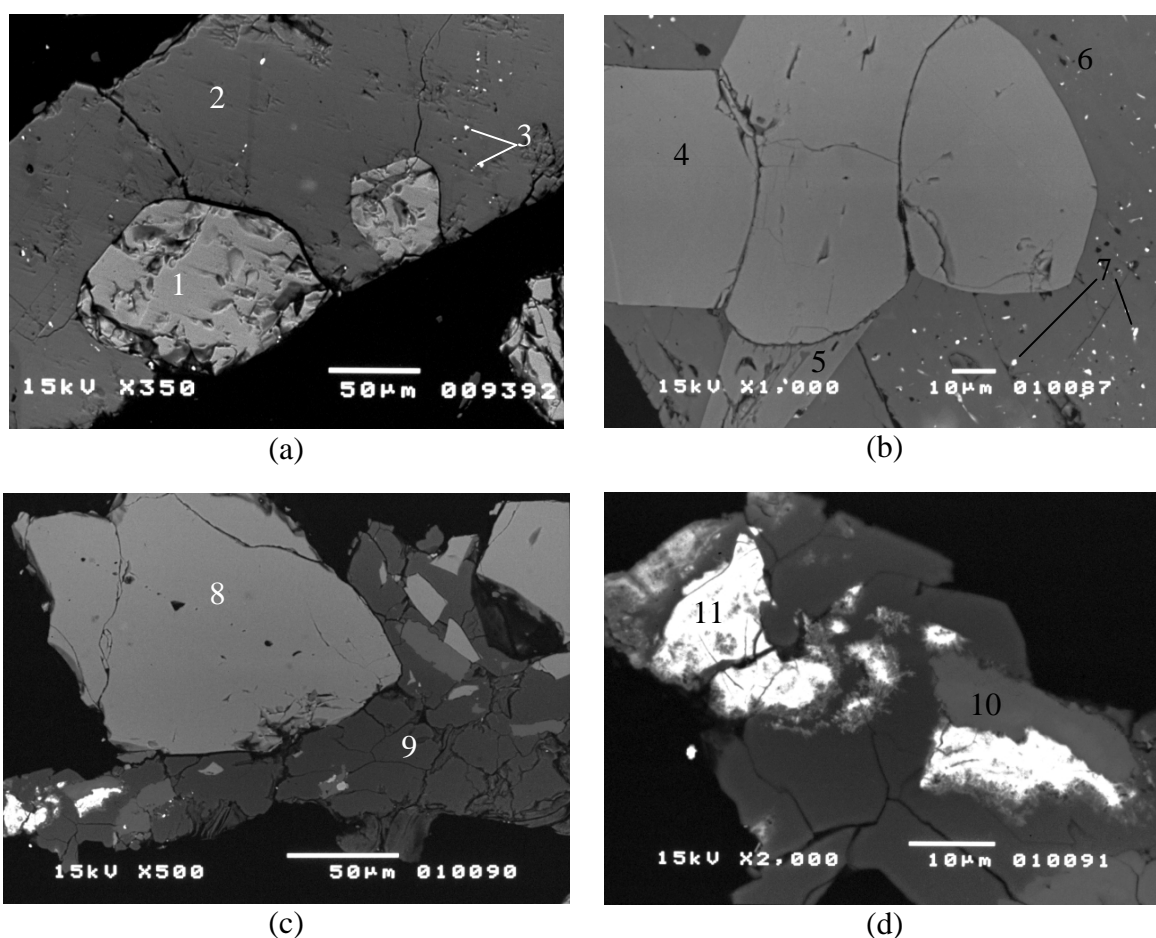
Figura 6.17 – Eletronmicrografias dos concentrados CG e CGR (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de calcita (am CG). (b): apatita com inclusões fluidas e de calcita (am CG). (c): apatita com inclusões de quartzo (am CGR). (d): apatita com inclusões de calcita, barita e FCM (am CGR).



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	CO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	58,3	-	0,1	-	1,0	-	0,1	40,3	0,2	-	-	-	-	apatita escura
2	55,5	-	-	0,0	1,0	-	0,1	40,2	3,1	-	-	-	0,1	apatita clara
3	54,7	-	-	-	1,2	0,9	-	0,2	-	43,0	-	-	-	calcita
4	0,4	-	42,0	16,5	5,1	-	4,9	1,6	-	-	11,2	17,2	1,1	flogopita
5	57,9	-	-	0,0	1,2	-	0,0	40,0	0,8	-	-	-	0,1	apatita
6	6,6	-	-	0,1	3,6	-	3,1	37,8	48,5	-	0,2	-	-	monazita
7	55,1	-	1,0	0,1	1,2	0,4	-	37,7	4,5	-	-	-	-	apatita
8	5,1	-	-	-	4,0	2,1	0,1	34,2	54,1	-	0,1	-	0,3	monazita
9	56,4	-	-	0,8	0,0	-	0,2	0,1	-	42,5	-	-	-	calcita
10	1,5	-	7,6	1,1	1,6	-	86,5	0,9	-	-	-	0,4	0,3	magnetita
11	56,9	-	0,5	-	1,0	0,3	0,2	40,2	0,8	-	-	-	-	apatita
12	35,3	0,2	-	16,7	0,1	-	0,4	-	-	47,3	-	-	-	dolomita
13	35,6	-	44,1	18,1	-	-	2,1	-	-	-	-	-	-	piroxênio

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

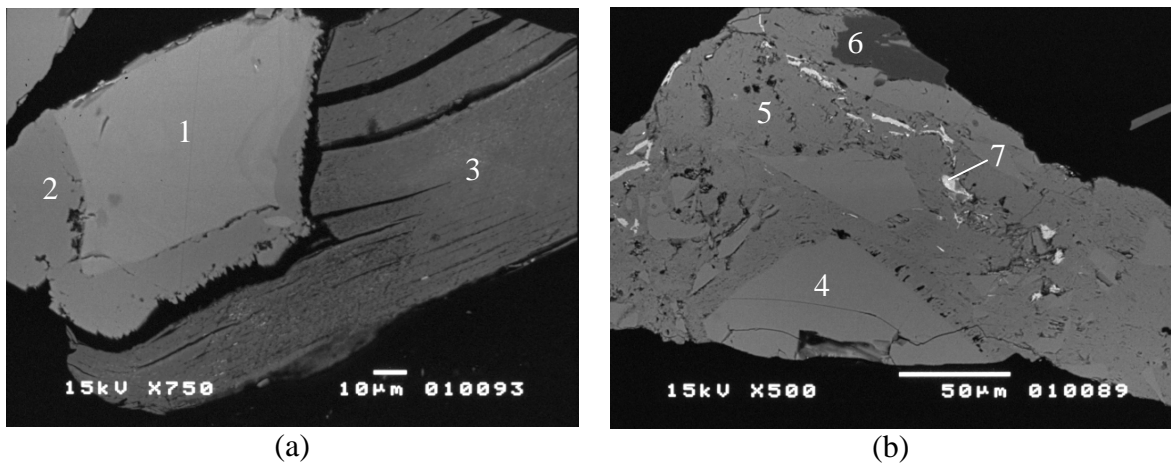
Figura 6.18 – Eletronmicrografias dos concentrados CG e CGR (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita com inclusões de calcita e de flogopita; notam-se regiões com tonalidades de cinza diferentes na apatita em função de teores variáveis de ETR (am CGR). (b): apatita com inclusões de monazita (am CGR). (c): apatita com inclusões de monazita e cortada por vênula de calcita. Junto com a calcita observa-se magnetita impura (am CGR). (d): apatita cortada por vênulas de dolomita; nota-se associação com piroxênio (am CG).



Área	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	SO ₃	CO ₂	MnO	TiO ₂	Interpretação
1	57,4	-	0,5	0,1	1,5	-	0,0	38,9	1,4	-	-	-	0,1	apatita
2	54,4	-	-	-	1,3	0,6	-	-	-	-	43,7	-	-	calcita
3	7,8	-	-	-	-	60,0	-	-	-	32,2	-	-	-	barita
4	56,5	-	0,1	-	1,1	-	0,3	40,5	1,3	-	-	-	0,2	apatita
5	0,9	9,5	54,3	-	-	-	35,3	-	-	-	-	-	-	anfíbólio
6	55,1	-	-	0,0	0,3	0,5	0,6	-	-	-	43,3	0,2	-	calcita
7	6,7	-	-	-	61,2	0,8	0,2	-	-	-	31,1	-	-	estroncianita
8	56,3	-	0,3	-	1,1	-	0,3	40,2	1,5	-	-	-	0,3	apatita
9	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
10	55,5	-	-	0,3	0,1	0,2	-	-	-	-	43,5	0,4	-	calcita
11	2,0	-	1,4	1,4	-	20,5	-	-	-	-	-	73,1	1,6	ho/ro

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 6.19 – Eletronmicrografias dos concentrados CG e CGR (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com calcita; notam-se finíssimas inclusões de barita na calcita (am CGR). (b): apatita associada com provável anfíbólio do tipo riebeckita e calcita; notam-se finíssimas inclusões de estroncianita na calcita (am CG). (c): apatita cortada por vênulas de quartzo com calcita e prováveis holandita – ho ou romanechita – ro (am CG) (d): ampliação de uma região da foto anterior.



Área	CaO	MnO	SiO ₂	MgO	SrO	BaO	FeO	P ₂ O ₅	ETR	K ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Interpretação
1	54,5	-	0,2	-	2,3	0,1	0,4	39,8	2,7	-	-	-	apatita clara
2	59,1	-	0,4	-	0,2	0,1	0,3	39,5	0,2	-	-	0,2	apatita escura
3	1,5	-	41,6	13,3	-	-	23,4	-	-	7,4	10,1	2,6	FCM
4	57,7	-	0,4	-	1,0	0,2	-	39,9	0,8	-	-	-	apatita clara
5	59,9	-	-	0,1	0,3	-	0,2	39,0	0,4	-	-	-	apatita escura
6	-	-	100,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	quartzo
7	2,6	0,9	4,4	1,7	-	-	87,2	2,1	-	-	0,5	0,6	goethita

ETR = elementos terras-raras (La₂O₃, Ce₂O₃ e Nd₂O₃)

Figura 6.20 – Eletromicrografias do concentrado CG (fração +0,210mm) obtidas no MEV (imagem de elétrons retroespalhados – IER). A microanálise EDS de cada miniárea pode é mostrada na tabela acima. (a): apatita associada com FCM; notam-se tonalidades diferentes na apatita devido à variações nos teores de Sr e ETR. (b): apatita primária alterada para apatita secundária parcialmente impregnada por hidróxido de ferro.

Os espectros dos concentrados CG e CGR da usina de Tapira foram caracterizados pela presença dos grupos iônicos OH⁻ e CO₃²⁻.

O grupo iônico OH⁻ nos concentrados CG e CGR foi indicado pela presença da banda de vibração axial em 3539-3542cm⁻¹ e de vibração angular em 725-729cm⁻¹, indicando a presença também de F na estrutura da apatita, o que já havia sido verificado através das técnicas de análises químicas (eletrodo seletivo).

O grupo iônico CO₃²⁻ na estrutura da apatita foi identificado nos concentrados CG e CGR da usina de Tapira, através da presença do dubleto em 1420 e 1462cm⁻¹ e de uma banda em 880cm⁻¹.

Através dos resultados obtidos pela técnica de infravermelho, juntamente com os resultados de análises químicas conclui-se que a apatita presente nesses concentrados trata-se de carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita, sendo semelhante aos resultados obtidos para os 12 concentrados obtidos a partir das amostras da mina.

Tabela 6.10 – Grupos iônicos com suas respectivas bandas de absorção presentes nos espectros de infravermelho dos concentrados CG e CGR da usina de Tapira-MG

Amostra	Grupo PO ₄				Grupo OH		Grupo CO ₃	
	v ₁	v ₃	v ₁ + v ₃	v ₄			v ₂	v ₃
CG	961	1092-1038	1995-2003-2080	602-571	3539	729	880	1462-1420
CGR	961	1092-1038	1995-2003-2080	602-571	3542	725	880	1462-1420

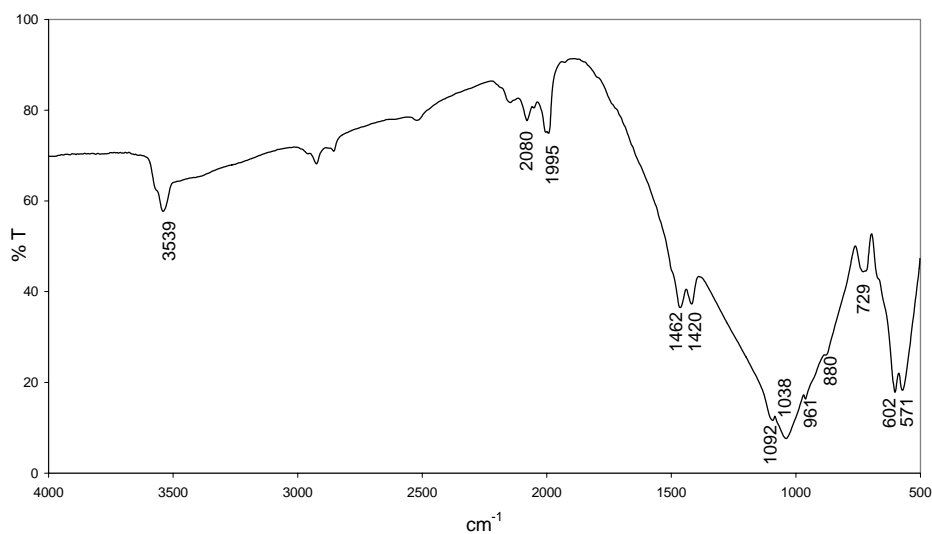


Figura 6.21 – Espectro de infravermelho (transmissão) do concentrado CG da usina de Tapira-MG.

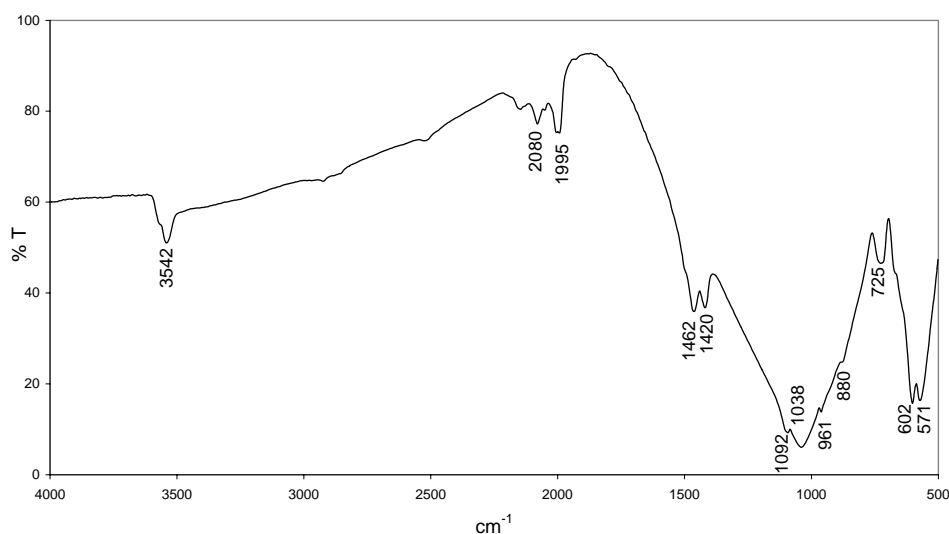


Figura 6.22 – Espectro de infravermelho (transmissão) do concentrado CGR da usina de Tapira-MG.

6.6 – SUMÁRIO

- Todos os pontos amostrados na usina de concentração de Tapira durante o processamento da pilha 912, com exceção dos concentrados CG e CGR, são constituídos dos mesmos minerais (apatita, calcita, dolomita, diopsídio, mica, quartzo, perovskita, anatásio, ilmenita, magnetita, hematita e goethita), porém em proporções diferenciadas, conforme indicado pelas intensidades dos picos de difração de raios-X. A amostra TC11(ROM) apresenta quantidade minoritária de schorlomita e escassa olivina do tipo crisolita.
- Os estudos de difração de raios-X nos filossilicatos da amostra TC11 (ROM) identificaram a presença de um mineral de camadas mistas (flogopita/vermiculita), vermiculita pura e clorita. Esses resultados são coerentes com os filossilicatos presentes nas 12 amostras de clinopiroxenitos da mina, onde foram observados esses mesmos tipos.
- Na amostra da alimentação TC11 (ROM), o comportamento da apatita é semelhante àquele observado na maioria das amostras de clinopiroxenitos estudados da mina de

Tapira, isto é, sua proporção em peso aumenta da fração mais grossa (+0,210mm) em direção às frações mais finas (-0,074mm +0,037mm), diminuindo na fração -0,037mm. O comportamento da magnetita e do carbonato também é coerente com as amostras da mina.

- Os concentrados CG e CGR apresentam como contaminantes principalmente os carbonatos (calcita, dolomita e localmente estroncianita), ocorrendo também diopsídio, minerais micáceos, quartzo, perovskita/anatásio, magnetita, goethita, ilmenita, barita, monazita e um óxido de Mn e Ba (provável holandita e/ou romanechita). A apatita constitui cerca de 83-84% em peso dos concentrados, verificando-se que ao longo da granulometria sua proporção em peso diminui da fração mais grossa (+0,210mm) em direção à fração mais fina (-0,037mm), ou seja, à medida que o material torna-se mais fino a quantidade de contaminantes (especialmente os carbonatos) aumenta.
- O conteúdo total de ETR nos concentrados varia de 0,5 - 0,6%, sendo observado um enriquecimento em ETRL em relação aos ETRP, sendo refletido nas curvas de abundância de ETR, normalizadas para condritos, que apresentam uma inclinação negativa. Estudos de Dutra & Formoso, 1991 e Lenharo, 1994 em apatita de Tapira verificaram essa mesma tendência, que é característica de apatitas de complexos alcalinos-carbonatíficos.
- Os teores mais elevados de flúor e de estrôncio nos concentrados CG e CGR indicam a presença desses elementos na estrutura da apatita, conforme verificado por diversos autores e por análises de microsonda eletrônica feitas em apatita das amostras de clinopiroxenitos da mina de Tapira neste trabalho.
- A técnica de espectrometria de infravermelho permitiu a identificação dos grupos iônicos OH^- e CO_3^{2-} na estrutura da apatita presente nos concentrados CG e CGR, sendo esta identificada como uma carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita, composição semelhante àquela verificada para a apatita presente nas 12 amostras de minério da mina de Tapira.

7 – CONCLUSÕES

Os estudos de caracterização mineralógica, através de diversas técnicas convencionais, nas amostras de minério fosfático da mina de Tapira-MG permitiram as seguintes conclusões:

- As doze amostras estudadas são classificados como clinopiroxenitos. De acordo com a composição mineralógica e grau de alteração, estas amostras foram separadas em quatro grandes grupos de minério: clinopiroxenitos pouco alterados amostras 2, 5 e 10 (classificação de campo: piroxenito compacto); clinopiroxenitos micáceos – amostras 1, 4 e 9 (classificação de campo: piroxenito semi-compacto); clinopiroxenitos argilizados – amostras 11 e 12 (classificação de campo: piroxenito serpentizado); e clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita – amostras 3, 6, 7 e 8 (classificação de campo: silexito).
- As 12 amostras apresentam mineralogia semelhante (diopsídio parcialmente alterado, ou não, para anfibólio; apatita, carbonatos, minerais micáceos, magnetita, perovskita, anatásio/rutilo, quartzo, titanita, ilmenita, hematita, goethita, zircão e pirita), porém com variações modais. A amostra 4 contém quantidade medianamente abundante de granada do tipo melanita e as amostras 11 e 12 possuem esmectita do tipo nontronita. Foram identificados, através de MEV, em praticamente todas as amostras, quantidades minoritárias de monazita, barita e zirconolita, bem como um óxido de Mn, Ba e Fe – prováveis holandita e/ou romanechita – (amostras de clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita e na amostra 4 de clinopiroxenito micáceo) e fosfatos secundários dos grupos do rabdofânio (amostras 11 e 12) e da crandalita (amostra 12) como produtos de alteração do anatásio.
- Estudos detalhados de difração de raios-X associados com microanálises químicas WDS identificaram os minerais micáceos como sendo principalmente filossilicatos de camadas mistas (flogopita/vermiculita e biotita/vermiculita, este último somente na amostra 12) e vermiculita pura, ocorrendo também quantidade minoritária de

clorita e flogopita. Os valores de K_2O nas análises dos FCM variam entre 3,3 - 6,2%, valores inferiores a uma flogopita/biotita pura (~9-10% de K_2O).

- Os carbonatos ocorrem principalmente sob a forma de vênulas submilimétricas a milimétricas cortando os demais minerais dos clinopiroxenitos, sendo exceções as amostras de clinopiroxenito argilizado e a amostra 1 (clinopiroxenito micáceo). Uma outra forma comum de ocorrência dos carbonatos é através de finas inclusões geralmente arredondadas, principalmente nos cristais de apatita. As amostras 9 (clinopiroxenito micáceo) e 7 e 8 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) mostram também quantidade minoritária de carbonato em agregados de cristais disseminados, interpretados como possíveis pedaços de vênulas.
- Os menores teores de carbonato (<1 - 1%) foram observados nas amostras 1 e 9 (clinopiroxenito micáceo) e amostras 11 e 12 (clinopiroxenito argilizado). Nas demais amostras, os carbonatos possuem teores entre 11-26%, sendo exceção a amostra 10 (clinopiroxenito pouco alterado) que exhibe o maior teor de carbonato (32%). Em termos de grupo de rochas, os clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (amostras 3, 6, 7 e 8) apresentam os teores mais elevados de carbonatos (17 - 26%). Estudos por fração granulométrica indicaram que a proporção em peso dos carbonatos, em todas as amostras da mina, possui tendência de aumento da fração mais grossa (+0,210mm) para a fração mais fina (-0,037mm).
- Resultados de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura indicaram que os carbonatos presentes nas venulações tratam-se de calcita, dolomita e, às vezes, calcita magnésiana. Já o carbonato presente como inclusão foi identificado principalmente como calcita, ocorrendo localmente estroncianita (amostra 4 e raramente na amostra 10) e escassa anquerita (amostra 11). Estudos por fração granulométrica das amostras mostraram que as vênulas diminuem em direção às frações mais finas, passando a predominar grãos liberados de carbonato a partir da fração -0,210 +0,149mm.

- A magnetita presente em todas as amostras da mina apresenta martitização incipiente a avançada começando nas bordas e fraturas e normalmente os cristais exibem lamelas de exsolução de ilmenita, bem como inclusões de ilmenita. A ilmenita presente sobre a forma de lamelas de exsolução na magnetita apresenta teores de MgO variando entre 2,8 até 12,5%. Nas frações granulométricas, a proporção em peso da magnetita possui tendência de diminuir da fração mais grossa (+0,210mm) para a fração mais fina (-0,037mm) em quase todas as amostras, sendo exceção os clinopiroxenitos micáceos, onde seu comportamento é mais variado.
- As características texturais e forma da apatita observada nas 12 amostras de clinopiroxenito indicam que a mesma é essencialmente primária e que foi um dos primeiros minerais a se formar, uma vez que é comum sua presença como inclusão em cristais de piroxênio/anfibólio, magnetita, minerais micáceos, granada, nontronita e perovskita. Apesar da apatita ser essencialmente primária, estudos por microscopia eletrônica de varredura indicaram a presença local de diferentes tonalidades de cinza na apatita, em função principalmente de teores diferentes de SrO e óxidos de terras-raras, podendo sugerir mais de uma geração.
- A apatita possui superfície geralmente lisa, sendo exceção aquela presente na amostra 12, onde seu aspecto é poroso, indicando início de dissolução. Predominam cristais límpidos, apesar de inclusões fluidas tubulares e arredondadas, bem como inclusões principalmente de carbonatos, serem comuns. Recobrimento parcial por hidróxidos de ferro é incipiente e ocorre em menos de 2-5% dos grãos. Dentre os grupos de rochas, a apatita presente nos clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita mostra aspecto mais límpido e a apatita da amostra 11 (clinopiroxenito argilizado) apresenta a maior quantidade de inclusões, sendo identificados monazita, barita, feldspato potássico, nontronita, calcita, anquerita, ilmenita e possível zirconolita.
- Verifica-se que os minerais portadores de cálcio presentes nas 12 amostras da mina correspondem principalmente a diopsídio, carbonatos, perovskita, apatita, melanita (amostra 4) e nontronita (amostras 11 e 12). Outros minerais portadores de cálcio

que ocorrem em quantidade minoritária são titanita, monazita, zirconolita e fosfatos secundários (rabdofânio – amostras 11 e 12 e crandalita – amostra 12). Microanálises de barita e minerais micáceos indicaram pequenas quantidades de CaO. Destes minerais, os carbonatos correspondem aos principais contaminantes dos concentrados de apatita produzidos a partir das 12 amostras e também dos concentrados CG e CGR da usina de concentração de Tapira-MG. Outros minerais portadores de cálcio presentes nos concentrados ocorrem em quantidades inferiores a 1% e são diopsídio, monazita, barita, perovskita, minerais micáceos, melanita (amostra 4) e nontronita (amostra 11).

- Os grupos de minérios não podem ser separados com base somente nos teores dos elementos maiores de análises químicas, com exceção dos clinopiroxenitos argilizados que podem ser identificados pelo elevado teor em Al_2O_3 (>4%) e em Fe_2O_3 (~26%). Os valores semelhantes são justificados pelo fato dos clinopiroxenitos serem compostos basicamente pelos mesmos minerais, variando somente suas proporções, e de que minerais diferentes podem possuir os mesmos elementos em sua estrutura, como por exemplo o Ca, que está presente na apatita, diopsídio, perovskita, titanita, carbonatos, monazita e granada.
- Os menores teores de P_2O_5 (cerca de 3,4%), o que corresponde a aproximadamente 8% de apatita, ocorrem nas amostras 2 e 5 de clinopiroxenitos pouco alterados. Os maiores teores foram observados nas amostras 10 – clinopiroxenito pouco alterado (~9,6%) e 11 – clinopiroxenito argilizado (~11,8%), o que corresponde a cerca de 23% e 28% de apatita, respectivamente. Em termos de grupos de rochas, os clinopiroxenitos argilizados e os ricos em magnetita e perovskita mostram os valores mais elevados de P_2O_5 . Através dos estudos por fração granulométrica, verificou-se que o teor de P_2O_5 na maioria das amostras (exceção as amostras 4 e 11) possui tendência geral de aumento da fração mais grossa (+0,210mm) em direção às frações mais finas (-0,074 +0,037mm), seguido de sua diminuição na fração -0,037mm. O maior teor de P_2O_5 concentra-se então na fração -0,074 +0,037mm, sendo essa fração responsável por cerca de 14-17% do total de P_2O_5 .

- Os teores mais elevados em ETR foram observados na amostra 11 – clinopiroxenito argilizado (cerca de 0,6%), amostra 10 – clinopiroxenito pouco alterado (cerca de 0,5%) e nas amostras 3, 6, 7 e 8 – clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (cerca de 0,4 - 0,5%). Esse fato está relacionado à maior quantidade de perovskita e/ou apatita presente nessas amostras, minerais esses principais portadores de ETR em Tapira. Outros minerais portadores de ETR correspondem a monazita, observada principalmente nas amostras 10 e 11, fosfatos secundários do grupo da crandalita (amostra 12) e do grupo do rhabdofânio (amostras 11 e 12), bem como escassos carbonato de Sr, Ca e ETR – provável ancilita (amostra 8) e zirconolita com ETR (amostra 5).
- Micronálises por EDS da granada presente na amostra 4 (clinopiroxenito micáceo) indicam que a mesma trata-se de andradita do tipo melanita, sendo rica em Ca (34,13 - 37,82% de CaO), pobre em Al (<2,36% de Al₂O₃) e com teores de TiO₂ variando entre 0,35% até 14,02%.
- Microanálises por WDS da perovskita indicam substituições do cátion Ca²⁺ por ETR³⁺, Na⁺ e Sr²⁺ e do Ti⁴⁺ por Nb⁵⁺ e Fe²⁺. Os óxidos de terras-raras na perovskita possuem valores entre 2,93 a 3,49% indicando que este mineral corresponde ao principal hospedeiro de ETR dos clinopiroxenitos da mina de Tapira.
- Resultados de espectrometria de infravermelho juntamente com microanálises por WDS indicam que a apatita presente nas 12 amostras de minério da mina de Tapira apresenta composição de carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita. Foi verificada a presença de substituições no sítio do Ca²⁺ principalmente por Sr²⁺ e ETR³⁺, ocorrendo também Na⁺, Mg²⁺ e Fe²⁺; no grupo PO₄²⁻ por SiO₄⁴⁻ e CO₃²⁻ e do sítio monovalente F por OH⁻. Os teores médios de SrO na apatita variam de 0,66% a 1,37%; de F variam entre 1,02% a 1,82%. Com relação aos óxidos de terras-raras, os teores obtidos são <1% na maioria das amostras, sendo exceção a apatita da amostra 10 – clinopiroxenito pouco alterado (1,93%), amostra 9 – clinopiroxenito micáceo (1,45%) e amostra 8 – clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita (1,47%).

- Observações aos microscópios óptico e eletrônico de varredura mostram que os carbonatos presentes nos concentrados ocorrem como grãos liberados, como inclusões na apatita ou como vênulas na apatita. Esta informação indica que é possível a obtenção de concentrados mais puros de apatita com a utilização de reagentes mais adequados que melhorem a seletividade apatita-carbonatos. Porém, as relações texturais entre a apatita e os minerais portadores de cálcio (principalmente os carbonatos) indicam que concentrados totalmente puros são impossíveis de se obter, uma vez que seria necessária uma moagem excessiva do minério.
- O índice de liberação da apatita na fração $-0,210 +0,149\text{mm}$ varia entre 87% a 95% para a maioria das amostras. São exceções as amostras 4 e 7, onde os índices de liberação são mais baixos (84% e 82%, respectivamente), estando a apatita principalmente associada com os carbonatos, e a amostra 9, onde o índice de liberação da apatita atinge cerca de 97%.
- Como a apatita presente nas 12 amostras de minério da mina de Tapira é essencialmente primária, isto é, não mostra apatita secundária associada, acredita-se que teria um bom desempenho no processo de flotação. Porém, o que deve ser levado em consideração é sua seletividade em relação aos minerais de ganga.

Acredita-se que o conhecimento detalhado da mineralogia e características de cada amostra de minério a ser processada será de grande importância para a adequação do processo de concentração. Os resultados mostram que, apesar de todas as 12 amostras serem classificadas como clinopiroxenitos, elas apresentam variações modais na composição, o que influencia na escolha dos reagentes de flotação mais apropriados, permitindo uma melhora do concentrado produzido, através de uma melhor recuperação da apatita. Deve-se avaliar a possibilidade de tipos de amostras diferentes serem tratados separadamente ou através de blendagens para que a recuperação da apatita não diminua em função de problemas de seletividade entre a apatita e os minerais de ganga.

8 – CONHECIMENTOS GERADOS A PARTIR DESTA TESE

O estudo de caracterização mineralógica em diferentes amostras de minério fosfático rico em carbonatos e silicatos, provenientes de partes mais profundas da mina de Tapira-MG, contribuiu para o conhecimento detalhado da mineralogia em associação com a apatita e suas relações texturais, o que auxiliará na previsão do comportamento destes minérios no processo de concentração por flotação. Ressalta-se a caracterização microestrutural dos principais constituintes minerais destes diferentes tipos de minério, utilizando-se as técnicas de microscopias óptica e eletrônica de varredura e microanálises EDS e WDS.

Destaca-se a importância do estudo para a verificação da forma de ocorrência dos carbonatos no minério (principalmente sob a forma de vênulas ou inclusões nos cristais de apatita), sendo útil para a explicação de sua presença nos concentrados.

Caracterização precisa dos minerais micáceos como sendo principalmente filossilicatos de camadas mistas, formados por diferentes proporções de flogopita e vermiculita e localmente biotita e vermiculita.

A identificação de somente um tipo de apatita nos diferentes tipos de minérios estudados, sendo esta primária, bem formada e de superfície geralmente lisa e límpida, é importante para explicar seu bom desempenho na flotação. Ressalta-se a classificação precisa da composição da apatita como carbonato-estrôncio-flúor-hidroxiapatita, a partir da técnica de espectrometria de infravermelho juntamente com microanálises WDS.

9 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste trabalho, sugere-se que sejam realizados estudos de flotação nestas mesmas amostras individuais ou em grupos de minério com características mineralógicas semelhantes definidos nesta tese. Estes estudos teriam como objetivo definir as condições de flotação para cada grupo de amostra com características mineralógicas diferentes. A partir dos resultados obtidos seria possível ajustar as condições operacionais da unidade industrial de flotação em função do minério alimentado, de forma a obter uma separação mais eficiente da apatita com relação aos minerais de ganga. Este estudo é de fundamental importância para o planejamento da lavra na jazida de Tapira.

10 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, L. O. A. de. Complexo de mineração de Tapira (CMT) – Dados gerais. Tapira: Fosfertil – Grupo Fertifos, 2000. 18p (Relatório Interno).
- ALVARENGA, L. C. de. Novo plano integrado de aproveitamento econômico – “PIAE” do jazimento de fosfato e titânio de Tapira - MG. 1996. 71p.
- ALVES, B. P. Distrito nióbio-titanífero de Tapira. Rio de Janeiro: DNPM – Divisão de Fomento da Produção Mineral, 1960. Bol. 108, 41p.
- ASSIS, S. M. de, MAIA, G. da S., COELHO, E. M. & SILVA, J. M. da. Contribuição à interpretação das características de fluatibilidade do sistema calcita/apatita. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minério e Hidrometalurgia, 11, 1985, Natal, RGN. Anais... Natal: Universidade Federal do Rio grande do Norte, 1985, v.1, p. 87-101.
- ASSIS, S. M. de, VIANA, S. H. M. & SILVA, J. M. da. Calcitas, dolomitas e apatitas. Algumas características inerentes x microflotação. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minério e Hidrometalurgia, 12, 1987, Rio de Janeiro, RJ. Anais...Rio de Janeiro, 1987, v.1, p. 265-80.
- ASSIS, S. M. & BRANDÃO, P. R. G. Os minerais micáceos do minério fosfático de Tapira. Parte I. Estudos com os minérios micáceos puros. *Brasil Mineral*, No. 175, p. 32-36, 1999.
- ATHENA MINERALOGY: Systematic list of minerals – Phosphates. Disponível na Internet <http://un2sg4.unige.ch/athena/mineral/minppc17.html>.
- BARBOSA, J. B. S. O sistema Si (Li) de espectrometria de emissão de raios X e sua aplicação na análise quantitativa de elementos de terras raras. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG, 1985. 203 p. (Dissertação, Mestrado no Curso de Pós-graduação em Ciência e Técnicas Nucleares - CCTN).
- BARBOSA, J. B. S. & PEREIRA, J. dos S. J. Determinação de elementos de terras raras por espectrometria de energia de raios X com excitação por radioisótopo. In:

- ENAN – Encontro de Aplicações Nucleares, III, 1995, Águas de Lindóia, SP. Anais...Águas de Lindóia, 1995, v.II, p. 780-785.
- BARROS, L. A. F de; FILHO, L. S. & PERES, A. E. C. Plant practice innovations in a phosphate concentrator. *Minerals Engineering*, v. 14, No. 1, p. 117-121, 2001.
- BIONDI, J. C. *Depósitos de minerais metálicos de filiação magmática*. São Paulo: T. A. Queiroz, 1986. 602 p.
- BRANDÃO, P. R. G., ARAUJO, A. C. de & PERES, A. E. C. Espectrofotometria infravermelha na investigação de espécies adsorvidas. In: Simpósio EPUSP de Caracterização Tecnológica na Engenharia e Indústria Mineral, 1990, São Paulo. Anais... São Paulo: coord. Técnica de H. Kahn, 1990. p. 211-230.
- BRANDÃO, P. R. G. & RODRIGUES, A. J. The degree of crystallinity and the crystal chemistry of apatites: implications to processing. In: ICAM'96 – International Congress on Applied Mineralogy, 5, 1996, Warsaw, Poland. Publicação da SUBDAN-DRUK s. c., 1997. p.116-120.
- BRANDÃO, P. R. G. Métodos de instrumentação e análise. Belo Horizonte: Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, 2000. (Notas de aula).
- BRIGATTI, M. F., MEDICI, L., SACCANI, E. & VACCARO, C. Crystal chemistry and petrologic significance of Fe³⁺- rich phlogopite from the Tapira carbonatite complex, Brazil. *American Mineralogist*, v. 81, p. 913-927, 1996.
- BROD, J. A. Petrology and geochemistry of the Tapira alkaline complex, Minas Gerais State, Brazil. England: University of Durham, 1999. 486 p. (Thesis, Doctor of Philosophy).
- BROD, J. A., GIBSON, S. A., THOMPSON, R. N., JUNQUEIRA-BROD, T. C., SEER, H. J., MORAES, L. C. de & BOAVENTURA, G. R. The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba igneous province (APIP) southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n°. 3, p. 404-408, 2000.

- CHAKHMOURADIAN, A. R. & MITCHELL, R. H. Niobian ilmenite, hydroxyapatite and sulfatian monazite: alternative hosts for incompatible elements in calcite kimberlite from Internatsional'Naya, Yakutia. *The Canadian Mineralogist*, v. 37, p. 1177-1189, 1999.
- CHIA, L. & RICKETTS, S. *Basic techniques and experiments in infrared and FT-IR spectroscopy*. Ed. Perkin Elmer, Connecticut USA: 1988. 103 p.
- CRAIG, J. R. & VAUGHAN, D. J. *Ore microscopy & ore petrography*. 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- COMODI, P., LIU, Y. STOPPA, F. & WOOLLEY, A. R. A multi-method analysis of Si-, S- and REE-rich apatite from a new find of kalsilite-bearing leucitite (Abruzzi, Italy). *Mineralogical Magazine*, v. 63, p. 661-672, 1999.
- CRUZ, F. F. & CHENEY, T.M. Recursos de fosfato no complexo carbonatítico de Tapira, MG. In: Congr. Bras. Geol., 29, 1976, Ouro Preto. Anais... Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1976, v.1. p. 89-107.
- CULLITY, B. D. *Elements of X-ray diffraction*. 3. Ed. New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1967. 514p.
- DANA, J. D. & DANA, E. S. *The system of mineralogy*. 7. Ed. New York: John Wiley & Sons, v. II, 1951. p. 877-889.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. *Minerais constituintes das rochas – uma introdução*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1981. 558p.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. *An introduction to rock forming minerals*. Essex, Longman. 2nd ed, 1992. 695p.
- DUTRA, C. V. & GOMES, C. B. A fluorescência de raios X na geologia. In: GOMES, C. B. *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Edgard Blücher LTDA - Prominério, 1984. p. 84-120.

- DUTRA, C. V. & FORMOSO, M. L. L. Algumas considerações sobre a distribuição de ETR em apatitas. In: Congr. Bras. Geoquímica., 3, 1991, São Paulo. Resumos... São Paulo: IG/USP, v. 2, 1991. p. 640-646.
- EL FEKI, H., SAVARIAULT, J. M., BEM SALAH, A. & JEMAL, M. Sodium and carbonate distribution in substituted calcium hydroxyapatite. *Solid State Sciences*, v. 2, p. 577-586, 2000.
- EVENSEN, N. M., HAMILTON, P. J. & O'NIONS, R. K. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 42, p. 1199-1212, 1978.
- FLEET, M. E. & PAN, Y. Site preference of rare earth elements in fluorapatite. *American Mineralogist*, v. 80, p. 329-335, 1995.
- FLEET, M. E. & PAN, Y. Site preference of rare earth elements in fluorapatite: binary (LREE + HREE) – substituted crystals. *American Mineralogist*, v. 82, p. 870-877, 1997.
- FORMOSO, M. L. L. Difractometria de raios X. In: GOMES, C. B. *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda: Prominério, 1984. p. 1-43.
- FROLOV, A. A. Vertical zonation in deposition of ore, as in ultrabasic-alkaline rocks and carbonatites. *International Geology Review*, v. 13, n°. 5, p. 685-695, 1971.
- FUSARO, R., ALVARENGA, L. C. de, BARROS, L. A. F. de, BARROS, I. V. & GROSSI SAD, J. H. Panorama do fosfato em Minas Gerais. In: Simp. Geol. Minas Gerais, 4, 1987, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1987. p. 1-31.
- GASPAR, J. C., BROD, J. A., SGARBI, P. B. A., JUNQUEIRA-BROD, T. C. & ARAÚJO, A. L. N. A review of the cretaceous alkaline magmatism in the western Minas Gerais and southern Goiás. In: International Geological Congress, 31, 2000, Rio de Janeiro. CD

- GAUDIN, A. M. *Principles of mineral dressing*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1939. 554 p.
- GOLDSTEIN, J. L., NEWBURY, D. E., ECHLIN, P., JOY, D. C., ROMIG, A. D. Jr., LYMAN, C. E., FIORI, C., LIFSHIN, E. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. 2. ed. New York: Plenum Press, 1992. 820p.
- GOMES, C. B. Microsonda eletrônica: princípios e aplicações na geologia. In: GOMES, C. B. *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo: Edgard Blücher Ltda: Prominério, 1984. p. 159-208.
- GOMES, C. B., RUBERTI, E. & MORBIDELLI, L. Carbonatite complexes from Brazil: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 3, n°. 1, p. 51-63, 1990.
- GONÇALVES, M. de L. S. S. *Métodos instrumentais para análise de soluções*. 1. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1983. 789p.
- GROSSI SAD, J. H. & TORRES, N. Geologia e recursos minerais do complexo de Tapira – MG, Brasil. Belo Horizonte: Geologia e Sondagens Limitada, 1971. 68 p.
- GROSSI SAD, J. H. Complexos ultramáficos alcalinos com carbonatito do Brasil meridional (com ênfase especial sobre os complexos da região do Alto Paranaíba). In: Seminário de atualização em exploração mineral, 1, 1972, Rio de Janeiro. DNPM/CPRM, 58p. (inédito).
- GROSSI SAD, J. H. & TORRES, N. Mineral exploration in the Tapira complex, Minas Gerais, Brazil. In: International Symposium on Carbonatites, 1976, Poços de Caldas, Minas Gerais. 50p.
- GROSSI SAD, J. H. Modelagem geológica do jazimento de fosfato de Tapira, Minas Gerais. Belo Horizonte, GEOSOL – Geologia e Sondagens Ltda, 1999. 24p. (Relatório).
- HABESCH, R. Curso de manutenção de microscópio óptico. São Carlos: Instituto de Física de São Carlos – USP, 1996. 19p.

- HASUI, Y. & CORDANI, U. G. Idades potássio-argônio de rochas eruptivas mesozóicas do oeste mineiro e sul de Goiás. In: Congr. Bras. Geol., 22, 1968, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1968. p. 139-143.
- HEINRICH, E. W. Contrasts in the anatomy of neighboring alkalic carbonatitic complexes. In: Simpósio Internacional de Carbonatitos, 1, 1976, Poços de Caldas, MG. Anais... Belo Horizonte: Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1978, p. 23-36.
- HENDERSON, P. *Rare earth element geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1984. 510 p.
- HUGHES, J. M., CAMERON, M. & MARIANO, A. N. Rare-earth-element ordering and structural variations in natural rare-earth-bearing apatites. *American Mineralogist*, v. 76, p. 1165-1173, 1991.
- KAHN, H. Caracterização mineralógica e tecnológica da jazida de fosfato do maciço alcalino de Anitápolis, SC. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 1988. 219 p. (Dissertação, Mestrado em Mineralogia e Petrologia).
- KAHN, H. Microscopia eletrônica de varredura e microanálise. São Paulo: III Curso de Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Mineraias, Escola Politécnica da USP, 2001, 10p. (Notas de aula).
- KLEIN, C. & HURLBUT, C. S. JR. *Manual of mineralogy*. 20. Edição. New York: Editora John Wiley & Sons, Inc., 1985, 596p.
- LACOUT, J. L., NOUNAH, A. & FERHAT, M. Strontium-cadmium substitution in hydroxy- and fluor-apatites. *Ann. Chim. Sci. Mat.*, v. 23, p. 57-60, 1998.
- LAPIN, A. V., IWANUCH, W. & PLOSHKO, V. V. Carbonatitos lineares de cinturões móveis: uma síntese. *Rev. Bras. Geociências*, São Paulo, v. 29, n° 4, p. 483-490, dezembro, 1999.
- LE MAITRE, R. W. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Osford: Blackwell Scientific Publications, 1989. 193p.

- LEONARDOS, O. H. Carbonatitos com apatita e pirocloro. Rio de Janeiro: DNPM – Divisão de Fomento da Produção Mineral, 1956. Avulso 80, 30 p.
- LENHARO, S. L. R. Caracterização mineralógica/tecnológica das apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfato. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994. 194 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral).
- LIU, Y. & COMODI, P. Some aspects of the crystal-chemistry of apatites. *Mineralogical Magazine*, v. 57, p. 709-719, 1993.
- MARIANO, A. N. The application of cathodoluminescence for carbonatite exploration and characterization. In: Simpósio Internacional de Carbonatitos, 1, 1976, Poços de Caldas, MG. Anais... Belo Horizonte: Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1978, p. 39-57.
- McARTHUR, J. M. Systematic variations in the contents of Na, Sr, CO₃ and SO₄ in marine carbonate-fluorapatite and their relation to weathering. *Chemical Geology*, v. 21, p. 89-112, 1978.
- McARTHUR, J. M. Francolite geochemistry – compositional controls during formation, diagenesis, metamorphism and weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 49, p. 23-35, 1985.
- McCLELLAN, G. H. & LEHR, J. R. Crystal chemical investigation of natural apatites. *The American Mineralogist*, v. 54, p. 1374-1391, 1969.
- McCLELLAN, G. H. Mineralogy of carbonate fluorapatites. *Journal of the Geological Society of London*, v. 137, p. 675-681, 1980.
- MELFI, A. J., SOUBIÈS, F. & TOLEDO-GROKE, M. C. Comportamento do nióbio nas alterações das rochas do complexo alcalino-carbonatítico de Tapira, Minas Gerais. In: Congr. Bras. Geoquímica., 3, 1991, São Paulo. Resumos... São Paulo: IG/USP, v. 1, 1991. p. 85-87.
- MENDES, S. Caracterização mineralógica de amostras do circuito de flotação – estudo de pilhas com alta RCP - Tapira, 1999. 8P. (Relatório SEPCO).

- MITCHELL, R. H. Perovskites: a revised classification scheme for an important rare earth element host in alkaline rocks. In: JONES, A. P., WALL, F. & WILLIAMS, C. T. *Rare Earth Minerals – Chemistry, origin and ore deposits*. London: Chapman & Hall, 1996. p. 41-76.
- MITCHELL, R. H., XIONG, J., MARIANO, A. N. & FLEET, M. E. Rare-earth-element-activated cathodoluminescence in apatite. *The Canadian Mineralogist*, v. 35, p. 979-998, 1997.
- MORBIDELLI, L., GOMES, C. B., BECCALUVA, L., BROTZU, P., CONTE, A. M., RUBERTI, E. & TRAVERSA, G. Mineralogical, petrological and geochemical aspects of alkaline and alkaline-carbonatite associations from Brazil. *Earth-Science Reviews*, v. 39, p. 135-168, 1995.
- MORTEANI, G. & PREINFALK, C. REE distribution and REE carriers in laterites formed on the alkaline complexes of Araxá and Catalão (Brazil). In: JONES, A. P., WALL, F. & WILLIAMS, C. T. *Rare Earth Minerals – Chemistry, origin and ore deposits*. London: Chapman & Hall, 1996. p. 227-255.
- PORPHÍRIO, N. H. & BARBOSA, M. I. M. Caracterização mineralógica de minérios. In: LUZ, A. B da, POSSA, M. V. & ALMEIDA, S. L. de. *Tratamento de Minérios*. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1998. p. 59-104.
- RATTI, G. Técnicas de análise química de compostos inorgânicos. São Paulo: III Curso de Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Mineraias, Escola Politécnica da USP, 2001, 22p. (Notas de aula).
- REGNIER, P., LASAGA, A. C., BERNER, R. A., HAN, O. H. & ZILM, K. W. Mechanism of CO₃²⁻ substitution in carbonate-fluorapatite: evidence from FTIR spectroscopy, C NMR, and quantum mechanical calculations. *American Mineralogist*, v. 79, p. 809-818, 1994.
- REYNOLDS, R. C. Interstratified clay minerals. In: BRINDLEY, G. W. and BROWN, G. *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Monograph No. 5*. London: Mineralogical Society, 1980. p. 249-303.

RIBEIRO, C. C. Apatita. Relatório interno Ultrafertil, Maio, 2002, 28p.

RODRIGUES, A. J. Influência dos aspectos cristalquímicos na flotabilidade das apatitas. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 1992. 264 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

RODRIGUES, A. J. & BRANDÃO, P. R. G. The influence of crystal chemistry properties on the floatability of apatites with sodium oleate. *Minerals Engineering*, v. 6, No. 6, p. 643-653, 1993.

RODRIGUES, C. de S. & LIMA, P. R. A. S. Complexos carbonatíticos do Brasil: geologia. São Paulo: CBMM - Departamento de Geologia, 1984, p. 1-17.

ROSS, S. D. Phosphates and others oxy-anions of group V. In: FARMER, V. C. *The infrared spectra of minerals*. London: Mineralogical Society, 1974. p. 383-444.

SANTOS, C. N. dos. Estudo mineralógico e micromorfológico das apatitas da Jazida de Tapira (MG) – correlação com o processo de beneficiamento. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 1998. 50p. (Monografia de trabalho de formatura).

SANTOS, R. V. & CLAYTON, R. N. The carbonate in high-temperature apatite: An analytical method applied to apatite from the Jacupiranga alkaline complex. *American Mineralogist*, v. 80, p. 336-344, 1995.

SGARBI, P. B. A., HEAMAN, L. M. & GASPAR, J. C. U-Pb perovskite ages for Brazilian kamafugites. In: International Geological Congress, 31, 2000, Rio de Janeiro. CD

SILVA, J. M. da, FILHO, L. de S. L., COELHO, E. M. & ASSIS, S. M. de. Constituição de apatitas brasileiras e hidrofobicidade na presença de oleato de sódio. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minério e Hidrometalurgia, 11, 1985, Natal, RGN. Anais... Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1985, v. 1, p. 77-86.

SKOOG, D. A., HOLLER, F. J. & NIEMAN, T. A. *Principles instrumental analysis*. Orlando, Florida: Saunders College Publishing 1998. 849 p.

SOBRINHO, E. G. Prospecção de urânio na chaminé alcalina de Tapira – Minas Gerais. Rio de Janeiro: Diretoria Executiva da Área Mineral (CNEN), 1974. Boletim 10, 16p.

SOUBIÈS, F., MELFI, A. J. & AUTEFAGE, F. Comportamento geoquímico dos elementos terras raras nos alteritos da jazida de fosfato e titânio de Tapira (Minas Gerais, Brasil): a importância dos fosfatos. *Rev. Bras. Geociências*, São Paulo, v. 21, n° 1, p. 3-16, março, 1991.

SUMÁRIO MINERAL 2002 – Fosfato – Antônio Eleutério de Souza – DNPM. p. 70-71. Disponível na Internet <http://www.dnpm.gov.br/sm2002.html>.

THOREZ, J. *Phyllosilicates and clay minerals – a laboratory handbook for their X-ray diffraction analysis*. Dison, Belgium: Editions G. Lelotte, 1975. 578p.

VIEIRA, M. A. de M. Complexo alcalino de Tapira, Minas Gerais: mineralogia e geoquímica da distribuição de terras raras no perfil de intemperismo. Belo Horizonte: Instituto de Geociências da UFMG, 1997. 95 p. (Dissertação, Mestrado em Geodinâmica e Evolução Crustal).

VOGEL, A. *Análise inorgânica quantitativa*. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara S. A., 1981. 690p.

ANEXO 1
CARACTERIZAÇÃO DA APATITA POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA NAS
AMOSTRAS DA MINA

- Clinopiroxenitos pouco alterados (amostras 2, 5 e 10)

Tabela A1.1 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 2 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	73% liberada 27% mista	88% liberada 12% mista	94% liberada 6% mista	94% liberada 6% mista	95% liberada 5% mista
Associação dos grãos mistos	6% carbonatos 2% piroxênio 6% óxidos (Fe, Ca, Ti) 6% cb + óxidos (Fe, Ca, Ti) 5% cb + silicatos 2% silicatos + hid. Ferro	7% carbonatos 1% piroxênio 3% óxidos/hid. Ferro 1% cb + minerais micáceos	1% carbonatos 1% cb + minerais micáceos 3% óxidos/hid. Ferro 1% cb + magnetita	3% carbonatos 2% silicatos 1% hid. Ferro <1% cb + hid. Ferro	4% carbonatos <1% minerais micáceos <1% hid. Ferro
Aspecto	51% límpida 31% com inclusões fluidas 8% com inclusões de carbonatos 8% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo 2% recobrimento parcial por hid. Ferro	66% límpida 26% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 5% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo 2% recobrimento parcial por hid. de ferro	80% límpida 14% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo 3% recobrimento parcial por hid. Ferro	63% límpida 33% com inclusões fluidas <1% com inclusões de carbonatos 1% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo 2% recobrimento parcial por hid. de ferro	53% límpida 40% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo 2% recobrimento parcial por hid. Ferro

Silicatos = quartzo, minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

Tabela A1.2 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 5 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	86% liberada 12% mista	91% liberada 9% mista	95% liberada 5% mista	95% liberada 5% mista	97% liberada 3% mista
Associação dos grãos mistos	11% carbonatos 1% piroxênio 2% cb + silicatos	7% carbonatos 1% piroxênio 1% perovskita	4% carbonatos 1% cb + minerais micáceos	4% carbonatos 1% cb + hid. Ferro	2,5% carbonatos 0,5% minerais micáceos
Aspecto	55% límpida 36% com inclusões fluidas 4% com inclusões de carbonatos 5% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo	74% límpida 21% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo 1% recobrimento parcial por hid. de ferro	62% límpida 35% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 1% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo	57% límpida 37% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo <1% recobrimento parcial por hid. de ferro	74% límpida 23% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos e quartzo

Silicatos = minerais micáceos e piroxênio

Tabela A1.3 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 10 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	58% liberada 42% mista	87% liberada 13% mista	89% liberada 11% mista	94% liberada 6% mista	98% liberada 2% mista
Associação dos grãos mistos	3% silicatos 23% carbonatos 4% óxidos(Fe, Ca,Ti)/hid. Fe 9% cb + óx. (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe 1% silicatos + cb <1% óxidos (Ca, Ti) + quartzo 1% piroxênio + hid. Fe	2% silicatos 8% carbonatos 2% óx. (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe <1% cb + hid. Fe <1% piroxênio + cb + magnetita	<1% quartzo 9% carbonatos 1% óxidos (Ca,Ti)/hid. Fe <1% cb. + hid. Fe	<1% silicatos 4% carbonatos 1% óx. (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe <1% cb + magnetita/hid. Fe	1,5% carbonatos 0,5% hid. Fe
Aspecto	71% límpida 1% com inclusões fluidas 7% com inclusões de carbonatos 19% cortada por vênulas de carbonatos 1% cortada por vênulas de quartzo 1% recobrimento parcial por hid. ferro	75% límpida 8% com inclusões fluidas 5% com inclusões de carbonatos 9% cortada por vênulas de carbonatos <1% cortada por vênulas de quartzo 2% recobrimento parcial por hid. ferro	81% límpida 7% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos 8% cortada por vênulas de carbonatos <1% cortada por vênulas de quartzo <1% recobrimento parcial por hid. ferro	92% límpida 3% com inclusões fluidas <1% com inclusões de carbonatos 3% cortada por vênulas de carbonatos <1% cortada por vênulas de quartzo 1% recobrimento parcial por hid. ferro	98% límpida 1% cortada por vênulas de carbonatos 1% recobrimento parcial por hid. Ferro

Silicatos = quartzo, minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

- Clinopiroxenitos micáceos (amostras 1, 4 e 9)

Tabela A1.4 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 1 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	92% liberada 8% mista	93% liberada 7% mista	96% liberada 4% mista	96% liberada 4% mista	97% liberada 3% mista
Associação dos grãos mistos	3% silicatos 5% óxidos(Fe, Ca,Ti)/hid. Fe	2% silicatos 5% óxidos (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe <1% cb + anatásio	2% silicatos 2% óxidos (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe	2% silicatos 2% magnetita/hid. Fe	1% silicatos 2% óxidos (Fe, Ti)/hid. Fe
Aspecto	61% límpida 2% com inclusões fluidas 34% com inclusões de carbonatos 3% recobrimento parcial por hid. ferro	65% límpida 5% com inclusões fluidas 27% com inclusões de carbonatos 3% recobrimento parcial por hid. ferro	65% límpida 6% com inclusões fluidas 28% com inclusões de carbonatos 1% recobrimento parcial por hid. ferro	74% límpida 6% com inclusões fluidas 17% com inclusões de carbonatos 3% recobrimento parcial por hid. ferro	91% límpida 3% com inclusões fluidas 5% com inclusões de carbonatos 1% recobrimento parcial por hid. Ferro

Silicatos = minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

Tabela A1.5 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 4 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	73% liberada 27% mista	84% liberada 16% mista	84% liberada 16% mista	90% liberada 10% mista	93% liberada 7% mista
Associação dos grãos mistos	4% minerais micáceos 8% carbonatos 2% perovskita 4% óxidos (Fe, Ca, Ti) + cb 5% óx.(Fe, Ca, Ti) + silicatos 2% silicatos + cb 2% perovskita + cb + silicatos	3% minerais micáceos 8% carbonatos 3% óxidos (Fe, Ca, Ti) <1% cb + piroxênio 2% cb + perovskita	4% silicatos 8% carbonatos 3% óxidos (Ca, Ti)/ hid. Fe 1% perovskita + piroxênio	4% silicatos 4% carbonatos 2% perovskita	6% carbonatos 1% magnetita + anatásio
Aspecto	58% límpida 30% com inclusões fluidas 4% com inclusões de carbonatos 8% cortada por vênulas de carbonatos	50% límpida 38% com inclusões fluidas 5% com inclusões de carbonatos 7% cortada por vênulas de carbonatos	57% límpida 26% com inclusões fluidas 7% com inclusões de carbonatos 7% cortada por vênulas de carbonatos 3% recobrimento parcial por hid. Ferro	64% límpida 29% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos 4% cortada por vênulas de carbonatos	60% límpida 34% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 5% cortada por vênulas de carbonatos

Silicatos = minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

Tabela A1.6 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 9 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	91% liberada 9% mista	97% liberada 3% mista	98% liberada 2% mista	98% liberada 2% mista	98% liberada 2% mista
Associação dos grãos mistos	1% carbonatos 14% silicatos 17% óxidos(Fe, Ca,Ti)/hid. Fe 1% cb + magnetita 1% silicatos + magnetita	1% silicatos 2% óxidos (Fe, Ca, Ti)	2% silicatos <1% óxidos (Fe, Ca, Ti)	1,5% silicatos <1% óxidos (Fe, Ti) <1% carbonatos	1,5% silicatos <1% óxidos (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe
Aspecto	60% límpida 2% com inclusões fluidas 35% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo <1% recobrimento parcial por hid. ferro	74% límpida 2% com inclusões fluidas 24% com inclusões de carbonatos	73% límpida 6% com inclusões fluidas 21% com inclusões de carbonatos	88% límpida 3% com inclusões fluidas 9% com inclusões de carbonatos	92% límpida 3% com inclusões fluidas 4% com inclusões de carbonatos 1% recobrimento parcial por hid. ferro

Silicatos = quartzo, minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

- Clinopiroxenitos argilizados (amostras 11 e 12)

Tabela A1.7 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 11 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	88% liberada 12% mista	92% liberada 8% mista	95% liberada 5% mista	95% liberada 5% mista	96% liberada 4% mista
Associação dos grãos mistos	6% óxidos (Fe, Ca, Ti) 3% hid. Ferro 2% silicatos <1% anatásio + argilomineral	5% óxidos (Fe, Ca, Ti) 2% hid. Ferro 1% silicatos <1% anatásio + argilomineral	1% óxidos (Ca, Ti) 3% hid. Ferro 1% argilomineral	1% óxidos (Fe, Ti) 3% hid. Ferro 1% silicatos	1% óxidos (Fe, Ti) 3% hid. Ferro 1% argilomineral
Aspecto	56% límpida 31% com inclusões fluidas 8% com inclusões de carbonatos <1% cortada por vênulas de quartzo 4% recobrimento parcial por hid. ferro	66% límpida 23% com inclusões fluidas 7% com inclusões de carbonatos 4% recobrimento parcial por hid. ferro	74% límpida 20% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos 3% recobrimento parcial por hid. ferro	70% límpida 21% com inclusões fluidas 4% com inclusões de carbonatos 5% recobrimento parcial por hid. ferro	82% límpida 11% com inclusões fluidas 4% com inclusões de carbonatos 3% recobrimento parcial por hid. ferro

Silicatos = quartzo, minerais micáceos e argilomineral; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

Tabela A1.8 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 12 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	87% liberada 13% mista	95% liberada 5% mista	96% liberada 4% mista	96% liberada 4% mista	98% liberada 2% mista
Associação dos grãos mistos	9% óxidos (Fe, Ca, Ti) 2% silicatos 2% óxidos (Fe, Ca, Ti) + silicatos	2% óxidos (Fe, Ca, Ti) <1% hid. Ferro 2% silicatos <1% óxidos (Fe, Ti) + silicatos	<1% óxidos (Fe, Ti) <1% hid. Ferro 3% silicatos	<1% anatásio 1% hid. Ferro 2% silicatos	<1% anatásio <1% hid. Ferro 1% silicatos
Aspecto	30% límpida 70% com inclusões fluidas	18% límpida 82% com inclusões fluidas	34% límpida 65% com inclusões fluidas 1% recobrimento parcial por hid. ferro	34% límpida 65% com inclusões fluidas 1% recobrimento parcial por hid. ferro	49% límpida 50% com inclusões fluidas 1% recobrimento parcial por hid. ferro

Silicatos = titanita, minerais micáceos e argilomineral; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

- Clinopiroxenitos ricos em magnetita e perovskita (amostras 3, 6, 7 e 8)

Tabela A1.9 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 3 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	73% liberada 27% mista	90% liberada 10% mista	95% liberada 5% mista	96% liberada 4% mista	98% liberada 2% mista
Associação dos grãos mistos	15% carbonatos <1% minerais micáceos 7% óxidos(Fe, Ca,Ti)/hid. Fe 3% cb + óxidos(Fe, Ca, Ti)/hid. Fe 1% cb + silicatos <1% silicatos + óxido (Ca, Ti)	5% carbonatos <1% cb + silicatos 3% óxidos (Fe,Ca,Ti)/hid.Fe 1% cb + óxido(Ca, Ti)/hid. Fe <1% cb + piroxênio + magnetita	4% carbonatos <1% piroxênio <1% magnetita <1% cb + óxidos (Ca, Ti)	3% carbonatos <1% minerais micáceos <1% hid. Ferro <1% cb + hid. Ferro	1% carbonatos <1% minerais micáceos 1% óxido (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe <1% cb + hid. Ferro
Aspecto	77% límpida 9% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 11% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo 2% recobrimento parcial por hid. Ferro	79% límpida 12% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 8% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo	82% límpida 14% com inclusões fluidas <1% com inclusões de carbonatos 3% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo	71% límpida 25% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 3% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo	70% límpida 29% com inclusões fluidas <1% com inclusões de carbonatos <1% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo <1% recobrimento parcial por hid. Ferro

Silicatos = minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

Tabela A1.10 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 6 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	76% liberada 24% mista	92% liberada 8% mista	93% liberada 7% mista	93% liberada 7% mista	98% liberada 2% mista
Associação dos grãos mistos	14% carbonatos 1% minerais micáceos 6% óxidos(Fe, Ca,Ti)/hid. Fe 2% cb + óxidos (Fe, Ca, Ti) 1% cb + piroxênio + óxi.(Fe, Ca, Ti) <1% quartzo + hid. Fe	5% carbonatos <1% piroxênio 1% óxidos (Ca, Ti)/hid. Fe 1% cb + óxido(Fe,Ca,Ti)/hid. Fe <1% cb + silicatos + hid. Fe	4% carbonatos <1% minerais micáceos <1% cb + silicatos <1% cb + óxi.(Fe, Ti)/hid. Fe 1% óxidos (Fe,Ca,Ti)/hid.Fe	6% carbonatos <1% minerais micáceos <1% hid. Ferro <1% anatásio + hid. Fe	2% carbonatos
Aspecto	78% límpida 9% com inclusões fluidas <1% com inclusões de carbonatos 12% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo <1% recobrimento parcial por hid. Ferro	84% límpida 8% com inclusões fluidas <1% com inclusões de carbonatos 7% cortada por vênulas de carbonatos <1% recobrimento parcial por hid. Ferro	89% límpida 5% com inclusões fluidas <1% com inclusões de carbonatos 5% cortada por vênulas de carbonatos	84% límpida 9% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 6% cortada por vênulas de carbonatos	89% límpida 9% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 1% cortada por vênulas de carbonatos

Silicatos = quartzo, minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

Tabela A1.11 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 7 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	76% liberada 24% mista	82% liberada 18% mista	88% liberada 12% mista	92% liberada 8% mista	95% liberada 5% mista
Associação dos grãos mistos	4% carbonatos 1% quartzo + hid. Fe 13% óxidos(Fe, Ca,Ti)/hid. Fe 6% cb + óxi(Fe, Ca, Ti)/hid. Fe	13% carbonatos 4% óxidos (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe 1% cb + óxido(Fe,Ca, Ti)	9% carbonatos <1% quartzo <1% cb + óxi.(Fe, Ca,Ti) 2% óxidos (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe	6% carbonatos 2% óxidos (Fe, Ti)/hid. Fe	3% carbonatos <1% minerais micáceos 1,5% óxido (Fe, Ti)
Aspecto	82% límpida 4% com inclusões fluidas 4% com inclusões de carbonatos 9% cortada por vênulas de carbonatos e quartzo 1% recobrimento parcial por hid. Ferro	76% límpida 2% com inclusões fluidas 5% com inclusões de carbonatos 17% cortada por vênulas de carbonatos <1% recobrimento parcial por hid. Ferro	85% límpida 4% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 10% cortada por vênulas de carbonatos	87% límpida 4% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 7% cortada por vênulas de carbonatos 1% recobrimento parcial por hid. Ferro	91% límpida 3% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 4% cortada por vênulas de carbonatos

Óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita, ilmenita e anatásio

Tabela A1.12 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra 8 da mina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	78% liberada 22% mista	87% liberada 13% mista	92% liberada 8% mista	93% liberada 7% mista	98% liberada 2% mista
Associação dos grãos mistos	<1% piroxênio 7% carbonatos 10% óxidos(Fe, Ca,Ti) 4% cb + óx. (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe <1% silicatos + cb + óx. (Fe, Ca, Ti)	<1% piroxênio 5% óxidos (Fe, Ca, Ti) 7% carbonatos <1% cb + magnetita	5% carbonatos 2% óxidos (Fe, Ca, Ti) 1% cb + óxidos (Fe, Ca, Ti)	<1% minerais micáceos 6% carbonatos <1% hidróxidos de Fe	<1% minerais micáceos 1% carbonatos <1% magnetita
Aspecto	87% límpida 3% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 7% cortada por vênulas de carbonatos <1% cortada por vênulas de quartzo <1% recobrimento parcial por hid. ferro	89% límpida 2% com inclusões de carbonatos 9% cortada por vênulas de carbonatos <1% cortada por vênulas de quartzo	89% límpida 2% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 7% cortada por vênulas de carbonatos <1% cortada por vênulas de quartzo	86% límpida 5% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos 5% cortada por vênulas de carbonatos <1% cortada por vênulas de quartzo 1% recobrimento parcial por hid. ferro	96% límpida 1% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos <1% cortada por vênulas de quartzo

Silicatos = quartzo e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

ANEXO 2
CARACTERIZAÇÃO DA APATITA POR FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA NAS
AMOSTRAS DA USINA

Tabela A2.1 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra TC11(ROM) da usina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	89% liberada 11% mista	95% liberada 5% mista	96% liberada 4% mista	96% liberada 4% mista	97% liberada 3% mista
Associação dos grãos mistos	3% carbonatos 2% silicatos 6% óxidos (Fe, Ca,Ti)/hid. Fe <1% piroxênio + magnetita	2% carbonatos 1% silicatos 1,5% óxidos (Fe, Ti)/hid. Fe 0,5% cb + silicatos	2% carbonatos <1% silicatos 1% óxidos (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe <1% cb + hematita/hid. Fe	2% carbonatos 1% silicatos 1% hid. Ferro	<1% carbonatos 1% minerais micáceos 1% hid. Ferro 1% perovskita
Aspecto	89% límpida 5% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos 3% cortada por vênulas de carbonatos	81% límpida 12% com inclusões fluidas 4% com inclusões de carbonatos 3% cortada por vênulas de carbonatos <1% recobrimento parcial por hid. de ferro	80% límpida 15% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos	80% límpida 11% com inclusões fluidas 5% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos 2% recobrimento parcial por hid. de ferro	84% límpida 9% com inclusões fluidas 5% com inclusões de carbonatos 1% cortada por vênulas de carbonatos 1% recobrimento parcial por hid. Ferro

Silicatos = quartzo, minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita e anatásio

Tabela A2.2 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra CG (concentrado grosso friável) da usina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	94% liberada 6% mista	95% liberada 5% mista	97% liberada 3% mista	97% liberada 3% mista	98% liberada 2% mista
Associação dos grãos mistos	3% carbonatos 1% silicatos <1% óxidos (Fe, Ca, Ti) 1% hid. Ferro <1% cb + óxi. (Fe, Ca, Ti)/hid. Fe <1% cb + minerais micáceos	1% carbonatos 1% silicatos 2% óxidos (Fe, Ca, Ti) 1% hid. Ferro	1% carbonatos <1% silicatos <1% óxidos (Fe, Ca, Ti) 1% hid. Ferro	1% carbonatos <1% silicatos <1% óxidos (Fe, Ca, Ti) 1% hid. Ferro	<1% carbonatos <1% minerais micáceos <1% óxido (Fe, Ti) 1% hid. Ferro <1% cb + piroxênio
Aspecto	70% límpida 17% com inclusões fluidas 7% com inclusões de carbonatos 4% cortada por vênulas de carbonatos e de quartzo 2% recobrimento parcial por hid. Ferro	79% límpida 15% com inclusões fluidas 3% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos e de quartzo 1% recobrimento parcial por hid. Ferro	85% límpida 11% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 1% cortada por vênulas de carbonatos 1% recobrimento parcial por hid. Ferro	83% límpida 12% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 1% cortada por vênulas de carbonatos 2% recobrimento parcial por hid. Ferro	89% límpida 8% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 1% cortada por vênulas de carbonatos 1% recobrimento parcial por hid. Ferro

Silicatos = quartzo, minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita, ilmenita e anatásio

Tabela A2.3 – Características da apatita por fração granulométrica na amostra CGR (concentrado granulado) da usina de Tapira-MG, obtidas pela técnica de microscopia óptica

Frações (mm)	+0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037
Forma	granular	granular	granular	granular	granular
Liberação	89% liberada 11% mista	93% liberada 7% mista	93% liberada 7% mista	94% liberada 6% mista	95% liberada 5% mista
Associação dos grãos mistos	6% carbonatos 1% silicatos 1% óxidos (Fe, Ti) 2% hid. Ferro 1% silicatos + hid. Ferro <1% cb + silicatos	4% carbonatos 1% silicatos <1% óxidos (Fe, Ca, Ti) 1% hid. Ferro <1% cb + hid. Ferro	3% carbonatos <1% silicatos <1% óxidos (Fe, Ti) 3% hid. Ferro	2% carbonatos <1% silicatos <1% óxidos (Fe, Ca, Ti) 3% hid. Ferro	1% carbonatos <1% minerais micáceos <1% óxido (Fe, Ti) 3% hid. Ferro
Aspecto	72% límpida 11% com inclusões fluidas 7% com inclusões de carbonatos 7% cortada por vênulas de carbonatos e de quartzo 3% recobrimento parcial por hid. Ferro	85% límpida 6% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 5% cortada por vênulas de carbonatos e de quartzo 2% recobrimento parcial por hid. Ferro	85% límpida 6% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 3% cortada por vênulas de carbonatos e de quartzo 4% recobrimento parcial por hid. Ferro	88% límpida 6% com inclusões fluidas 1% com inclusões de carbonatos 2% cortada por vênulas de carbonatos 3% recobrimento parcial por hid. Ferro	88% límpida 5% com inclusões fluidas 2% com inclusões de carbonatos 1% cortada por vênulas de carbonatos 4% recobrimento parcial por hid. Ferro

Silicatos = quartzo, minerais micáceos e piroxênio; óxidos (Fe, Ca, Ti) = magnetita, perovskita, ilmenita e anatásio

ANEXO 3
RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS DAS AMOSTRAS DA MINA POR
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Tabela A3.1 – Dados analíticos da amostra 1 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	4,72	7,07	7,89	7,51	7,81	6,12
Fe ₂ O ₃	18,10	18,50	16,80	15,30	15,40	16,10
MgO	12,40	10,00	10,20	10,80	10,50	11,80
CaO	18,10	21,90	22,40	21,10	20,90	15,10
Al ₂ O ₃	2,77	1,60	1,76	2,05	1,92	2,90
SiO ₂	31,90	28,40	28,20	28,70	28,70	31,70
TiO ₂	6,14	7,85	7,98	7,54	8,07	7,16
Na ₂ O	0,47	0,47	0,54	0,92	1,21	0,88
K ₂ O	0,69	0,43	0,60	0,60	0,67	1,04
BaO	0,059	0,039	0,042	0,045	0,056	0,075
SrO	0,18	0,24	0,26	0,23	0,25	0,16
ZrO ₂	0,038	0,038	0,056	0,065	0,061	0,064
ThO ₂	<0,005	<0,005	0,007	0,008	0,012	0,01
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,008	0,009	0,014	0,009	0,012	0,014
Nb ₂ O ₅	0,074	0,083	0,10	0,11	0,099	0,092
F	0,28	0,63	0,49	0,55	0,46	0,63
P.F.	4,37	2,79	3,16	3,87	4,10	6,26
La ₂ O ₃	0,084	0,11	0,13	0,12	0,13	0,12
CeO ₂	0,18	0,24	0,28	0,25	0,29	0,24
Pr ₆ O ₁₁	0,019	0,026	0,03	0,03	0,03	0,030
Nd ₂ O ₃	0,064	0,086	0,097	0,093	0,11	0,086
Sm ₂ O ₃	0,008	0,012	0,014	0,014	0,015	0,012
Eu ₂ O ₃	<0,002	0,004	<0,002	<0,002	0,005	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,007	0,008	0,009	0,009	0,009	0,008
Dy ₂ O ₃	0,006	0,007	0,004	0,008	0,007	0,006
Total	100,67	100,54	101,06	99,93	100,83	100,60

Tabela A3.2 – Dados analíticos da amostra 2 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	1,97	2,78	3,16	3,43	3,84	3,03
Fe ₂ O ₃	21,40	17,60	16,10	14,70	13,50	11,3
MgO	8,24	9,05	9,58	9,79	9,70	9,56
CaO	19,80	21,80	22,90	23,40	24,40	25,4
Al ₂ O ₃	0,90	1,07	1,16	1,12	1,14	1,01
SiO ₂	29,00	29,10	29,10	28,80	27,80	25,4
TiO ₂	12,40	10,90	9,88	9,10	8,64	6,48
Na ₂ O	0,28	0,62	0,26	0,28	0,24	0,25
K ₂ O	0,32	0,32	0,34	0,34	0,34	0,43
BaO	0,036	0,042	0,037	0,040	0,040	0,06
SrO	0,17	0,21	0,21	0,22	0,21	0,18
ZrO ₂	0,09	0,11	0,14	0,15	0,15	0,13
ThO ₂	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,009	0,009	0,007	0,008	0,009	0,008
Nb ₂ O ₅	0,14	0,13	0,12	0,11	0,098	0,09
F	0,24	0,60	0,32	0,57	0,26	0,07
P.F.	5,75	6,59	7,69	8,49	10,50	17,3
La ₂ O ₃	0,14	0,14	0,12	0,11	0,10	0,099
CeO ₂	0,31	0,30	0,25	0,24	0,22	0,19
Pr ₆ O ₁₁	0,032	0,031	0,025	0,026	0,023	0,021
Nd ₂ O ₃	0,11	0,11	0,091	0,089	0,079	0,072
Sm ₂ O ₃	0,017	0,018	0,015	0,014	0,012	0,011
Eu ₂ O ₃	0,005	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,011	0,009	0,012	0,012	0,008	0,007
Dy ₂ O ₃	0,011	0,010	0,009	0,008	0,006	0,008
Total	101,38	101,55	101,53	101,05	101,32	101,11

Tabela A3.3 – Dados analíticos da amostra 3 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	5,83	7,34	8,92	9,64	10,00	7,34
Fe ₂ O ₃	24,90	20,30	18,20	15,70	14,00	11,1
MgO	5,18	5,67	6,10	6,70	7,03	9,51
CaO	22,80	25,70	27,70	28,30	29,20	26,3
Al ₂ O ₃	0,49	0,52	0,54	0,58	0,59	0,62
SiO ₂	13,50	13,00	12,50	12,90	12,90	16,5
TiO ₂	19,80	18,40	16,90	14,80	13,40	8,85
Na ₂ O	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,12
K ₂ O	0,17	0,16	0,17	0,18	0,17	0,35
BaO	0,030	0,033	0,032	0,036	0,040	0,060
SrO	0,34	0,34	0,40	0,41	0,31	0,30
ZrO ₂	0,063	0,058	0,070	0,063	0,070	0,070
ThO ₂	0,012	0,010	0,009	0,009	<0,005	<0,005
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,013	0,013	0,013	0,014	0,014	0,012
Nb ₂ O ₅	0,19	0,16	0,15	0,14	0,11	0,082
F	0,35	0,36	0,40	0,81	0,34	0,10
P.F.	6,98	8,61	9,15	10,4	11,60	17,2
La ₂ O ₃	0,23	0,21	0,20	0,18	0,16	0,12
CeO ₂	0,52	0,46	0,43	0,39	0,34	0,25
Pr ₆ O ₁₁	0,054	0,050	0,045	0,041	0,035	0,025
Nd ₂ O ₃	0,19	0,17	0,16	0,14	0,12	0,091
Sm ₂ O ₃	0,027	0,024	0,025	0,022	0,019	0,015
Eu ₂ O ₃	0,008	0,007	0,006	0,006	<0,002	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,017	0,015	0,017	0,014	0,013	0,009
Dy ₂ O ₃	0,018	0,015	0,010	0,010	0,008	0,009
Total	101,81	101,72	102,24	101,57	100,54	99,03

Tabela A3.4 – Dados analíticos da amostra 4 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	5,01	4,11	4,00	3,92	4,14	3,21
Fe ₂ O ₃	14,10	13,30	14,20	16,10	17,20	14,30
MgO	10,80	12,30	12,50	10,60	8,45	12,40
CaO	21,80	19,20	19,20	20,70	23,30	20,00
Al ₂ O ₃	3,61	4,52	4,36	3,44	2,57	3,42
SiO ₂	25,70	28,20	28,90	27,30	25,00	27,90
TiO ₂	6,79	5,60	5,94	7,04	7,73	5,06
Na ₂ O	0,18	0,18	0,16	0,23	0,15	0,11
K ₂ O	1,74	2,04	1,85	1,46	1,18	1,32
BaO	0,15	0,18	0,04	0,15	0,12	0,12
SrO	0,29	0,26	0,24	0,25	0,30	0,25
ZrO ₂	0,10	0,091	0,090	0,09	0,087	0,079
ThO ₂	0,008	<0,005	0,007	0,008	0,015	0,009
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,006	0,008	0,008	0,007	0,009	0,008
Nb ₂ O ₅	0,074	0,056	0,056	0,074	0,075	0,046
F	0,63	0,63	0,61	0,45	0,49	0,46
P.F.	9,46	9,81	9,15	9,11	8,97	12,7
La ₂ O ₃	0,08	0,062	0,06	0,077	0,088	0,054
CeO ₂	0,19	0,15	0,14	0,18	0,21	0,12
Pr ₆ O ₁₁	0,02	0,016	0,015	0,021	0,023	0,013
Nd ₂ O ₃	0,07	0,054	0,053	0,067	0,08	0,045
Sm ₂ O ₃	0,01	0,008	0,007	0,009	0,01	0,007
Eu ₂ O ₃	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,006	0,005	0,005	0,006	0,006	0,004
Dy ₂ O ₃	0,005	<0,004	0,006	0,005	0,006	<0,004
Total	100,83	100,78	101,60	101,29	100,21	101,64

Tabela A3.5 – Dados analíticos da amostra 5 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	2,87	3,89	4,41	4,57	4,58	2,95
Fe ₂ O ₃	19,80	16,60	15,10	13,40	12,10	10,00
MgO	10,90	10,60	10,20	9,92	9,44	8,48
CaO	21,20	24,40	25,80	26,70	28,90	30,70
Al ₂ O ₃	1,72	1,53	1,52	1,74	1,69	1,99
SiO ₂	30,20	29,70	28,20	26,90	25,2	22,80
TiO ₂	5,47	5,43	5,07	4,61	4,24	2,99
Na ₂ O	0,30	0,28	0,31	0,45	0,26	0,18
K ₂ O	0,32	0,27	0,30	0,26	0,29	0,36
BaO	0,059	0,050	0,055	0,053	0,060	0,1
SrO	0,16	0,19	0,20	0,20	0,18	0,13
ZrO ₂	0,15	0,25	0,29	0,32	0,28	0,15
ThO ₂	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,008	0,010	0,008	0,010	0,012	0,009
Nb ₂ O ₅	0,081	0,10	0,092	0,090	0,082	0,054
F	0,34	0,63	0,44	0,47	0,35	0,052
P.F.	6,76	7,60	9,32	10,80	13,50	20,00
La ₂ O ₃	0,071	0,091	0,086	0,090	0,079	0,067
CeO ₂	0,15	0,19	0,17	0,17	0,15	0,12
Pr ₆ O ₁₁	0,016	0,020	0,018	0,017	0,017	0,013
Nd ₂ O ₃	0,051	0,065	0,060	0,060	0,056	0,044
Sm ₂ O ₃	0,008	0,010	0,010	0,010	0,009	0,008
Eu ₂ O ₃	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,005	0,007	0,008	0,006	0,006	0,004
Dy ₂ O ₃	0,008	0,009	0,006	0,006	0,007	0,005
Total	100,65	101,92	101,67	100,85	101,49	101,21

Tabela A3.6 – Dados analíticos da amostra 6 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	3,13	6,11	7,33	8,00	8,52	6,33
Fe ₂ O ₃	25,00	19,50	17,50	15,70	14,10	11,50
MgO	3,55	4,82	5,22	5,45	5,48	6,58
CaO	19,60	25,20	27,00	28,70	30,00	30,70
Al ₂ O ₃	0,35	0,73	0,82	0,78	0,73	0,65
SiO ₂	25,30	18,60	17,60	17,00	16,20	17,00
TiO ₂	14,20	13,30	12,70	12,20	11,20	7,56
Na ₂ O	0,06	0,07	0,08	0,09	0,06	0,1
K ₂ O	0,07	0,08	0,47	0,08	0,08	0,19
BaO	0,039	0,045	0,047	0,050	0,052	0,081
SrO	0,21	0,30	0,32	0,33	0,33	0,25
ZrO ₂	0,040	0,053	0,062	0,052	0,058	0,047
ThO ₂	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,011	0,011	0,010	0,013	0,013	0,011
Nb ₂ O ₅	0,14	0,13	0,11	0,11	0,10	0,076
F	0,47	0,23	0,44	0,57	0,33	0,084
P.F.	8,76	10,70	11,20	12,5	13,80	18,1
La ₂ O ₃	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13	0,11
CeO ₂	0,35	0,35	0,32	0,31	0,28	0,22
Pr ₆ O ₁₁	0,036	0,037	0,033	0,032	0,030	0,023
Nd ₂ O ₃	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,08
Sm ₂ O ₃	0,020	0,019	0,017	0,017	0,016	0,012
Eu ₂ O ₃	0,007	0,005	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,014	0,013	0,011	0,011	0,010	0,008
Dy ₂ O ₃	0,014	0,014	0,009	0,008	0,006	0,007
Total	101,66	100,61	101,57	102,25	101,63	99,72

Tabela A3.7 – Dados analíticos da amostra 7 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	3,43	5,87	7,39	8,36	8,74	5,99
Fe ₂ O ₃	17,60	15,80	13,40	11,80	10,40	10,90
MgO	3,89	4,39	4,97	5,21	5,53	7,26
CaO	21,80	25,80	27,60	29,10	30,90	28,20
Al ₂ O ₃	0,24	0,45	0,67	0,55	0,52	0,58
SiO ₂	22,60	17,60	16,70	15,50	15,00	16,20
TiO ₂	20,10	19,30	16,60	15,00	13,60	9,26
Na ₂ O	0,18	0,16	0,15	0,15	0,19	0,12
K ₂ O	0,16	0,16	0,14	0,15	0,15	0,26
BaO	0,13	0,14	0,13	0,14	0,16	0,25
SrO	0,26	0,32	0,34	0,37	0,39	0,31
ZrO ₂	0,051	0,061	0,059	0,056	0,051	0,05
ThO ₂	0,02	0,012	0,014	0,013	0,022	0,012
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,009	0,011	0,011	0,011	0,019	0,016
Nb ₂ O ₅	0,16	0,15	0,12	0,11	0,09	0,062
F	0,55	0,60	0,41	0,43	0,60	0,52
P.F.	10,10	10,30	11,90	13,10	15,20	20,10
La ₂ O ₃	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,15
CeO ₂	0,52	0,49	0,43	0,4	0,4	0,33
Pr ₆ O ₁₁	0,056	0,052	0,046	0,045	0,045	0,033
Nd ₂ O ₃	0,19	0,18	0,16	0,15	0,15	0,12
Sm ₂ O ₃	0,025	0,024	0,022	0,019	0,019	0,018
Eu ₂ O ₃	0,006	0,005	0,005	0,005	0,004	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,015	0,015	0,013	0,012	0,011	0,01
Dy ₂ O ₃	0,008	0,009	0,007	0,008	0,006	0,004
Total	102,32	102,11	101,48	100,87	102,36	100,76

Tabela A3.8 – Dados analíticos da amostra 8 (clinopiroxenito rico em magnetita e perovskita) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	3,79	5,36	6,90	8,06	8,48	5,49
Fe ₂ O ₃	22,00	20,40	18,60	15,30	13,20	12,50
MgO	4,45	4,87	5,30	5,69	5,98	7,68
CaO	22,10	25,10	27,20	29,00	31,00	28,90
Al ₂ O ₃	0,44	0,55	0,72	0,72	0,59	0,56
SiO ₂	19,00	14,60	13,30	13,00	12,50	15,10
TiO ₂	19,90	19,50	17,80	15,50	13,60	8,88
Na ₂ O	0,18	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14
K ₂ O	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10	0,18
BaO	0,092	0,09	0,09	0,096	0,12	0,19
SrO	0,27	0,30	0,32	0,34	0,35	0,27
ZrO ₂	0,064	0,065	0,07	0,08	0,071	0,066
ThO ₂	0,014	0,007	0,014	0,009	0,019	0,008
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,010	0,013	0,011	0,011	0,015	0,010
Nb ₂ O ₅	0,14	0,14	0,12	0,11	0,08	0,05
F	0,40	0,64	0,64	0,72	0,58	0,33
P.F.	8,57	9,54	10,30	12,20	14,80	21,10
La ₂ O ₃	0,20	0,19	0,18	0,16	0,14	0,11
CeO ₂	0,47	0,45	0,4	0,36	0,33	0,25
Pr ₆ O ₁₁	0,05	0,049	0,043	0,04	0,037	0,027
Nd ₂ O ₃	0,18	0,16	0,15	0,14	0,12	0,092
Sm ₂ O ₃	0,023	0,022	0,021	0,018	0,016	0,013
Eu ₂ O ₃	0,006	<0,002	<0,002	<0,002	0,004	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,013	0,014	0,012	0,009	0,009	0,008
Dy ₂ O ₃	0,007	0,005	0,009	0,009	0,004	0,004
Total	102,48	102,33	102,46	101,82	102,28	101,96

Tabela A3.9 – Dados analíticos da amostra 9 (clinopiroxenito micáceo) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	4,82	6,60	7,26	7,31	6,89	5,11
Fe ₂ O ₃	18,80	23,50	21,00	18,80	16,90	17,00
MgO	13,80	8,63	8,31	7,89	7,85	9,70
CaO	14,40	19,40	20,00	19,60	18,00	13,10
Al ₂ O ₃	4,89	2,05	1,81	1,48	1,46	2,14
SiO ₂	29,10	24,20	25,80	28,90	34,70	36,80
TiO ₂	6,78	9,97	10,10	9,62	9,00	7,33
Na ₂ O	0,36	0,34	0,44	0,47	0,66	0,67
K ₂ O	0,65	0,30	0,26	0,30	0,32	0,47
BaO	0,07	0,034	0,027	0,028	0,031	0,053
SrO	0,16	0,25	0,25	0,25	0,22	0,15
ZrO ₂	0,032	0,05	0,058	0,053	0,04	0,074
ThO ₂	<0,005	<0,005	0,007	<0,005	0,008	0,007
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,008	0,010	0,012	0,010	0,012	0,012
Nb ₂ O ₅	0,052	0,096	0,096	0,092	0,07	0,058
F	0,60	0,76	0,58	0,62	0,47	0,53
P.F.	7,58	3,81	4,01	3,53	3,85	8,29
La ₂ O ₃	0,078	0,13	0,14	0,13	0,11	0,11
CeO ₂	0,16	0,29	0,29	0,27	0,24	0,20
Pr ₆ O ₁₁	0,016	0,03	0,03	0,028	0,025	0,022
Nd ₂ O ₃	0,058	0,01	0,1	0,098	0,09	0,078
Sm ₂ O ₃	0,009	0,014	0,014	0,015	0,013	0,011
Eu ₂ O ₃	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,007	0,009	0,009	0,009	0,010	0,007
Dy ₂ O ₃	0,005	0,012	<0,004	0,009	0,006	0,004
Total	102,44	100,50	100,60	99,51	100,98	101,93

Tabela A3.10 – Dados analíticos da amostra 10 (clinopiroxenito pouco alterado) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	7,75	8,59	9,88	10,80	10,80	8,00
Fe ₂ O ₃	14,10	13,90	13,80	12,60	11,00	10,50
MgO	6,18	4,83	4,02	4,07	4,24	5,55
CaO	26,20	28,90	31,00	32,70	33,30	31,10
Al ₂ O ₃	1,11	0,72	0,62	0,58	0,70	0,88
SiO ₂	23,40	20,80	17,70	16,50	15,90	18,10
TiO ₂	4,39	4,60	4,61	4,32	3,78	2,70
Na ₂ O	0,49	0,45	0,39	0,47	0,40	0,57
K ₂ O	0,48	0,42	0,40	0,43	0,42	0,56
BaO	0,28	0,30	0,30	0,34	0,40	0,63
SrO	0,64	0,73	0,76	0,78	0,79	0,67
ZrO ₂	0,110	0,11	0,12	0,11	0,09	0,13
ThO ₂	0,027	0,025	<0,005	0,032	0,039	0,047
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,011	0,015	0,018	0,022	0,024	0,130
Nb ₂ O ₅	0,08	0,088	0,087	0,09	0,07	0,11
F	0,50	0,54	0,76	0,87	0,61	0,57
P.F.	14,60	15,20	15,40	15,90	17,10	19,40
La ₂ O ₃	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,14
CeO ₂	0,31	0,34	0,35	0,39	0,38	0,35
Pr ₆ O ₁₁	0,035	0,04	0,041	0,047	0,045	0,041
Nd ₂ O ₃	0,12	0,14	0,15	0,27	0,16	0,14
Sm ₂ O ₃	0,019	0,02	0,022	0,024	0,024	0,02
Eu ₂ O ₃	0,004	0,004	<0,002	0,002	0,006	0,005
Gd ₂ O ₃	0,011	0,015	0,012	0,013	0,014	0,012
Dy ₂ O ₃	0,007	0,013	0,008	0,009	0,008	0,006
Total	100,97	100,92	100,59	101,52	100,45	100,36

Tabela A3.11 – Dados analíticos da amostra 11 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	16,10	17,30	16,60	15,70	14,40	6,40
Fe ₂ O ₃	35,20	29,60	28,60	27,20	26,80	22,00
MgO	0,89	0,93	0,98	1,13	1,18	1,78
CaO	22,80	24,20	23,00	21,70	20,00	9,62
Al ₂ O ₃	0,73	1,29	1,66	2,19	2,50	7,65
SiO ₂	4,54	6,86	8,83	11,00	12,80	29,10
TiO ₂	13,90	13,00	13,00	12,80	13,20	7,95
Na ₂ O	0,15	0,12	0,12	0,14	0,12	0,06
K ₂ O	0,11	0,15	0,20	0,21	0,25	0,29
BaO	0,13	0,14	0,15	0,16	0,18	0,19
SrO	0,39	0,38	0,36	0,32	0,30	0,12
ZrO ₂	0,083	0,09	0,11	0,10	0,09	0,11
ThO ₂	0,013	0,008	0,008	0,015	0,018	0,024
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,030	0,029	0,026	0,027	0,034	0,020
Nb ₂ O ₅	0,22	0,19	0,18	0,18	0,15	0,093
F	0,78	0,97	0,77	0,79	0,95	0,46
P.F.	2,56	3,97	4,88	6,20	7,22	15,70
La ₂ O ₃	0,22	0,22	0,22	0,21	0,23	0,20
CeO ₂	0,49	0,46	0,46	0,46	0,48	0,39
Pr ₆ O ₁₁	0,049	0,047	0,047	0,047	0,049	0,041
Nd ₂ O ₃	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,14
Sm ₂ O ₃	0,024	0,025	0,025	0,024	0,025	0,02
Eu ₂ O ₃	0,006	0,006	0,006	0,006	0,005	0,005
Gd ₂ O ₃	0,016	0,018	0,016	0,016	0,016	0,011
Dy ₂ O ₃	0,012	0,009	0,012	0,008	0,007	0,006
Total	99,60	100,17	100,42	100,79	101,17	102,38

Tabela A3.12 – Dados analíticos da amostra 12 (clinopiroxenito argilizado) da mina de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	5,81	9,36	10,50	12,10	13,00	3,97
Fe ₂ O ₃	33,10	27,20	25,20	23,60	23,10	24,70
MgO	5,69	5,33	5,17	4,57	3,68	4,69
CaO	9,72	14,10	15,90	18,00	19,30	5,44
Al ₂ O ₃	5,30	4,94	4,68	4,22	3,57	6,16
SiO ₂	15,20	16,40	15,90	15,40	14,70	29,60
TiO ₂	17,70	14,10	13,80	14,10	15,70	11,50
Na ₂ O	0,06	0,05	0,06	0,05	0,04	0,13
K ₂ O	1,98	1,89	1,28	1,32	0,93	1,51
BaO	0,17	0,16	0,13	0,12	0,10	0,13
SrO	0,16	0,32	0,36	0,43	0,44	0,17
ZrO ₂	0,043	0,11	0,081	0,082	0,080	0,12
ThO ₂	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,010	0,009	0,009	0,010	0,012	0,010
Nb ₂ O ₅	0,11	0,13	0,08	0,089	0,097	0,066
F	0,39	0,63	0,55	0,64	0,65	0,10
P.F.	5,66	7,04	7,43	6,80	6,09	13,00
La ₂ O ₃	0,090	0,084	0,083	0,090	0,095	0,081
CeO ₂	0,21	0,19	0,18	0,19	0,20	0,13
Pr ₆ O ₁₁	0,021	0,019	0,017	0,020	0,019	0,017
Nd ₂ O ₃	0,068	0,060	0,060	0,064	0,067	0,060
Sm ₂ O ₃	0,011	0,010	0,010	0,010	0,011	0,01
Eu ₂ O ₃	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,008	0,007	0,007	0,006	0,009	0,006
Dy ₂ O ₃	0,011	0,009	0,006	0,006	0,006	0,007
Total	101,52	102,15	101,49	101,92	101,90	101,61

ANEXO 4
RESULTADOS DE ANÁLISES QUÍMICAS DAS AMOSTRAS DA USINA POR
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Tabela A4.1 – Dados analíticos da amostra TC11(ROM) da usina de concentração de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	6,60	8,31	8,76	9,17	9,64	6,37
Fe ₂ O ₃	22,40	21,00	19,20	17,50	16,5	19,20
MgO	7,18	5,81	6,01	6,41	6,21	6,60
CaO	17,20	20,30	21,30	21,70	22,0	14,10
Al ₂ O ₃	2,83	2,11	2,01	2,32	2,30	4,29
SiO ₂	25,70	23,80	23,95	24,44	23,80	28,70
TiO ₂	10,40	11,40	10,60	9,98	9,88	7,86
Na ₂ O	0,22	0,24	0,23	0,21	0,22	0,20
K ₂ O	0,75	0,75	0,70	0,75	0,75	1,21
BaO	0,14	0,14	0,13	0,14	0,15	0,23
SrO	0,28	0,35	0,35	0,38	0,36	0,25
ZrO ₂	0,15	0,19	0,16	0,22	0,21	0,2
ThO ₂	<0,005	0,007	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,012	0,013	0,016	0,016	0,017	0,018
Nb ₂ O ₅	0,11	0,13	0,13	0,13	0,12	0,11
F	0,57	0,51	0,41	0,45	0,45	0,16
P.F.	6,15	5,58	5,97	6,81	7,20	10,5
La ₂ O ₃	0,12	0,14	0,13	0,13	0,13	0,14
CeO ₂	0,27	0,32	0,30	0,30	0,29	0,26
Pr ₆ O ₁₁	0,028	0,033	0,030	0,033	0,030	0,030
Nd ₂ O ₃	0,094	0,12	0,10	0,10	0,11	0,10
Sm ₂ O ₃	0,014	0,02	0,017	0,016	0,016	0,017
Eu ₂ O ₃	<0,002	0,006	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Gd ₂ O ₃	0,010	0,015	0,010	0,011	0,010	0,008
Dy ₂ O ₃	0,011	0,014	0,006	0,009	0,006	0,009
Total	101,24	101,31	100,52	101,23	100,40	100,56

Tabela A4.2 – Dados analíticos do concentrado CG da usina de concentração de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	40,9	40,6	37,0	34,9	33,8	29,8
Fe ₂ O ₃	0,34	0,39	0,46	0,72	0,94	1,53
MgO	0,37	0,43	0,65	0,81	1,17	1,50
CaO	49,4	52,5	52,3	55,2	54,0	51,2
Al ₂ O ₃	0,05	0,05	0,07	0,09	0,14	0,37
SiO ₂	1,2	1,06	1,34	1,6	1,86	2,94
TiO ₂	0,45	0,50	0,55	0,76	1,11	1,23
Na ₂ O	0,67	0,67	2,02	1,83	0,58	0,27
K ₂ O	0,021	0,016	0,60	0,034	0,046	0,09
BaO	0,021	0,028	0,041	0,060	0,007	0,12
SrO	1,10	1,10	1,06	0,98	0,93	0,73
ZrO ₂	0,062	0,054	0,038	0,052	0,069	0,097
ThO ₂	0,015	0,023	0,017	0,018	0,024	0,025
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,040	0,038	0,028	0,026	0,028	0,040
Nb ₂ O ₅	0,008	0,011	0,012	0,018	0,021	0,034
F	1,36	1,36	1,40	1,40	1,40	1,2
P.F.	-	0,15	1,65	1,87	3,20	7,38
La ₂ O ₃	0,17	0,17	0,19	0,18	0,16	0,19
CeO ₂	0,34	0,35	0,36	0,35	0,32	0,34
Pr ₆ O ₁₁	0,038	0,041	0,043	0,042	0,041	0,045
Nd ₂ O ₃	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,16
Sm ₂ O ₃	0,022	0,023	0,030	0,023	0,021	0,024
Eu ₂ O ₃	0,005	0,006	0,006	0,005	0,006	0,005
Gd ₂ O ₃	0,016	0,015	0,016	0,016	0,015	0,017
Dy ₂ O ₃	0,009	0,010	0,009	0,009	0,008	0,009
Total	96,75	99,75	100,04	101,14	100,04	99,35

Tabela A4.3 – Dados analíticos do concentrado CGR da usina de concentração de Tapira-MG, por fração granulométrica

Análise química (%)	Fração granulométrica (mm)					
	+ 0,210	-0,210 + 0,149	-0,149 + 0,105	-0,105 + 0,074	-0,074 + 0,037	-0,037
P ₂ O ₅	40,3	38,5	37,9	34,9	33,8	30,5
Fe ₂ O ₃	0,33	0,43	0,56	0,54	0,73	0,69
MgO	0,35	0,44	0,58	0,78	1,02	1,15
CaO	51,6	51,7	54,6	55,7	53,5	52,9
Al ₂ O ₃	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,12
SiO ₂	1,3	1,5	1,66	1,52	1,44	1,56
TiO ₂	0,31	0,49	0,67	0,53	0,63	0,81
Na ₂ O	0,99	1,26	0,55	0,63	0,62	0,15
K ₂ O	0,016	0,019	0,023	0,022	0,025	0,04
BaO	0,024	0,034	0,048	0,060	0,068	0,099
SrO	1,09	1,06	1,01	1,00	0,91	0,68
ZrO ₂	0,022	0,024	0,024	0,042	0,026	0,040
ThO ₂	0,013	0,019	0,020	0,020	0,013	0,015
U ₃ O ₈	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Y ₂ O ₃	0,036	0,028	0,027	0,029	0,029	0,033
Nb ₂ O ₅	0,007	0,009	0,010	0,014	0,012	0,011
F	1,44	1,52	1,48	1,28	1,40	1,20
P.F.	-	0,30	0,70	2,74	5,20	9,53
La ₂ O ₃	0,16	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13
CeO ₂	0,32	0,31	0,29	0,28	0,27	0,25
Pr ₆ O ₁₁	0,038	0,039	0,040	0,034	0,032	0,032
Nd ₂ O ₃	0,13	0,14	0,12	0,12	0,12	0,11
Sm ₂ O ₃	0,021	0,020	0,020	0,019	0,018	0,017
Eu ₂ O ₃	0,005	0,006	0,005	0,005	0,006	0,004
Gd ₂ O ₃	0,014	0,015	0,013	0,014	0,013	0,013
Dy ₂ O ₃	0,007	0,007	0,009	0,007	0,008	0,007
Total	98,56	98,07	100,56	100,49	100,10	100,09

ANEXO 5
RESULTADOS DE MICROANÁLISES WDS DAS APATITAS DE
CLINOPIROXENITOS DA MINA DE TAPIRA-MG

