DANIEL ULIANA

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO DE FOSFATO DO
COMPLEXO ALCALINO DE SALITRE, MG - ÁREA FOSFERTIL

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

São Paulo
2010

DANIEL ULIANA

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO DE FOSFATO DO
COMPLEXO ALCALINO DE SALITRE, MG - ÁREA FOSFERTIL

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Livre-Docente
Henrique Kahn

São Paulo
2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de abril de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Uliana, Daniel

**Caracterização tecnológica do minério de fosfato do com -
plexo alcalino de Salitre, MG – área Fوسفertil / D. Uliana. -- ed.rev.
-- São Paulo, 2010.
210 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo.**

- 1. Caracterização tecnológica de minérios (Metodologia)**
- 2. Fosfatos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Henrique Kahn, pela orientação, incentivo e por seus valiosos ensinamentos a mim transmitidos.

A todos os amigos e colegas do LCT – Laboratório de Caracterização da EPUSP: André pela ajuda e parceria nas pesquisas sobre fosfatos; Manuela pela boa vontade, incentivo e paciência; demais colegas do LCT: Liz, Mariane, Carina, Juliana, Lilia, Giuliana, Luciano, Freud pelo coleguismo e amizade; igualmente ao pessoal administrativo e técnico: Ilda, Rosi, Juscelino, Carlos, Edvaldo, Ailton, Rafael, Rafael Neto, Douglas, Lino, Erílio e também ao Alfredo (LTM) pela força e experiência dispensadas nos ensaios laboratoriais; Viviane e Renata, as quais me ajudaram no processamento das imagens do MLA, na época, alunas de graduação, hoje pós-graduandas.

A todos que me ajudaram direta ou indiretamente neste trabalho.

À bibliotecária Cristina Bonesio pela prestimoza atenção, apoio e boa vontade.

À empresa Fosfertil – Fertilizantes Fosfatados S.A. por ter possibilitado a realização deste estudo, especialmente aos ex-funcionários Luiz Antonio Fonseca de Barros e Eliomar Evaristo Ferreira.

À FUNDESPA – Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas pela bolsa de Mestrado.

E é claro que à minha família, meus pais, Mauro e Nilma, pela dedicação, amor, confiança e incentivo incondicionais; por TUDO, afinal!

À minha doce e querida Marcela, por seu amor, amizade e companheirismo sempre presentes.

A TODOS VOCÊS MEU SINCERO OBRIGADO!

RESUMO

O presente estudo refere-se à caracterização tecnológica de tipos de minério de fosfato residual do complexo alcalino-carbonatítico de Salitre (MG), em área de interesse da Fosfertil. O procedimento experimental consistiu de moagem das amostras abaixo de 0,21 mm, análise granulométrica por peneiramento a úmido e separações minerais (líquido denso e Frantz). A composição mineralógica bem como a liberação da apatita e suas formas de associação com a ganga foram determinadas através de sistema de análise de imagens por feixe de elétrons (Mineral Liberation Analyser), com apoio de análises por DRX e MEV/EDS. As composições químicas dos produtos gerados foram determinadas por FRX. Seis amostras com graus distintos de intemperismo foram estudadas: apatitito (APAT), foscorito intemperizado (FIT), foscorito silicificado (FST), zona de mistura (ZMT), piroxenito intemperizado (PIT) e piroxenito (PXT). Os teores de P_2O_5 variam de 9 a 25% e a composição mineralógica é similar para todas as amostras, variando apenas as proporções relativas entre as espécies minerais. As amostras mais intemperizadas (APAT e FIT) são basicamente constituídas por apatita e magnetita; a amostra PIT apresenta também conteúdos elevados de filossilicatos e quartzo. Já as amostras menos intemperizadas (PXT, FST e ZMT) contêm maiores proporções de filossilicatos e diopsídio, principalmente a amostra PXT. A parcela de fósforo não apatítico varia de 10 a 20% nas amostras PIT e FIT e de 1 a 6% nas demais, sendo mais expressiva nos finos ($<0,020$ mm). Para cominuição abaixo de 0,21 mm, o conteúdo de finos varia de 20 a 34% e a parcela de fósforo associada a estes é de 13 e 16% nas amostras APAT, FIT e PIT e de 19 a 21% nas demais. Acima de 0,020 mm, a apatita representa de 96 a 98% do P_2O_5 (89% na amostra PIT); a liberação da apatita é superior a 90% nas amostras APAT, FIT e PIT, variando de 85 a 89% nas demais. Os resultados obtidos sugerem que a composição mineralógica e suas formas de associação não devem opor maiores dificuldades à concentração da apatita por flotação, podendo-se, em princípio, restringir a variabilidade do minério estudado a três tipos principais para fins de processamento mineral.

Palavras-chave: Minério de fosfato. Caracterização tecnológica. Apatita. Análise de imagens.

ABSTRACT

The present study refers to the technological characterization of residual phosphate ore types from Salitre alkaline-carbonatitic complex (MG), in Fosfertil area. The procedure comprised grinding the samples below 0.21 mm, size analysis by wet screening and mineral separations (heavy liquid and Frantz). Mineralogical composition as well as apatite liberation and its associations to gangue minerals were determined by SEM-based image analysis (Mineral Liberation Analyser) and supported by XRD and SEM/EDS. Chemical compositions of all generated products were determined by XRF. Six samples with different weathering grades were studied: apatite (APT), weathered foskorite (FIT), silicified foskorite (FST), mixture zone (ZMT), weathered piroxenite (PIT) and piroxenite (PXT). The P_2O_5 grades vary from 9 to 25% and mineralogical composition is similar to all samples, varying only the relative proportions among mineral species. The deeply weathered samples (APAT and FIT) are basically constituted by apatite and magnetite; PIT shows also high content of phyllosilicates and quartz. On the other hand, the less weathered samples (FST, ZMT and PXT) have major amounts of phyllosilicates and diopside, especially PXT. The non-apatitic phosphor varies from 10 to 20% in samples PIT and FIT and from 1 to 6% in the others; these contents are mostly expressive in fines (<0.020 mm). The fine content, considering comminution under 0.21 mm, varies between 20 and 34% w/w, while the related distribution of apatitic phosphor corresponds from 13 to 16% in the samples APAT, FIT and PIT and from 19 to 21% in the others. Above 0.020 mm, apatite represents 96 to 98% of total phosphor (89% in sample PIT); its liberation grade overcomes 90% in APAT, FIT and PIT, varying from 85 to 89% in the other samples. The results suggest that mineralogical composition and its associations should not oppose major difficulties to apatite concentration by froth flotation and that might be possible to restrict the ore variability to three main ore-types for mineral processing.

Keywords: Phosphate ore. Technological characterization. Apatite. Image analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais produtores de rocha fosfática e suas reservas (dados extraídos de Souza e Cardoso, 2008)	24
Figura 2 - Principais produtores mundiais de rocha fosfática com valores em milhões de toneladas por ano (dados extraídos de IFA, 2008).	24
Figura 3 - Seção esquemática de um complexo alcalino-carbonatítico mostrando a distribuição dos litotipos e as principais mineralizações a eles associadas (Biondi, 1986; 2003)	29
Figura 4 - Comportamento dos principais minerais ao longo do perfil de intemperismo (adaptado de Born e Kahn, 1990)	31
Figura 5 - (a) Mapa do Estado de Minas Gerais, mostrando o posicionamento do município de Patrocínio e as principais cidades próximas na região do Triângulo Mineiro (PATROCÍNIO, 2008); (b) Localização dos complexos de Salitre e Serra Negra (PATROCÍNIO, 2009).	35
Figura 6 - Mapa Geológico dos Complexos de Salitre e Serra Negra (Melo <i>et al.</i> , 1997).	39
Figura 7 - Mapa geológico simplificado do complexo de Salitre, com quadrado destacando a área considerada neste estudo (Fosfertil, 2003 <i>apud</i> Barros, 2006).....	40
Figura 8 - Fluxograma do procedimento experimental adotado	62
Figura 9 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - amostra APAT	67
Figura 10 - Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra APAT	70
Figura 11 - Diferenças de composição química entre apatita primária e apatita secundária - amostra APAT	73
Figura 12 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica - amostra APAT	75
Figura 13 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra APAT	76

Figura 14 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra APAT	76
Figura 15 - Curvas de distribuição <i>versus</i> teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra APAT	77
Figura 16 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - amostra FIT	81
Figura 17 - Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra FIT	85
Figura 18 – Diferenças de composição química entre apatita primária e apatita secundária - amostra FIT	88
Figura 19 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra FIT	90
Figura 20 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra FIT	90
Figura 21 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra FIT	91
Figura 22 - Curvas de distribuição <i>versus</i> teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra FIT	91
Figura 23 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - amostra FST	95
Figura 24 – Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra FST	99
Figura 25 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra FST	102
Figura 26 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra FST	103
Figura 27 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra FST	103
Figura 28 - Curvas de distribuição <i>versus</i> teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - Amostra FST	104
Figura 29 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - amostra ZMT	108
Figura 30 - Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra ZMT	112

Figura 31 - Diferenças de composição química entre apatita primária e apatita secundária - amostra ZMT	115
Figura 32 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra ZMT	116
Figura 33 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra ZMT	117
Figura 34 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra ZMT	117
Figura 35 - Curvas de distribuição <i>versus</i> teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra ZMT	118
Figura 36 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - Amostra PIT	122
Figura 37 – Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais – amostra PIT	126
Figura 38 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra PIT	129
Figura 39 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra PIT	130
Figura 40 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra PIT	130
Figura 41 - Curvas de distribuição <i>versus</i> teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra PIT	131
Figura 42 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - amostra PXT	135
Figura 43 - Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra PXT	139
Figura 44 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra PXT	142
Figura 45 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra PXT	143
Figura 46 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra PXT	143
Figura 47 - Curvas de distribuição <i>versus</i> teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra PXT	144

Figura 48 - Comparação entre a distribuição em massa e de teores acumulados abaixo para o produto de moagem das amostras estudadas.....	149
Figura 49 - Partição de P_2O_5 apatítico em relação ao total de P_2O_5	150
Figura 50 - Composição mineralógica das amostras estudadas (+0,020 mm).....	151
Figura 51 - Espectros de liberação da apatita em área das partículas (+0,020 mm)	153
Figura 52 - Espectros de liberação da apatita em perímetro exposto das partículas (+0,020 mm)	153

LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS

Fotomicrografia 1 - MEV; amostra APAT, fração -0,21+0,15 mm.	72
Fotomicrografia 2 - MEV; amostra APAT, fração -0,21+0,15 mm.	72
Fotomicrografia 3 - MEV; amostra APAT, fração -0,15+0,074 mm.	73
Fotomicrografia 4 - MEV, amostra FIT, fração -0,21+0,15 mm.	86
Fotomicrografia 5 - MEV, amostra FIT, fração +0,21 mm.	87
Fotomicrografia 6 – MEV, amostra FIT, fração -0,21+0,15 mm.	88
Fotomicrografia 7 - MEV, amostra FST, fração +0,21 mm.	100
Fotomicrografia 8 - MEV, amostra FST, fração -0,21+0,15 mm.	101
Fotomicrografia 9 - MEV, amostra ZMT, fração -0,15+0,074 mm.	113
Fotomicrografia 10 - MEV, amostra ZMT, fração -0,21+0,15 mm.	114
Fotomicrografia 11 - MEV, amostra ZMT, fração -0,21+0,15 mm.	115
Fotomicrografia 12 - MEV, amostra PIT, fração +0,21 mm.	127
Fotomicrografia 13 - MEV, amostra PIT, fração -0,21+0,15 mm.	128
Fotomicrografia 14 - MEV, amostra PXT, fração +0,21 mm.	140
Fotomicrografia 15 - MEV, amostra PXT, fração -0,21+0,15 mm.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correspondência entre definições de tipos de minérios adotadas em Salitre – área Fosfertil	52
Tabela 2 - Relação de amostras estudadas	60
Tabela 3 - Composição química da amostra APAT	65
Tabela 4 - Análise granuloquímica da amostra APAT	66
Tabela 5 - Resultados das separações minerais para a amostra APAT (frações acima de 0,020 mm)	68
Tabela 6 - Composição mineralógica para a amostra APAT (frações acima de 0,020 mm)	70
Tabela 7 - Formas de associação da apatita na amostra APAT (frações acima de 0,020 mm)	74
Tabela 8 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra APAT	78
Tabela 9 - Composição química da amostra FIT	79
Tabela 10 - Análise granuloquímica da amostra FIT	80
Tabela 11 - Resultados das separações minerais para a amostra FIT (frações acima de 0,020 mm)	82
Tabela 12 - Composição mineralógica para a amostra FIT (frações acima de 0,020 mm)	84
Tabela 13 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra FIT	89
Tabela 14 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra FIT	92
Tabela 15 - Composição química da amostra FST	94
Tabela 16 - Análise granuloquímica da amostra FST	94
Tabela 17 - Resultados das separações minerais para a amostra FST (frações acima de 0,020 mm)	97
Tabela 18 - Composição mineralógica para a amostra FST (frações acima de 0,020 mm)	99

Tabela 19 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra FST	102
Tabela 20 – Partição de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra FST	105
Tabela 21 - Composição química da amostra ZMT.....	106
Tabela 22 - Distribuição de teores por fração no produto de moagem - amostra ZMT	107
Tabela 23 - Resultados das separações minerais para a amostra ZMT (frações acima de 0,020 mm).....	109
Tabela 24 - Composição mineralógica para a amostra ZMT (frações acima de 0,020 mm)	111
Tabela 25 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra ZMT	116
Tabela 26 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra ZMT.....	119
Tabela 27 - Composição química da amostra PIT	120
Tabela 28 - Análise granuloquímica da amostra PIT.....	121
Tabela 29 - Resultados das separações minerais para a amostra PIT (frações acima de 0,020 mm).....	123
Tabela 30 - Composição mineralógica para a amostra PIT (frações acima de 0,020 mm)	125
Tabela 31 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra PIT	129
Tabela 32 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra PIT.....	132
Tabela 33 - Composição química da amostra PXT	133
Tabela 34 - Análise granuloquímica da amostra PXT	134
Tabela 35 - Resultados das separações minerais para a amostra PXT (frações acima de 0,020 mm).....	136
Tabela 36 - Composição mineralógica para a amostra PXT (frações acima de 0,020 mm)	138
Tabela 37 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra PXT	142

Tabela 38 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra PXT	145
Tabela 39 - Composição química das amostras estudadas	147
Tabela 40 - Composição mineralógica das amostras estudadas (% em massa) - intervalo +0,020 mm.....	151
Tabela 41 – Características da apatita (+0,020 mm).....	152
Tabela 42 - Comparação entre os resultados de teores e distribuição de P_2O_5 apatítico no produto não magnético em 4 kG (3D) e liberação da apatita por MLA (2D), total +0,020 mm	154
Tabela 43 - Sumário comparativo das principais características relevantes ao beneficiamento mineral das amostras estudadas	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	Trifosfato de adenosina (<i>adenosine triphosphate</i>)
BSE	Elétrons retroespalhados (<i>backscattered electrons</i>)
CL	Catodoluminescência
DAP	Fosfato de diamônio (<i>diammonium phosphate</i>)
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
DRX	Difração de raios X
EDS	Espectrômetro por dispersão de energia (<i>energy dispersive spectrometer</i>)
ESEM	Microscópio eletrônico de varredura ambiental (<i>environmental scanning electron microscope</i>)
ETR	Elementos terras raras
FEG	Feixe de emissão de campo (<i>field emission gun</i>)
FRX	Fluorescência de raios X
FTIR	Espectrometria de infravermelho por transformada de Fourier (<i>Fourier transform infrared spectroscopy</i>)
ICDD	International Centre for Diffraction Data
IFA	Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes (International Fertilizers Industry Association)
MAP	Fosfato de monoamônio (<i>monoammonium phosphate</i>)
MEV	Microscópio/microscopia eletrônico(a) de varredura
MLA	Mineral Liberation Analyser (<i>software</i>)
MO	Microscópio/microscopia óptico(a)
PAN-ICSD	PANalytical Inorganic Crystal Structure Database
PF	Perda ao fogo
TBE	Tetrabrometano
TSP	Fosfato super triplo ou fosfato trissódico (<i>trisodium phosphate</i>)
VFCO	Viação Férrea Centro-Oeste
WDS	Espectrômetro por dispersão de comprimento de onda (<i>wavelength dispersive spectrometer</i>)
WHIMS	Separador magnético via úmida de alta intensidade (<i>wet high intensity magnetic separator</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Metas e objetivos	21
1.2	Estrutura da dissertação	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	O fósforo como elemento estratégico	23
2.2	Complexos alcalino-carbonatíticos	25
2.3	Principais depósitos de fosfato no Brasil e no mundo	26
2.3.1	Zoneamento de complexos alcalino-carbonatíticos	27
2.4	Comportamento geoquímico do P	29
2.5	A variabilidade composicional da apatita	31
2.6	Geologia da área de estudo	34
2.6.1	Contexto geológico regional.....	36
2.6.2	Geologia do Complexo de Salitre	39
2.7	Caracterização de matérias primas minerais.....	41
2.7.1	Tipologia de minérios	43
2.7.2	Amostragem	44
2.7.3	Etapas da caracterização tecnológica	45
2.7.4	Principais técnicas instrumentais para caracterização da apatita	48
2.8	O minério de fosfato de Salitre	50
2.8.1	Estudos prévios de caracterização	50
2.8.2	Tipos de minério de fosfato na área em estudo.....	52
2.8.3	Caracterização das variedades de apatita.....	55
2.9	Beneficiamento de minérios de fosfato relacionados a complexos alcalino-carbonatíticos	56
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
3.1	Amostras estudadas.....	60
3.2	Procedimento experimental	61
3.3	Técnicas analíticas empregadas	63
4	RESULTADOS OBTIDOS	65
4.1	Apatitito (APAT)	65
4.1.1	Composição química.....	65
4.1.2	Análise granulométrica.....	65
4.1.3	Separações minerais.....	67

4.1.4	Composição mineralógica.....	69
4.1.5	Características da apatita.....	71
4.1.6	Partição dos principais óxidos presentes.....	77
4.2	Foscorito Intemperizado (FIT)	79
4.2.1	Composição química.....	79
4.2.2	Análise granulométrica.....	79
4.2.3	Separações minerais.....	81
4.2.4	Composição mineralógica.....	84
4.2.5	Características da apatita.....	86
4.2.6	Partição dos principais óxidos presentes.....	92
4.3	Foscorito Silicificado (FST)	93
4.3.1	Composição química.....	93
4.3.2	Análise granulométrica.....	94
4.3.3	Separações minerais.....	96
4.3.4	Composição mineralógica.....	98
4.3.5	Características da apatita.....	100
4.3.6	Partição dos principais óxidos presentes.....	104
4.4	Zona de Mistura (ZMT).....	106
4.4.1	Composição química.....	106
4.4.2	Análise granulométrica.....	107
4.4.3	Separações minerais.....	108
4.4.4	Composição mineralógica.....	111
4.4.5	Características da apatita.....	113
4.4.6	Partição dos principais óxidos presentes.....	118
4.5	Piroxenito Intemperizado (PIT)	120
4.5.1	Composição química.....	120
4.5.2	Análise granulométrica.....	120
4.5.3	Separações minerais.....	122
4.5.4	Composição mineralógica.....	125
4.5.5	Características da apatita.....	127
4.5.6	Partição dos principais óxidos presentes.....	131
4.6	Piroxenito (PXT)	133
4.6.1	Composição química.....	133
4.6.2	Análise granulométrica.....	133
4.6.3	Separações minerais.....	135
4.6.4	Composição mineralógica.....	138
4.6.5	Características da apatita.....	140
4.6.6	Partição dos principais óxidos presentes.....	144
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	147

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	155
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158
	APÊNDICE A - Principais equipamentos utilizados	167
	APÊNDICE B - Fluxograma da análise de imagens no MLA.....	171
	APÊNDICE C - Difrátogramas de raios X.....	172
	APÊNDICE D - Fotomicrografias e microanálises obtidas ao MEV/EDS	184
	APÊNDICE E - Composições químicas das fases minerais adotadas no sistema MLA	205
	APÊNDICE F - Composições químicas dosadas (FRX) <i>versus</i> calculadas (MLA)	206
	ANEXO A - Coluna estratigráfica da região do Alto Paranaíba	209
	ANEXO B - Composição das amostras estudadas.....	210

1 INTRODUÇÃO

Os principais depósitos brasileiros de fosfato encontram-se associados a complexos alcalino-carbonatíticos estando, em geral, relacionados a processos de alteração intempérica (Toledo, 1999; Kahn, 1999; Lenharo, 1994; Rodrigues e Lima, 1984; Altschuler, 1973), como é o caso do Complexo de Salitre. Além de baixo teor, quando comparados com depósitos de origem sedimentar (fosforitos marinhos), os depósitos associados a complexos alcalinos apresentam uma complexidade mineralógica acentuada (Amaral, 1997), tornando-se indispensável a caracterização geológica e tecnológica do minério, desde a fase de pesquisa até no acompanhamento das operações de lavra (Born e Kahn, 1990).

Dado à complexidade natural das rochas dos complexos alcalino-carbonatíticos e à superimposição de processos de laterização na formação dos depósitos de fosfato, cada depósito apresenta peculiaridades no que se refere aos minerais de fosfato presentes, dos quais a apatita é o único passível de aproveitamento, e minerais de ganga, além de formas de associações mineralógicas, distribuição granulométrica, impregnação superficial e grau de liberação da apatita, dentre outras. A variabilidade destas características pode implicar em distintos comportamentos frente aos processos de beneficiamento empregados, sendo, portanto, necessária a adequada caracterização dos tipos distintos de materiais encontrados no depósito mineral.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta a caracterização de seis tipos de minério de fosfato da porção central do Complexo de Salitre, numa área de interesse da empresa Fosfertil - Fertilizantes Fosfatados, efetuada em apoio a estudos de viabilidade técnico-econômica visando à implantação de um empreendimento mineiro para a produção de rocha fosfática (concentrado de apatita).

As rochas do Complexo de Salitre estão relacionadas a eventos intrusivos de pequena profundidade, de natureza ultrabásica, das quais podem ser destacadas mica-peridotitos, piroxenitos e carbonatitos, com tipos transicionais entre elas. Há ainda a presença de coberturas lateríticas às quais estão relacionadas mineralizações de fosfato, titânio e nióbio, particularmente nas porções norte e central da intrusão (Melo *et al.*, 1997). As amostras estudadas referem-se a

composições de intervalos de testemunhos de sondagens, sendo que os estudos realizados compreenderam etapas de cominuição, análise granulométrica e separações minerais seguidos de análises químicas e mineralógicas dos produtos obtidos.

1.1 Metas e objetivos

O presente trabalho teve como principal objetivo a caracterização tecnológica dos tipos de minério de fosfato do complexo alcalino-carbonatítico de Salitre, avaliando-se as suas variáveis intrínsecas relevantes para fins do beneficiamento mineral, através da conjugação de diversas técnicas de caracterização, bem como reclassificação dos tipos preliminarmente definidos frente ao comportamento potencial no processamento mineral.

Como resultados, este estudo teve por meta definir a composição mineralógica das amostras, as formas de associação da apatita com os minerais de ganga e o seu grau de liberação, a recuperação potencial da apatita (parcela não impregnada), a partição do fósforo entre a apatita e outros eventuais minerais portadores de fósforo, além do conteúdo de P_2O_5 associado às frações finas. Também foram avaliados o grau de recobrimento superficial da apatita e suas características morfológicas, relevantes para o comportamento deste mineral na etapa de concentração por flotação.

1.2 Estrutura da dissertação

Capítulo 1 – Introdução: apresenta o trabalho desenvolvido e situa o leitor no contexto geral de desenvolvimento da pesquisa em questão.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: tem por finalidade apresentar ao leitor o levantamento bibliográfico sobre aspectos de mercado, geológicos e tecnológicos pertinentes ao tema proposto.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: destina-se a detalhar todas as etapas do procedimento experimental estabelecido.

Capítulo 4 – Resultados obtidos: compreende todos os resultados obtidos ao longo do estudo para cada amostra.

Capítulo 5 – Discussão dos resultados: contempla a análise e a discussão dos principais resultados obtidos de forma comparativa entre as amostras estudadas.

Capítulo 6 – Considerações finais: destaca as características mais relevantes do conjunto de amostras estudadas para fins de aproveitamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O fósforo como elemento estratégico

Usualmente expresso na forma de óxido (P_2O_5), o fósforo é um elemento fundamental na geração e armazenamento de energia das plantas, através da fotossíntese, e dos animais, presente nas células sob a forma de trifosfato de adenosina (ATP). Participa ativamente do processo de crescimento e sustentação corporal dos vegetais e animais. No organismo animal, sob a forma de apatita, o fósforo corresponde a cerca de 80% em massa dos ossos do esqueleto, tornando-se então o segundo elemento mais abundante no corpo humano, depois do cálcio (Zhang *et al.*, 2006).

Por se tratar de um elemento físico-quimicamente muito ativo, não é encontrado livre na natureza, ocorrendo predominantemente na forma de sais-fosfatos; estes abrangem uma numerosa gama de espécies minerais de composição bem variada, apesar de sua proporção em peso na crosta terrestre ser relativamente pequena, o que resulta em grande número de minerais raros.

De acordo com levantamento realizado pelo DNPM (Souza e Cardoso, 2008), o Brasil é atualmente o sexto maior produtor de rocha fosfática do mundo com 4% da produção mundial. Em valores absolutos, a produção mundial de rocha fosfática em 2007 foi de 147,6 milhões de toneladas, das quais 6,2 milhões referem-se à produção brasileira. As reservas mundiais (medidas e indicadas) são estimadas em quase 50 bilhões de toneladas, das quais nosso país detém por volta de 320 milhões, o que corresponde a 0,6% do total mundial.

A Figura 1 ilustra graficamente a posição do Brasil no *ranking* mundial dos principais produtores de rocha fosfática e suas respectivas reservas. Pode-se notar que o Brasil participa ativamente no mercado mundial de rocha fosfática e, mesmo com reservas menores que países como África do Sul, Jordânia, Síria, Israel e Egito, ainda sim os supera em produção desse bem mineral.

Segundo Souza e Cardoso (*op. cit.*), as principais reservas nacionais estão localizadas predominantemente nos Estados de Minas Gerais (67%) Goiás (14%) e São Paulo (6%).

Figura 1 - Principais produtores de rocha fosfática e suas reservas (dados extraídos de Souza e Cardoso, 2008)

Apenas três países concentram 75% das reservas mundiais. O Marrocos ocupa o primeiro lugar, com 42%, seguido pela China, com 26% e Estados Unidos, que representa 7%. Segundo dados da IFA (International Fertilizer Industry Association), em 2008 dez países foram responsáveis por cerca de 90% da produção mundial de rocha fosfática, dos quais Estados Unidos, Marrocos e Tunísia são os principais fornecedores para o Brasil, como é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Principais produtores mundiais de rocha fosfática com valores em milhões de toneladas por ano (dados extraídos de IFA, 2008).

A principal utilização de rocha fosfática é na produção de fertilizantes para emprego na agroindústria, além de fabricação de suplementos para nutrição animal. A quantidade de solo agricultável no planeta é bastante restrita e a atividade agrícola acaba por extrair os nutrientes do solo num ritmo mais acelerado do que o naturalmente sustentável. Dessa maneira, para que se possa atender a demanda crescente de alimentos para a população mundial, os fertilizantes são indispensáveis à agricultura, já que constituem a única forma de devolução dos principais nutrientes para o solo.

Os denominados macro-nutrientes são constituídos por nitrogênio, fósforo e potássio, enquanto que os nutrientes secundários são cálcio, magnésio e enxofre. Os micro-nutrientes abrangem ferro, manganês, boro, cloro, cobre, zinco e molibdênio. Dos três macro-nutrientes, o fósforo é requerido pelas plantas em quantidades dez vezes maiores em relação ao nitrogênio e ao potássio (Herz e Vroomen, 2006).

O ácido fosfórico, derivado a partir da reação entre apatita e ácido sulfúrico, é a matéria prima para a produção de vários ingredientes para fertilizantes fosfatados, suplemento para nutrição animal e outros compostos químicos fosfatados. Entre os ingredientes para fertilizantes fosfatados encontram-se o fosfato de diamônio (DAP), o fosfato de monoamônio (MAP) e fosfato super triplo ou fosfato trissódico (TSP). Os dois primeiros são produzidos através da reação do ácido fosfórico com amônia, enquanto que o fosfato super triplo é obtido pela reação de ácido fosfórico com a rocha fosfática (concentrado de apatita) (Herz e Vroomen, *op. cit.*).

2.2 Complexos alcalino-carbonatíticos

No Brasil existem 23 complexos alcalino-carbonatíticos, agrupados em cinco províncias geográficas: Amazônica, Alto Araguaia, Alto Parnaíba, Sudeste e Sul (Rodrigues e Lima, 1984). A estes complexos são freqüentemente associadas mineralizações de P, Nb, Ti, F, U e ETR.

De acordo com Biondi (2003), os complexos alcalino-carbonatíticos brasileiros ocorrem em zonas arqueadas e falhadas nas bordas das bacias do Paraná, do Parnaíba e do Amazonas. Do ponto de vista estrutural, o autor destaca que as intrusões se enquadram em pelo menos três grandes lineamentos estruturais,

controlando assim a posição das províncias alcalinas brasileiras. O primeiro e mais importante é conhecido no Triângulo Mineiro como Lineamento Alto Parnaíba, estendendo-se desde o litoral do Rio de Janeiro até o leste de Rondônia, cruzando os Estados de Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso. Em Minas Gerais, no Triângulo Mineiro, ocorrem os complexos alcalino-carbonatíticos mais importantes economicamente; em Goiás esses complexos situam-se na região de Catalão.

O segundo lineamento mais importante, ainda segundo Biondi (2003), é o Lancinha-Cubatão, que se estende desde o Estado do Paraná até o Rio de Janeiro. Os principais complexos alcalinos associados a esse lineamento são: Mato Preto, Tunas e Banhadão, no Paraná; Morro Redondo, Tambuá-Rio Bonito e o maciço de Itatiaia, no Rio de Janeiro e, talvez, Lages e Anitápolis, em Santa Catarina; Barra do Itapirapuã, Jacupiranga, Morro do Serrote, Ipanema e Juquiá, em São Paulo. De acordo com diversos autores (Almeida 1971; 1983 *apud* Slavec *et al.*, 2001; Algarte, 1972 e Ferreira e Algarte, 1979, entre outros *apud* Ruberti *et al.*, 1992), estes complexos alcalinos estão tectonicamente condicionados ao Arco de Ponta Grossa, estrutura de direção NW-SE, ativa provavelmente desde a era paleozóica e relacionada à abertura do Oceano Atlântico Sul.

O lineamento Transbrasiliano tem direção geral dada pelo azimute 45° e estende-se desde o sul do Estado do Mato Grosso do Sul até a região de Fortaleza, no Estado do Ceará, cruzando o lineamento Alto Parnaíba, a oeste de Goiás, em uma região onde ocorrem vários complexos ultrabásico-alcalinos mineralizados (Água Branca, Santa Fé, Morro do Engenho, Salobinha, Fazenda Furnas e Rio dos Bois). Há ocorrências ainda de complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos na região norte do Brasil, nas margens norte e sul da Bacia Amazônica (Biondi, *op. cit.*).

As datações disponíveis indicam que a maior parte das intrusões alcalinas e carbonatíticas da região norte sejam de idade meso a paleoproterozóicas, muito anteriores, portanto, às das regiões central, sudeste e sul do país, que têm idades juro-cretáceas (Biondi *op. cit.*).

2.3 Principais depósitos de fosfato no Brasil e no mundo

Os depósitos de fosfato podem ser de origem magmática (complexos alcalino-carbonatíticos), sedimentar (fosforitos marinhos) ou de acumulação orgânica

(guano).

Amaral (1997) classifica os depósitos de fosfato em dois tipos básicos existentes na natureza: os primários e os de origem secundária ou residuais (acumulação laterítica), que são aqueles formados por acumulação resultante de depósitos ou fontes primárias de material fosfático.

No Brasil os depósitos de fosfato estão associados, em sua maioria, a complexos alcalino-carbonatíticos, geralmente relacionados a processos de alteração intempérica (lateritas), à exceção de Jacupiranga, atualmente explorado em nível de rocha fresca. Entre estes se destacam: Salitre, Tapira, Araxá, em Minas Gerais; Jacupiranga, Juquiá, Iperó, Catalão I, Angico dos Dias e Maicuru (Biondi, 2003).

Inúmeros depósitos de fosfato estão distribuídos pelo mundo, sendo que os economicamente mais importantes estão localizados nos Estados Unidos, Marrocos, China, Rússia, África do Sul, Jordânia e Austrália. A grande maioria desses depósitos é de origem sedimentar e geralmente lavrada a céu aberto, com uma pequena porção em minas subterrâneas. Os Estados Unidos são atualmente os maiores produtores mundiais, respondendo por 25 a 30% da produção mundial. As principais ocorrências naquele país estão localizadas nos Estados da Flórida (Bone Valley) e Carolina do Norte (Beaufort County), ambos de origem sedimentar, assim como o de Qulad Abdoun, no Marrocos. Outros importantes depósitos de origem sedimentar ocorrem no Egito, na região do Mar Vermelho, e na Rússia, na Península de Kola (Bacia Kara Tau). Dentre os depósitos de fosfato relacionados a complexos alcalinos de maior importância econômica destacam-se ainda o de Khibina, na Península de Kola, na Rússia, e o carbonatito de Palabora, na África do Sul, o qual também é importante por suas reservas de cobre (Notholt *et al.*, 1989; Zhang *et al.*, 2006).

2.3.1 Zoneamento de complexos alcalino-carbonatíticos

Dentre os depósitos de fosfato atualmente conhecidos, vários deles apresentam características bastante semelhantes, embora possa se afirmar que cada um apresente peculiaridades específicas, distinguindo-se dos demais,

especialmente no caso daqueles associados a complexos alcalino-carbonatíticos (Born e Kahn, 1990).

A complexidade mineralógica e tipológica dos minérios provenientes destes tipos de complexos reflete-se na variabilidade litológica horizontal discutida a seguir, que é acentuada pelo zoneamento vertical causado pelos processos de alteração intempérica.

Os complexos alcalino-carbonatíticos apresentam, em geral, uma estrutura básica anelar zonada, com diversas etapas de intrusões e metassomatismo; uma auréola ou borda constituída por rochas silicáticas metassomáticas é também comumente observada.

De acordo com Biondi (1986), as primeiras rochas a se formarem são, provavelmente, as ultrabásicas, incluindo-se aí os piroxenitos, clino-piroxenitos, peridotitos e melteigitos. A fase posterior engloba rochas nefeliníticas, como sienitos e ijolitos e, subseqüentemente, os urtitos, como diferenciação dos ijolitos. As intrusões nefelínicas causam intensa fenitização nas rochas encaixantes. Ainda segundo Biondi, após o magmatismo nefelínico, ocorrem os carbonatitos (C_1 a C_4), iniciando-se pelos carbonatitos calcíticos e os carbonatitos ricos em ferro. Os carbonatitos dolomíticos são, aparentemente, uma fase menos propícia a conter concentrações metálicas.

A Figura 3 ilustra a sucessão de múltiplas fases de magmatismo em uma chaminé alcalino-carbonatítica típica, indicando os atuais níveis de exposição de alguns depósitos minerais conhecidos, como por exemplo Jacupiranga e Araxá.

Os complexos alcalino-carbonatíticos brasileiros apresentam, em geral, formas ovaladas a subcirculares, com diâmetros que variam desde centenas de metros até alguns quilômetros e estão, em grande parte, encaixados em rochas do embasamento pré-cambriano (Kahn, 1999).

- Horizonte “A”: usualmente material estéril, de coloração avermelhada, constituído por capeamento laterítico argiloso e/ou crostas de canga ferruginosa. Neste horizonte estão presentes os oxi-hidróxidos de ferro, quartzo e, subordinadamente, os argilominerais.
- Horizonte “B”: nele ocorrem os fosfatos aluminosos neoformados, pertencentes à série da crandallita (Toledo, 1999), além de oxi-hidróxidos de ferro, anatásio e quartzo. É marcante a ausência de apatita. Anatásio, principal fase portadora de titânio, pode apresentar concentrações econômicas, além de fluorita e fases portadoras de nióbio, terras raras, bário e estrôncio.
- Horizonte “C”: no qual a principal fase portadora de fósforo é a apatita, sendo comum o seu enriquecimento neste horizonte, podendo estar relacionado tanto ao acúmulo residual como à neoformação da própria apatita. Aluminofosfatos estão presentes apenas no topo deste horizonte. Além do anatásio, ocorrem ilmenita e outras fases portadoras de titânio, como perovskita e schorlomita, de forma mais acentuada nas porções inferiores. Dependendo da natureza da rocha subjacente, ETR podem estar associados à apatita ou fluorcarbonatos, carbonatos de ETR, ou ainda à monazita. Nas porções superiores deste horizonte, os filossilicatos tipo 2:1, tais como biotita/flogopita, são alterados para argilominerais e oxi-hidróxidos de ferro; já nas porções inferiores, o hábito micáceo é preservado em filossilicatos como vermiculita (2:1), clorita (2:1:1) e interestratificados (2:1 / 2:1:1).
- Horizonte “D”: marcado pela presença de silicatos originais preservados, ao menos de forma parcial. Ocorrem ainda minerais de titânio, nióbio e ETR; carbonatos são praticamente inexistentes neste horizonte. É característica a coloração esverdeada na porção mais basal quando da abundante presença de silicatos ferro-magnesianos na rocha sã (piroxênio e flogopita principalmente). Também é comum estarem preservadas feições estruturais e texturais da rocha original.
- Horizonte “E”: material saprolítico, no qual a assembléia mineral presente, embora parcialmente alterada, assemelha-se àquela da rocha original subjacente. É marcante a presença de estruturas e texturas da rocha mãe em cortes recentes, além da presença de carbonatos, embora em

menores proporções na porção superior, principalmente quando as rochas subjacentes são de origem carbonatítica. Apatita e minerais de ETR, além de fluorita podem ocorrer em proporções econômicas.

- Horizonte “F”: é caracterizado pela rocha sã, ou pouco intemperizada, exceção feita à olivina que ocorre geralmente serpentinizada, parcial ou totalmente. São freqüentemente observados sulfetos de ferro como minerais acessórios.

A Figura 4 mostra a ocorrência, neoformação e degradação das principais fases minerais presentes nos perfis de intemperismo de complexos alcalino-carbonatíticos, ao longo dos horizontes de alteração citados anteriormente.

Figura 4 - Comportamento dos principais minerais ao longo do perfil de intemperismo (adaptado de Born e Kahn, 1990)

2.5 A variabilidade composicional da apatita

A apatita é um dos minerais não silicatados mais abundantes na crosta e, atualmente, o único mineral de minério de fósforo com interesse econômico.

A fórmula química da apatita é designada por $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, onde o flúor, o cloro e a hidroxila podem substituírem-se mutuamente, dando origem às

espécies completas, sendo, respectivamente, fluorapatita, clorapatita e hidroxiapatita (Klein e Hurlbut, 1999).

A flúor-hidroxi-apatita, de fórmula simplificada $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{OH})_2$, é o mineral do grupo da apatita mais freqüentemente associado aos complexos alcalino-carbonatíticos e como acessório nas rochas ígneas em geral. Entretanto, muitos substituintes têm sido encontrados, em todos os sítios cristaloquímicos, não somente em apatita de carbonatitos, mas de todos os ambientes geológicos e mesmo em materiais de origem orgânica (Toledo e Pereira, 2001).

A apatita constitui, na verdade, uma vasta família de minerais de fosfato de cálcio, de fórmula geral $\text{A}_{10}(\text{XO}_4)_6\text{Z}_2$. Dada a complexidade inerente ao tema, são inúmeras as publicações direcionadas ao estudo da variabilidade composicional da apatita – não apenas aquela originada naturalmente em ambientes geológicos ou mesmo em materiais orgânicos, mas também em materiais sintéticos – as quais destacam-se Náray-Szabó (1930), Mehmél (1930; 1931) todos *apud* Lenharo (1994), além de McConnell (1973), Montel (1977), LeGeros e LeGeros (1984). O sítio catiônico A pode conter, em substituição ao Ca, os elementos Na, Mg, Al, Sr, Ba, Fe, Mn, U, K, Cd, TR, Zn, Pb, Be, entre outros. Já no sítio catiônico X podem ocorrer trocas do P por Al, As, V, S, C, Si, Cr, etc. Os principais elementos presentes no sítio aniônico Z são F, OH, Cl, além de Br e outros (Toledo e Pereira, *op. cit.*).

A composição da apatita pode variar conforme o meio em que esta foi formada respeitando a necessidade de compensação de cargas decorrentes de substituições entre íons de carga diferente em relação à sua composição ideal. Entre os substituintes para o ânion fosfato, destaca-se o carbonato (CO_3^{2-}), cuja entrada provoca modificações estruturais e exige mecanismos de compensação de cargas. A variabilidade de composição, admitindo várias substituições, resulta em diferenças nos parâmetros da cela unitária, densidade, índices de refração, birrefringência, susceptibilidade magnética e solubilidade dentre outros. (Toledo, 1999; Toledo e Pereira, *op. cit.*).

O sítio do ânion monovalente F^- pode também ser ocupado principalmente por OH^- , Cl^- ou CO_3^{2-} (Toledo e Pereira, *op. cit.*). Os principais minerais do grupo da apatita de ocorrência natural, com fórmulas simplificadas, além de combinações destes tipos, em proporções muito variadas, são:

- fluorapatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ e flúor-hidroxi-apatita $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{OH})_2$ - ocorre principalmente como apatita de origem ígnea, com substituições

importantes do F^- por OH^- , e com teores variados em CO_3^{2-} (em substituição ao PO_4^{3-} e não ao F^-), mais baixos que em apatita sedimentar. Composição química: 55,60% de CaO, 42,22% de P_2O_5 , 3,77% de F.

- hidroxiapatita $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ - tem ocorrência típica na alteração supérgena de materiais sob influência de guano (excrementos de aves) e, junto com carbonato-hidroxiapatita, constitui a matéria mineral de ossos e dentes atuais. Composição química: 55,82% de CaO, 42,39% de P_2O_5 , 1,79% de H_2O .
- clorapatita $Ca_{10}(PO_4)_6Cl_2$ - menos comum que as outras variedades, pode ocorrer em rochas ígneas básicas, em rochas afetadas por metassomatismo com cloro, e ainda em alguns ambientes sedimentares. Composição química: 53,84% de CaO, 40,89% de P_2O_5 , 6,81% de Cl.
- carbonato-fluorapatita $(Ca,Na,Mg)_{10}(PO_4,CO_3)_6(F,OH)_2$ - típica de ambientes sedimentares, com F^- e CO_3^{2-} acima de 1% em peso (a denominação francolita não é mais válida). Composição química: 57,60% de CaO, 36,45% de P_2O_5 , 4,52% de CO_2 , 3,90% de F.
- carbonato-hidroxiapatita $Ca_{10}(PO_4,CO_3)_6(OH)_2$ - ocorre principalmente como a matéria mineral de ossos e dentes. Para esse tipo de ocorrência de origem sedimentar, são citadas principalmente substituições por Na, Mg e Sr. Composição química: 57,83% de CaO, 36,60% de P_2O_5 , 4,54% de CO_2 , 1,86% de H_2O .

A substituição do Ca por ETR na apatita de carbonatitos é muito importante, pois reflete a composição do magma e sua evolução. Outro elemento importante que pode ocupar o sítio do Ca é o Sr. O Ba também pode estar presente, embora em quantidades muito inferiores ao Sr (Toledo e Pereira, 2001).

Born *et al.* (1996) efetuaram um trabalho de pesquisa voltada à variabilidade composicional, micromorfológica e estrutural da apatita de diversos depósitos de fosfato brasileiros, enfocando a interferência dessas características no comportamento da apatita frente à flotação.

2.6 Geologia da área de estudo

O Complexo de Salitre localiza-se no município de Patrocínio, Estado de Minas Gerais, na região do Triângulo Mineiro, aproximadamente 280 km a noroeste de Belo Horizonte e 70 km ao norte de Araxá, conforme é apresentado na Figura 5. A região do complexo dista cerca de 30 km da sede de Patrocínio, dos quais 22 km são percorridos por rodovia asfaltada (MG-230), com sentido ao povoado de São Benedito (próximo à Salitre de Minas), e o restante do trajeto é realizado por estrada de terra. Apenas a 8 km da área sob pesquisa, encontra-se a Viação Férrea Centro-Oeste (VFCO) que passa pela cidade de Patrocínio e oferece acesso até o litoral (Melo *et al.*, 1997).

Situada na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba, a intrusão de Salitre controla o padrão radial de drenagem ao seu redor e na depressão ao centro há a denominada Lagoa Campestre, onde nasce o córrego homônimo (Melo *et al.*, *op. cit.*).

Nesta região são encontrados diversos complexos alcalinos, alinhados segundo a direção NW-SE, ao longo de uma zona de fratura, dentre os quais se destacam os maciços de Tapira, Barreiro, Salitre, Serra Negra, Catalão, Poços de Caldas, além de outros (Alves, 1960).

Serra Negra situa-se a poucos quilômetros a N-NW de Salitre. Os dois complexos são os que apresentam maior expressão em área na região de Patrocínio e são quase ligados a um ao outro, como continuação da Serra do Salitre. O domo de Serra Negra é também denominado Chapadão de Ferro por causa da espessa crosta de canga laterítica ferruginosa que reveste a maior parte de seu topo nivelado. A drenagem do domo de Serra Negra, também de padrão radial, é muito bem caracterizada. Através de observações aéreas e até mesmo por imagens orbitais destaca-se a perfeita estrutura anelar. Este maciço tem uma área de aproximadamente 100 km² (Melo *et al.*, *op. cit.*).

Figura 5 - (a) Mapa do Estado de Minas Gerais, mostrando o posicionamento do município de Patrocínio e as principais cidades próximas na região do Triângulo Mineiro (PATROCÍNIO, 2008); (b) Localização dos complexos de Salitre e Serra Negra (PATROCÍNIO, 2009).

2.6.1 Contexto geológico regional

Os Complexos de Salitre e Serra Negra estão encaixados em rochas metassedimentares do Grupo Bambuí, na porção SE do Cráton São Francisco. A estratigrafia da região, segundo Barbosa *et al.* (1970), é brevemente descrita a seguir, sendo esta detalhada no ANEXO A.

As rochas do embasamento, formado por granodioritos, granitos e gnaisses apresentam idades desde o Arqueano até o Proterozóico, enquanto que os Grupos Araxá, Canastra, Bambuí e a Formação Ibiá pertencem ao Proterozóico Superior (Pereira *et al.*, 1994). Sobre estas rochas tem-se o Grupo São Bento, a Formação Aerado e a Formação Bauru pertencentes ao Cretáceo.

O Grupo Araxá compreende, em sua maioria, mica xistos metamorfisados em fácies epidoto-anfibolito, com intercalações de lentes de muscovita quartzitos, quartzitos hematíticos, hematita-sericita xistos e raramente anfibolitos. Nos mica xistos podem ocorrer em quantidades variáveis granada, biotita, estauroлита, rutilo, zircão e turmalina como acessórios (Barbosa *et al.*, *op. cit.*).

O Grupo Canastra é constituído basicamente por quartzo filitos laminados, com níveis de quartzitos de granulação de areia muito fina a silte. Os filitos são prateados sericíticos, ora grafitosos, ora granatíferos. São raras as camadas de quartzito puro, de modo que ocorrem quartzitos ferruginosos e mesmo itabiritos, localmente milonitizados, tornando-se fibrosos com intensa silicificação e com perda de seu aspecto granular.

A Formação Ibiá não está inserida em nenhum dos grupos aqui mencionados por insuficiência de dados para seu correto posicionamento estratigráfico. É formada por uma faixa de calcixistos de coloração cinza chumbo, ligeiramente esverdeada.

O Grupo Bambuí é subdividido em três Formações: Paranoá, Paraopeba e Três Marias. Na Região de Salitre ocorrem apenas as duas primeiras com litologias apresentando metamorfismo incipiente, tais como calcários, arenitos quartzíticos, arcóseos, conglomerados, siltitos, margas e filitos ardosianos. Intercalações de metassiltitos escuros ocorrem nos quartzitos que bordejam os Complexos de Salitre e Serra Negra. Localmente, esses quartzitos encontram-se fenitizados (Barbosa *et al.*, *op. cit.*).

As rochas do Grupo São Bento encontradas na região, que podem ser observadas na estrada entre Perdizes e Patrocínio, são representadas por basaltos

amigdaloidais intercalados com argilitos e siltitos e basaltos também amigdaloidais com veios e pequenos bolsões de material caulinitizado.

A Formação Aerado é subdividida em três Membros: Abaeté, Quiricó e Três Barras. O Membro Abaeté constitui-se de um conglomerado na base da formação, por vezes apenas seixos esparsos. O Membro Quiricó é predominantemente composto por sedimentos argilosos a siltosos, arenitos finos, folhelhos e argilitos. O Membro Três Barras é constituído por arenitos com estratificações cruzadas na base, passando a turbiditos e arenitos silicificados na porção superior (Barbosa *et al.*, 1970).

A Formação Bauru compreende rochas sedimentares tufáceas na porção a NE dos Complexos de Salitre e Serra Negra e rochas piroclásticas na região de Patos de Minas, mais a leste, que gradam horizontalmente e também verticalmente para tufos.

Segundo Melo *et al.* (1997) e Barbosa *et al.* (*op. cit.*), as rochas alcalinas, de origem ígnea intrusiva e idade Cretácea Superior, estão encaixadas nos metassedimentos do Grupo Bambuí (Pré Cambriano), sendo que este compreende materiais psamíticos e pelíticos. A formação inferior que está em contato direto com as intrusivas é formada por ortoquartzitos, com granulação fina a média e ocorre muitas vezes de forma descontínua, adelgaçando-se em alguns locais, apresentando fenitização. Os ortoquartzitos apresentam essencialmente quartzo e folhelhos argilosos, também pertencentes a esta formação, apresentam sericita-muscovita. Minerais acessórios como magnetita, turmalina verde e grafita também ocorrem nessas rochas. As estruturas sedimentares dessas rochas não podem ser identificadas devido à fenitização no contato com a intrusão alcalina.

A formação superior apresenta ortoquartzitos e arenitos feldspáticos na base e folhelhos argilosos com significativa proporção de folhelhos silticos mais acima. O anel contínuo que envolve o Complexo, o qual se destaca na topografia, é constituído por ortoquartzitos com apreciável proporção de folhelhos feldspáticos, de coloração clara e granulação de 0,5 a 1 mm. Sobre o material psamítico ocorrem folhelhos argilosos que, por sua vez, apresentam intercalações de bancos centimétricos de folhelhos silticos, com estratificação nítida, de coloração avermelhada nos níveis mais alterados e verde oliva quando fresco. Há uma série de fraturamentos radiais no pacote metassedimentar que envolve a intrusão e falhamentos nas zonas de contato, com pequenos rejeitos horizontais. As camadas

mergulham de forma centrífuga à intrusão, decrescendo à medida que dela se afastam, podendo chegar de 50° a 60° nas proximidades dos contatos.

Os Complexos alcalinos de Salitre e Serra Negra são compostos principalmente por dunitos, peridotitos, serpentinitos, piroxenitos, magnetita clino-piroxenitos, glimeritos e carbonatitos. Estas rochas apresentam idades relativas ao Cretáceo Superior (Hasui e Cordani, 1968; Sonoki e Garda, 1988; Melo *et al.*, 1997) e raramente afloram, pois estão cobertas por um espesso manto laterítico originado a partir de intenso intemperismo ocorrido no período Terciário; estas lateritas constituem os chapadões de ferro observados particularmente em Serra Negra.

A falha de empurrão que coloca o Grupo Canastra sobre o Bambuí sofre uma inflexão próxima a Patrocínio, com mudança de direção de NW para NNE, devido às intrusões de Salitre e Serra Negra. As estruturas dômicas são separadas por duas falhas de direção NE. Também ocorre uma série de falhas radiais aos dois Complexos (Melo *et al.*, *op. cit.*), provavelmente resposta rúptil das rochas encaixantes às intrusões. Estas estruturas podem ser observadas na Figura 6.

Serra Negra apresenta um diâmetro aproximado de 11 a 14 km; já no Complexo de Salitre, nota-se uma extensão de aproximadamente 8 km na direção NNW, de maior alongamento, e cerca de 5 km na direção ENE.

Figura 6 - Mapa Geológico dos Complexos de Salitre e Serra Negra (Melo *et al.*, 1997).

2.6.2 Geologia do Complexo de Salitre

De acordo com Barbosa *et al.* (1970), o complexo ultramáfico-alcálico de Salitre é composto predominantemente por mica-peridotitos, seguidos por piroxenitos, dunitos e serpentinitos, também ocorrendo clino-piroxenitos e shonkinitos de forma mais restrita (mapa geológico apresentado na Figura 7). Carbonatitos calcíticos ocorrem basicamente como veios tardios ou diques. Os afloramentos destas rochas são raros na região, devido a uma espessa crosta laterítica que é, por sua vez, recoberta por um solo marrom, essencialmente argiloso (Melo *et al.*, 1997).

Figura 7 - Mapa geológico simplificado do complexo de Salitre, com quadrado destacando a área considerada neste estudo (Fosfertil, 2003 apud Barros, 2006).

A descrição mais atual das principais rochas presentes no complexo de Salitre é feita por Chaban (2003 apud Barros, 2006), compreendendo silicocarbonatito, carbonatito, peridotitos e piroxenitos, havendo tipos litológicos transicionais entre eles.

De acordo com Chaban (*op. cit.*) as rochas sílico-carbonatíticas apresentam predomínio de silicatos (50 a 70%), embora haja presença de carbonatos. O carbonatito, essencialmente calcítico, apresenta granulação média a grossa e ocorre principalmente na porção sul do complexo como veios e diques de pequena expressão cortando peridotitos e piroxenitos. Os peridotitos apresentam grande distribuição em área e são, por vezes, fenitizados, ocorrendo como corpos tabulares. Segundo o autor acima citado, essas litologias apresentam mineralogia bastante semelhante, variando apenas a proporção relativa entre as fases minerais, sendo

elas: olivina, diopsídio, flogopita, calcita, perovskita, magnetita-ilmenita, apatita, augita diopsídica, titanita.

A rocha mica peridotito apresenta textura granular média e grosseira, com maior presença de flogopita, além dos minerais citados anteriormente. Ainda de acordo com Chaban (2003), os piroxenitos ocorrem de forma abundante e com grande variedade no complexo.

Schubert (2001 *apud* Barros, 2006) observaram, em campanha de reavaliação das reservas de titânio e fosfato para o DNPM, foscorito, apatitito, glimerito, silexito e argilito, além das litologias piroxenito e carbonatito, já citadas. De acordo com esses autores, o foscorito consiste de uma variedade de piroxenito com conteúdos de apatita superiores a 25%. Segundo Chaban (*op. cit.*), o termo foscorito é designado para rochas magmáticas ricas em apatita, magnetita e olivina, apresentando subordinadamente mica, piroxênio e carbonatos.

Segundo Melo *et al.* (1997), a mineralização de Salitre, a exemplo de outros complexos como Tapira, Barreiro e Catalão, é constituída por hidroxiapatita, concentrada pelos mesmos processos genéticos, ou seja, intemperismo e lixiviação sobre as rochas originalmente ricas naquele mineral.

2.7 Caracterização de matérias primas minerais

Minérios são normalmente constituídos por uma variedade de minerais, com diferentes tamanhos dos cristais, morfologias, porosidades, pesos específicos, propriedades de superfície, susceptibilidade magnética e condutibilidade elétrica, dentre outras. Assim, a facilidade ou a dificuldade na separação de uma dada espécie mineral em relação à outra depende das diferenças relativas dentre essas características (Sampaio e Tavares, 2005).

A determinação das várias propriedades que influenciam no beneficiamento é de grande importância para avaliar a aplicabilidade dos métodos de concentração a um dado material. Técnicas das mais variadas – e que normalmente apenas necessitam de um pequeno volume de amostra – encontram-se disponíveis e podem fornecer informações sobre a identidade dos compostos e fases minerais presentes, suas proporções, densidade, presença de elementos traços nas fases de interesse,

características morfológicas, geométricas e texturais de grãos e partículas, dentre outras.

O conceito de caracterização tecnológica foi introduzido pioneiramente pelo Prof. Paulo Abib Andery no início dos anos de 1970, sendo consagrado logo em seguida, com desenvolvimento contínuo até os dias atuais, destacando-se particularmente o avanço e aperfeiçoamento das técnicas instrumentais, assim como a acessibilidade a elas. Tratava-se, na época, de uma nova forma de abordagem dos estudos aplicados ao desenvolvimento de alternativas de processos para o aproveitamento mineral (Kahn, 1999).

Internacionalmente, a caracterização de minérios voltada para o processo recebe denominações como *ore-dressing mineralogy*, *process mineralogy*, *metallurgical mineralogy*, *technological mineralogy* e *mineralurgie*.

Sant'Agostino e Kahn (1997) definem a caracterização tecnológica como uma expressão aplicada num sentido amplo para o estudo de minérios e recursos minerais para os quais se vislumbra aproveitamento econômico, abordando também, de forma bastante criteriosa, as diversas etapas da caracterização. Os autores defendem ainda que existam dois segmentos tecnológicos distintos, sendo que um deles se refere às técnicas de exploração da mina e o outro diz respeito às técnicas de beneficiamento ou processamento, ou ainda, adequação para a indústria de transformação.

Na prática, os critérios de abordagem e definição de procedimentos num estudo de caracterização de um determinado recurso ou bem mineral são norteados a partir do conhecimento preliminar da natureza e propriedades físico-químicas dos minerais que o constituem e objetivos a serem atingidos. Tais informações podem ser obtidas na literatura, através de levantamento de estudos já publicados a respeito daquele depósito mineral, ou de depósitos similares; deve-se ainda considerar a aplicabilidade dos métodos de ensaios e técnicas analíticas passíveis de serem adotadas, bem como suas características e limitações. Além disso, não podem ser desconsideradas as especificações a que se destina o bem mineral em questão, assim como a compreensão dos processos de transformação e beneficiamento passíveis de serem empregados.

O conceito de caracterização tecnológica, no entanto, é relativamente mais abrangente, pois não se limita às informações químicas e mineralógicas usuais, tais como conteúdos, composições, associações e liberação. Além dessas informações,

procura-se determinar o comportamento dos minerais úteis frente ao processo de beneficiamento, estipulando-se índices tecnológicos como, por exemplo, granulometria de liberação, partição de elementos químicos de interesse entre fases distintas, curvas de separabilidade, expectativas de recuperação em massa e metalúrgica, estimativa de qualidade de concentrado, dentre vários outros parâmetros de comportamento no tratamento do minério. A escola Australiana hoje também engloba no termo caracterização tecnológica, em um conceito mais abrangente, a determinação de parâmetros ou índices específicos, tais como de britabilidade e moabilidade, a realização de ensaios descontínuos de processos de beneficiamento, bem como estabelecimento de propriedades geomecânicas.

2.7.1 Tipologia de minérios

A caracterização tecnológica em seu objetivo mais amplo, *sensu lato*, integra a pesquisa com o beneficiamento mineral, muitas vezes também com processos de transformação posteriores. Sendo idealmente desenvolvida de forma conjugada, com interrelações e interdependências destes três segmentos, possibilita a ampliação do conhecimento sobre o minério, agregando informações de cunho geológico e tecnológico, e fornece importantes subsídios para sua exploração econômica (Henley, 1983; Isoitko, 1990; Schapiro *et al.*, 1981).

O estudo ou análise da distribuição e variabilidade das características do minério em um depósito mineral e as decorrentes implicações no processo de beneficiamento, geram o conceito de tipologia de minério, ou variedades com comportamento diferenciado frente às alternativas tecnológicas de processo e constituem a denominada caracterização tecnológica do depósito. Estas informações - parâmetros físicos, químicos, mineralógicos e tecnológicos do minério - quando relacionadas ao seu valor econômico e, conseqüentemente, à economicidade do seu aproveitamento, estão inseridas no contexto da Geometalurgia (Silveira *et al.*, 1990).

Para a otimização do aproveitamento de um recurso mineral todas estas informações devem ser devidamente consideradas nas etapas de modelagem/parametrização das reservas, plano de aproveitamento econômico e planejamento operacional de uma mina (Henley, *op. cit.*; Schapiro, *op. cit.*).

A definição e o estabelecimento de tipos de minérios dependem do nível de conhecimento sobre o depósito mineral. Segundo Born e Kahn (1990), numa fase inicial, estes são definidos primeiramente com base em observações realizadas no campo e dados químicos e mineralógicos eventualmente disponíveis. O reconhecimento de tipos de minérios é essencial para orientar a coleta de amostras-tipo representativas, destinadas a estudos tecnológicos e a auxiliar na definição dos métodos a serem empregados nestes estudos. Depois de avaliadas as características do minério frente ao processo de beneficiamento, efetua-se uma revisão dos critérios estabelecidos para a individualização dos tipos de minérios, com a confirmação dos tipos inicialmente estabelecidos ou a combinação entre estes. Paralela ou posteriormente, devem ser definidos ensaios padrão para determinação sistemática de parâmetros relevantes ao aproveitamento do minério e à sua distribuição no depósito; dessa maneira, almeja-se como resultado um modelo dos tipos de minério relevantes para o aproveitamento do depósito, com enfoque nas relações de teor, taxa de alimentação, qualidade do concentrado e recuperação.

2.7.2 Amostragem

O termo amostragem é designado para a operação de retirada de uma parte conveniente de um volume maior, de modo que as características da alíquota obtida sejam as mesmas em relação ao material original (Sampaio e Tavares, 2005).

Quando um determinado volume de material não pode ser manipulado em sua totalidade, faz-se necessária a preparação de um lote representativo, o que constitui a amostragem primária. Entretanto, quando há preparação de subamostras destinadas a ensaios específicos, este procedimento denomina-se amostragem secundária (Sampaio e Tavares, *op. cit.*).

A amostragem correta é fator determinante da qualidade dos resultados a serem gerados em análises e ensaios laboratoriais, de maneira que estes possam representar de maneira adequada certo volume de material do depósito mineral ou serem correlacionáveis aos dados obtidos em um processo industrial.

A representatividade das amostras coletadas é de fundamental relevância, uma vez que para a realização de ensaios em laboratório são utilizadas massas pequenas que variam desde centenas de gramas até dezenas ou centenas de

quilos. Contudo é importante destacar que, por serem utilizados pequenos volumes de material, em escala descontínua (isto é, em laboratório), os procedimentos efetuados apresentam um tempo de resposta relativamente curto, refletindo em maior agilidade na obtenção de resultados que eventualmente irão subsidiar importantes tomadas de decisões quanto à implantação, manutenção ou modificações das rotinas de processo (Kahn, 1999).

2.7.3 Etapas da caracterização tecnológica

De maneira simplificada, podem-se dividir os procedimentos para os estudos de caracterização realizados em laboratório em dois grupos: o primeiro contempla etapas de preparação de amostra, as quais compreendem cominuição e análise granulométrica do material, enquanto que o segundo abrange as operações de separações minerais com intuito de individualizar as fases minerais presentes, através de suas propriedades diferenciadoras seguindo-se a concentração das espécies minerais de interesse, com vista ao detalhamento de suas propriedades (Sant'Agostino e Kahn, 1997).

2.7.3.1 Preparação da amostra

De modo geral, os estudos de caracterização obedecem a uma seqüência lógica de procedimentos, iniciando-se pela análise textural, principalmente no caso de rocha fresca, na qual é possível verificar o tamanho dos cristais do mineral de interesse. Após esta fase inicial, deve-se proceder com a cominuição da amostra com o objetivo de adequar a granulação do material aos estudos subseqüentes. A seguir é feita a observação do comportamento do material na etapa de preparação, através das distribuições em massa e dos elementos químicos/óxidos mais relevantes através das frações granulométricas geradas em operações de peneiramento e/ou classificação em ciclones, dentre outros métodos. Este comportamento refletirá nas características como textura e estrutura, que definem a granulação e forma de associação das fases minerais presentes (Sant'Agostino e Kahn, *op. cit.*).

A distribuição dos elementos/óxidos de interesse na granulometria constitui um parâmetro importante e é obtido através da classificação granulométrica conjugada com análises químicas. Nos materiais em que todo o elemento de interesse esteja contido numa única fase mineral, este parâmetro irá refletir o comportamento do próprio mineral útil na granulometria. No entanto, casos nos quais existam duas ou mais fases que contenham o elemento de interesse são relativamente freqüentes, como por exemplo, em minérios fosfáticos, principalmente os de origem residual, nos quais o fósforo pode estar contido não apenas na forma de apatita como também nos fosfatos secundários neoformados.

Não é incomum que as fases minerais portadoras do elemento de interesse apresentem comportamentos distintos frente aos processos de beneficiamento, de modo que algumas dessas fases não respondem de forma favorável a esses processos ou não sejam passíveis de uso posterior, constituindo, dessa forma, minerais de ganga. Assim, torna-se importante a determinação dos minerais que contêm o elemento útil, sua partição nas diversas fases e a distribuição destas fases na granulometria.

Com base na distribuição do elemento de interesse, são selecionadas frações granulométricas para a retirada de alíquotas destinadas a análises mineralógicas mais detalhadas.

2.7.3.2 Separações minerais

Após as etapas de preparação da amostra, inicia-se então a etapa de separações minerais. Nesta fase, os métodos de separação devem ser definidos de acordo com a granulometria da amostra e propriedades físicas diferenciadoras do(s) mineral(is) de interesse em relação à ganga, que podem ser: peso específico, susceptibilidade magnética, condutibilidade elétrica, hidrofobicidade/hidrofilicidade, cor, solubilidade, etc. Os métodos de separações minerais em laboratório compreendem: métodos densitários, magnéticos, elétricos, flotação, catação manual (*sorting*), dissolução efetiva, etc. Dependendo da composição mineralógica da amostra, pode-se optar pela utilização de um ou mais destes métodos, de forma seqüenciada.

Um aspecto a ser destacado durante as etapas de caracterização é a aferição da qualidade de operação, recorrendo-se aos balanços de massa por comparação do peso alimentado nos ensaios e a somatória dos pesos dos produtos, considerando-se as perdas aceitáveis abaixo de 5%, idealmente abaixo de 2% da massa total empregada em cada ensaio (Sant'Agostino e Kahn, 1997).

Para que um determinado processo de concentração seja eficaz, é necessário não apenas que tal processo proporcione seletividade do mineral útil em relação aos minerais de ganga, mas também que o mineral de interesse apresente grau de liberação adequado às especificações requeridas para seu concentrado.

2.7.3.3 Associações minerais

O grau de liberação é definido como a porcentagem de um dado mineral que se encontra na forma de partículas livres, enquanto que aquelas partículas que contêm tanto minerais de interesse quanto os de ganga são denominadas mistas (Sampaio e Tavares, 2005).

O grau de liberação de uma determinada fase representa a sua proporção na forma livre e é determinado pela razão entre a quantidade desta fase presente na forma livre e a quantidade total existente na amostra (Gaudin, 1939; Barbery, 1991); Gaudin (*op. cit.*) propôs um método expedito para a estimativa do grau de liberação que consiste na observação de partículas em seções polidas utilizando-se de um microscópio óptico de luz refletida.

Ainda que uma breve observação ao microscópio ótico seja, em muitos casos, suficiente para avaliar se a maioria das partículas do mineral de interesse se encontram na forma liberada ou não, este método pode induzir a erros graves se utilizado para medidas quantitativas detalhadas. Para a obtenção de resultados acurados faz-se necessário o emprego da técnica de análise de imagens para determinar as proporções e tamanhos aparentemente liberados e não liberados em cada produto de moagem (Petruk, 2000).

Mais recentemente, sistemas automatizados de análise de imagem por feixe de elétrons (MEV/EDS), que consistem, a grosso modo, de três operações principais, sendo elas: identificação e distinção das fases minerais, geração de imagens representativas da amostra analisada e, finalmente, análises e medidas a

partir das imagens digitais resultantes. Sistemas dedicados ao setor mineral ganham cada vez mais espaço por serem capazes de coletar uma grande quantidade de dados em curto espaço de tempo, gerando resultados estatisticamente mais confiáveis e precisos (Sutherland e Gottlieb, 1991; Fandrich *et al.*, 2007).

2.7.4 Principais técnicas instrumentais para caracterização da apatita

A seguir são apresentadas brevemente as principais técnicas empregadas na caracterização tecnológica da apatita, as quais fornecem informações relevantes para a avaliação e compreensão do seu comportamento no beneficiamento mineral (Kahn *et al.*, 2008)

A microscopia óptica (MO) por luz transmitida é uma ferramenta básica e extremamente importante, pois permite não apenas identificar as fases de interesse, como também as suas formas de associação com a ganga. Na caracterização, são observadas essencialmente montagens de partículas minerais, classificadas por fração granulométrica com ou sem separações minerais, montadas em seções polidas ou em seções delgadas polidas ou não. As observações de fragmentos de rocha são efetuadas previamente à etapa de cominuição da amostra (análise textural). Informações como forma dos cristais, inclusões e recobrimentos superficiais também podem ser obtidas através dessa técnica.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma poderosa ferramenta através da qual é possível se obter um nível de detalhe tanto maior quanto o seu poder de magnificação em relação à MO. Para utilização desta técnica analítica as amostras observadas podem estar na forma de grãos ou partículas coladas a um suporte, ou então, em lâminas delgadas polidas ou ainda seções polidas; na preparação destas amostras, faz-se necessário o seu recobrimento por uma película condutora (usualmente C, Au ou Pt). Podem ser obtidas imagens que destacam diferentes características do material analisado, conforme a necessidade. As imagens geradas com detector de elétrons retroespalhados (*backscattered electrons* - BSE) permitem a distinção entre as espécies minerais pela diferença de número atômico médio dos elementos constituintes, através de tons de cinza. Já o detector de elétrons secundários (SE) gera imagens que trazem informações sobre a topografia/superfície das partículas do material analisado (Goldstein *et al.*, 2003).

Nas imagens obtidas através do detector de catodoluminescência (CL) é possível observar diferenças devidas a composição de uma mesma partícula de um determinado mineral; variedades de apatita podem ser facilmente diferenciadas pelas distintas cores geradas por CL, as quais estão relacionadas à presença de elementos traços em sua estrutura cristalina (Marshall, 1988; Götze, 2000).

Sistemas de microanálises químicas por EDS e/ou WDS acoplados ao MEV permitem realizar análises químicas pontuais, podendo ser obtidas, de forma estatística, as composições químicas médias de cada fase mineral presente. Isto se torna útil para posterior quantificação mineralógica através de cálculos estequiométricos baseados na composição química da amostra.

A difração de raios X (DRX) é basicamente aplicada na caracterização de minerais com maior enfoque na identificação e quantificação de espécies minerais. Particularmente em estudos de apatita, a DRX permite a identificação e distinção das variedades desse mineral, através da avaliação de parâmetros de cela unitária e do grau de cristalinidade (Bish e Reynolds, 1989).

A espectroscopia no infravermelho (FTIR) tem como principal objetivo identificar a presença de grupos de hidroxilas e carbonatos, anteriormente já sugeridos por DRX ou resultados de análises químicas.

Um teste amplamente utilizado na avaliação da flotabilidade e seletividade da apatita é a microflotação em tubo de Hallimond modificado através do qual objetiva-se estimar o comportamento da apatita na flotação, assim como da ganga, em relação ao pH, ao tipo de coletor, depressores e espécies iônicas presentes na solução. Este teste é conduzido com fases minerais puras sob condições controladas.

Os diferentes graus de recobrimento da superfície da apatita por películas de oxi-hidróxidos de ferro podem, não apenas reduzir a área disponível para adsorção do coletor na flotação, como também modificar a susceptibilidade magnética média das partículas. A apatita fortemente recoberta por estas películas não responde de maneira adequada no processo de flotação. O conteúdo de apatita não flotável, ou seja, a apatita fortemente impregnada por estas películas pode ser estimado em ensaio realizado em separadores magnéticos Frantz ou WHIMS. Este procedimento é utilizado há longa data para avaliação da recuperação potencial de apatita em depósitos de fosfato brasileiros.

2.8 O minério de fosfato de Salitre

2.8.1 Estudos prévios de caracterização

Em 1997, Apati conduziu estudos na área do Complexo de Salitre, numa depressão onde convergem as drenagens da bacia interior ao complexo, denominada por Lagoa Campestre. Este foi o primeiro trabalho na área sem focar no minério de fosfato propriamente dito, visando entender os processos de transporte dos materiais dentro desse sistema, sendo, para isso, caracterizada uma série de toposseqüência nas vertentes ao redor da lagoa.

Braz (2001), foi um dos pioneiros a realizar estudos de caracterização mineralógica e tecnológica do minério fosfato de Salitre em áreas de interesse do Grupo Galvani situadas nas porções oeste e sudoeste do complexo. Este autor, em sua dissertação de mestrado (Braz, 2004), discute que as amostras por ele estudadas podem ser consideradas como um tipo único de minério para fins de processamento mineral, visto que estas não apresentaram diferenças relevantes entre si.

Braz *et al.* (2004), apresentam resultados de estudos por microscopia eletrônica de varredura e óptica, indicando a presença de duas fases distintas de apatita, uma considerada primária, relacionada à intrusão do complexo alcalino, e outra secundária associada a eventos hidrotermais e/ou alteração supergênica. Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) e de catodoluminescência (CL) aliadas a microanálises químicas permitiram distinguir facilmente estas duas fases, sendo que a apatita primária possui teores mais elevados de SrO e de ETR, enquanto que a apatita secundária mostra maiores conteúdos de F, Fe_2O_3 e Al_2O_3 .

Araújo *et al.* (2004), apresentam resultados de caracterização tecnológica realizada em minério de fosfato localizado na porção central do complexo de Salitre em área de interesse da Fosfertil. O estudo teve como objetivo estudar amostras compostas de furos de sondagem referentes às médias previstas para o primeiro e os dez anos de exploração, conforme o plano de aproveitamento econômico preliminar então elaborado por esta empresa. As amostras estudadas apresentam teores médios de P_2O_5 de 12 a 15% e entre 36 e 40% para os produtos obtidos a partir de separações minerais. Os autores verificaram ainda que o comportamento tecnológico das amostras é muito semelhante, apresentando somente diferenças

mais expressivas no que tange aos menores constituintes (anatásio, fosfatos secundários, feldspato, holandita, perovskita e pirocloro). Destaca-se que para a amostra de dez anos de exploração foi detectada ainda a presença de carbonatos (calcita e/ou dolomita) e piroxênio/anfibólio.

Kahn *et al.* (2004), em seu trabalho voltado à otimização dos processos de beneficiamento do foscorito encontrado na porção central do complexo de Salitre, efetuaram estudos de caracterização tecnológica, com enfoque para a avaliação de uma alternativa de processamento através de separação magnética a seco. Devido ao alto teor de P e mineralogia singular presente no foscorito, essencialmente apatita e magnetita, além de minerais acessórios como ilmenita, perovskita, argilominerais e goethita, os resultados obtidos no estudo sugerem a possibilidade de um estágio de produção inicial via separação magnética a seco, enquanto pesquisas detalhadas e estudos de viabilidade para uma mineração em larga escala eram realizadas.

Barros (2006), cuja tese de doutorado teve como objeto de estudo o mesmo conjunto de amostras estudadas no presente trabalho, constatou a importância da tipologia de minérios para a otimização do processo. Em seu trabalho, o autor buscou avaliar as diferenças de comportamento tecnológico entre as tipologias de minério para a reserva mineral de Salitre e identificar os parâmetros críticos em relação à concentração da apatita por flotação. Para tanto efetuou diversos ensaios para determinação das características morfológicas, cristalográficas e físico-químicas daquele mineral, características estas importantes para um melhor controle de sua seletividade na flotação.

Dentre as publicações mais recentes relacionadas a estudos realizados sobre os tipos de minério de Salitre podem ser citadas Barros (*op. cit.*), Uliana (2006), Uliana *et al.* (2007;2008), Barros *et al.* (2008), além de estudos realizados sobre a caracterização da apatita propriamente dita por Braz *et al.* (2008) através da técnica de catodoluminescência para distinção entre apatita primária e secundária.

Uma parte dos resultados do presente trabalho foi publicada na Revista Escola de Minas, por Uliana *et al.* (2009).

2.8.2 Tipos de minério de fosfato na área em estudo

A tipologia preliminar de tipos de minério para realização dos estudos iniciais de caracterização e desenvolvimento de processos foi estabelecida para amostras da campanha de sondagens realizada pela Fosfertil em 2002 considerando o resultados de análises químicas e descrição dos testemunhos de sondagens (Kahn, 2003; *apud* Barros, 2006) sendo definidos dois tipos básicos de minério - foscoritos e piroxenitos e suas respectivas sub-tipologias: foscorito apatítico cimentado, foscorito alterado e foscorito silicificado, além de piroxenito de alto magnésio e baixo magnésio. Esta tipologia foi posteriormente redefinida (Lenharo, 2004 *apud* Barros, *op. cit.*) levando em consideração aspectos texturais/genéticos estabelecidos através estudos ao microscópio óptico conjugado com análises por difração de raios X.

A correspondência entre estes tipos é apresentada na Tabela 1 e discutida a seguir.

Tabela 1 - Correspondência entre definições de tipos de minérios adotadas em Salitre – área Fosfertil

Kahn, 2003 <i>apud</i> Barros, 2006	Lenharo, 2004 <i>apud</i> Barros, 2006
Foscorito apatítico cimentado	Apatitito (APAT)
Foscorito alterado	Foscorito intemperizado (FIT)
Foscorito silicificado	Foscorito silicificado (FST)
Piroxenito de alto magnésio	Piroxenito (PXT)
Piroxenito de baixo magnésio	Piroxenito intemperizado (PIT)
	Zona de mistura (ZMT)

O foscorito apatítico foi denominado apatitito, devido ao seu alto percentual de apatita, apresentando um material compacto e bitolado, ou seja, com faixa granulométrica restrita. No caso do foscorito alterado, esse foi reclassificado como foscorito intemperizado em razão da presença de material ferruginoso e friável. Já para o foscorito silicificado manteve sua mesma classificação. Para os piroxenitos, adotou-se a classificação de piroxenito, particularmente para o tipo piroxenito de alto magnésio, no qual o processo de intemperismo foi menos acentuado. Para o piroxenito com baixo magnésio os estudos de microscopia óptica mostraram que o processo de laterização foi bastante acentuado propiciando um maior

enriquecimento em apatita tendo este tipo sido renomeado como piroxenito intemperizado.

Verificou-se ainda a presença de materiais correspondentes a uma transição entre os dois principais tipos identificados (piroxenito e foscorito) e, de forma a evitar qualquer confusão com os aspectos geológicos, adotou-se uma nova classificação como sendo uma amostra de zona de mistura.

Em termos de distribuição espacial na campanha de sondagem realizada pela Fosfertil, no ano de 2003, os principais tipos litológicos descritos foram piroxenito, foscorito e peridotito com predominância dos piroxenitos sobre os demais (Barros, 2006).

A seguir são detalhadas as principais características de cada tipo de minério segundo Barros (*op. cit.*) – itens 2.8.2.1 a 2.8.2.6. É importante ressaltar que as composições mineralógicas descritas por aquele autor e sumariadas a seguir referem-se a descrições de amostras pontuais de intervalos de sondagem que abrangem desde os níveis mais intemperizados até a rocha fresca.

2.8.2.1 Apatitito (APAT)

O apatitito representa rochas compostas essencialmente por apatita (42 a 85%) e subordinadamente flogopita (traços a 15%), magnetita (traços a 5%), carbonatos (traços a 20%), olivina (traços a 25%) e clinohumita (traços a 5%), além de oxi-hidróxidos de ferro (traços a 10%), serpentina (traços a 3%), clorita (traços a 5%), argilominerais (traços a 3%) e quartzo (traços a 2%). Esses apatititos apresentam em média 70% de apatita e podem ser classificados como supérgenos ou com carbonatação superimposta.

O apatitito supergênico é formado por massas de apatita secundária muito finas com cavidades e vesículas distribuídas aleatoriamente e alongadas, parcialmente preenchidas por apatita radial concêntrica prismática acicular. Apatitito com carbonatação superimposta representa rochas de granulação fina, inequigranular seriada a equigranular, constituídas de apatita, flogopita e oxi-hidróxidos de ferro, percolados e penetrados por carbonatos intersticiais.

2.8.2.2 Foscorito

O foscorito e seus produtos de alteração hidrotermal e intempérica representam rochas constituídas por apatita (10 a 30%), magnetita (10 a 50%) e olivina (traços a 32%) com flogopita (traços a 30%) e carbonatos (5 a 32%), dependendo do grau de flogopitização e carbonatação, além de clinohumita (traços a 18%), perovskita (traços a 6%) e pirocloro (traços a 2%). Outros minerais comuns como traços são pirita, serpentina, biotita, ilmenita, oxi-hidróxidos de ferro, fengita e óxidos de titânio.

2.8.2.3 Foscorito Intemperizado (FIT)

O foscorito intemperizado apresenta as mesmas características primárias do foscorito acima descrito, inclusive com faixas de cristalização cumulática; no entanto, destaca-se que este litotipo apresenta apenas alteração intempérica, evidenciada pela transformação de olivina para serpentina, sem carbonatação ou flogopitização. É constituído de serpentina ($\approx 30\%$), olivina (forsterita; $\approx 10\%$), apatita (predominantemente primária; $\approx 25\%$), magnetita ($\approx 25\%$), carbonatos ($\approx 5\%$) e traços de fengita ($\approx 1\%$), flogopita ($\approx 1\%$), oxi-hidróxidos de ferro, pirocloro, perovskita e pirita.

2.8.2.4 Foscorito Silicificado (FST)

O foscorito silicificado constitui material de granulação grossa a fina, inequigranular seriada, sendo que as porções de granulação grossa representam zonas reliquias de apatita primária grossa, geralmente fraturada. As zonas de granulação mais fina são constituídas de oxi-hidróxidos de ferro associado ao quartzo reprecipitado e à apatita secundária. A rocha original pode ter sido um foscorito, um apatitito ou, ainda, um piroxenito, em função dos restos de clorita/serpentina, da granulação da apatita primária e da presença somente de magnetita (sem pirita e sem anatásio).

2.8.2.5 Piroxenito (PXT)

O piroxenito e seus produtos de alteração hidrotermal são compostos principalmente por piroxênios (25 a 60%) e flogopita (11 a 35%), além de olivina (traços a 15%), magnetita (4 a 12%), perovskita/leucoxênio (5 a 18%), apatita (1 a 25%), carbonatos (traços a 25%) e clinohumita (traços a 15%); outros minerais comuns são serpentina (até 30%), clorita (até 8%), oxi-hidróxidos de ferro, pirita, quartzo e barita. Pode estar associado a processos hidrotermais, sendo classificado então como hidrotermalizado.

Piroxenito com alteração hidrotermal pode apresentar zonas de granulação muito grossa e de granulação fina a média, ambas muito fraturadas e com alteração de clinohumita, flogopita, carbonatos e, finalmente, apatita secundária. A rocha geralmente é inequigranular seriada.

2.8.2.6 Piroxenito Intemperizado (PIT)

O piroxenito pode, também, estar associado a processos de intemperismo, sendo, então, classificado como intemperizado. Essas rochas são de granulação grossa-média a fina, inequigranular seriada a equigranular, em processo de alteração supergênica. São constituídas por pseudomorfos de piroxênio (e/ou olivina) (0 a 25%), substituídos por serpentina (15 a 30%) e cristais médios de flogopita (0 a 35%), clorita (0 a 8%), magnetita (4 a 12%), clinohumita (0 a 5%), apatita (0 a 5%), oxi-hidróxidos de ferro (traços a 15%), perovskita (0 a 18%), além de agregados de minerais (flogopita, clorita, etc.) e raramente barita e quartzo. Toda a rocha é percolada e cortada por carbonatos (0 a 25%).

2.8.3 Caracterização das variedades de apatita

Barros (*op. cit.*) apresenta resultados de estudos de caracterização morfológica, textural e química (EDS e FTIR) da apatita, obtidos através de separações minerais de amostras de testemunhos de sondagens. Ao todo este autor

descreve 6 variedades, sendo 2 primárias (ígneas) e 4 secundárias (neoformadas no processo de laterização):

- 1 apatita primária, límpida, sem inclusões, de granulação média (0,2 a 1,0 mm) podendo ser prismática ou arredondada (magmática);
- 2 apatita primária, com inclusões, de granulação média (0,2 a 1,0 mm) podendo ser alongada ou arredondada (magmática ou hidrotermal);
- 3 halos ou bordas sobrecrecidas, fina a média, com birrefringência mais elevada, amarelada e, eventualmente, com aspecto de linhas internas paralelas (linhas de crescimento), podendo ser classificada como hidrotermal ou supérgena;
- 4 fina a média acicular, radial de preenchimento, podendo formar semi-rosetas, classificada como supérgena;
- 5 em esferulitos de granulação fina a média, formando rosetas, classificada como supérgena;
- 6 coloforme, em seqüência, com crescimento perpendicular as paredes ou de forma irregular preenchendo os interstícios como um cimento, ambas as formas compostas de grãos muito finos.

A apatita de variedades 4, 5 e 6 acima descritas estão intimamente associadas ao “plasma limonítico” e têm sua origem relacionada aos processos de alteração intempérica.

2.9 Beneficiamento de minérios de fosfato relacionados a complexos alcalino-carbonatíticos

São abordados neste item os aspectos mais relevantes quanto à seletividade da apatita em relação à ganga na flotação e os principais fatores que irão afetar no desempenho dessa operação unitária como processo de concentração daquele mineral.

A flotação é um processo de separação aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas características de superfície entre as espécies presentes (Peres e Araújo, 2006). É empregada na concentração de diversos tipos de minérios e amplamente utilizada em minérios de fosfato.

Etapa de pré-concentração através de separação magnética é comum no processamento de minérios de fosfato com elevados conteúdos de magnetita, a exemplo dos foscoritos. Essa etapa é geralmente realizada junto à etapa de moagem, cujo produto alimenta a flotação, procurando-se, dessa forma, remover grande parte da magnetita liberada e evitar a sobre모agem da apatita, uma vez que a magnetita apresenta maior resistência à moagem; essa operação propicia também um aumento da taxa de alimentação do circuito de moagem.

A seletividade do processo de flotação é fundamentada na diferenciação do grau de hidrofobicidade das diferentes espécies minerais presentes (Peres e Araújo, 2006).

Além da seletividade em relação à ganga, há alguns fatores que devem ser considerados para o desempenho do processo. No caso da apatita, deve-se avaliar a presença de recobrimento por películas argilo-limoníticas e variedades distintas de apatita. Tais características podem influenciar negativamente na recuperação desse mineral na flotação.

Dentre as fases minerais presentes nos minérios de fosfato brasileiros, verifica-se que praticamente todos são oximinerais, ou seja, apresentam oxigênio em sua composição. Esta grande família compreende a maioria dos minerais existentes na natureza e apresenta, como característica natural, acentuada hidrofiliidade, ou seja, grande afinidade pela água. Este fenômeno deve-se principalmente às pontes de hidrogênio formadas pela interação entre o hidrogênio, constituinte das moléculas de água, e o oxigênio presente na estrutura cristalina desses minerais (Leal Filho, 1999). Sabe-se que quanto maior a solubilidade de um determinado mineral, maior será sua hidrofiliidade. Dessa forma, quanto mais solúvel for o mineral a ser flotado, maior deverá ser a cadeia carbônica da substância coletora que irá induzir hidrofobicidade à superfície deste mineral

De maneira simplificada, podem-se agrupar os minerais em cinco famílias tecnológicas principais (ordenadas pela solubilidade, em ordem crescente): hidrofóbicos (ex: grafita), sulfetos, óxidos e silicatos, sais semi-solúveis (ex: apatita, dolomita, perovskita, barita) e sais solúveis (ex: halita, silvita).

Para reverter o caráter dos oximinerais de hidrofílico para hidrofóbico é necessário prévio condicionamento do minério em polpa com substâncias compostas por cadeias carbônicas de grande comprimento ($C > 12$) (Leal Filho, *op. cit.*).

A apatita, caracterizada como oximineral da família dos sais semi-solúveis, é um exemplo de mineral naturalmente hidrofílico. Para que se torne hidrofóbica é necessária a adsorção de agentes coletores de cadeias longas em sua superfície, tais como os ácidos graxos (Leal Filho, 1991).

A flotabilidade da apatita pode ser afetada pelo seu grau de alteração, pelo tipo (se primária ou secundária), pela presença de inclusões e ainda pelo recobrimento de películas argilo-limoníticas (Lenharo, 1994).

Os coletores utilizados para a apatita são os ácidos carboxílicos, ou ácidos graxos, com diferentes tamanhos de cadeia carbônica. A seletividade da apatita na flotação dá-se, principalmente, pela presença de outros minerais semi-solúveis como calcita, dolomita, fluorita e barita, rotineiramente presentes em minérios de fosfato de origem ígnea.

No caso de Cajati, onde o minério é lavrado em nível de rocha fresca, com mineralogia relativamente simples, foi desenvolvido o processo de concentração de apatita a partir da utilização de ácido graxo como coletor e amido de milho como depressor dos minerais de ganga, processo este desenvolvido na década de 1960 pelo Prof. Paulo Abib Andery. Já no caso de minérios lavrados em nível de rocha intemperizada, como é o caso da maioria dos depósitos de fosfato brasileiros, foram constatados diversos problemas para este processo principalmente devido à sua complexidade mineralógica (Leal Filho, *op. cit.*).

Existem inúmeros trabalhos sobre a determinação das propriedades físico-químicas de superfície e avaliação da flotabilidade e seletividade da apatita para diversos tipos de minérios brasileiros de origem ígnea, dos quais podem ser destacados Leal Filho (1991), Rodrigues e Brandão (1993), Lenharo (1994), Barros (1997), Guimarães e Peres (1999), Leal Filho (1999), Leal Filho *et al.* (2000), Barros *et al.* (2001), Papini *et al.* (2001), Guimarães *et al.* (2005), Barros (2006), Oliveira *et al.* (2007), Barros *et al.* (2008), entre outros.

No depósito de Salitre, de acordo com Barros *et al.* (*op. cit.*), a apatita pode ser classificada em três tipos principais: a primária, com alto conteúdo de SiO_2 ; a secundária, com altos conteúdos de ferro e magnésio (provavelmente associados a intenso recobrimento superficial) e aquelas que apresentam maior birrefringência, com alto conteúdo de $(\text{CO}_3)^{-2}$. O recobrimento da apatita primária presente nos foscoritos por películas limoníticas, modifica seu comportamento na flotação,

tornando sua superfície físico-quimicamente semelhante aos oxi-hidróxidos de ferro (Barros, 2008).

Barros *et. al.* (*op. cit.*) destacam outros fatores críticos na flotação, além do tipo de apatita e seu grau de recobrimento. A presença de íons de Ca e Mg modificam a carga de superfície da apatita e de minerais de ganga. Os autores também verificaram que o amido de milho é mais eficiente como depressor da apatita secundária, devido à associação com óxi-hidróxidos de ferro e, no caso dos carbonatos, que este age melhor como depressor de calcita que de dolomita.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostras estudadas

Foram estudadas seis amostras compostas de furos de sondagem, representativas dos tipos de minério individualizados segundo critérios apresentados no item 2.8.2. A composição das amostras (ANEXO B) foi efetuada pela Fosfertil, sendo a identificação das mesmas apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação de amostras estudadas

Amostra	Tipo de minério
APAT	Apatitito
FIT	Foscorito intemperizado
FST	Foscorito silicificado
ZMT	Zona de mistura
PIT	Piroxenito intemperizado
PXT	Piroxenito

Foram encaminhados para estudo massa total em torno de 5 kg de cada amostra. As suas principais características são apresentadas a seguir:

- Apatitito, formado por um material compacto, bitolado e com conteúdo de Fe_2O_3 menor que 20,0%.
- Foscorito intemperizado, material ferruginoso e friável.
- Foscorito silicificado, material com níveis de sílexito bitolado e bastante compacto.
- Zona de mistura, material friável com maiores teores de SiO_2 e Al_2O_3 , com presença de foscorito e piroxenito.
- Piroxenito intemperizado, amostra com baixo teor de magnésio, apresentando-se bastante intemperizada.
- Piroxenito, amostra com baixo grau de intemperismo e alto teor de magnésio.

Destaca-se que estas amostras referem-se a contrapartes relativas àquelas objeto de estudo dos capítulos 5.4 a 5.7 da tese de doutorado de Barros (2006).

3.2 Procedimento experimental

As atividades de caracterização desenvolvidas neste estudo são ilustradas no fluxograma da Figura 8 e descritas a seguir:

- cominuição abaixo de 1 mm em britador de rolos;
- homogeneização e amostragem através de pilhas alongadas ou amostrador Jones, para retirada de alíquotas representativas destinadas aos ensaios de caracterização;
- cominuição através de moinho de bolas, em circuito aberto com ajuste de tempo de moagem para obtenção de produto com aproximadamente 93% do material passante em peneira de abertura 0,21 mm (65 malhas Tyler) - condição especificada pela Fosfertil;
- análise granulométrica do produto de moagem através de peneiramento a úmido em peneiras com aberturas nominais de 0,21 mm (65 malhas), 0,15 mm (100 malhas), 0,074 mm (200 malhas), 0,037 mm (400 malhas) e 0,020 mm (635 malhas);
- amostragem das frações granulométricas através de amostrador Jones, para retirada de alíquotas representativas destinadas aos ensaios de separações minerais;
- separações minerais em líquido denso tetrabrometano (TBE), com densidade de $2,95 \text{ g/cm}^3$, para as frações acima de 0,020 mm, seguidas de separações magnéticas em separador Frantz (modelo de barreira, LB-1) restritas aos produtos pesados, empregando-se duas intensidades de campo distintas. Dessa forma, procurou-se individualizar as várias espécies minerais presentes, gerando os seguintes produtos:
 - flutuado, com densidade inferior a $2,95 \text{ g/cm}^3$;
 - afundado magnético em 1 kG;
 - afundado magnético em 4 kG;
 - afundado não magnético em 4 kG;

Todas as atividades descritas, bem com as análises efetuadas, foram conduzidas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

Figura 8 - Fluxograma do procedimento experimental adotado

3.3 Técnicas analíticas empregadas

Análises químicas foram efetuadas em pastilhas fundidas através da técnica de fluorescência de raios X em espectrômetro Axios Advanced, marca Panalytical, com determinações quantitativas de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO, tanto na amostra inicial quanto nos produtos gerados nas etapas de preparação e separações minerais. Efetuou-se também a determinação da perda ao fogo (PF) com amostra calcinada em mufla a 1050 °C por 1h. A aferição das operações de “manuseio de amostras / análises químicas” foi realizada através da comparação entre os teores dosados e os teores médios calculados, ponderados com as massas de cada fração/ produto, procurando-se respeitar o limite máximo aceitável para diferença entre os valores dosados e os calculados da ordem de 10% relativos (Sant’Agostino e Kahn, 1997).

A análise mineralógica por difração de raios X foi realizada pelo método do pó, em difratômetro de raios X, marca Philips, modelo MPD 1880, nos produtos de separações minerais, bem como no material passante em 0,020 mm. A identificação da assembléia mineral presente foi obtida por comparação dos difratogramas com os bancos de dados do International Centre for Diffraction Data (2003), ICDD e PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007), PAN-ICSD, através do *software* High Score Plus (versão 2.2d, 2008) da PANalytical.

A identificação das diversas fases minerais presentes e a determinação de suas composições químicas foram efetuadas em microscópio eletrônico de varredura, modelo Stereoscan 440, marca LEO, com sistemas de microanálise INCA (EDS/WDS, marca Oxford).

A quantificação dos minerais presentes e o estudo das formas de ocorrência e associação da apatita foram efetuados de maneira automatizada através do *sistema* de análise de imagens Mineral Liberation Analyser (MLA-FEI) integrado a microscópio eletrônico de varredura ambiental (ESEM) Quanta 600 FEG (FEI) com sistema de microanálise Quantax (Bruker). Estas análises consideraram os níveis de cinza em imagem de elétrons retroespalhados (contraste de número atômico) e as composições químicas por EDS (Fandrich *et al.*, 2007) empregando o modo XBSE do sistema MLA. A aferição dos resultados obtidos foi efetuada através da comparação da composição química calculada pelo *software* MLA, que se baseia na

química mineral e densidades informadas, com os teores dosados por fração granulométrica através de fluorescência de raios X.

No APÊNDICE A são apresentadas algumas fotografias referentes aos principais equipamentos utilizados neste trabalho. O APÊNDICE B apresenta um fluxograma com a seqüência das principais etapas realizadas para a análise de imagens através do sistema MLA.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Apatitito (APAT)

4.1.1 Composição química

A composição química da amostra APAT está exposta na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química da amostra APAT

P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Teores (% em massa)					PF	CaO/ P ₂ O ₅
			Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO		
25,2	33,3	1,73	0,81	27,2	1,36	1,45	0,96	3,19	1,32

Esta amostra é constituída por 33,3% de CaO, 27,2% de Fe₂O₃ e 25,2% de P₂O₅ (essencialmente apatítico), além de 1,73% de SiO₂, 1,45 de TiO₂, 1,36% de MgO, 0,96% de BaO e 0,81% de Al₂O₃. A relação CaO/P₂O₅ é 1,32. A perda ao fogo para esta amostra corresponde a 3,19%.

4.1.2 Análise granulométrica

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise granuloquímica para a amostra APAT.

A análise granulométrica indica que 6,85% em massa constituem material retido em 0,21 mm, enquanto que 19,9% referem-se ao passante em 0,020 mm.

Os teores de P₂O₅ apresentam tendência geral de diminuição para as frações mais finas, variando entre 24 e 27% no intervalo -0,21+0,020 mm, onde estão contidos aproximadamente 75% do total de P₂O₅ presente na amostra. Acima de 0,21 mm o teor de P₂O₅ é 32,5% (8,8% do total contido na amostra), enquanto que abaixo de 0,020 mm este teor corresponde a 21,3%, o que representa 16,7% do total de P₂O₅ contido na amostra. A relação CaO/P₂O₅ varia entre 1,32 e 1,37 acima de 0,020 mm, diminuindo para 1,23 abaixo dessa fração.

Tabela 4 - Análise granuloquímica da amostra APAT

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)									CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)				
	ret.	acum.	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
+0,21	6,8	6,8	32,5	44,5	2,25	0,49	10,4	0,73	1,15	0,71	3,81	1,37	8,8	9,0	3,9	2,6	3,7
-0,21+0,15	21,0	27,9	26,7	36,0	1,08	0,37	27,0	1,32	1,58	0,73	2,58	1,35	22,1	13,3	9,1	21,1	20,8
-0,15+0,074	27,4	55,3	26,4	35,2	1,09	0,44	27,6	1,39	1,60	0,79	2,04	1,33	28,5	17,5	14,3	28,2	28,6
-0,074+0,020	24,8	80,1	24,4	32,1	1,63	0,66	28,8	1,59	1,76	0,88	3,70	1,32	23,9	23,8	19,3	26,7	29,5
-0,020	19,9	100,0	21,3	26,2	3,10	2,28	28,8	1,16	1,34	1,35	7,44	1,23	16,7	36,3	53,3	21,4	17,3
Total calc.	100,0		25,4	33,5	1,70	0,85	26,8	1,34	1,55	0,91	3,76	1,32	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			25,2	33,3	1,73	0,81	27,2	1,36	1,45	0,96	3,19	1,32					

Nota: "ret." = retida; "acum." = acumulada; "calc." = calculado

Abaixo de 0,21 mm estão contidos aproximadamente 97% do total de Fe₂O₃ presente na amostra, com teores compreendidos entre 27 e 29%, tendendo ao acréscimo nas frações mais finas. Acima de 0,21 mm este teor corresponde a 10,4%.

Os teores de SiO₂ estão compreendidos entre 1,1 e 3,1%, com tendência de aumento para os finos a partir de 0,21 mm. Os teores de TiO₂ variam de 1,1 a 1,8%, enquanto que os de MgO situam-se entre 0,7 e 1,6%, ambos com tendência a aumentar para os finos, até 0,020 mm.

Acima de 0,020 mm, os teores de Al₂O₃ situam-se entre 0,4 e 0,7%, elevando-se para 2,28% abaixo dessa fração. BaO apresenta comportamento semelhante ao longo do intervalo granulométrico, com teores variando entre 0,7 e 0,9% acima de 0,020 mm e 1,35% abaixo dessa fração.

As distribuições acumuladas em massa e dos conteúdos de P₂O₅, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e MgO são ilustradas no gráfico da Figura 9.

As distribuições dos teores de P₂O₅, Fe₂O₃ e MgO apresentam comportamentos semelhantes entre si e também em relação à distribuição em massa, com conteúdos entre 17 e 21% abaixo de 0,020 mm. A distribuição de SiO₂ destaca-se das demais, notadamente a partir de 0,15 mm, com esta tendendo a concentrar-se nos finos, com conteúdo aproximado de 36% abaixo de 0,020 mm. A distribuição de Al₂O₃ é significativamente distinta já a partir de 0,21 mm, com 53% do total de Al₂O₃ contido abaixo de 0,020 mm.

Figura 9 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - amostra APAT

4.1.3 Separações minerais

Os resultados das separações minerais (líquido denso e separação magnética em Frantz) para a amostra APAT, efetuadas nas frações acima de 0,020 mm, são apresentados na Tabela 5.

O produto total +0,020 mm afundado não magnético em 4 kG responde por 60,5% em massa no ensaio (48,4% em relação à amostra), com proporções variando de 54,5 a 75,2% em massa, tendendo à diminuição nas frações finas. O teor médio de P_2O_5 neste produto corresponde a 39% (89,3% do total contido no ensaio; 74,4% em relação à amostra), situando-se entre 38,3 e 39,4% ao longo do intervalo granulométrico considerado. O teor médio de CaO é de 52,2%, com relação CaO/ P_2O_5 de 1,34, variando de 1,33 a 1,36, diminuindo aos finos. Permanecem associados a este produto teores de 1,80% de Fe_2O_3 , 0,58% de BaO, 0,32% de TiO_2 e 0,22% de Al_2O_3 . A perda ao fogo para este produto corresponde a 2,16%.

O produto total +0,020 mm flutuado corresponde a 2,3% em massa no ensaio (1,9% em relação à amostra), com proporções variando entre 1,8 e 3,5% ao longo do intervalo granulométrico considerado. Este produto apresenta teores médios de 44,3% de SiO_2 , 10,6% de MgO, 9,28% de CaO, 5,89% de Fe_2O_3 , 5,18% de Al_2O_3 , 2,36% de P_2O_5 (0,2% dos totais contidos no ensaio e na amostra), 0,63% de TiO_2 e 0,39% de BaO. A relação CaO/ P_2O_5 média para este produto é de 3,94, mantendo-se elevada ao longo do intervalo granulométrico considerado.

Tabela 5 - Resultados das separações minerais para a amostra APAT (frações acima de 0,020 mm)

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)								CaO/ P ₂ O ₅	Distr. ensaio (%)			Distr. amostra (%)				
			P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO		PF	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	
-0,30+0,21	Flutuado	3,5	0,2	2,26	7,68	53,2	4,44	4,47	10,2	0,47	0,38	17,3	3,40	0,2	1,5	1,5	0,0	0,0	0,1
	Af. Mag. 1 kG	3,6	0,2	3,76	4,84	1,60	<0,10	80,2	3,56	3,35	1,04	...	1,29	0,4	27,8	10,5	0,0	0,7	0,5
	Af. Mag. 4 kG	17,7	1,2	19,8	26,8	1,27	0,95	32,8	0,99	4,01	1,15	6,65	1,35	10,8	55,9	61,8	0,9	1,5	3,1
	Afund. Não Mag.	75,2	5,1	38,3	52,2	0,11	0,22	2,04	<0,10	0,40	0,61	2,69	1,36	88,6	14,8	26,2	7,8	0,4	1,3
	Total calculado	100,0	6,8	32,5	44,5	2,25	...	10,4	...	1,15	0,71	...	1,37	100,0	100,0	100,0	8,8	2,6	5,1
-0,21+0,15	Flutuado	1,9	0,4	2,52	11,6	44,7	4,14	4,71	9,96	0,57	0,40	20,7	4,61	0,2	0,3	0,7	0,0	0,1	0,1
	Af. Mag. 1 kG	24,6	5,2	1,48	1,79	0,35	<0,10	87,1	3,76	3,39	1,04	...	1,21	1,4	79,5	52,9	0,3	16,8	11,3
	Af. Mag. 4 kG	11,7	2,5	17,6	22,5	1,34	1,50	37,3	1,22	4,52	1,27	7,51	1,28	7,7	16,1	33,5	1,7	3,4	7,1
	Afund. Não Mag.	61,8	13,0	39,2	52,8	<0,10	0,19	1,75	0,11	0,33	0,52	2,13	1,35	90,8	4,0	12,9	20,1	0,8	2,8
	Total calculado	100,0	21,0	26,7	36,0	...	...	27,0	1,32	1,58	0,73	...	1,35	100,0	100,0	100,0	22,1	21,1	21,4
-0,15+0,074	Flutuado	1,8	0,5	2,31	9,99	42,1	5,00	5,82	10,3	0,63	0,41	...	4,32	0,2	0,4	0,7	0,0	0,1	0,2
	Af. Mag. 1 kG	25,2	6,9	1,10	1,30	0,33	<0,10	88,0	3,76	3,27	1,02	...	1,19	1,0	80,4	51,6	0,3	22,7	14,6
	Af. Mag. 4 kG	11,8	3,2	16,6	20,7	2,04	1,86	37,4	1,67	5,11	1,38	7,97	1,25	7,4	16,0	37,7	2,1	4,5	10,6
	Afund. Não Mag.	61,2	16,8	39,4	52,7	<0,10	0,22	1,48	0,10	0,26	0,59	1,80	1,34	91,4	3,3	10,0	26,1	0,9	2,8
	Total calculado	100,0	27,4	26,4	35,2	...	...	27,6	1,39	1,60	0,79	...	1,33	100,0	100,0	100,0	28,5	28,2	28,2
-0,074+0,020	Flutuado	2,9	0,7	2,33	8,07	42,6	6,11	7,05	11,3	0,72	0,38	20,5	3,46	0,3	0,7	1,2	0,1	0,2	0,3
	Af. Mag. 1 kG	24,1	6,0	1,13	1,31	0,50	<0,10	88,1	3,69	3,11	1,01	0,56	1,16	1,1	73,6	42,5	0,3	19,6	12,0
	Af. Mag. 4 kG	18,5	4,6	17,2	20,7	1,48	1,85	33,6	1,60	4,30	1,54	8,81	1,20	13,0	21,6	45,2	3,1	5,8	12,7
	Afund. Não Mag.	54,5	13,5	38,4	51,0	<0,10	0,26	2,15	0,14	0,36	0,63	2,45	1,33	85,6	4,1	11,1	20,4	1,1	3,1
	Total calculado	100,0	24,8	24,4	32,1	...	...	28,8	1,59	1,76	0,88	3,70	1,32	100,0	100,0	100,0	23,9	26,7	28,2
TOTAL +0,020	Flutuado	2,3	1,9	2,36	9,28	44,3	5,18	5,89	10,6	0,63	0,39	...	3,94	0,2	0,5	0,9	0,2	0,4	0,8
	Af. Mag. 1 kG	22,9	18,3	1,25	1,49	0,41	<0,10	87,7	3,73	3,25	1,02	...	1,19	1,1	76,1	46,3	0,9	59,8	38,4
	Af. Mag. 4 kG	14,4	11,5	17,4	21,7	1,59	1,68	35,4	1,47	4,54	1,40	8,07	1,25	9,4	19,3	40,6	7,9	15,1	33,6
	Afund. Não Mag.	60,5	48,4	39,0	52,2	...	0,22	1,80	...	0,32	0,58	2,16	1,34	89,3	4,1	12,1	74,4	3,2	10,0
	Total calculado	100,0	80,1	26,4	35,2	...	...	26,3	...	1,60	0,80	...	1,34	100,0	100,0	100,0	83,3	78,6	82,8

Nota: "Distr" = Distribuição; "Af." ou "Afund." = Afundado; "Mag." = Magnético; (...) dado não disponível

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 1 kG representa 22,9% em massa no ensaio (18,3% em relação à amostra), com proporção de 3,6% acima de 0,21 mm, elevando-se 24 a 25% abaixo dessa fração. Este produto apresenta teores médios de 87,7% de Fe_2O_3 (76,1% do total contido no ensaio; 59,8% em relação à amostra), 3,73% de MgO , 3,25% de TiO_2 (46,3% do total contido no ensaio; 38,4% em relação à amostra), 1,49% de CaO , 1,02% de BaO , 1,25% de P_2O_5 (1,1% do total contido no ensaio; 0,9% em relação à amostra) e 0,41% de SiO_2 . A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ média para este produto é de 1,19, variando de 1,16 a 1,29, com tendência de diminuição nos finos.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 4 kG corresponde a 14,4% em massa no ensaio (11,5% em relação à amostra), com proporções compreendidas entre 11,7% e 18,5%. Este produto apresenta teores médios de 35,4% de Fe_2O_3 , 21,7% de CaO , 17,4% de P_2O_5 (9,4% do total contido no ensaio; 7,9% em relação à amostra), 4,54% de TiO_2 (40,6% do total contido no ensaio; 33,6% em relação à amostra), 1,68% de Al_2O_3 , 1,59% de SiO_2 , 1,47% de MgO e 1,40% de BaO . A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ média é de 1,25, variando entre 1,20 e 1,35, com tendência de diminuição nas frações finas. A perda ao fogo representa 8,07% neste produto.

4.1.4 Composição mineralógica

A composição mineralógica da amostra APAT para as frações acima de 0,020 mm, apresentada na Tabela 6, foi determinada através do sistema de análise de imagens MLA, com apoio de identificação das fases por DRX além de MEV. A comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais é apresentada na Figura 10.

Considerando-se o intervalo +0,020 mm, a amostra APAT é composta predominantemente por apatita (64%) e magnetita (21%; hematita é inferior a 1% nesta amostra), além de 6% de goethita, 2% de filossilicatos (vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita), 2% de psilomelano, 1% de ilmenita e 0,9% de quartzo. Outros minerais acessórios (inferiores a 1%) estão presentes, sendo eles: aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita, monazita, niobatos (pirocloro e traços de

Tabela 6 - Composição mineralógica para a amostra APAT (frações acima de 0,020 mm)

Mineral	Fração (mm) - % em massa				
	+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Total +0,020
apatita	81	66	64	57	64
Al-fosfatos	0,3	0,5	0,5	1	0,6
monazita	0,3	0,5	0,3	0,9	0,5
calcita	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
dolomita	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
perovskita	0,7	0,5	0,4	0,2	0,4
anatásio	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
ilmenita	0,8	0,9	0,9	1	1
magnetita	4	23	24	22	21
hematita*	3	<1	<1	<1	<1
goethita	4	4	5	9	6
psilomelano	0,8	0,8	1	4	2
niobatos	0,1	0,3	0,3	1	0,5
zirkelita-zirconolita	0,2	0,2	0,2	0,5	0,3
filossilicatos	2	2	2	2	2
diopsídio	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
quartzo	2	0,9	0,8	0,8	0,9
titanita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
outros	<0,1	0,1	<0,1	0,1	0,1

Notas: 1. Al-fosfatos = gorzeixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

2. *hematita calculada por diferença em relação à magnetita presente no afundado magnético em 1 kG

Figura 10 - Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra APAT

ferro-columbita), carbonatos (calcita e dolomita), perovskita, zirkelita, zirconolita, anatásio, diopsídio, titanita e outros (barita, zircão, baddeleita e pirrotita).

As proporções de apatita situam-se entre 57 e 81%, com tendência de decréscimo nas frações mais finas.

A magnetita apresenta conteúdos entre 22 e 24% abaixo de 0,21 mm e 4% acima dessa fração. A hematita representa 3% na fração 0,21 mm, sendo inferior a 1% abaixo dessa fração. Já a goethita apresenta proporções de 4 a 5% acima de 0,074 mm, elevando-se para 9% abaixo dessa fração. As proporções de filossilicatos praticamente não variam ao longo do intervalo, correspondendo a 2%.

Psilomelano situa-se ao redor de 1% acima de 0,074 mm, aumentando para 4% na fração -0,074+0,020 mm, enquanto que a ilmenita varia de 0,8 a 1%, com ligeiro aumento nos finos. O conteúdo de quartzo acima de 0,21 mm é de 2%, situando-se abaixo de 1% nas demais frações.

Os difratogramas para cada produto estão expostos no APÊNDICE C. No APÊNDICE D são apresentados os principais minerais observados ao MEV, com análises por EDS, indicadas por pontos ou áreas. Os teores médios considerados para as composições dos minerais presentes e respectivas massas específicas são expostos no APÊNDICE E (banco de dados do MLA). Já a comparação entre as composições químicas dosadas por FRX e as calculadas a partir do MLA é mostrada no APÊNDICE F, indicando elevadas correlações e validando os resultados da análise de imagens.

4.1.5 Características da apatita

Os principais aspectos da apatita, observados ao MEV, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 1 e na Fotomicrografia 2.

Fotomicrografia 1 - MEV; amostra APAT, fração -0,21+0,15 mm.
Apatita primária em forma de relictos envoltos por apatita secundária (canto superior esq.) e apatita associada à oxi-hidróxidos de ferro (abaixo e à dir.).

Fotomicrografia 2 - MEV; amostra APAT, fração -0,21+0,15 mm.
Apatita primária reliquiar (mais clara), cimentada por aluminofosfatos secundários (a); apatita porosa (b); núcleos de apatita primária, envoltos por apatita secundária microcristalina (c); apatita associada a oxi-hidróxidos de ferro (tons mais claros) (d).

A Fotomicrografia 3 e a Figura 11 mostram as principais diferenças entre a apatita primária e secundária, ilustrando as variações de composição da apatita. A apatita primária apresenta teores mais elevados de P_2O_5 e SrO enquanto que a apatita secundária apresenta teores mais elevados de F.

Fotomicrografia 3 - MEV; amostra APAT, fração -0,15+0,074 mm. Detalhe de apatita com zoneamento composicional. A apatita primária (1c a 1g e 3) apresenta teores mais elevados de P_2O_5 e SrO enquanto que a apatita secundária (1a, 1b e 4) apresenta teores mais elevados de F.

Figura 11 - Diferenças de composição química entre apatita primária e apatita secundária - amostra APAT

A Tabela 7 e a Figura 12 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da apatita (% em massa), entre livre (partículas com 95% ou mais de apatita em área – critério do MLA) e mista em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,020 mm.

Tabela 7 - Formas de associação da apatita na amostra APAT (frações acima de 0,020 mm)

Sumário das formas de associação da apatita (% em massa)										
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias	Mista em ternárias	Total mista	Total livre + mista					
+0,21	90	8	1	10	100					
-0,21+0,15	89	9	2	11	100					
-0,15+0,074	92	7	1	8	100					
-0,074+0,020	89	9	2	11	100					
Total +0,020	90	8	2	10	100					

Associações da apatita em partículas binárias (% em massa)										
Fração (mm)	goeth	magnet	psilom	monazita	filossilic	quartzo	Al-fosf	niobatos	outros*	Total
+0,21	4	2	0,8	0,5	0,4	0,4	0,1	0,3	0,5	8
-0,21+0,15	4	2	1	0,4	0,7	0,3	0,2	0,2	0,5	9
-0,15+0,074	3	1	0,8	0,3	0,4	0,1	0,1	0,1	0,5	7
-0,074+0,020	6	0,6	1	0,8	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	9
Total +0,020	4	1	0,9	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,5	8

Associações da apatita em partículas ternárias (% em massa)										
Fração (mm)	goeth	magnet	psilom	monazita	filossilic	quartzo	Al-fosf	niobatos	outros*	Total
+0,21	0,4	0,4	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	1
-0,21+0,15	0,6	0,6	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	2
-0,15+0,074	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	1
-0,074+0,020	0,8	0,3	0,3	0,2	0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,1	2
Total +0,020	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,1	2

Notas: 1. abreviaturas: goeth = goethita; filossilic = filossilicato; magnet = magnetita; Al-fosf = Al-fosfatos; psilom = psilomelano
2. (*) = outros minerais presentes

A liberação global da apatita para esta amostra corresponde a 90%, variando entre 89% e 92% no intervalo considerado. Quando na forma mista, ocorre predominantemente em partículas binárias, associação esta que representa 8%. Já as associações ternárias representam 2%. Nas associações binárias a apatita ocorre preferencialmente junto aos oxi-hidróxidos de ferro, notadamente goethita.

Figura 12 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica - amostra APAT

A partir das imagens digitais obtidas pelo MLA, calcula-se a fração de mineral útil para cada partícula, através de sua respectiva área ou perímetro exposto. O posterior processamento destes dados permite determinar a distribuição da frequência do mineral em questão, sendo então estabelecidas as curvas do espectro de liberação da apatita, considerando as frações em área e em “superfície livre” (parcela de apatita exposta no perímetro de cada partícula).

A relação entre estas duas formas de expressar a liberação da apatita pode variar, essencialmente em função da textura do minério pré cominuição, ou seja, da morfologia (ou micromorfologia) da apatita e suas formas de associação com os minerais de ganga (inclusões ou intercrescimento). Estas curvas são apresentadas respectivamente na Figura 13 e na Figura 14.

Figura 13 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra APAT

Figura 14 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra APAT

A partir do processamento das imagens digitais do MLA, com informações de proporções minerais em cada partícula e sua respectiva composição química, definida com base nas proporções dos seus constituintes minerais, é possível se estabelecer curvas de distribuição *versus* teor de P_2O_5 considerando apenas o P_2O_5 apatítico para cada fração granulométrica e o total contido acima de 0,020 mm, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Curvas de distribuição versus teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra APAT

Estes dados indicam ser facilmente suplantado o teor comercial de concentrados de apatita (36-37% de P_2O_5) com índices de recuperações potenciais superiores a 99% de P_2O_5 apatítico considerando exclusivamente as associações entre apatita e demais minerais de ganga (a seletividade do processo de concentração não é computada nesta avaliação).

4.1.6 Partição dos principais óxidos presentes

As partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO dentre os minerais portadores, obtidas nos estudos efetuados através do MLA, para o material retido em 0,020 mm, são apresentadas na Tabela 8.

Aproximadamente 98% do total de P_2O_5 contido acima de 0,020 mm ocorre na forma de apatita e o restante, isto é, P_2O_5 não-apatítico, está distribuído nos aluminofosfatos (0,9%), na monazita (0,6%), na goethita (0,3%) e traços intimamente associados ao anatásio.

Nesta amostra, 99% do total de CaO contido acima de 0,020 mm está presente na apatita, uma vez que outros portadores desse elemento, tais como carbonatos, perovskita, monazita, zirkelita, zirconolita, niobatos, titanita e filossilicatos representam apenas traços na amostra estudada.

Tabela 8 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra APAT

Mineral	Distribuição (%)							
	P_2O_5	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	BaO
apatita	98	99						
Al-fosfatos	0,9	<0,1		27	0,3			19
monazita	0,6	0,1						
calcita		0,1				<0,1		
dolomita		0,3			<0,1	7		
perovskita		0,4			<0,1		13	
anatásio	<0,1			0,7	<0,1		7	
ilmenita					2	8	33	
magnetita					76	64	36	
hematita					2			
goethita	0,3		5	19	19			
psilomelano								79
niobatos		<0,1			0,2		0,2	1
zirkelita-zirconolita		0,1		0,2	<0,1		6	
filossilicatos		<0,1	40	52	2	21	3	
diopsídio		<0,1	0,7		<0,1	0,3	<0,1	
quartzo			52					
titanita		<0,1	0,5				1	
outros			1					0,4

Nota: Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

O quartzo é responsável por 52% do SiO_2 , enquanto que os filossilicatos compreendem 40% e a goethita 5%. Os principais minerais portadores de Al_2O_3 são os filossilicatos (com 52% do total contido no intervalo considerado), os aluminofosfatos (27%) e a goethita (19%).

O Fe_2O_3 está presente, essencialmente, na forma de oxi-hidróxidos de ferro (76% na magnetita, 19% na goethita e 2% na hematita), além de 2% na ilmenita e 2% nos filossilicatos. O MgO está contido principalmente na magnetita e/ou hematita (64%) e nos filossilicatos (21%), além de 8% na ilmenita e 7% nos carbonatos.

Do total de TiO_2 contido no intervalo considerado, 36% estão contidos na magnetita, 33% na ilmenita, 13% na perovskita, 7% no anatásio, 6% na zirkelita-zirconolita, 3% nos filossilicatos e 1% na titanita. O principal mineral portador de BaO é o psilomelano, com 79%, seguido pelos aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita que representam 19% do total contido no intervalo granulométrico

considerado, além de 1% nos niobatos e traços na barita, a qual ocorre como mineral acessório.

4.2 Foscorito Intemperizado (FIT)

4.2.1 Composição química

A composição química da amostra FIT está exposta na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química da amostra FIT

Teores (% em massa)										CaO/ P ₂ O ₅
P ₂ O ₅	P ₂ O _{5ap}	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF	
16,0	15,2	19,8	3,79	2,44	41,0	2,86	4,10	1,18	4,06	1,24

Nota: P₂O_{5ap} = P₂O₅ apatítico

Esta amostra é constituída por 41,0% de Fe₂O₃, 19,8% de CaO, 16,0% de P₂O₅ (dos quais 15,2% correspondem a P₂O₅ apatítico), além de 4,10% de TiO₂, 3,79% de SiO₂, 2,86% de MgO, 2,44% de Al₂O₃ e 1,18% de BaO. A relação CaO/P₂O₅ é 1,24. A perda ao fogo para esta amostra corresponde a 4,06%.

4.2.2 Análise granulométrica

A Tabela 10 apresenta os resultados da análise granuloquímica para a amostra FIT.

A análise granulométrica indica que 4,8% em massa constituem material retido em 0,21 mm, enquanto que 23,6% referem-se ao passante em 0,020 mm.

Acima de 0,020 mm, o P₂O₅ ocorre essencialmente na forma de apatita, com teores entre 15,0 e 17,8%, perfazendo 86% do P₂O₅ apatítico contido na amostra. Abaixo dessa fração o teor de P₂O₅ diminui para 12,5%, dos quais apenas 8,58% correspondem a P₂O₅ apatítico.

Tabela 10 - Análise granuloquímica da amostra FIT

Fração (mm)	% Massa ret. acum.		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)						
			P ₂ O ₅	P ₂ O _{5ap}	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF	P ₂ O ₅	P ₂ O _{5ap}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO		
+0,21	4,8	4,8	17,8	17,4	24,4	3,40	0,92	36,5	2,93	5,42	0,84	3,60	1,37	5,3	5,7	4,5	2,0	4,4	5,1	
-0,21+0,15	19,7	24,5	17,8	17,1	23,6	2,08	0,91	41,7	2,80	4,72	0,94	2,02	1,33	21,9	23,1	11,4	8,0	20,5	20,0	
-0,15+0,074	27,6	52,2	17,8	17,2	23,4	2,30	0,94	40,0	2,89	4,53	0,92	2,80	1,31	30,7	32,5	17,6	11,5	27,5	28,9	
-0,074+0,020	24,3	76,4	15,7	15,0	19,8	3,85	1,66	40,8	3,27	4,80	1,02	4,35	1,26	23,8	24,9	25,9	17,9	24,7	28,7	
-0,020	23,6	100,0	12,5	8,58	11,4	6,23	5,77	39,2	2,03	3,51	1,74	10,2	0,92	18,3	13,8	40,7	60,6	23,0	17,3	
Total calc.	100,0		16,0	14,6	19,8	3,61	2,25	40,2	2,76	4,43	1,14	4,81	1,23	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Total dosado			16,0	14,3	19,8	3,79	2,44	41,0	2,86	4,10	1,18	4,06	1,24							

Nota: "ret." = retida; "acum." = acumulada; "calc." = calculado; "P₂O_{5ap}" = P₂O₅ apatítico

A relação CaO/P₂O₅ varia entre 1,29 e 1,37 acima de 0,020 mm, diminuindo para 0,92 abaixo dessa fração.

Abaixo de 0,21 mm, os teores de Fe₂O₃ estão compreendidos entre 39,2 e 41,7%, enquanto que, acima dessa fração, corresponde a 36,5%. Os teores de TiO₂ variam de 3,51 a 5,42%, com tendência geral de diminuição para os finos.

Acima de 0,020 mm, os teores de SiO₂ estão compreendidos entre 2,08 e 3,85%, elevando-se para 6,23% abaixo dessa fração. Já os teores de MgO estão compreendidos entre 2,80 e 3,27% acima de 0,020 mm, diminuindo para 2,03% abaixo dessa fração.

Os teores de Al₂O₃ situam-se entre 0,91 e 1,66 acima de 0,020 mm, com tendência de aumento para os finos, elevando-se para 6,23% abaixo dessa fração. Os teores de BaO variam de 0,84 a 1,74%, com tendência geral de aumento aos finos.

As distribuições acumuladas em massa e dos conteúdos de P₂O₅, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e MgO são ilustradas no gráfico da Figura 16.

As distribuições dos teores de P₂O₅, Fe₂O₃ e MgO apresentam comportamentos semelhantes entre si e também em relação à distribuição em massa, com conteúdos de 17 a 18% para P₂O₅ e MgO e de 23 a 24% para Fe₂O₃ e massa abaixo de 0,020 mm. Se for considerado apenas o P₂O₅ na forma de apatita (P₂O₅ apatítico), nota-se que este apresenta uma maior tendência de concentração acima de 0,020 mm em relação ao P₂O₅ total, a partir de 0,15 mm. O conteúdo de P₂O₅ apatítico abaixo de 0,020 mm corresponde a 14% (contra 18% de P₂O₅ total). A

Figura 16 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - amostra FIT

distribuição de SiO_2 destaca-se das demais já a partir de 0,21 mm, tendendo a concentrar-se nos finos, com conteúdo aproximado de 41% abaixo de 0,020 mm. A distribuição de Al_2O_3 também é bastante distinta já a partir de 0,21 mm, com 61% do total de Al_2O_3 contido abaixo de 0,020 mm.

4.2.3 Separações minerais

Os resultados das separações minerais (líquido denso e separação magnética em Frantz) para a amostra FIT, efetuadas nas frações acima de 0,020 mm, são apresentados na Tabela 11.

O produto total +0,020 mm afundado não magnético em 4 kG responde por 38,5% em massa no ensaio (29,4% em relação à amostra), com proporções ao redor de 41% em massa acima de 0,074 mm, decrescendo abaixo dessa fração para 32,3% (provável ineficiência da separação nessa fração). O teor médio de P_2O_5 (essencialmente apatítico) neste produto corresponde a 38,6% (89% do total de P_2O_5 apatítico contido no ensaio; 76,7% em relação à amostra), permanecendo praticamente constante ao longo do intervalo granulométrico considerado. O teor médio de CaO é de 51,1%, com relação CaO/ P_2O_5 de 1,33, situando-se entre 1,33 e 1,35 até 0,074 mm e diminuindo para 1,31 na fração -0,074+0,020 mm.

Tabela 11 - Resultados das separações minerais para a amostra FIT (frações acima de 0,020 mm)

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅		Distribuição no ensaio (%)					Distribuição na amostra (%)				
			P ₂ O ₅	P ₂ O ₅ ap	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF			P ₂ O ₅	P ₂ O ₅ ap	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅ ap	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂
-0,30+0,21	Flutuado	6,7	0,3	0,89	3,85	44,4	7,60	6,47	17,0	0,97	0,33	18,9	4,33	P ₂ O ₅	0,3	0,3	1,2	39,0	1,2	0,0	0,0	0,1	2,0	0,1
	Af. Mag. 1 kG	30,5	1,5	0,38	0,57	0,23	<0,10	87,4	4,40	5,13	1,03	...	1,52	P ₂ O ₅	0,6	0,6	72,9	45,7	28,8	0,0	0,0	3,2	2,3	1,7
	Af. Mag. 4 kG	22,1	1,1	8,56	12,4	1,63	1,84	41,0	1,73	13,9	1,18	6,85	1,45	P ₂ O ₅	10,6	10,6	24,8	13,0	56,5	0,6	0,6	1,1	0,7	3,3
	Afund. Não Mag.	40,7	2,0	38,6	52,1	<0,10	<0,10	0,95	0,16	1,79	0,60	2,00	1,35	P ₂ O ₅	88,4	88,4	1,1	2,2	13,5	4,7	5,0	0,0	0,1	0,8
	Total calculado	100,0	4,8	17,8	24,4	...	...	36,5	2,93	5,42	0,84	...	1,37	P ₂ O ₅	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	5,3	5,7	4,4	5,1	5,9
-0,21+0,15	Flutuado	3,5	0,7	1,31	9,68	42,0	6,40	6,00	14,6	0,92	0,42	...	7,39	P ₂ O ₅	0,3	0,3	0,5	18,5	0,7	0,1	0,1	0,1	3,7	0,1
	Af. Mag. 1 kG	39,2	7,7	0,59	0,66	0,27	<0,10	87,6	4,33	4,69	1,07	...	1,11	P ₂ O ₅	1,3	1,1	82,5	60,5	39,0	0,3	0,3	16,9	12,1	8,2
	Af. Mag. 4 kG	16,0	3,2	9,59	8,03	10,7	2,00	3,31	41,6	2,47	1,55	8,08	1,11	P ₂ O ₅	8,6	7,3	16,0	14,1	47,5	1,9	1,7	3,3	2,8	10,0
	Afund. Não Mag.	41,3	8,1	38,7	51,5	0,40	0,38	1,07	0,47	1,47	0,63	1,77	1,33	P ₂ O ₅	89,8	91,3	1,1	6,9	12,9	19,7	21,1	0,2	1,4	2,7
	Total calculado	100,0	19,7	17,8	23,6	2,08	...	41,7	2,80	4,72	0,94	...	1,33	P ₂ O ₅	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	21,9	23,1	20,5	20,0	21,0
-0,15+0,074	Flutuado	3,6	1,0	1,08	8,69	42,3	6,21	5,98	13,8	0,79	0,39	20,4	8,05	P ₂ O ₅	0,2	0,2	0,5	17,1	0,6	0,1	0,1	0,1	4,9	0,2
	Af. Mag. 1 kG	39,0	10,8	0,61	0,50	0,39	<0,10	84,7	4,22	4,36	0,98	...	1,09	P ₂ O ₅	1,3	1,1	82,5	57,0	37,5	0,4	0,4	22,7	16,4	10,6
	Af. Mag. 4 kG	15,9	4,4	8,96	6,77	9,01	2,82	3,76	40,5	3,46	1,62	8,69	1,01	P ₂ O ₅	8,0	6,2	16,1	19,1	50,2	2,5	2,0	4,4	5,5	14,2
	Afund. Não Mag.	41,5	11,5	38,8	51,5	0,43	0,28	0,88	0,48	1,27	0,63	1,64	1,33	P ₂ O ₅	90,4	92,5	0,9	6,9	11,7	27,8	30,1	0,3	2,0	3,3
	Total calculado	100,0	27,6	17,8	23,4	2,30	...	40,0	2,89	4,53	0,92	...	1,31	P ₂ O ₅	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	30,7	32,5	27,5	28,9	28,2
-0,074+0,020	Flutuado	6,8	1,7	1,32	5,74	42,9	6,57	8,70	13,6	0,72	0,45	19,5	4,35	P ₂ O ₅	0,6	0,6	1,5	28,5	1,0	0,1	0,2	0,4	8,2	0,3
	Af. Mag. 1 kG	35,2	8,5	0,97	0,76	1,01	0,37	<0,10	86,6	4,21	4,03	...	1,04	P ₂ O ₅	2,2	1,8	74,7	45,3	29,6	0,5	0,5	18,4	13,0	7,8
	Af. Mag. 4 kG	25,7	6,2	11,8	8,68	11,5	2,77	4,21	36,4	2,78	1,10	9,26	0,98	P ₂ O ₅	19,3	15,2	22,9	21,8	58,7	4,6	3,8	5,7	6,3	15,4
	Afund. Não Mag.	32,3	7,8	38,0	37,5	49,9	0,23	0,39	1,19	0,44	1,59	1,98	1,31	P ₂ O ₅	78,0	82,4	0,9	4,3	10,7	18,6	20,5	0,2	1,2	2,8
	Total calculado	100,0	24,3	15,7	14,7	19,8	3,85	...	40,8	3,27	4,80	...	1,26	P ₂ O ₅	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	23,8	24,9	24,7	28,7	26,3
TOTAL +0,020	Flutuado	4,8	3,7	1,22	7,12	42,7	6,53	7,26	14,1	0,80	0,42	...	5,86	P ₂ O ₅	0,3	0,4	0,9	22,7	0,8	0,3	0,3	0,7	18,8	0,7
	Af. Mag. 1 kG	37,3	28,5	0,70	0,57	0,76	0,34	<0,10	86,2	4,26	4,39	...	1,09	P ₂ O ₅	1,5	1,3	79,4	53,1	34,7	1,3	1,1	61,2	43,9	28,2
	Af. Mag. 4 kG	19,4	14,8	10,3	8,02	10,7	2,54	3,72	39,0	2,84	1,63	8,67	1,04	P ₂ O ₅	11,6	9,4	18,7	18,4	52,7	9,5	8,1	14,4	15,3	42,9
	Afund. Não Mag.	38,5	29,4	38,6	38,5	51,1	...	...	1,02	0,45	1,45	1,79	1,33	P ₂ O ₅	86,5	89,0	1,0	5,7	11,8	70,7	76,7	0,7	4,7	9,6
	Total calculado	100,0	76,4	17,1	16,6	22,4	...	...	40,5	2,99	4,72	...	1,30	P ₂ O ₅	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	81,7	86,2	77,0	82,7	81,3

Nota: "Af." ou "Afund." = Afundado; "Mag." = Magnético; P₂O₅ap = P₂O₅ apático; (...) dado não disponível

Permanecem associados a este produto teores de 1,45% de TiO_2 , 1,02% de Fe_2O_3 , 0,63% de BaO , 0,45% de MgO . Os teores de SiO_2 e Al_2O_3 são inferiores a 0,5%. A perda ao fogo neste produto corresponde a 1,79%.

O produto total +0,020 mm flutuado corresponde a 4,8% em massa no ensaio (3,7% em relação à amostra), com proporções variando entre 3,5 e 6,8% ao longo do intervalo granulométrico considerado. Este produto apresenta teores médios de 42,7% de SiO_2 , 14,1% de MgO , 7,26% de Fe_2O_3 , 7,12% de CaO , 6,53% de Al_2O_3 , 1,22% de P_2O_5 (essencialmente apatítico; 0,4% do total contido no ensaio e 0,3% na amostra), 0,80% de TiO_2 e 0,42% de BaO . A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ média para este produto é de 5,86, mantendo-se elevada ao longo do intervalo granulométrico considerado.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 1 kG representa 37,3% em massa no ensaio (28,5% em relação à amostra), com proporções variando entre 30,5 e 39,2%, tendendo ao acréscimo para os finos até 0,074 mm. Este produto apresenta teores médios de 86,2% de Fe_2O_3 (79,4% do total contido no ensaio; 61,2% em relação à amostra), 4,39% de TiO_2 , 4,26% de MgO , 1,00% de BaO , 0,76% de CaO , 0,70% de P_2O_5 , dos quais 0,57% referem-se a P_2O_5 apatítico (1,3% do total contido no ensaio; 1,1% em relação à amostra) e 0,34% de SiO_2 . A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ média para este produto é de 1,09, mantendo-se entre 1,04 e 1,11 ao longo do intervalo granulométrico considerado, à exceção da fração +0,21 mm, na qual corresponde a 1,52.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 4 kG corresponde a 19,4% em massa no ensaio (14,8% em relação à amostra), com proporções compreendidas entre 15,9% e 25,7%. Este produto apresenta teores médios de 39,0% de Fe_2O_3 , 12,8% de TiO_2 (52,7% do total contido no ensaio; 42,9% em relação à amostra), 10,7% de CaO , 10,3% de P_2O_5 , dos quais 8,02% referem-se a P_2O_5 apatítico (9,4% do total contido de $\text{P}_2\text{O}_{5\text{ap}}$ no ensaio; 8,1% em relação à amostra), 3,72% de Al_2O_3 , 2,84% de MgO , 2,54% de SiO_2 e 1,63% de BaO . A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ média é de 1,04, variando de 0,98 a 1,42, com tendência de diminuição nas frações finas. A perda ao fogo neste produto representa 8,67%.

4.2.4 Composição mineralógica

A composição mineralógica da amostra FIT, para as frações acima de 0,020 mm, apresentada na Tabela 12, foi determinada através do sistema de análise de imagens MLA, com apoio de identificação das fases por DRX além de MEV. A comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais é apresentada na está exposta na Figura 17.

Tabela 12 - Composição mineralógica para a amostra FIT (frações acima de 0,020 mm)

Mineral	Fração (mm) - % em massa				Total +0,020
	+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	
apatita	43	41	42	44	42
Al-fosfatos	0,8	1	0,9	1	1
monazita	0,1	0,2	0,3	0,7	0,4
calcita	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
dolomita	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
perovskita	3	2	1	1	2
anatásio	0,7	0,7	0,4	0,8	0,6
ilmenita	3	3	3	3	3
magnetita	30	38	41	32	37
hematita*	2	1	1	1	1
goethita	5	5	3	6	4
psilomelano	0,7	1	0,7	2	1
niobatos	0,1	0,2	0,2	0,5	0,3
zirkelita-zirconolita	1	0,7	0,6	1	0,9
filossilicatos	7	4	3	6	4
diopsídio	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
quartzo	2	1	0,9	1	1
titanita	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2
outros	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1

Notas: 1. Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

2. *hematita calculada por diferença em relação à magnetita presente no afundado magnético em 1 kG

Considerando-se o intervalo +0,020 mm, a amostra FIT é composta predominantemente por apatita (42%) e magnetita (37%; hematita corresponde a 1% nesta amostra), além de 4% de goethita, 4% de filossilicatos (vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita) 3% de ilmenita, 2% de perovskita e aluminofosfatos (série goiazita-gorceixita), quartzo e psilomelano, com 1% cada.

Figura 17 - Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra FIT

Outros minerais acessórios (inferiores a 1%) estão presentes, sendo eles: zirkelita, zirconolita, anatásio, carbonatos (calcita e dolomita), monazita, niobatos (pirocloro e traços de ferro-columbita), titanita e outros (barita, zircão, baddeleita e pirrotita).

As proporções de apatita estão compreendidas entre 41 e 44% ao longo do intervalo granulométrico considerado.

A magnetita apresenta conteúdos entre 30 e 41%, com tendência de aumento para os finos até 0,074 mm. A hematita corresponde a 2% acima de 0,21 mm e 1% abaixo dessa fração. Já a goethita apresenta proporções de 5 a 6%, exceto na fração -0,15+0,074 mm, na qual corresponde a 3%.

As proporções de filossilicatos situam-se 3 e 7%, tendendo a diminuir nas frações intermediárias. A ilmenita mantém conteúdo constante de 3% ao longo do intervalo. Já a perovskita varia de 1 a 3%, tendendo a diminuir nas frações finas.

Os aluminofosfatos situam-se ao redor de 1%, enquanto que o quartzo e o psilomelano variam de 0,7 a 2%.

4.2.5 Características da apatita

Os principais aspectos da apatita, observados ao MEV, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 4 e na Fotomicrografia 5.

**Fotomicrografia 4 - MEV, amostra FIT, fração -0,21+0,15 mm.
Apatita com núcleos primários preservados e cristalização secundária acicular, parcialmente alterada para aluminofosfatos (tonalidades mais escuras).**

Fotomicrografia 5 - MEV, amostra FIT, fração +0,21 mm.
Apatita com diferenças de cristalinidade (a); apatita com zoneamento composicional (b);
apatita associada à oxi-hidróxidos de ferro (c; d).

A Fotomicrografia 6 e a Figura 18 mostram as principais diferenças entre a apatita primária e secundária ilustrando as variações de composição da apatita. A apatita primária apresenta teores mais elevados de P_2O_5 e SrO enquanto que a apatita secundária apresenta teores mais elevados de F.

Fotomicrografia 6 – MEV, amostra FIT, fração -0,21+0,15 mm. Detalhe de apatita com zoneamento composicional. A apatita primária (1c a 1g) apresenta teores mais elevados de P_2O_5 e SrO enquanto que a apatita secundária (1a, 1b) apresenta teores mais elevados de F.

Figura 18 – Diferenças de composição química entre apatita primária e apatita secundária - amostra FIT

A Tabela 13 e a Figura 19 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da apatita (% em massa), entre livre e mista em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,020 mm.

Tabela 13 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra FIT

Sumário das formas de associação da apatita (% em massa)										
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias		Mista em ternárias		Total mista		Total livre + mista		
+0,21	95	5		0,7		5		100		
-0,21+0,15	91	8		2		9		100		
-0,15+0,074	94	5		1		6		100		
-0,074+0,020	94	5		0,8		6		100		
Total +0,020	93	6		1		7		100		

Associações da apatita em partículas binárias (% em massa)										
Fração (mm)	goeth	filossilic	magnet	Al-fosf	ilmenita	psilom	zirkelita-zirconol	niobatos	outros*	Total
+0,21	1	0,7	0,7	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,9	5
-0,21+0,15	2	1	1	0,6	0,6	0,6	0,4	0,1	0,7	8
-0,15+0,074	1	0,7	0,9	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,4	5
-0,074+0,020	2	0,4	0,2	0,3	0,1	0,3	0,2	0,3	0,6	5
Total +0,020	2	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,6	6

Associações da apatita em partículas ternárias (% em massa)										
Fração (mm)	goeth	filossilic	magnet	Al-fosf	ilmenita	psilom	zirkelita-zirconol	niobatos	outros*	Total
+0,21	0,3	<0,1	0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,7
-0,21+0,15	0,4	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	2
-0,15+0,074	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	0,2	1
-0,074+0,020	0,3	0,1	0,1	0,2	<0,1	0,1	0,0	<0,1	<0,1	0,8
Total +0,020	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	0,2	1

Notas: 1. abreviaturas: goeth = goethita; filossilic = filossilicato; magnet = magnetita; Al-fosf = Al-fosfatos; psilom = psilomelano

2. (*) = outros minerais presentes

A liberação global da apatita para esta amostra corresponde a 93%, variando entre 94% e 95%, exceto pela fração -0,21+0,15 mm, na qual corresponde a 91%. Quando na forma mista, ocorre predominantemente em partículas binárias, associação esta que representa 6%. Já as associações ternárias representam 1%. Nas associações binárias a apatita ocorre preferencialmente junto aos oxi-hidróxidos de ferro, principalmente goethita, além dos filossilicatos.

Figura 19 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra FIT

As curvas do espectro de liberação da apatita, considerando as frações em área e em “superfície livre” (parcela de apatita exposta no perímetro de cada partícula), são apresentadas respectivamente na Figura 20 e na Figura 21.

Figura 20 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra FIT

Figura 21 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra FIT

As curvas de distribuição *versus* teor de P_2O_5 (obtidas nos estudos de MLA), considerando apenas o P_2O_5 apatítico para cada fração granulométrica e o total contido acima de 0,020 mm, são apresentadas na Figura 22.

Figura 22 - Curvas de distribuição *versus* teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra FIT

Estes dados indicam ser facilmente suplantado o teor comercial de

concentrados de apatita (36-37% de P_2O_5) com índices de recuperações potenciais superiores a 99% de P_2O_5 apatítico considerando exclusivamente as associações entre apatita e demais minerais de ganga (a seletividade do processo de concentração não é computada nesta avaliação).

4.2.6 Partição dos principais óxidos presentes

As partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO dentre os minerais portadores, obtidas nos estudos efetuados através do MLA, para o material retido em 0,020 mm, são apresentadas na Tabela 14.

Aproximadamente 96% do total de P_2O_5 contido acima de 0,020 mm ocorre na forma de apatita e o restante está distribuído nos aluminofosfatos (3%), na monazita (0,7%), na goethita (0,4%) e anatásio (0,1%).

Tabela 14 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra FIT

Mineral	Distribuição (%)							
	P_2O_5	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	BaO
apatita	96	96						
Al-fosfatos	3	0,1		28	0,3			44
monazita	0,7	0,1						
calcita		0,5				0,1		
dolomita		0,3			<0,1	2		
perovskita		3			0,1		18	
anatásio	0,1			2	0,1		11	
ilmenita					3	12	37	
magnetita					84	60	24	
hematita					3			
goethita	0,4		2	8	8			
psilomelano								54
niobatos		<0,1			0,1		<0,1	1
zirkelita-zirconolita		0,4		0,4	<0,1		6	
filossilicatos		0,1	54	61	2	25	2	
diopsídio		<0,1	0,4		<0,1	0,1	<0,1	
quartzo			40					
titanita		0,2	2				1	
outros			2					0,4

Nota: Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

Nesta amostra, 96% do total de CaO contido acima de 0,020 mm está presente na apatita, enquanto que 3% estão presentes na perovskita, 0,8% nos carbonatos, 0,4% na zirkelita-zirconolita, 0,2% na titanita, 0,1% nos aluminofosfatos, 0,1% na monazita e 0,1% nos filossilicatos, além de traços nos niobatos e no diopsídio.

Os filossilicatos são responsáveis por 54% do total de SiO₂ contido no intervalo considerado, enquanto que o quartzo responde por 40%, goethita, titanita e zircão por 2% cada. Os principais minerais portadores de Al₂O₃ são os filossilicatos (com 61% do total contido no intervalo considerado) e os aluminofosfatos (28%), enquanto 8% estão contidos na goethita e 2% no anatásio, além de traços na zirkelita-zirconolita.

O Fe₂O₃ está presente essencialmente na forma de oxi-hidróxidos de ferro (84% na magnetita, 8% na goethita e 3% na hematita), além de 3% na ilmenita e 2% nos filossilicatos.

O MgO está contido principalmente na magnetita (60%) e nos filossilicatos (25%), além de 12% na ilmenita e 2% nos carbonatos.

Do total de TiO₂ contido no intervalo considerado, 37% estão contidos na ilmenita, 24% na magnetita, 18% na perovskita, 11% no anatásio, 6% na zirkelita-zirconolita, 2% nos filossilicatos e 1% na titanita.

Os principais minerais portadores de BaO nesta amostra são o psilomelano, com 54%, seguido pelos aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita que representam 44% do total contido no intervalo granulométrico considerado, além de 1% nos niobatos e traços na barita, a qual ocorre como mineral acessório.

4.3 Foscorito Silicificado (FST)

4.3.1 Composição química

A composição química da amostra FST está exposta na Tabela 15.

Esta amostra é composta por 23,2% de Fe₂O₃, 20,7% de CaO, 19,5% de SiO₂, 13,5% de P₂O₅ (essencialmente apatítico), além de 5,48% de TiO₂, 5,00% de MgO, 2,85% de Al₂O₃ e 0,83% de BaO. A relação CaO/P₂O₅ é 1,53. A perda ao fogo para esta amostra corresponde a 6,30%.

Tabela 15 - Composição química da amostra FST

Teores (% em massa)									CaO/ P ₂ O ₅
P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF	
13,5	20,7	19,5	2,85	23,2	5,00	5,48	0,83	6,30	1,53

4.3.2 Análise granulométrica

A Tabela 16 apresenta os resultados da análise granuloquímica para a amostra FST.

Tabela 16 - Análise granuloquímica da amostra FST

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)									CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)				
	ret.	acum.	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF		P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
+0,21	6,5	6,5	14,0	24,3	27,9	2,69	8,16	7,28	6,19	0,55	4,77	1,73	6,73	9,27	6,0	2,30	9,57
-0,21+0,15	15,9	22,4	18,0	27,8	16,9	1,23	18,8	3,97	6,14	0,63	3,76	1,54	21,3	13,8	6,7	13,1	12,9
-0,15+0,074	23,6	46,0	16,9	25,8	16,2	1,33	21,4	4,22	6,48	0,68	3,51	1,53	29,6	19,7	10,7	22,0	20,3
-0,074+0,020	24,2	70,1	13,4	20,7	19,7	1,99	23,3	5,35	6,91	0,75	4,60	1,55	23,9	24,4	16,4	24,6	26,3
-0,020	29,9	100,0	8,32	11,6	21,4	5,88	29,2	5,10	3,92	0,96	12,3	1,39	18,5	32,9	60,2	38,0	31,0
Total calc.	100,0		13,5	20,5	19,5	2,92	22,9	4,91	5,75	0,76	6,52	1,52	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			13,5	20,7	19,5	2,85	23,2	5,00	5,48	0,83	6,30	1,53					

Nota: "ret." = retida; "acum." = acumulada; "calc." = calculado

A análise granulométrica indica que 6,5% em massa constituem material retido em 0,21 mm, enquanto que 29,9% referem-se ao passante em 0,020 mm.

Nesta amostra, o P₂O₅ ocorre essencialmente na forma de apatita. No intervalo -0,21+0,020 mm estão compreendidos cerca de 75% do total de P₂O₅ contido na amostra. Acima de 0,020 mm, os teores de P₂O₅ situam-se entre 13,4 e 18,0%, com tendência de diminuição para os finos a partir de 0,21 mm, caindo para 8,32 abaixo de 0,020 mm. A relação CaO/P₂O₅ varia entre 1,39 e 1,73, com tendência de diminuição para os finos.

Os teores de SiO₂ estão compreendidos entre 16,2 e 21,4% abaixo de 0,21mm, com tendência de aumento para os finos. Já acima de 0,21 mm esse teor eleva-se para 27,9%. Os teores de Fe₂O₃ variam de 8,16 até 29,2%, tendendo ao acréscimo para os finos.

Acima de 0,21 mm, o teor de MgO corresponde a 7,28%, enquanto que abaixo dessa fração esses teores variam de 3,97 a 5,35%, com tendência geral de aumento nas frações mais finas. Já os teores de TiO_2 estão compreendidos entre 6,14 e 6,91% acima de 0,020 mm, diminuindo para 3,92% abaixo dessa fração.

Os teores de Al_2O_3 situam-se entre 1,23 e 2,69% acima de 0,020 mm, elevando-se para 5,88% na fração -0,020 mm. Já os teores de BaO variam de 0,55 a 0,96%, com aumento aos finos.

As distribuições acumuladas em massa e dos conteúdos de P_2O_5 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MgO são ilustradas no gráfico da Figura 23.

A distribuição do P_2O_5 (essencialmente apatítico) mostra uma maior tendência de se concentrar nas frações mais grossas, principalmente abaixo de 0,15 mm, com 18,5% na fração -0,020 mm. As distribuições de SiO_2 e MgO apresentam comportamentos semelhantes entre si e também em relação à distribuição em massa, com proporções entre 30 e 33% abaixo de 0,020 mm. O Fe_2O_3 apresenta comportamento similar, embora seu conteúdo abaixo de 0,020 mm seja um pouco mais elevado, com 38%. Já a distribuição de Al_2O_3 destaca-se das demais já a partir de 0,21 mm, com 60% contidos abaixo de 0,020 mm.

Figura 23 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - amostra FST

4.3.3 Separações minerais

Os resultados das separações minerais (líquido denso e separação magnética em Frantz) para a amostra FST, efetuadas nas frações acima de 0,020 mm, são apresentados na Tabela 17.

O produto total +0,020 mm afundado não magnético em 4 kG responde por 42,9% em massa no ensaio (30,1% em relação à amostra), com proporções variando de 41,1 a 47,8% acima de 0,074 mm, diminuindo para 37,3% abaixo dessa fração (provável ineficiência da separação nessa fração). O teor médio de P_2O_5 neste produto corresponde a 33,5% (91,8% do total contido no ensaio; 74,8% em relação à amostra), situando-se entre 31,6 e 34,8% ao longo do intervalo granulométrico considerado, com teores mais elevados nas frações intermediárias. O teor médio de CaO é de 47,3% (83,2% do total contido no ensaio; 69,2% em relação à amostra), com relação CaO/ P_2O_5 de 1,41, correspondendo a 1,48 acima de 0,21 mm e entre 1,40 e 1,41 abaixo dessa fração. Permanecem associados a este produto teores de 4,56% de TiO_2 , 3,81% de SiO_2 , 1,96% de Fe_2O_3 , 1,41% de MgO, 0,65% de BaO e 0,32% de Al_2O_3 . A perda ao fogo média para este produto representa 1,85%.

O produto total +0,020 mm flutuado corresponde a 27,3% em massa no ensaio (19,2% em relação à amostra), com proporções entre 31,5 e 39,8% ao longo do intervalo granulométrico considerado. Este produto apresenta teores médios de 55,9% de SiO_2 (82% do total contido no ensaio; 55% em relação à amostra), 11,2% de MgO (63,6% do total contido no ensaio; 43,9% em relação à amostra), 7,66% de Fe_2O_3 , 6,81% de CaO, 4,93% de Al_2O_3 , 1,11% de P_2O_5 (1,9% do total contido no ensaio; 1,6% em relação à amostra), 0,83% de TiO_2 e 0,41% de BaO. A relação CaO/ P_2O_5 média é de 6,16, mantendo-se elevada ao longo do intervalo granulométrico considerado. A perda ao fogo neste produto corresponde a 9,7%.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 1 kG representa 14,1% em massa no ensaio (9,9% em relação à amostra), com proporções variando entre 14 e 16,7% abaixo de 0,21 mm; acima dessa fração não houve separação na intensidade de campo magnético empregada. Este produto apresenta teores médios de 86,7% de Fe_2O_3 (60,4% do total contido no ensaio; 37,5% em relação à amostra), 6,04% de TiO_2 , 2,18% de MgO, 1,40% de CaO, 1,02% de BaO, 1,16% de SiO_2 e

Tabela 17 - Resultados das separações minerais para a amostra FST (frações acima de 0,020 mm)

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)							CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)							
			P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂		BaO	PF	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	
-0,30+0,21	Flutuado	39,8	2,6	0,88	4,04	56,4	6,28	6,65	13,3	1,01	0,42	8,82	4,59	2,5	6,6	80,3	32,4	72,8	6,5	0,2	0,5	7,4	0,7	7,0	0,5
	Af. Mag. 4 kG	19,2	1,2	3,72	18,5	18,2	0,65	25,5	6,91	18,3	0,76	2,37	4,98	5,1	14,6	12,5	59,8	18,2	56,7	0,3	1,1	1,2	1,4	1,7	3,9
	Afund. Não Mag.	41,1	2,7	31,6	46,7	4,93	0,17	1,54	1,59	5,55	0,59	1,96	1,48	92,4	78,8	7,2	7,8	9,0	36,8	6,2	6,0	0,7	0,2	0,9	2,6
	Total calculado	100,0	6,5	14,0	24,3	27,9	2,69	8,16	7,28	6,19	0,55	4,77	1,73	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	6,7	7,7	9,3	2,3	9,6	7,0
-0,21+0,15	Flutuado	22,6	3,6	1,26	7,51	59,1	4,48	5,87	9,80	0,78	0,39	10,8	5,96	1,6	6,1	78,8	7,0	55,7	2,9	0,3	1,3	10,9	0,9	7,2	0,5
	Af. Mag. 1 kG	14,0	2,2	0,89	1,84	1,01	<0,10	85,9	2,13	6,86	1,02	...	2,06	0,7	0,9	0,8	63,8	7,5	15,6	0,1	0,2	0,1	8,4	1,0	2,7
	Af. Mag. 4 kG	15,6	2,5	5,94	15,6	11,6	0,87	30,5	5,51	20,4	0,88	3,14	2,62	5,2	8,8	10,7	25,3	21,7	51,9	1,1	1,9	1,5	3,3	2,8	8,8
	Afund. Não Mag.	47,8	7,6	34,8	48,9	3,42	0,18	1,52	1,25	3,80	0,55	1,74	1,40	92,6	84,2	9,7	3,9	15,1	29,6	19,7	18,2	1,3	0,5	1,9	5,0
-0,15+0,074	Total calculado	100,0	15,9	18,0	27,8	16,9	...	18,8	3,97	6,14	0,63	...	1,54	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	21,3	21,6	13,8	13,1	12,9	17,0
	Flutuado	22,8	5,4	0,92	7,25	57,3	4,36	6,64	10,7	0,80	0,36	9,70	7,88	1,2	6,4	80,6	7,1	58,0	2,8	0,4	1,9	15,8	1,6	11,8	0,7
	Af. Mag. 1 kG	16,7	3,9	0,60	1,23	0,94	<0,10	86,8	2,14	6,22	0,98	...	2,05	0,6	0,8	1,0	67,8	8,5	16,1	0,2	0,2	0,2	15,0	1,7	4,3
	Af. Mag. 4 kG	14,6	3,5	5,51	12,3	9,52	1,14	31,9	5,68	23,9	0,87	3,52	2,24	4,8	7,0	8,6	21,8	19,7	53,9	1,4	2,1	1,7	4,8	4,0	14,3
-0,074+0,020	Afund. Não Mag.	45,8	10,8	34,4	48,3	3,49	0,36	1,55	1,27	3,85	0,66	1,70	1,40	93,4	85,8	9,8	3,3	13,8	27,2	27,6	25,4	1,9	0,7	2,8	7,2
	Total calculado	100,0	23,6	16,9	25,8	16,2	...	21,4	4,22	6,48	0,68	...	1,53	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	29,6	29,6	19,7	22,0	20,3	26,6
	Flutuado	31,5	7,6	1,24	7,11	53,3	5,09	9,58	11,6	0,81	0,45	9,49	5,73	2,9	10,8	85,5	12,9	68,3	3,7	0,7	2,6	20,8	3,2	18,0	1,1
	Af. Mag. 1 kG	15,5	3,7	0,95	1,33	1,49	<0,10	87,0	2,26	5,36	1,05	...	1,39	1,1	1,0	1,2	57,7	6,5	12,0	0,3	0,2	0,3	14,2	1,7	3,5
TOTAL +0,020	Af. Mag. 4 kG	15,7	3,8	5,98	9,80	6,68	1,37	36,5	4,64	23,4	1,08	5,23	1,64	7,1	7,5	5,3	24,6	13,7	53,3	1,7	1,8	1,3	6,1	3,6	15,5
	Afund. Não Mag.	37,3	9,0	31,9	44,8	4,20	0,45	2,95	1,65	5,76	0,73	2,10	1,41	88,9	80,7	8,0	4,7	11,5	31,1	21,3	19,6	1,9	1,2	3,0	9,0
	Total calculado	100,0	24,2	13,4	20,7	19,7	...	23,3	5,35	6,91	0,75	...	1,55	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	23,9	24,3	24,4	24,6	26,3	29,0
	Flutuado	27,3	19,2	1,11	6,81	55,9	4,93	7,66	11,2	0,83	0,41	9,70	6,16	1,9	7,6	82,0	10,3	63,6	3,5	1,6	6,4	55,0	6,4	43,9	2,8
TOTAL +0,020	Af. Mag. 1 kG	14,1	9,9	0,80	1,40	1,16	...	86,7	2,18	6,04	1,02	...	1,76	0,7	0,8	0,9	60,4	6,4	13,1	0,6	0,7	0,6	37,5	4,4	10,4
	Af. Mag. 4 kG	15,7	11,0	5,57	12,9	9,99	1,10	32,5	5,42	22,3	0,93	3,90	2,31	5,6	8,3	8,4	25,1	17,6	53,5	4,5	6,9	5,6	15,6	12,1	42,6
	Afund. Não Mag.	42,9	30,1	33,5	47,3	3,81	0,32	1,96	1,41	4,56	0,65	1,85	1,41	91,8	83,2	8,8	4,1	12,5	30,0	74,8	69,2	5,9	2,6	8,6	23,9
	Total calculado	100,0	70,1	15,7	24,3	18,6	...	20,3	4,83	6,53	0,68	...	1,56	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	81,5	83,2	67,1	62,0	69,0	79,6

Nota: "Af." ou "Afund." = Afundado; "Mag." = Magnético; (...) dado não disponível

0,80% de P_2O_5 (0,7% do total contido no ensaio; 0,6% em relação à amostra). A relação CaO/P_2O_5 média para este produto é de 1,76, mantendo-se elevada ao longo do intervalo granulométrico considerado.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 4 kG corresponde a 15,7% em massa no ensaio (11% em relação à amostra), com proporção de 19,2% acima de 0,21 mm, variando entre 14,6 e 15,7% abaixo dessa fração. Este produto apresenta teores médios de 32,5% de Fe_2O_3 , 22,3% de TiO_2 (53,5% do total contido no ensaio; 42,6% em relação à amostra), 12,9% de CaO , 9,99% de SiO_2 , 5,57% de P_2O_5 (5,6% do total contido no ensaio; 4,5% em relação à amostra), 5,42% de MgO , 1,10% de Al_2O_3 e 0,93% de BaO . A relação CaO/P_2O_5 média para este produto é de 2,31, mantendo-se elevada por todo o intervalo granulométrico considerado. A perda ao fogo média para este produto corresponde a 3,9%.

4.3.4 Composição mineralógica

A composição mineralógica da amostra FST para as frações acima de 0,020 mm, apresentada na Tabela 18, foi determinada através do sistema de análise de imagens MLA, com apoio de identificação das fases por DRX além de MEV. A comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais é apresentada na Figura 24.

Considerando-se o intervalo +0,020 mm, a amostra FST é composta predominantemente por apatita (39%), filossilicatos (15%; vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita), magnetita (13%; inclui traços de hematita) e quartzo (11%), além de ilmenita e diopsídio (4% cada), perovskita (3%), goethita (3%), calcita (2%), anatásio, titanita e psilomelano (1% cada). Outros minerais acessórios (inferiores a 1%) estão presentes, sendo eles: dolomita, zirkelita-zirconolita, aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita, monazita, niobatos (pirocloro e traços de Fe-columbita) e outros (barita, zircão, baddeleita e pirrotita).

As proporções de apatita na fração -0,21+0,074 mm correspondem a 44% e entre 33 e 35% nas demais frações.

O conteúdo de filossilicatos acima de 0,21 mm corresponde a 27%; abaixo dessa fração as proporções desses minerais situam-se entre 9 e 11% até 0,074 mm, elevando-se para 19% na fração -0,074+0,020 mm.

Tabela 18 - Composição mineralógica para a amostra FST (frações acima de 0,020 mm)

Mineral	Fração (mm) - % em massa				
	+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Total +0,020
apatita	35	44	44	33	39
Al-fosfatos	0,3	0,2	0,4	0,6	0,4
monazita	0,1	0,1	0,2	0,6	0,3
calcita	0,9	2	2	2	2
dolomita	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8
perovskita	6	4	3	2	3
anatásio	0,8	1	1	1	1
ilmenita	2	3	4	6	4
magnetita	2	15	15	13	13
goethita	1	2	2	5	3
psilomelano	0,1	0,5	0,6	2	1
niobatos	0,1	0,1	0,2	0,6	0,3
zirkelita-zirconolita	0,5	0,7	0,6	1	0,8
filossilicatos	27	9	11	19	15
dióxido de silício	7	4	3	2	4
quartzo	15	11	10	11	11
titanita	0,3	0,7	0,8	2	1
outros	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Notas: 1. Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interstratificadas, caulinita e clorita; outros = barita, zircão, baddeleíta e pirrotita;

2. magnetita inclui traços de hematita

Figura 24 – Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra FST

A magnetita apresenta conteúdos entre 13 e 15% abaixo de 0,21 mm; acima dessa fração corresponde a 2%. Já a goethita apresenta proporções de 1 a 5%, com tendência de aumento nas frações mais finas. A ilmenita apresenta comportamento semelhante, com proporções entre 6%; já o diopsídio mostra comportamento inverso, com conteúdos entre 2 e 7%, assim como a perovskita, que varia de 2 a 6%.

A calcita corresponde a 2% abaixo de 0,21 mm e 0,9% acima dessa fração. Já a dolomita é inferior a 1% em todo o intervalo granulométrico considerado.

O anatásio situa-se ao redor de 1%, enquanto que titanita e psilomelano não ultrapassam 1%, exceto na fração $-0,074+0,020$ mm, na qual atingem 2%.

4.3.5 Características da apatita

Os principais aspectos da apatita, observados ao MEV, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 7 e na Fotomicrografia 8.

Fotomicrografia 7 - MEV, amostra FST, fração +0,21 mm.
Detalhe de núcleo preservado de apatita, envolto por agregado de aluminofosfatos microcristalinos.

Fotomicrografia 8 - MEV, amostra FST, fração -0,21+0,15 mm.
(a) Apatita mista com oxi-hidróxidos de ferro e filossilicato; (b) apatita livre com zoneamento composicional.

A Tabela 19 e a Figura 25 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da apatita (% em massa), entre livre e mista em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,020 mm.

A liberação global da apatita para esta amostra corresponde a 89%, variando entre 87% e 91% no intervalo granulométrico considerado. Quando na forma mista, ocorre predominantemente em partículas binárias, associação esta que representa 9%. Já as associações ternárias representam 2%. Nas associações binárias a apatita ocorre preferencialmente junto aos oxi-hidróxidos de ferro, principalmente goethita, além dos filossilicatos.

Tabela 19 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra FST

Sumário das formas de associação da apatita (% em massa)										
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias		Mista em ternárias		Total mista		Total livre + mista		
+0,21	90	9		1		10		100		
-0,21+0,15	87	10		3		13		100		
-0,15+0,074	91	8		2		9		100		
-0,074+0,020	90	9		2		10		100		
Total +0,020	89	9		2		11		100		

Associações da apatita em partículas binárias (% em massa)										
Fração (mm)	goeth	filossilic	quartzo	ilmenita	magnet	psilom	perovsk	zirkelita-zirconol	outros*	Total
+0,21	1	2	2	1	0,3	0,2	0,7	0,2	0,9	9
-0,21+0,15	2	2	2	1	0,9	0,4	0,8	0,4	1	10
-0,15+0,074	2	2	0,8	1	0,5	0,6	0,3	0,5	0,9	8
-0,074+0,020	4	2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,1	0,2	1	9
Total +0,020	2	2	1	0,8	0,5	0,4	0,4	0,4	1	9

Associações da apatita em partículas ternárias (% em massa)										
Fração (mm)	goeth	filossilic	quartzo	ilmenita	magnet	psilom	perovsk	zirkelita-zirconol	outros*	Total
+0,21	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	<0,1	0,2	<0,1	0,2	1
-0,21+0,15	0,4	0,2	0,3	0,5	0,3	0,1	0,3	0,2	0,5	3
-0,15+0,074	0,3	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	2
-0,074+0,020	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,3	2
Total +0,020	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	2

Notas: 1. abreviaturas: goeth = goethita; filossilic = filossilicato; magnet = magnetita; psilom = psilomelano; perovsk = perovskita; zirconol = zirconolita

2. (*) = outros minerais presentes

Figura 25 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra FST

As curvas do espectro de liberação da apatita, considerando as frações em área e em “superfície livre” (parcela de apatita exposta no perímetro de cada partícula), são apresentadas respectivamente na Figura 26 e na Figura 27.

Figura 26 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra FST

Figura 27 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra FST

As curvas de distribuição *versus* teor de P_2O_5 (obtidas nos estudos de MLA), considerando apenas o P_2O_5 apatítico para cada fração granulométrica e o total contido acima de 0,020 mm, são apresentadas na Figura 28.

Figura 28 - Curvas de distribuição *versus* teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - Amostra FST

Estes dados indicam ser facilmente suplantado o teor comercial de concentrados de apatita (36-37% de P_2O_5) com índices de recuperações potenciais superiores a 99% de P_2O_5 apatítico considerando exclusivamente as associações entre apatita e demais minerais de ganga (a seletividade do processo de concentração não é computada nesta avaliação).

4.3.6 Partição dos principais óxidos presentes

As partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO dentre os minerais portadores, obtidas nos estudos efetuados através do MLA, para o material retido em 0,020 mm, são apresentadas na Tabela 20.

Aproximadamente 98% do total de P_2O_5 contido acima de 0,020 mm ocorre na forma de apatita e o restante está distribuído nos aluminofosfatos (1%), na monazita (0,6%) e traços na goethita e anatásio.

Tabela 20 – Partição de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra FST

Mineral	Distribuição (%)							
	P_2O_5	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	BaO
apatita	98	84						
Al-fosfatos	1	<0,1		7	0,2			23
monazita	0,6	<0,1						
calcita		4				0,2		
dolomita		1			<0,1	4		
perovskita		5			0,4		30	
anatásio	0,2			2	0,4		14	
ilmenita					9	9	37	
magnetita					65	10	6	
goethita	0,3		0,2	4	13			
psilomelano								71
niobatos		<0,1			0,3		<0,1	0,6
zirkelita-zirconolita		0,3		0,4	0,1		4	
filossilicatos		0,1	32	87	11	65	3	
diopsídio		4	10		0,9	12	0,3	
quartzo			56					
titanita		1	2				7	
outros			0,1					5

Nota: Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

Nesta amostra, 84% do total de CaO contido acima de 0,020 mm está presente na apatita, enquanto que 5% estão presentes na perovskita, 5% nos carbonatos (4% na calcita e 1% na dolomita, 4% no diopsídio e 1% na titanita, além de traços na zirkelita-zirconolita, nos filossilicatos, nos aluminofosfatos e na monazita.

O quartzo é responsável por 56% do total de SiO_2 contido no intervalo considerado, enquanto que os filossilicatos respondem por 32%, diopsídio por 10% e titanita 2%, além de traços na goethita e no zircão.

Os principais minerais portadores de Al_2O_3 são os filossilicatos, que compreendem 87% do total contido no intervalo, além dos aluminofosfatos com 7%, psilomelano com 4%, e anatásio com 2%; há traços de Al_2O_3 na zirkelita-zirconolita.

O Fe_2O_3 está presente essencialmente na forma de oxi-hidróxidos de ferro (65% na magnetita e 13% na goethita), além de 11% nos filossilicatos, 9% na

ilmenita e traços no diopsídio, perovskita, anatásio, niobatos, aluminofosfatos, zirkelita-zirconolita e carbonatos.

O MgO nesta amostra está contido principalmente nos filossilicatos (65%), além de 12% no diopsídio, 10% na magnetita, 9% na ilmenita e 4% nos carbonatos (essencialmente na dolomita e traços na calcita).

Do total de TiO_2 contido, 37% estão presentes na ilmenita, 30% na perovskita, 14% no anatásio, 7% na titanita, 6% na magnetita, 4% na zirkelita-zirconolita, além de traços no diopsídio e nos niobatos.

Os principais minerais portadores de BaO nesta amostra são o psilomelano, com 71% do BaO contido, seguido pelos aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita, que representam 23% do total contido no intervalo granulométrico considerado, além de 5% na barita e traços nos niobatos.

4.4 Zona de Mistura (ZMT)

4.4.1 Composição química

A composição química da amostra ZMT está exposta na Tabela 21.

Tabela 21 - Composição química da amostra ZMT

P_2O_5	CaO	SiO_2	Teores (% em massa)			TiO_2	BaO	PF	CaO/ P_2O_5
			Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO				
14,7	21,3	13,2	3,33	26,9	3,48	6,35	0,92	6,91	1,44

Esta amostra é composta por 26,9% de Fe_2O_3 , 21,3% de CaO, 14,7% de P_2O_5 (essencialmente apatítico), 13,2% de SiO_2 , além de 6,35% de TiO_2 , 3,48% de MgO, 3,33% de Al_2O_3 e 0,92% de BaO. A relação CaO/ P_2O_5 é 1,44. A perda ao fogo para esta amostra corresponde a 6,91%.

4.4.2 Análise granulométrica

A Tabela 22 apresenta os resultados da análise granuloquímica para a amostra ZMT.

Tabela 22 - Distribuição de teores por fração no produto de moagem - amostra ZMT

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)									CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)				
	ret.	acum.	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
+0,21	5,5	5,5	16,1	27,1	18,4	1,58	15,8	3,99	8,87	0,64	4,29	1,68	6,0	7,8	2,6	3,2	6,5
-0,21+0,15	13,5	18,9	19,3	29,1	10,1	1,28	22,5	2,94	7,31	0,74	4,72	1,51	17,6	10,5	5,2	11,4	11,7
-0,15+0,074	23,8	42,8	18,5	27,7	9,65	1,37	25,8	3,16	7,49	0,77	3,98	1,49	29,9	17,7	10,0	23,1	22,3
-0,074+0,020	23,0	65,7	15,5	23,0	12,5	1,95	25,6	3,85	7,91	0,83	6,14	1,48	24,1	22,1	13,6	22,1	26,2
-0,020	34,3	100,0	9,63	11,5	15,8	6,56	31,3	3,29	4,71	1,10	14,6	1,19	22,4	41,9	68,5	40,2	33,4
Total calc.	100,0		14,7	21,2	13,0	3,28	26,6	3,38	6,68	0,89	8,22	1,44	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			14,7	21,3	13,2	3,33	26,9	3,48	6,35	0,92	6,91	1,44					

Nota: "ret." = retida; "acum." = acumulada; "calc." = calculado

A análise granulométrica indica que 5,5% em massa constituem material retido em 0,21 mm, enquanto que 34,3% referem-se ao passante em 0,020 mm.

Nesta amostra, o P₂O₅ ocorre essencialmente na forma de apatita. No intervalo -0,21+0,020 mm estão compreendidos 72% do total de P₂O₅ contido na amostra. Acima de 0,020 mm, os teores de P₂O₅ situam-se entre 15,5 e 19,3%, com tendência de diminuição para os finos a partir de 0,21 mm, caindo para 9,63 abaixo de 0,020 mm. A relação CaO/P₂O₅ varia entre 1,19 e 1,68, com tendência de diminuição para os finos.

Os teores de Fe₂O₃ variam de 15,8 até 31,3%, tendendo a se elevarem para os finos. Os teores de SiO₂ estão compreendidos entre 9,65 e 15,8% abaixo de 0,21 mm, com tendência geral de aumento para os finos. Já acima de 0,21 mm esse teor eleva-se para 18,4%.

Acima de 0,020 mm, os teores de TiO₂ estão compreendidos entre 4,31 e 8,87%, diminuindo para 4,71% abaixo dessa fração. Já os teores de MgO situam-se entre 2,94 e 3,99% ao longo do intervalo granulométrico, sem tendência definida.

Os teores de Al₂O₃ situam-se entre 1,28 e 1,95% acima de 0,020 mm, elevando-se para 6,56% na fração -0,020 mm. Já os teores de BaO variam de 0,64 a 1,10%, com aumento aos finos.

As distribuições acumuladas em massa e dos conteúdos de P_2O_5 , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MgO são ilustradas no gráfico da Figura 29.

Figura 29 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumulados abaixo para o produto de moagem - amostra ZMT

A distribuição do P_2O_5 (essencialmente apatítico) mostra uma maior tendência de se concentração nas frações mais grossas, com 22% na fração -0,020 mm. As distribuições de SiO_2 , Fe_2O_3 e MgO apresentam comportamentos semelhantes entre si e também em relação à distribuição em massa, com proporções de 40 a 42% para SiO_2 e Fe_2O_3 e de 33 a 34% para MgO e massa, abaixo de 0,020 mm. Já a distribuição de Al_2O_3 destaca-se das demais já a partir de 0,21 mm, com 69% contidos abaixo de 0,020 mm.

4.4.3 Separações minerais

Os resultados das separações minerais (líquido denso e separação magnética em Frantz) para a amostra ZMT, efetuadas nas frações acima de 0,020 mm, são apresentados na Tabela 23.

O produto total +0,020 mm afundado não magnético em 4 kG responde por 47,0% em massa no ensaio (30,9% em relação à amostra), com proporções variando de 44,3 a 49,7%, com tendência de acréscimo na fração -0,21+0,074 mm. O teor médio

Tabela 23 - Resultados das separações minerais para a amostra ZMT (frações acima de 0,020 mm)

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)					Distribuição na amostra (%)				
			P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF		P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	
-0,30+0,21	Flutuado	24,4	1,14	6,49	59,1	4,47	5,99	10,6	0,84	0,37	10,8	5,69	1,7	5,8	9,2	65,0	2,3	0,1	0,4	0,3	4,2	0,2	
	Af. Mag. 1 kG	8,7	0,80	2,15	<0,10	0,19	88,1	2,17	6,36	1,00	...	2,69	0,4	0,7	48,5	4,7	6,2	0,0	0,0	1,6	0,3	0,5	
	Af. Mag. 4 kG	22,7	6,78	20,8	11,1	1,07	25,2	3,62	22,7	0,84	3,65	3,06	9,5	17,4	36,2	20,6	58,1	0,6	1,2	1,2	1,3	4,2	
	Afund. Não Mag.	44,3	32,2	46,6	3,35	0,52	2,16	0,87	6,69	0,62	1,87	1,45	88,3	76,1	6,1	9,7	33,4	5,3	5,3	0,2	0,6	2,4	
	Total calculado	100,0	16,1	27,1	...	1,58	15,8	3,99	8,87	0,64	...	1,68	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	6,0	7,0	3,2	6,5	7,3	
-0,21+0,15	Flutuado	16,5	1,37	12,6	47,3	4,18	5,30	10,5	0,91	0,43	18,1	9,19	1,2	7,1	3,9	59,0	2,0	0,2	1,3	0,4	6,9	0,3	
	Af. Mag. 1 kG	16,9	1,09	1,87	0,73	<0,10	86,1	2,17	6,26	1,05	...	1,72	1,0	1,1	64,9	12,5	14,5	0,2	0,2	7,4	1,5	2,1	
	Af. Mag. 4 kG	16,9	8,21	15,6	6,13	1,64	35,1	2,75	21,8	1,07	4,97	1,90	7,2	9,0	26,4	15,8	50,4	1,3	1,7	3,0	1,9	7,4	
	Afund. Não Mag.	49,7	35,1	48,5	2,41	0,63	2,20	0,75	4,86	0,63	1,80	1,38	90,7	82,8	4,9	12,7	33,1	15,9	15,3	0,6	1,5	4,9	
	Total calculado	100,0	19,3	29,1	10,1	...	22,5	2,94	7,31	0,74	...	1,51	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	17,6	18,5	11,4	11,7	14,7	
-0,15+0,074	Flutuado	15,6	1,14	13,5	47,9	4,51	5,89	11,3	0,97	0,45	13,8	11,8	1,0	7,6	3,6	55,8	2,0	0,3	2,4	0,8	12,4	0,5	
	Af. Mag. 1 kG	18,4	0,77	1,21	0,89	<0,10	88,2	2,19	5,59	1,04	...	1,58	0,8	0,8	62,9	12,8	13,7	0,2	0,3	14,5	2,8	3,7	
	Af. Mag. 4 kG	17,9	6,76	11,0	4,49	1,89	42,6	3,01	22,5	1,18	5,23	1,63	6,5	7,1	29,5	17,1	53,8	2,0	2,2	6,8	3,8	14,4	
	Afund. Não Mag.	48,1	35,4	48,6	2,52	0,69	2,15	0,94	4,75	0,62	1,84	1,38	91,7	84,5	4,0	14,3	30,5	27,4	26,2	0,9	3,2	8,1	
	Total calculado	100,0	18,5	27,7	9,65	...	25,8	3,16	7,49	0,77	...	1,49	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	29,9	31,1	23,1	22,3	26,7	
-0,074+0,020	Flutuado	21,5	1,21	10,9	45,8	4,54	8,85	10,5	0,88	0,45	16,5	9,00	1,7	10,2	7,4	58,5	2,4	0,4	2,5	1,6	15,3	0,6	
	Af. Mag. 1 kG	15,8	0,82	1,05	0,81	<0,10	88,7	2,28	4,68	1,07	...	1,28	0,8	0,7	54,8	9,4	9,4	0,2	0,2	12,1	2,5	2,5	
	Af. Mag. 4 kG	17,9	6,26	7,60	3,75	2,40	42,3	3,12	22,5	1,28	7,21	1,21	7,2	5,9	29,5	14,5	50,9	1,7	1,5	6,5	3,8	13,8	
	Afund. Não Mag.	44,8	31,2	42,8	4,12	1,22	4,72	1,51	6,59	0,75	2,91	1,37	90,3	83,2	8,3	17,6	37,3	21,8	20,7	1,8	4,6	10,1	
	Total calculado	100,0	15,5	23,0	12,5	...	25,6	3,85	7,91	0,83	...	1,48	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	24,1	24,9	22,1	26,2	27,2	
TOTAL +0,020	Flutuado	18,6	1,21	11,5	48,1	4,46	6,99	10,8	0,91	0,44	15,4	9,51	1,3	8,1	5,4	58,3	2,2	1,0	6,6	3,2	38,9	1,7	
	Af. Mag. 1 kG	16,4	0,85	1,34	...	...	87,9	2,22	5,46	1,05	...	1,56	0,8	0,8	59,5	10,6	11,6	0,6	0,7	35,6	7,1	8,8	
	Af. Mag. 4 kG	18,1	6,87	11,7	5,24	1,93	39,2	3,06	22,4	1,16	5,70	1,71	7,1	8,1	29,3	16,2	52,5	5,5	6,6	17,5	10,8	39,8	
	Afund. Não Mag.	47,0	33,7	46,5	3,09	0,84	3,02	1,08	5,54	0,67	2,19	1,38	90,8	83,0	5,8	14,9	33,7	70,5	67,6	3,5	9,9	25,6	
	Total calculado	100,0	17,4	26,3	...	...	24,2	3,42	7,71	0,78	...	1,51	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	77,6	81,5	59,8	66,6	75,9	

Nota: "Af." ou "Afund." = Afundado; "Mag." = Magnético; (...) dado não disponível

de P_2O_5 neste produto corresponde a 33,7% (90,8% do total contido no ensaio; 70,5% em relação à amostra), situando-se entre 31,2 e 35,4% ao longo do intervalo granulométrico considerado, com teores mais elevados nas frações intermediárias. O teor médio de CaO é de 46,5% (83,0% do total contido no ensaio; 67,6% em relação à amostra), com relação CaO/ P_2O_5 de 1,38, correspondendo a 1,45 acima de 0,21 mm e entre 1,37 e 1,38 abaixo dessa fração. Permanecem associados a este produto teores de 5,54% de TiO_2 , 3,09% de SiO_2 , 3,02% de Fe_2O_3 , 1,08% de MgO, 0,84% de Al_2O_3 e 0,67% de BaO. A perda ao fogo média para este produto representa 2,19%.

O produto total +0,020 mm flutuado corresponde a 18,6% em massa no ensaio (12,2% em relação à amostra), com proporções variando entre 15,6 e 24,4% ao longo do intervalo granulométrico considerado. Este produto apresenta teores médios de 48,1% de SiO_2 , 11,5% de CaO, 10,8% de MgO (58,3% do total contido no ensaio; 38,9% em relação à amostra), 6,99% de Fe_2O_3 , 4,46% de Al_2O_3 , 1,21% de P_2O_5 (1,3% do total contido no ensaio; 1,0% em relação à amostra), 0,91% de TiO_2 e 0,44% de BaO. A relação CaO/ P_2O_5 média é de 9,51, mantendo-se elevada ao longo do intervalo granulométrico considerado. A perda ao fogo neste produto corresponde a 15,4%.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 1 kG representa 16,4% em massa no ensaio (10,8% em relação à amostra), com proporções variando entre 15,8 e 18,4% abaixo de 0,21 mm; acima dessa fração corresponde a 8,7%. Este produto apresenta teores médios de 87,9% de Fe_2O_3 (59,5% do total contido no ensaio; 35,6% em relação à amostra), 5,46% de TiO_2 , 2,22% de MgO, 1,34% de CaO, 1,05% de BaO e 0,85% de P_2O_5 (0,8% do total contido no ensaio; 0,6% em relação à amostra). A relação CaO/ P_2O_5 média para este produto é de 1,56, variando de 1,28 a 2,69, com tendência de diminuir aos finos.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 4 kG corresponde a 18,1% em massa no ensaio (11,9% em relação à amostra), com proporção de 22,7% acima de 0,21 mm, variando entre 16,9 e 17,9% abaixo dessa fração. Este produto apresenta teores médios de 39,2% de Fe_2O_3 , 22,4% de TiO_2 (52,5% do total contido no ensaio; 39,8% em relação à amostra), 11,7% de CaO, 5,24% de SiO_2 , 6,87% de P_2O_5 (7,1% do total contido no ensaio; 5,5% em relação à amostra), 3,06% de MgO, 1,93% de Al_2O_3 e 1,16% de BaO. A relação CaO/ P_2O_5 média para este produto é de

1,71, correspondendo a 3,06 acima de 0,21 mm e entre 1,21 e 1,90 abaixo dessa fração. A perda ao fogo média para este produto representa 5,7%.

4.4.4 Composição mineralógica

A composição mineralógica da amostra ZMT, para as frações acima de 0,020 mm, apresentada na Tabela 24, foi determinada através do sistema de análise de imagens MLA, com apoio de identificação das fases por DRX além de MEV. A comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais é apresentada na Figura 30.

Tabela 24 - Composição mineralógica para a amostra ZMT (frações acima de 0,020 mm)

Mineral	Fração (mm) - % em massa				Total +0,020
	+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	
apatita	43	45	44	34	41
Al-fosfatos	0,3	1	1	2	1
monazita	0,1	0,2	0,3	0,8	0,4
calcita	1	2	2	2	2
dolomita	2	3	3	2	2
perovskita	9	5	4	3	4
anatásio	2	2	1	2	2
ilmenita	3	4	5	9	6
magnetita	8	14	17	15	15
goethita	3	4	5	8	6
psilomelano	0,2	0,7	1	2	1
niobatos	0,1	0,3	0,4	1	0,6
zirkelita-zirconolita	0,5	0,5	0,7	2	1
filossilicatos	11	8	7	9	8
diopsídio	5	3	2	1	2
quartzo	12	7	6	5	7
titanita	0,4	0,5	0,6	2	1
outros	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Notas: 1. Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita;
2. magnetita inclui traços de hematita

Figura 30 - Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra ZMT

Considerando-se o intervalo +0,020 mm, a amostra ZMT é composta predominantemente por apatita (41%) e magnetita (15%; inclui traços de hematita), além de 8% de filossilicatos (vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita), 7% de quartzo, 6% de goethita, 6% de ilmenita, 4% de perovskita, 2% de calcita, 2% de dolomita, 2% de diopsídio, 2% de anatásio e psilomelano, aluminofosfatos (série goiazita-gorceixita), zirkelita-zirconolita e titanita, com 1% cada. Outros minerais acessórios (inferiores a 1%) estão presentes, sendo eles: niobatos (pirocloro e traços de Fe-columbita), monazita e outros (barita, zircão, baddeleita e pirrotita).

As proporções de apatita situam-se entre 43 e 45% acima de 0,074 mm, diminuindo para 34% abaixo dessa fração.

A magnetita corresponde a 8% acima de 0,21 mm, com conteúdos entre 14 e 17% abaixo dessa fração. Já a goethita apresenta proporções de 3 a 8%, com tendência de aumento para os finos.

As proporções de filossilicatos situam-se entre 7 e 11%, tendendo a diminuir para os finos até 0,074 mm. A ilmenita varia de 3 a 9% com tendência de acréscimo nas frações finas. Já a perovskita também se situa entre 3 e 9%, embora decresça aos finos.

O diopsídio varia de 1 a 5%, com tendência de diminuição para os finos. Já a dolomita situa-se entre 2 e 3%, enquanto que a dolomita está compreendida entre 1 e 2% ao longo do intervalo granulométrico considerado.

Os conteúdos de anatásio variam de 1 a 2%. Psilomelano, aluminofosfatos, zirkelita-zirconolita e titanita apresentam proporções de 0,2 a 0,5% na fração +0,21 mm, tendendo a aumentar aos finos, elevando-se para 2% na fração -0,074+0,020 mm.

4.4.5 Características da apatita

Os principais aspectos da apatita, observados ao MEV, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 9 e na Fotomicrografia 10.

**Fotomicrografia 9 - MEV, amostra ZMT, fração -0,15+0,074 mm.
Apatita (cinza médio) predominantemente livre, apresentando diferenças de cristalinidade.**

**Fotomicrografia 10 - MEV, amostra ZMT, fração -0,21+0,15 mm.
Detalhe de apatita (cinza claro) mista com ilmenita porosa (branca).**

A Fotomicrografia 11 e a Figura 31 mostram as principais diferenças entre a apatita primária e secundária ilustrando as variações de composição da apatita. A apatita primária apresenta teores mais elevados de P_2O_5 e SrO enquanto que a apatita secundária apresenta teores mais elevados de F.

Fotomicrografia 11 - MEV, amostra ZMT, fração -0,21+0,15 mm.
Detalhe de núcleo de apatita primária (1c a 1i) envolto por apatita secundária (1a, 1b; 1j a 1l)
com crescimento euédrico.

Figura 31 - Diferenças de composição química entre apatita primária e apatita secundária - amostra ZMT

A Tabela 25 e a Figura 32 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da apatita (% em massa), entre livre e mista em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,020 mm.

Tabela 25 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra ZMT

Sumário das formas de associação da apatita (% em massa)										
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias		Mista em ternárias		Total mista		Total livre + mista		
+0,21	87	11		2		13		100		
-0,21+0,15	85	12		3		15		100		
-0,15+0,074	88	9		2		12		100		
-0,074+0,020	88	10		2		12		100		
Total +0,020	87	10		2		13		100		

Associações da apatita em partículas binárias (% em massa)										
Fração (mm)	goeth	filossilic	quartzo	ilmenita	magnet	Al-fosf	psilom	zirkelita-zirconol	outros*	Total
+0,21	2	1	3	1	1	0,5	0,4	0,2	1	11
-0,21+0,15	2	2	2	1	1	0,7	0,6	0,7	1	12
-0,15+0,074	3	1	1	1	0,8	0,4	0,5	0,5	1	9
-0,074+0,020	5	2	0,4	0,6	0,4	0,5	0,5	0,2	0,9	10
Total +0,020	3	1	1	1	0,8	0,5	0,5	0,4	1	10

Associações da apatita em partículas ternárias (% em massa)										
Fração (mm)	goeth	filossilic	quartzo	ilmenita	magnet	Al-fosf	psilom	zirkelita-zirconol	outros*	Total
+0,21	0,4	0,3	0,3	0,2	0,4	0,1	<0,1	<0,1	0,5	2
-0,21+0,15	0,6	0,4	0,2	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,6	3
-0,15+0,074	0,5	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,4	2
-0,074+0,020	0,7	0,4	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	2
Total +0,020	0,6	0,4	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,4	2

Notas: 1. abreviaturas: goeth = goethita; filossilic = filossilicato; magnet = magnetita; Al-fosf = Al-fosfatos; psilom = psilomelano; zirconol = zirconolita

2. (*) = outros minerais presentes

Figura 32 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra ZMT

A liberação global da apatita para esta amostra corresponde a 87%, variando entre 85% e 88. Quando na forma mista, ocorre predominantemente em partículas binárias, associação esta que representa 10%. Já as associações ternárias representam 2%. Nas associações binárias a apatita ocorre preferencialmente junto aos oxi-hidróxidos de ferro, principalmente goethita, além dos filossilicatos.

As curvas do espectro de liberação da apatita, considerando as frações em área e em “superfície livre” (parcela de apatita exposta no perímetro de cada partícula), são apresentadas respectivamente na Figura 33 e na Figura 34.

Figura 33 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra ZMT

Figura 34 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra ZMT

As curvas de distribuição *versus* teor de P_2O_5 (obtidas nos estudos de MLA), considerando apenas o P_2O_5 apatítico para cada fração granulométrica e o total contido acima de 0,020 mm, são apresentadas na Figura 35.

Figura 35 - Curvas de distribuição *versus* teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra ZMT

Estes dados indicam ser facilmente suplantado o teor comercial de concentrados de apatita (36-37% de P_2O_5) com índices de recuperações potenciais superiores a 99% de P_2O_5 apatítico considerando exclusivamente as associações entre apatita e demais minerais de ganga (a seletividade do processo de concentração não é computada nesta avaliação).

4.4.6 Partição dos principais óxidos presentes

As partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO dentre os minerais portadores, obtidas nos estudos efetuados através do MLA, para o material retido em 0,020 mm, são apresentadas na Tabela 26.

Aproximadamente 96% do total de P_2O_5 contido acima de 0,020 mm ocorre na forma de apatita e o restante está presente nos aluminofosfatos (3%), além de traços na monazita, na goethita e no anatásio.

Tabela 26 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra ZMT

Mineral	Distribuição (%)							
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO
apatita	96	83						
Al-fosfatos	3	0,1		23	0,6			42
monazita	0,7	0,1						
calcita		4				0,3		
dolomita		3			0,1	16		
perovskita		7			0,5		30	
anatásio	0,3			3	0,5		17	
ilmenita					9	15	37	
magnetita					62	15	5	
goethita	0,5		0,7	8	21			
psilomelano								57
niobatos		<0,1			0,5		<0,1	0,8
zirkelita-zirconolita		0,4		0,6	0,2		4	
filossilicatos		0,1	29	65	6	45	2	
diopsídio		2	10		0,5	10	0,2	
quartzo			58					
titanita		1	3				5	
outros			0,2					0,2

Nota: Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

Nesta amostra, 83% do total de CaO contido acima de 0,020 mm está presente na apatita, enquanto que 7% estão presentes na perovskita, 7% nos carbonatos (4% na calcita e 3% na dolomita), 2% no diopsídio, 1% na titanita e traços na zirkelita-zirconolita, nos aluminofosfatos, na monazita, nos filossilicatos e nos niobatos.

O quartzo é responsável por 58% do SiO_2 contido no intervalo, enquanto que os filossilicatos respondem por 29%, além de 10% no diopsídio, 3% na titanita e traços na goethita e no zircão.

Os principais minerais portadores de Al_2O_3 são os filossilicatos (com 65% do total contido no intervalo considerado), seguidos pelos aluminofosfatos (23%), além de 8% na goethita e 3% no anatásio e traços na zirkelita-zirconolita.

O Fe_2O_3 está presente essencialmente na forma de oxi-hidróxidos de ferro (62% na magnetita e 21% na goethita), além de 9% na ilmenita, 6% nos filossilicatos e traços nos aluminofosfatos, perovskita, anatásio, niobatos, diopsídio, zirkelita-zirconolita e carbonatos.

O MgO está contido predominantemente nos filossilicatos (45%), seguidos por carbonatos (16%, dos quais cerca de 15% estão presentes na dolomita e traços na calcita), ilmenita (15%), magnetita (15%) e diopsídio (10%).

Do total de TiO_2 contido no intervalo considerado, 37% estão contidos na ilmenita, 30% na perovskita, 17% no anatásio, 5% na magnetita, 5% na titanita, 4% na zirkelita-zirconolita, 2% nos filossilicatos e traços no diopsídio e nos niobatos.

Os principais minerais portadores de BaO nesta amostra são o psilomelano, com 57% e os aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita, que representam 42%, além de traços nos niobatos e na barita.

4.5 Piroxenito Intemperizado (PIT)

4.5.1 Composição química

A composição química da amostra PIT está exposta na Tabela 27.

Tabela 27 - Composição química da amostra PIT

P_2O_5	$\text{P}_2\text{O}_{5\text{ap}}$	CaO	Teores (% em massa)						PF	CaO/ P_2O_5
			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	BaO		
11,7	11,2	14,6	21,7	4,58	28,6	1,41	8,45	1,06	5,82	1,25

Nota: $\text{P}_2\text{O}_{5\text{ap}} = \text{P}_2\text{O}_5$ apatítico

Esta amostra é composta por 28,6% de Fe_2O_3 , 21,7% de SiO_2 , 14,6% de CaO, 11,7% de P_2O_5 (dos quais 11,2% correspondem a P_2O_5 apatítico), além de 8,45% de TiO_2 , 4,58% de Al_2O_3 , 1,41% de MgO e 1,06% de BaO. A relação CaO/ P_2O_5 é 1,25. A perda ao fogo para esta amostra corresponde a 5,82%.

4.5.2 Análise granulométrica

A Tabela 28 apresenta os resultados da análise granuloquímica para a amostra PIT.

Tabela 28 - Análise granuloquímica da amostra PIT

Fração (mm)	% Massa ret. acum.		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)						
			P ₂ O ₅	P ₂ O _{5ap}	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF		P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	P ₂ O _{5ap}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
+0,21	7,1	7,06	13,7	13,1	19,7	29,8	1,58	17,4	1,48	11,3	0,74	2,52	1,43	8,4	9,5	9,9	2,5	4,4	7,4	
-0,21+0,15	13,6	20,7	15,6	14,2	20,9	17,6	1,51	27,0	1,16	10,8	0,84	2,68	1,34	18,4	19,9	11,3	4,5	13,1	11,3	
-0,15+0,074	22,0	42,7	16,2	14,7	21,4	15,3	1,76	27,5	1,32	10,5	0,83	2,51	1,32	30,8	33,2	15,8	8,6	21,6	20,8	
-0,074+0,020	24,0	66,7	11,8	9,83	15,2	21,7	3,32	27,3	1,72	10,8	0,91	4,10	1,29	24,4	24,2	24,5	17,6	23,4	29,4	
-0,020	33,3	100,0	6,26	3,90	5,19	24,6	9,10	31,5	1,31	5,42	1,03	13,4	0,83	18,0	13,3	38,6	66,9	37,5	31,1	
Total calc.	100,0		11,6	10,8	14,3	21,3	4,53	28,0	1,40	8,97	0,91	6,54	1,24	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Total dosado			11,7	11,2	14,6	21,7	4,58	28,6	1,41	8,45	1,06	5,82	1,25							

Nota: "ret." = retida; "acum." = acumulada; "calc." = calculado; "P₂O_{5ap}" = P₂O₅ apatítico

A análise granulométrica indica que 7,1% em massa constituem material retido em 0,21 mm, enquanto que 33,3% referem-se ao passante em 0,020 mm.

Acima de 0,020 mm, os teores de P₂O₅ variam de 11,8 a 16,2%, perfazendo 82% do total de P₂O₅ presente na amostra. Considerando o P₂O₅ apatítico, esses teores variam de 9,83 a 14,7% nesse intervalo, representando 87% do total de P₂O₅ apatítico presente na amostra. Abaixo de 0,020 mm, o teor de P₂O₅ diminui para 6,26%, dos quais 3,90% correspondem a P₂O₅ apatítico.

A relação CaO/P₂O₅ varia entre 1,29 e 1,43 acima de 0,020 mm, diminuindo para 0,83 abaixo dessa fração.

No intervalo -0,21+0,020 mm, os teores de Fe₂O₃ situam-se ao redor de 27%, elevando-se para 31,5% abaixo de 0,020 mm; já acima de 0,21 mm esse teor corresponde a 17,4%. Os teores SiO₂ variam de 15,3 a 29,8%, com tendência de decréscimo nas frações intermediárias.

Os teores de TiO₂ situam-se entre 10,5 e 11,3% acima de 0,020 mm, diminuindo para 5,42% abaixo dessa fração. Já os teores de Al₂O₃ variam de 1,51 a 3,32% acima de 0,020 mm, com tendência geral de acréscimo aos finos, elevando-se para 9,10% abaixo dessa fração.

Os teores de MgO estão compreendidos entre 1,16 e 1,72%, enquanto que os teores de BaO variam de 0,74 a 1,03% ao longo do intervalo granulométrico.

As distribuições acumuladas em massa e dos conteúdos de P₂O₅, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e MgO são ilustradas no gráfico da Figura 36.

Figura 36 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - Amostra PIT

As distribuições dos teores de SiO_2 , Fe_2O_3 e MgO apresentam comportamentos semelhantes entre si e também em relação à distribuição em massa, com conteúdos de 31 a 39% abaixo de 0,020 mm. Se considerarmos apenas o P_2O_5 na forma de apatita ($\text{P}_2\text{O}_{5\text{ap}}$), nota-se que este apresenta uma maior tendência de concentração acima de 0,020 mm em relação ao P_2O_5 total, a partir de 0,15 mm. O conteúdo de $\text{P}_2\text{O}_{5\text{ap}}$ abaixo de 0,020 mm corresponde a 13% (contra 18% de P_2O_5 total).

A distribuição de Al_2O_3 destaca-se das demais já a partir de 0,21 mm, com 67% do total de Al_2O_3 contido abaixo de 0,020 mm.

4.5.3 Separações minerais

Os resultados das separações minerais (líquido denso e separação magnética em Frantz) para a amostra PIT, efetuadas nas frações acima de 0,020 mm, são apresentados na Tabela 29.

O produto total +0,020 mm afundado não magnético em 4 kG responde por 37% em massa no ensaio (24,7% em relação à amostra), com proporções situadas entre 36,4 e 41,8% acima de 0,074 mm, tendendo ao acréscimo para os finos; abaixo dessa fração essa proporção cai para 31,5% (provável ineficiência da separação nessa

Tabela 29 - Resultados das separações minerais para a amostra PIT (frações acima de 0,020 mm)

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)					Distribuição na amostra (%)											
			P ₂ O ₅	P ₂ O _{5ap}	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	P ₂ O _{5ap}	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	P ₂ O _{5ap}	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	P ₂ O _{5ap}	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂		
-0,30+0,21	Flutuado	36,0	2,5	1,11	1,69	81,0	2,68	6,30	2,89	0,82	0,39	2,96	1,52	2,9	2,9	97,7	13,0	2,6	0,2	0,3	9,7	0,6	0,2							
	Af. Mag. 1 kG	6,3	0,4	0,43	0,43	1,15	0,97	0,27	86,8	1,61	7,93	1,04	...	2,67	0,2	0,2	0,2	31,3	4,4	0,0	0,0	0,0	1,4	0,4						
	Af. Mag. 4 kG	21,3	1,5	3,42	3,42	7,32	2,44	1,90	43,6	1,57	31,4	1,44	4,26	2,14	5,3	5,3	1,7	53,4	59,3	0,4	0,5	0,2	2,3	5,3						
	Afund. Não Mag.	36,4	2,6	34,4	34,4	47,8	0,27	0,54	1,07	<0,10	10,4	0,62	1,49	1,39	91,6	91,6	0,3	2,2	33,7	7,6	8,7	0,0	0,1	3,0						
	Total calculado	100,0	7,1	13,7	13,7	19,7	29,8	1,58	17,4	...	11,3	0,74	...	1,43	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,4	9,5	9,9	4,4	8,9						
-0,21+0,15	Flutuado	21,7	2,9	1,85	1,35	1,79	76,6	3,21	7,88	1,78	0,43	4,78	0,97	2,6	1,9	94,0	6,3	3,4	0,5	0,4	10,6	0,8	0,5							
	Af. Mag. 1 kG	16,7	2,3	0,63	0,62	0,82	1,48	<0,10	85,5	2,08	8,40	1,03	...	1,31	0,7	0,7	1,4	52,9	13,1	0,1	0,1	0,2	6,9	2,1						
	Af. Mag. 4 kG	22,1	3,0	4,06	4,06	5,48	2,74	2,49	47,6	1,95	27,8	1,45	4,74	1,35	5,7	5,8	3,4	38,9	57,0	1,1	1,1	0,4	5,1	9,3						
	Afund. Não Mag.	39,5	5,4	36,0	36,0	48,5	0,52	0,66	1,26	<0,10	7,22	0,65	1,51	1,35	91,0	91,7	1,2	1,8	26,5	16,7	18,2	0,1	0,2	4,3						
	Total calculado	100,0	13,6	15,6	15,5	20,9	17,6	...	27,0	...	10,8	0,84	...	1,34	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	18,4	19,9	11,3	13,1	16,3						
-0,15+0,074	Flutuado	19,4	4,3	1,80	1,33	1,77	72,9	4,64	8,85	2,20	0,47	4,94	0,98	2,2	1,6	92,5	6,3	3,3	0,7	0,5	14,6	1,4	0,9							
	Af. Mag. 1 kG	16,6	3,7	0,39	0,39	0,54	1,00	<0,10	87,2	2,03	7,72	1,04	...	1,38	0,4	0,4	1,1	52,7	12,2	0,1	0,1	0,2	11,4	3,1						
	Af. Mag. 4 kG	22,2	4,9	3,53	3,05	4,05	2,55	2,51	48,3	2,52	28,2	1,43	4,57	1,15	4,8	4,2	3,7	39,0	59,8	1,5	1,4	0,6	8,4	15,4						
	Afund. Não Mag.	41,8	9,2	36,0	36,0	48,2	0,98	0,73	1,36	<0,10	6,19	0,60	1,29	1,34	92,6	93,8	2,7	2,1	24,7	28,6	31,1	0,4	0,4	6,3						
	Total calculado	100,0	22,0	16,2	16,0	21,4	15,3	...	27,5	...	10,5	0,83	...	1,32	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	30,8	33,2	15,8	21,6	25,7						
-0,074+0,020	Flutuado	30,4	7,3	2,03	1,78	2,37	64,9	6,55	13,4	2,28	0,56	5,47	1,17	5,2	4,8	90,8	14,9	4,2	1,3	1,2	22,2	3,5	1,2							
	Af. Mag. 1 kG	10,7	2,6	0,39	0,26	0,35	1,04	<0,10	88,7	2,15	6,51	1,04	...	0,89	0,4	0,2	0,5	34,6	6,4	0,1	0,1	0,1	8,1	1,9						
	Af. Mag. 4 kG	27,5	6,6	4,94	3,60	4,79	3,19	2,94	45,8	2,65	25,2	1,47	5,93	0,97	11,5	8,7	4,0	46,1	63,8	2,8	2,1	1,0	10,8	18,5						
	Afund. Não Mag.	31,5	7,6	31,1	31,1	41,7	3,17	1,67	3,85	0,23	8,83	0,72	2,58	1,34	82,9	86,2	4,6	4,4	25,6	20,3	20,8	1,1	1,0	7,4						
	Total calculado	100,0	24,0	11,8	11,3	15,2	21,7	...	27,3	1,72	10,8	0,91	...	1,29	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	24,4	24,2	24,5	23,4	29,0						
TOTAL +0,020	Flutuado	25,6	17,1	1,80	1,52	2,02	71,3	4,92	10,3	2,26	1,50	0,49	4,84	1,12	3,2	2,7	93,0	10,0	3,6	2,7	2,3	57,1	6,2	2,9						
	Af. Mag. 1 kG	13,4	8,9	0,45	0,44	0,59	1,13	...	87,2	2,06	7,56	1,04	...	1,30	0,4	0,4	0,8	44,5	9,4	0,3	0,3	0,5	27,8	7,5						
	Af. Mag. 4 kG	24,0	16,0	4,20	3,71	4,93	2,84	2,63	46,7	2,38	27,2	1,45	5,13	1,17	7,1	6,0	3,5	42,6	60,6	5,8	5,2	2,1	26,7	48,4						
	Afund. Não Mag.	37,0	24,7	34,3	34,3	46,2	1,48	0,98	2,07	...	7,66	0,65	1,75	1,35	89,3	90,9	2,8	2,9	26,4	73,2	78,8	1,7	1,8	21,1						
	Total calculado	100,0	66,7	14,2	14,0	18,9	19,6	...	26,3	...	10,8	0,85	...	1,33	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	82,0	86,7	61,4	62,5	79,9						

Nota: "Af." ou "Afund" = Afundado; "Mag." = Magnético; P₂O₅ apatítico; (...) dado não disponível

fração). O teor médio de P_2O_5 (essencialmente apatítico) neste produto corresponde a 34,3% (90,9% do total de P_2O_{5ap} contido no ensaio; 78,8% em relação à amostra), com teores situados entre 34,4 e 36% acima de 0,074mm, diminuindo para 31,1% abaixo dessa fração. O teor médio de CaO corresponde a 46,2%, com relação CaO/ P_2O_5 média de 1,35, correspondendo a 1,39 acima de 0,21 mm e entre 1,34 e 1,35 abaixo dessa fração. Permanecem associados a este produto teores de 7,66% de TiO_2 , 2,07% de Fe_2O_3 , 1,48% de SiO_2 , 0,98% de Al_2O_3 e 0,65% de BaO. Os teores de SiO_2 e Al_2O_3 são inferiores a 0,5%. A perda ao fogo neste produto corresponde a 1,75%.

O produto total +0,020 mm flutuado corresponde a 25,6% em massa no ensaio (17,1% em relação à amostra), com proporções compreendidas entre 19,4 e 36,0%, tendendo à diminuição nas frações intermediárias. Este produto apresenta teores médios de 71,3% de SiO_2 (93% do total contido no ensaio; 57,1% em relação à amostra), 10,3% de Fe_2O_3 , 4,92% de Al_2O_3 , 2,26% de MgO, 2,02% de CaO, 1,80% de P_2O_5 , dos quais 1,52% referem-se a P_2O_5 apatítico (2,7% do total contido no ensaio; 2,3% em relação à amostra), 1,50% de TiO_2 e 0,49% de BaO. A relação CaO/ P_2O_5 média para este produto é de 1,12, correspondendo a 1,52 acima de 0,21 mm e entre 0,97 e 1,17 abaixo dessa fração.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 1 kG representa 13,4% em massa no ensaio (8,9% em relação à amostra), com proporções variando entre 6,3 e 16,7%, tendendo ao acréscimo nas frações intermediárias. Este produto apresenta teores médios de 87,2% de Fe_2O_3 (44,5% do total contido no ensaio; 27,8% em relação à amostra), 7,56% de TiO_2 , 2,06% de MgO, 1,13% de SiO_2 , 1,04% de BaO, 0,59% de CaO e 0,45% de P_2O_5 (essencialmente apatítico; 0,4% do total contido no ensaio e 0,3% em relação à amostra). A relação CaO/ P_2O_5 média para este produto é de 1,30, variando de 0,89 a 2,67, com tendência de diminuição aos finos.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 4 kG corresponde a 24% em massa no ensaio (16% em relação à amostra), com proporções compreendidas entre 21,3 e 27,5%, aumentando para os finos. Este produto apresenta teores médios de 46,7% de Fe_2O_3 (42,6% do total contido no ensaio; 26,7% em relação à amostra), 27,2% de TiO_2 (60,6% do total contido no ensaio; 48,4% em relação à amostra), 4,93% de CaO, 4,20% de P_2O_5 , dos quais 3,71% referem-se a P_2O_5 apatítico (6,0% do total contido no ensaio; 5,2% em relação à amostra), 2,84% de

SiO₂, 2,63% de Al₂O₃, 2,38% de MgO e 1,45% de BaO. A relação CaO/P₂O₅ média é de 1,17, variando de 0,97 a 2,14, com tendência de diminuição nas frações finas. A perda ao fogo neste produto representa 5,13%.

4.5.4 Composição mineralógica

A composição mineralógica da amostra PIT, para as frações acima de 0,020 mm, apresentada na Tabela 30, foi determinada através do sistema de análise de imagens MLA, com apoio de identificação das fases por DRX além de MEV. A comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais é apresentada na está exposta na Figura 37.

Tabela 30 - Composição mineralógica para a amostra PIT (frações acima de 0,020 mm)

Mineral	Fração (mm) - % em massa				
	+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	Total +0,020
apatita	30	31	31	21	27
Al-fosfatos	1	2	2	2	2
monazita	0,1	0,3	0,2	0,9	0,5
calcita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
dolomita	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
perovskita	7	5	4	3	4
anatásio	3	3	3	3	3
ilmenita	4	7	7	13	9
magnetita	7	16	14	10	12
hematita*	3	<1	<1	2	1
goethita	2	5	7	11	7
psilomelano	0,5	1	2	3	2
niobatos	0,1	0,2	0,3	0,9	0,5
zirkelita-zirconolita	0,7	0,6	0,6	1	0,9
filossilicatos	9	10	13	13	12
diopsídio	<0,1	0,0	0,1	<0,1	0,1
quartzo	30	18	15	14	17
titanita	0,2	0,4	0,5	1	0,7
outros	<0,1	0,1	0,1	0,2	0,1

Notas: 1. Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

2. *hematita calculada por diferença em relação à magnetita presente no afundado magnético em 1 kG

Figura 37 – Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais – amostra PIT

Considerando-se o intervalo $+0,020$ mm, a amostra PIT é composta por 27% de apatita, 17% de quartzo, 12% de magnetita (12%; hematita corresponde a 1% nesta amostra), 12% de filossilicatos (vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita), 9% de ilmenita, 7% de goethita, além de 4% de perovskita, 3% de anatásio, 2% de psilomelano e 2% de aluminofosfatos (série goiazita-gorceixita). Outros minerais acessórios (inferiores a 1%) estão presentes, sendo eles: zirkelita, zirconolita, titanita, niobatos (pirocloro e traços de Fe-columbita), monazita, diopsídio, carbonatos (calcita e dolomita), e outros (barita, zircão, baddeleita e pirrotita).

As proporções de apatita situam-se entre 30 e 31% acima de 0,074 mm, decrescendo para 21% abaixo dessa fração.

Acima de 0,21 mm, o conteúdo de quartzo corresponde a 30%, situando-se entre 14 e 18% abaixo dessa fração, com tendência de diminuição aos finos.

A magnetita representa 7% acima de 0,21 mm, situando-se entre 10 e 16% abaixo dessa fração. A hematita apresenta conteúdos de até 3%, sendo inferior a 1% na fração $-0,21+0,074$ mm. Já a goethita apresenta proporções de 2 a 11%, tendendo a aumentar para os finos.

As proporções de filossilicatos situam-se 9 e 13%, tendendo a aumentar nas frações finas. A ilmenita apresenta comportamento semelhante, com conteúdos variando entre 4 e 13%. Já a perovskita varia de 3 a 7%, tendendo a diminuir nas frações finas.

As proporções de anatásio mantêm-se constantes em 3% ao longo do intervalo granulométrico considerado, enquanto que o psilomelano situa-se entre 0,5 e 3%, com tendência de aumento para os finos.

Os aluminofosfatos correspondem a cerca de 1% acima de 0,21 mm, elevando-se para 2% abaixo dessa fração.

4.5.5 Características da apatita

Os principais aspectos da apatita, observados ao MEV, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 12 e na Fotomicrografia 13.

Fotomicrografia 12 - MEV, amostra PIT, fração +0,21 mm.
Apatita refere-se aos tons de cinza médio e ocorre predominantemente na forma liberada já na fração +0,21 mm.

Fotomicrografia 13 - MEV, amostra PIT, fração -0,21+0,15 mm.
Apatita (tons de cinza claro) com superfície limpa e homogênea, por vezes mista com oxihidróxidos de ferro (branco).

A Tabela 31 e a Figura 38 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da apatita (% em massa), entre livre e mista em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,020 mm.

A liberação global da apatita para esta amostra corresponde a 92%, variando entre 91 e 94%. Quando na forma mista, ocorre predominantemente em partículas binárias, associação esta que representa 6%. Já as associações ternárias representam 2%. Nas associações binárias a apatita ocorre preferencialmente junto aos filossilicatos e à goethita, além do quartzo.

Tabela 31 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra PIT

Sumário das formas de associação da apatita (% em massa)										
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias			Mista em ternárias		Total mista	Total livre + mista		
+0,21	94	5			1		6	100		
-0,21+0,15	91	6			2		9	100		
-0,15+0,074	93	5			2		7	100		
-0,074+0,020	92	6			2		8	100		
Total +0,020	92	6			2		8	100		

Associações da apatita em partículas binárias (% em massa)										
Fração (mm)	filossilic	goeth	quartzo	ilmenita	magnet	zirkelita-zirconol	Al-fosf	psilom	outros*	Total
+0,21	0,7	0,2	2	0,6	0,3	0,1	<0,1	0,1	0,7	5
-0,21+0,15	2	0,9	1	1	0,4	0,2	0,1	0,2	0,8	6
-0,15+0,074	1	1	0,8	0,7	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	5
-0,074+0,020	2	2	0,1	0,4	0,2	0,4	0,5	0,2	0,7	6
Total +0,020	1	1	0,8	0,7	0,3	0,3	0,2	0,2	0,6	6

Associações da apatita em partículas ternárias (% em massa)										
Fração (mm)	filossilic	goeth	quartzo	ilmenita	magnet	zirkelita-zirconol	Al-fosf	psilom	outros*	Total
+0,21	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	0,5	1
-0,21+0,15	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,5	2
-0,15+0,074	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	<0,1	0,1	0,4	2
-0,074+0,020	0,3	0,6	0,1	0,2	<0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	2
Total +0,020	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4	2

Notas: 1. abreviaturas: filossilic = filossilicato; goeth = goethita; magnet = magnetita; zirconol = zirconolita; Al-fosf = Al-fosfatos; psilom = psilomelano

2. (*) = outros minerais presentes

Figura 38 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra PIT

As curvas do espectro de liberação da apatita, considerando as frações em área e em “superfície livre” (parcela de apatita exposta no perímetro de cada partícula), são apresentadas respectivamente na Figura 39 e na Figura 40.

Figura 39 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra PIT

Figura 40 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra PIT

As curvas de distribuição *versus* teor de P_2O_5 (obtidas nos estudos de MLA), considerando apenas o P_2O_5 apatítico para cada fração granulométrica e o total contido acima de 0,020 mm, são apresentadas na Figura 41.

Figura 41 - Curvas de distribuição versus teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra PIT

Estes dados indicam ser facilmente suplantado o teor comercial de concentrados de apatita (36-37% de P_2O_5) com índices de recuperações potenciais superiores a 99% de P_2O_5 apatítico considerando exclusivamente as associações entre apatita e demais minerais de ganga (a seletividade do processo de concentração não é computada nesta avaliação).

4.5.6 Partição dos principais óxidos presentes

As partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO dentre os minerais portadores, obtidas nos estudos efetuados através do MLA, para o material retido em 0,020 mm, são apresentadas na Tabela 32.

Aproximadamente 89% do total de P_2O_5 contido acima de 0,020 mm ocorre na forma de apatita e o restante está distribuído nos aluminofosfatos (8%) e na monazita (1%), além de traços na goethita e no anatásio.

Tabela 32 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra PIT

Mineral	Distribuição (%)							
	P_2O_5	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	BaO
apatita	89	87						
Al-fosfatos	8	0,2		18	0,7			37
monazita	1	0,1						
calcita e dolomita		<0,1			<0,1	<0,1		
perovskita		10			0,4		22	
anatásio	0,7			3	0,8		22	
ilmenita					13	32	43	
magnetita					44	20	4	
hematita					7			
goethita	0,9		0,5	6	23			
psilomelano								63
niobatos		<0,1			0,4		<0,1	0,5
zirkelita-zirconolita		0,6		0,3	0,1		3	
filossilicatos		0,5	20	73	10	48	3	
diopsídio		0,1	0,1		<0,1	0,3	<0,1	
quartzo			78					
titanita		1	1				3	
outros			0,1					0,2

Nota: Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

Nesta amostra, 87% do total de CaO contido acima de 0,020 mm está presente na apatita, enquanto que 10% estão presentes na perovskita, 1% na titanita e traços na zirkelita-zirconolita, nos filossilicatos, nos aluminofosfatos, na monazita, no diopsídio, nos carbonatos e nos niobatos.

Do total de SiO_2 presente no intervalo considerado, para esta mostra, 78% estão presentes no quartzo e 20% nos filossilicatos, além de 1% na titanita e traços na goethita, no diopsídio e no zircão.

Os principais minerais portadores de Al_2O_3 são os filossilicatos (com 73% do total contido no intervalo considerado) e os aluminofosfatos (18%), enquanto que 6% estão contidos na goethita e 3% no anatásio, além de traços na zirkelita-zirconolita.

O Fe_2O_3 está presente principalmente na forma de oxi-hidróxidos de ferro (44% na magnetita, 23% na goethita e 7% na hematita), além de 13% na ilmenita, 10% nos filossilicatos e traços no anatásio, nos aluminofosfatos, na perovskita, nos niobatos, na zirkelita-zirconolita, nos carbonatos e no diopsídio.

O MgO está contido principalmente nos filossilicatos (48%), na ilmenita (32%) e na magnetita (20%), além de traços no diopsídio e nos carbonatos.

Do total de TiO_2 contido no intervalo considerado, 43% estão contidos na ilmenita, 22% na perovskita, 22% no anatásio, 4% na magnetita, 3% na zirkelita-zirconolita, 3% na titanita, 3% nos filossilicatos e traços nos niobatos e no diopsídio.

Os principais minerais portadores de BaO nesta amostra são o psilomelano, com 63%, seguido pelos aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita que representam 37% do total contido no intervalo granulométrico considerado, além de traços nos niobatos e na barita, a qual ocorre como mineral acessório.

4.6 Piroxenito (PXT)

4.6.1 Composição química

A composição química da amostra PXT está exposta na Tabela 33.

Tabela 33 - Composição química da amostra PXT

P_2O_5	CaO	SiO_2	Teores (% em massa)					PF	CaO/ P_2O_5
			Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	BaO		
9,00	19,6	24,1	2,57	18,2	11,1	5,28	0,68	8,56	2,18

Esta amostra é composta por 24,1% de SiO_2 , 19,6% de CaO, 18,2% de Fe_2O_3 , 11,1% de MgO, 9,0% de P_2O_5 (essencialmente apatítico), além de 2,57% de Al_2O_3 , 5,28% de TiO_2 e 0,68% de BaO. A relação CaO/ P_2O_5 é 2,18. A perda ao fogo para esta amostra corresponde a 8,56%.

4.6.2 Análise granulométrica

A Tabela 34 apresenta os resultados da análise granuloquímica para a amostra PXT.

Tabela 34 - Análise granuloquímica da amostra PXT

Fração (mm)	% Massa ret. acum.		Teores (%)									CaO/P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)				
			P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF		P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
+0,21	5,6	5,6	4,87	17,8	35,5	4,78	7,41	15,8	5,19	0,48	5,55	3,66	3,1	8,3	10,2	2,3	7,9
-0,21+0,15	16,1	21,7	11,9	25,8	22,3	2,08	14,9	9,13	5,78	0,59	5,46	2,16	21,7	15,0	12,8	13,3	13,2
-0,15+0,074	22,4	44,1	11,5	24,0	21,0	2,09	17,0	9,16	6,26	0,62	5,29	2,09	29,0	19,6	17,8	21,0	18,4
-0,074+0,020	27,2	71,3	8,90	19,1	23,6	2,46	19,0	11,2	5,98	0,61	7,23	2,14	27,1	26,7	25,4	28,4	27,2
-0,020	28,7	100,0	5,95	12,5	25,5	3,11	22,1	12,9	3,14	0,72	14,1	2,11	19,2	30,5	33,9	35,0	33,1
Total calc.	100,0		8,90	19,3	24,0	2,63	18,1	11,1	5,15	0,63	8,39	2,17	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total dosado			9,00	19,6	24,1	2,57	18,2	11,1	5,28	0,68	8,56						

Nota: "ret." = retida; "acum." = acumulada; "calc." = calculado

A análise granulométrica indica que 5,6% em massa constituem material retido em 0,21 mm, enquanto que 28,7% referem-se ao passante em 0,020 mm.

Nesta amostra, o P₂O₅ ocorre essencialmente na forma de apatita. No intervalo -0,21+0,020 mm estão compreendidos 78% do total de P₂O₅ contido na amostra. Os teores de P₂O₅ variam de 5,95 a 11,9% abaixo de 0,21 mm, tendendo ao decréscimo para os finos, enquanto que acima dessa fração esse teor corresponde a 4,87%. A relação CaO/P₂O₅ situa-se entre 2,09 e 2,16 abaixo de 0,21 mm, correspondendo a 3,66% acima dessa fração.

Os teores de SiO₂ estão compreendidos entre 21,0 e 25,5% abaixo de 0,21 mm, enquanto que, acima dessa fração, eleva-se para 35,5%. Já o teor de MgO acima de 0,21 mm corresponde a 15,8%, com teores variando entre 9,13 e 12,9% abaixo dessa fração, tendendo ao aumento para os finos.

Os teores de Fe₂O₃ variam de 7,41 até 22,1%, tendendo ao acréscimo para os finos. Já os teores de TiO₂ estão compreendidos entre 5,19 e 6,26% acima de 0,020 mm, diminuindo para 3,14% abaixo dessa fração.

Os teores de Al₂O₃ situam-se entre 2,09 e 4,78%, com tendência de diminuição nas frações intermediárias. Já os teores de BaO variam de 0,48 a 0,72%, com aumento aos finos.

As distribuições acumuladas em massa e dos conteúdos de P₂O₅, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e MgO são ilustradas no gráfico da Figura 42.

Figura 42 - Curvas de distribuição em massa e de teores acumuladas abaixo para o produto de moagem - amostra PXT

A distribuição do P_2O_5 mostra uma maior tendência de se concentrar nas frações mais grossas, principalmente a partir de 0,15 mm, com 19% abaixo de 0,020 mm. As distribuições de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MgO apresentam comportamentos semelhantes entre si e também em relação à distribuição em massa, com conteúdos que variam de 29 a 25% abaixo de 0,020 mm.

4.6.3 Separações minerais

Os resultados das separações minerais (líquido denso e separação magnética em Frantz) para a amostra PXT, efetuadas nas frações acima de 0,020 mm, são apresentados na Tabela 35.

O produto total +0,020 mm afundado não magnético em 4 kG responde por 37% em massa no ensaio (26,4% em relação à amostra), com proporções variando de 24,1 a 42,3%, com acréscimo na fração -0,21+0,074 mm. O teor médio de P_2O_5 neste produto corresponde a 24,5% (89,9% do total contido no ensaio; 72,7% em relação à amostra), com teor de 18% acima de 0,074 mm, situando-se entre 23,3 e 25,7% abaixo dessa fração. O teor médio de CaO é de 41,5% (69,7% do total contido no ensaio; 56,7% em relação à amostra), com relação CaO/P_2O_5 de 1,69, correspondendo a 2,15 acima de 0,21 mm e entre 1,66 e 1,70 abaixo dessa fração.

Tabela 35 - Resultados das separações minerais para a amostra PXT (frações acima de 0,020 mm)

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição no ensaio (%)							Distribuição na amostra (%)						
			P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF	P ₂ O ₅		CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂			
-0,30+0,21	Flutuado	47,1	2,6	0,32	2,88	40,6	9,82	8,70	23,0	1,74	0,42	10,2	9,00	3,1	7,6	53,9	55,4	68,6	15,8	0,1	0,4	4,5	1,3	5,5	0,9		
	Af. Mag. 4 kG	28,8	1,6	1,28	24,7	39,5	0,40	9,11	11,9	8,69	0,54	0,98	19,3	7,6	39,9	32,0	35,4	21,8	48,2	0,2	2,1	2,7	0,8	1,7	2,7		
	Afund. Não Mag.	24,1	1,4	18,0	38,8	20,7	0,14	2,85	6,29	7,74	0,52	1,88	2,15	89,3	52,5	14,0	9,3	9,6	36,0	2,7	2,7	1,2	0,2	0,8	2,0		
	Total calculado	100,0	5,6	4,87	17,8	35,5	4,78	7,41	15,8	5,19	0,48	5,55	3,66	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,1	5,2	8,3	2,3	7,9	5,6		
-0,21+0,15	Flutuado	27,9	4,5	0,91	10,1	38,5	6,83	7,60	18,6	1,20	0,45	15,0	11,1	2,1	10,9	48,1	14,2	56,9	5,8	0,5	2,4	7,2	1,9	7,5	1,0		
	Af. Mag. 1 kG	9,9	1,6	0,85	2,72	0,41	0,11	87,8	2,13	6,83	1,02	...	3,20	0,7	1,0	0,2	58,5	2,3	11,7	0,2	0,2	0,0	7,8	0,3	2,1		
	Af. Mag. 4 kG	19,9	3,2	3,78	22,5	29,4	0,46	15,5	9,64	13,1	0,65	1,82	5,94	6,3	17,3	26,2	20,6	21,0	44,9	1,4	3,7	3,9	2,7	2,8	8,1		
	Afund. Não Mag.	42,3	6,8	25,7	43,1	13,5	0,17	2,36	4,28	5,13	0,56	2,13	1,68	90,9	70,7	25,5	6,7	19,8	37,5	19,7	15,2	3,8	0,9	2,6	6,8		
-0,15+0,074	Total calculado	100,0	16,1	11,9	25,8	22,3	2,08	14,9	9,13	5,78	0,59	...	2,16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	21,7	21,6	15,0	13,3	13,2	18,1		
	Flutuado	29,8	6,7	0,67	10,0	37,9	6,59	8,43	19,1	1,02	0,50	13,8	14,9	1,7	12,4	54,0	14,8	62,1	4,9	0,5	3,5	10,6	3,1	11,4	1,3		
	Af. Mag. 1 kG	11,9	2,7	0,63	1,67	0,94	<0,10	86,1	2,00	7,70	1,03	...	2,64	0,7	0,8	0,5	60,1	2,6	14,6	0,2	0,2	0,1	12,6	0,5	4,0		
	Af. Mag. 4 kG	17,0	3,8	3,57	18,9	24,5	0,47	19,7	8,72	16,6	0,71	2,06	5,29	5,3	13,4	19,9	19,7	16,2	45,2	1,5	3,7	3,9	4,1	3,0	12,3		
-0,074+0,020	Afund. Não Mag.	41,3	9,2	25,7	42,6	13,0	0,11	2,22	4,24	5,36	0,54	2,01	1,66	92,3	73,3	25,6	5,4	19,1	35,3	26,7	20,4	5,0	1,1	3,5	9,6		
	Total calculado	100,0	22,4	11,5	24,0	21,0	...	17,0	9,16	6,26	0,62	...	2,09	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	29,0	27,8	19,6	21,0	18,4	27,2		
	Flutuado	40,4	11,0	0,68	8,64	38,0	5,56	11,1	19,9	0,75	0,48	14,8	12,7	3,1	18,3	65,0	23,5	72,0	5,1	0,8	4,9	17,3	6,7	19,6	1,6		
	Af. Mag. 1 kG	11,1	3,0	0,87	1,72	1,42	<0,10	86,0	2,23	6,64	0,98	...	1,97	1,1	1,0	0,7	50,1	2,2	12,3	0,3	0,3	0,2	14,2	0,6	3,9		
TOTAL +0,020	Af. Mag. 4 kG	15,5	4,2	5,25	14,9	20,4	1,02	25,4	8,10	17,8	0,77	2,92	2,84	9,2	12,2	13,4	20,8	11,3	46,4	2,5	3,3	3,6	5,9	3,1	14,6		
	Afund. Não Mag.	33,0	9,0	23,3	39,6	14,9	0,17	3,19	4,91	6,56	0,56	2,44	1,70	86,7	68,5	20,9	5,6	14,5	36,3	23,5	18,4	5,6	1,6	4,0	11,4		
	Total calculado	100,0	27,2	8,90	19,1	23,6	...	19,0	11,2	5,98	0,61	...	2,14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	27,1	26,8	26,7	28,4	27,2	31,5		
	Flutuado	34,8	24,8	0,68	8,66	38,3	6,52	9,48	19,8	1,01	0,47	14,1	12,7	2,3	13,7	56,9	19,9	65,9	5,9	1,9	11,1	39,6	13,0	44,1	4,9		
TOTAL +0,020	Af. Mag. 1 kG	10,2	7,3	0,78	1,92	1,02	...	86,4	2,12	7,07	1,01	...	2,46	0,8	0,9	0,4	53,3	2,1	12,1	0,6	0,7	0,3	34,6	1,4	10,0		
	Af. Mag. 4 kG	18,0	12,9	3,89	19,2	26,3	0,64	19,2	9,15	15,1	0,69	2,15	4,94	6,9	15,7	20,2	20,9	15,8	45,8	5,6	12,8	14,1	13,6	10,6	37,8		
	Afund. Não Mag.	37,0	26,4	24,5	41,5	14,2	0,15	2,62	4,58	5,83	0,55	2,18	1,69	89,9	69,7	22,4	5,9	16,3	36,2	72,7	56,7	15,6	3,8	10,9	29,9		
	Total calculado	100,0	71,3	10,1	22,0	23,4	...	16,5	10,4	5,96	0,60	...	2,18	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	80,8	81,4	69,5	65,0	66,9	82,5		

Nota: "Af." ou "Afund." = Afundado; "Mag." = Magnético; (...) dado não disponível

Permanecem associados a este produto teores de 14,2% de SiO_2 , 5,83% de TiO_2 (36,2% do total contido no ensaio; 29,9% em relação à amostra), 4,58% de MgO , 2,62% de Fe_2O_3 , 0,55% de BaO e 0,15% de Al_2O_3 . A perda ao fogo média para este produto representa 2,18%.

O produto total +0,020 mm flutuado corresponde a 34,8% em massa no ensaio (24,8% em relação à amostra), com proporções variando entre 27,9 e 47,1%, tendendo ao decréscimo nas frações intermediárias. Este produto apresenta teores médios de 38,3% de SiO_2 (56,9% do total contido no ensaio; 39,6% em relação à amostra), 19,8% de MgO (65,9% do total contido no ensaio; 44,1% em relação à amostra), 9,48% de Fe_2O_3 , 8,66% de CaO , 6,52% de Al_2O_3 , 1,01% de TiO_2 , 0,68% de P_2O_5 (2,3% do total contido no ensaio; 1,9% em relação à amostra) e 0,47% de BaO . A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ média é de 12,7, mantendo-se elevada ao longo do intervalo granulométrico considerado. A perda ao fogo neste produto corresponde a 14,1%.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 1 kG representa 10,2% em massa no ensaio (7,3% em relação à amostra), com proporções variando entre 9,9 e 11,9% abaixo de 0,21 mm; acima dessa fração não houve separação na intensidade de campo magnético empregada. Este produto apresenta teores médios de 86,4% de Fe_2O_3 (53,3% do total contido no ensaio; 34,6% em relação à amostra), 7,07% de TiO_2 , 2,12% de MgO , 1,92% de CaO , 1,02% de SiO_2 , 1,01% de BaO e 0,78% de P_2O_5 (0,8% do total contido no ensaio; 0,6% em relação à amostra). A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ média para este produto é de 2,46, variando de 1,97 a 3,20, com decréscimo aos finos.

O produto total +0,020 mm afundado magnético em 4 kG corresponde a 18,0% em massa no ensaio (12,9% em relação à amostra), com proporções que variam de 15,5 a 28,8%, tendendo a diminuir nos finos. Este produto apresenta teores médios de 26,3% de SiO_2 , 19,2% de Fe_2O_3 , 19,2% de CaO , 15,1% de TiO_2 (45,8% do total contido no ensaio; 37,8% em relação à amostra), 9,15% de MgO , 3,89% de P_2O_5 (6,9% do total contido no ensaio; 5,6% em relação à amostra), 0,69% de BaO e 0,64% de Al_2O_3 . A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ média para este produto é de 4,94, mantendo-se elevada ao longo do intervalo granulométrico considerado. A perda ao fogo média para este produto representa 2,15%.

4.6.4 Composição mineralógica

A composição mineralógica da amostra PXT para as frações acima de 0,020 mm, apresentada na Tabela 36, foi determinada através do sistema de análise de imagens MLA, com apoio de identificação das fases por DRX além de MEV. A comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais é apresentada na Figura 43.

Tabela 36 - Composição mineralógica para a amostra PXT (frações acima de 0,020 mm)

Mineral	Fração (mm) - % em massa				Total +0,020
	+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,020	
apatita	15	31	29	26	27
Al-fosfatos	<0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
monazita	<0,1	0,1	0,3	0,4	0,3
calcita	0,4	4	4	4	4
dolomita	0,7	2	2	2	2
perovskita	6	5	5	5	5
anatásio	0,3	0,7	0,9	1	0,9
ilmenita	2	3	4	7	5
magnetita	0,9	8	11	10	9
goethita	0,4	2	2	3	2
psilomelano	<0,1	0,1	0,4	0,9	0,5
niobatos	<0,1	<0,1	0,1	0,3	0,2
zirkelita-zirconolita	0,2	0,4	0,4	0,8	0,5
filossilicatos	46	20	23	24	24
diopsídio	26	19	14	11	15
quartzo	3	3	3	3	3
titanita	0,2	0,4	0,4	1	0,7
outros	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1

Notas: 1. Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

2. magnetita inclui traços de hematita

Considerando-se o intervalo +0,020 mm, a amostra PXT é composta por 27% de apatita, 24% de filossilicatos (vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita), 15% de diopsídio, 9% de magnetita (inclui traços de hematita), além de 5% de perovskita, 5% de ilmenita, 4% de calcita, 3% de quartzo, 2% de dolomita e 2% de goethita. Outros minerais acessórios (inferiores a 1%) estão presentes, sendo

Figura 43 - Comparação entre os difratogramas dos produtos das separações minerais - amostra PXT

eles: anatásio, titanita, zirkelita, zirconolita, psilomelano, monazita, niobatos (pirocloro e traços de Fe-columbita), aluminofosfatos (série goiazita-gorceixita) e outros (barita, zircão, baddeleita e pirrotita).

A proporção de apatita acima de 0,21 mm corresponde a 15%, situando-se 26 e 31% abaixo dessa fração, com tendência de diminuição aos finos. Acima de 0,21 mm, o conteúdo de filossilicatos representa 46%, diminuindo para conteúdos entre 20 e 24% abaixo dessa fração. O diopsídio varia de 11 a 26% ao longo do intervalo granulométrico considerado, com tendência de diminuição aos finos.

A magnetita varia de 8 a 10% abaixo de 0,21 mm; acima dessa fração representa apenas 0,9%. Já a goethita apresenta proporções de 0,4 a 2%, aumentando para os finos.

Calcita e dolomita correspondem a 0,4 e 0,7% acima de 0,21 mm; abaixo dessa fração a calcita constitui 4%, enquanto que a dolomita corresponde a 2%. Já a perovskita varia de 5 a 6% ao longo do intervalo granulométrico considerado.

As proporções de ilmenita estão compreendidas entre 2 e 7%, com tendência de acréscimo aos finos. O quartzo não varia ao longo do intervalo granulométrico, mantendo-se em 3%.

4.6.5 Características da apatita

Os principais aspectos da apatita, observados ao MEV, em relação à sua forma de ocorrência e associações com a ganga presente, são ilustrados na Fotomicrografia 14 e na Fotomicrografia 15.

Fotomicrografia 14 - MEV, amostra PXT, fração +0,21 mm.
Apatita, com superfície lisa e homogênea, em sua maioria liberada, por vezes mista com diopsídio.

Fotomicrografia 15 - MEV, amostra PXT, fração -0,21+0,15 mm.
Apatita (cinza claro) livre, com superfície lisa e homogênea (canto esq. superior), ou com zoneamento composicional (ao centro inferior).

A Tabela 37 e a Figura 44 apresentam um sumário da distribuição das formas de associação da apatita (% em massa), entre livre e mista em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para as frações acima de 0,020 mm.

A liberação global da apatita para esta amostra corresponde a 85%, variando entre 85% e 89%, exceto pela fração -0,21+0,15 mm, na qual corresponde a 78%. Quando na forma mista, ocorre predominantemente em partículas binárias, associação esta que representa 13%. Já as associações ternárias representam 2%. Nas associações binárias a apatita ocorre preferencialmente junto aos filossilicatos e à goethita, além da ilmenita.

Tabela 37 - Formas de associação da apatita no intervalo +0,020 mm - amostra PXT

Sumário das formas de associação da apatita (% em massa)					
Fração (mm)	Livre	Mista em binárias	Mista em ternárias	Total mista	Total livre + mista
+0,21	87	11	2	13	100
-0,21+0,15	78	18	4	22	100
-0,15+0,074	85	12	3	15	100
-0,074+0,020	89	10	1	11	100
Total +0,020	85	13	2	15	100

Associações da apatita em partículas binárias (% em massa)										
Fração (mm)	filossilic	goeth	ilmenita	perovsk	quartzo	magnet	carbon	zirkelita-zirconol	outros*	Total
+0,21	4	0,7	1	0,5	1	1	0,3	0,3	1	11
-0,21+0,15	8	3	2	1	0,8	0,8	0,6	0,6	2	18
-0,15+0,074	5	2	2	0,6	0,5	0,5	0,3	0,4	1	12
-0,074+0,020	3	4	0,5	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	1	10
Total +0,020	5	3	1	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	1	13

Associações da apatita em partículas ternárias (% em massa)										
Fração (mm)	filossilic	goeth	ilmenita	perovsk	quartzo	magnet	carbon	zirkelita-zirconol	outros*	Total
+0,21	0,3	0,3	0,5	0,2	0,1	0,2	<0,1	<0,1	0,1	2
-0,21+0,15	0,7	0,4	0,7	0,4	0,2	0,4	0,1	0,1	0,7	4
-0,15+0,074	0,5	0,3	0,5	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,5	3
-0,074+0,020	0,2	0,3	0,2	<0,1	<0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	1
Total +0,020	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,5	2

Notas: 1. abreviaturas: filossilic = filossilicato; goeth = goethita; magnet = magnetita; zirconol = zirconolita; Al-fosf = Al-fosfatos; psilom = psilomelano

2. (*) = outros minerais presentes

Figura 44 - Distribuição das formas de associação da apatita por fração granulométrica – amostra PXT

As curvas do espectro de liberação da apatita, considerando as frações em área e em “superfície livre” (parcela de apatita exposta no perímetro de cada partícula), são apresentadas respectivamente na Figura 45 e na Figura 46.

Figura 45 - Espectro de liberação da apatita em termos de fração em área das partículas - amostra PXT

Figura 46 - Espectro de liberação da apatita em termos de perímetro de grão exposto - amostra PXT

As curvas de distribuição *versus* teor de P_2O_5 (obtidas nos estudos de MLA),

considerando apenas o P_2O_5 apatítico para cada fração granulométrica e o total contido acima de 0,020 mm, são apresentadas na Figura 47.

Figura 47 - Curvas de distribuição versus teor de P_2O_5 apatítico (MLA) - amostra PXT

Estes dados indicam ser facilmente suplantado o teor comercial de concentrados de apatita (36-37% de P_2O_5) com índices de recuperações potenciais superiores a 99% de P_2O_5 apatítico considerando exclusivamente as associações entre apatita e demais minerais de ganga (a seletividade do processo de concentração não é computada nesta avaliação).

4.6.6 Partição dos principais óxidos presentes

As partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO dentre os minerais portadores, obtidas nos estudos efetuados através do MLA, para o material retido em 0,020 mm, são apresentadas na Tabela 38.

Mais de 98% do total de P_2O_5 contido acima de 0,020 mm ocorre na forma de apatita e o restante, está distribuído como traços na monazita, nos aluminofosfatos, na goethita e no anatásio.

Tabela 38 - Partições de P_2O_5 , CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO, TiO_2 e BaO (total +0,020 mm) - amostra PXT

Mineral	Distribuição (%)							
	P_2O_5	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	BaO
apatita	98	63						
Al-fosfatos	0,5	<0,1		1	0,1			14
monazita	0,7	<0,1						
calcita		8				0,3		
dolomita		2			0,1	4		
perovskita		9			0,8		38	
anatásio	0,3			1	0,4		10	
ilmenita					11	5	36	
magnetita					53	4	4	
goethita	0,3		0,1	2	11			
psilomelano								84
niobatos		<0,1			0,2		<0,1	0,1
zirkelita-zirconolita		0,2		0,1	0,1		2	
filossilicatos		0,4	46	96	19	61	4	
diopsídio		17	37		5	26	1	
quartzo			15					
titanita		0,9	1				4	
outros			<0,1					2

Nota: Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

Nesta amostra, 63% do total de CaO contido acima de 0,020 mm está presente na apatita, enquanto que 17% estão presentes na forma de diopsídio, 10% nos carbonatos (sendo 8% na calcita e 2% na dolomita), 9% na perovskita e traços na titanita, nos filossilicatos, na zirkelita-zirconolita, nos aluminofosfatos, na monazita e nos niobatos.

Os filossilicatos são responsáveis por 46% do total de SiO_2 contido no intervalo considerado, enquanto que o diopsídio responde por 37%, seguido pelo quartzo com 15% e titanita com 1%, além de traços na goethita e no zircão. Os filossilicatos compreendem quase todo o Al_2O_3 presente nesta amostra, representando 96% do total contido no intervalo granulométrico considerado, enquanto que a goethita responde por 2%, monazita e anatásio com 1% cada e traços estão presentes na zirkelita-zirconolita.

O Fe_2O_3 está presente predominantemente na forma de oxi-hidróxidos de ferro (56% na magnetita e 11% na goethita), além de 19% nos filossilicatos, 11% na

ilmenita, 5% no diopsídio e traços na perovskita, no anatásio, nos niobatos, nos carbonatos e na zirkelita-zirconolita.

O MgO está contido principalmente nos filossilicatos (61%) e no diopsídio (26%), seguidos por 5% na ilmenita, 4% nos carbonatos (essencialmente dolomita e traços na calcita) e 4% na magnetita.

Do total de TiO_2 contido no intervalo considerado, 38% estão contidos na perovskita, 36% na ilmenita, 10% no anatásio, além de 4% na magnetita, 4% na titanita, 4% nos filossilicatos, 2% na zirkelita-zirconolita, 1% no diopsídio e traços nos niobatos.

O principal mineral portador de BaO nesta amostra é o psilomelano, com 84% do total contido no intervalo considerado, seguido pelos aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita que representam 14% e barita com 2%, além de traços nos niobatos.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos através dos estudos de caracterização tecnológica, efetuados por meio das separações minerais com apoio de análises químicas e mineralógicas e análise de imagens através do sistema MLA, foram confrontadas as principais características relevantes para o beneficiamento mineral entre as amostras estudadas.

A comparação entre as composições químicas das amostras estudadas está exposta na Tabela 39.

Tabela 39 - Composição química das amostras estudadas

Teores (% em massa)	Amostras					
	APAT	FIT	FST	ZMT	PIT	PXT
P ₂ O ₅ total	25,2	16,0	13,5	14,7	11,7	9,00
P ₂ O ₅ apatítico	24,4	14,3	13,3	13,8	9,35	8,89
CaO	33,3	19,8	20,7	21,3	14,6	19,6
SiO ₂	1,73	3,79	19,5	13,2	21,7	24,1
Al ₂ O ₃	0,81	2,44	2,85	3,33	4,58	2,57
Fe ₂ O ₃	27,2	41,0	23,2	26,9	28,6	18,2
MgO	1,36	2,86	5,00	3,48	1,41	11,1
TiO ₂	1,45	4,10	5,48	6,35	8,45	5,28
BaO	0,96	1,18	0,83	0,92	1,06	0,68
PF	3,19	4,06	6,30	6,91	5,82	8,56
CaO/P ₂ O ₅	1,32	1,24	1,53	1,44	1,25	2,18

A amostra APAT é a que apresenta o teor mais elevado de P₂O₅ (25,2%, dos quais 24,4% correspondem a P₂O₅ apatítico), enquanto que a amostra PXT possui o mais baixo teor (9%, dos quais 8,89% representam P₂O₅ apatítico). As outras amostras apresentam teores de P₂O₅ variando de 11,7 a 16,0% (9,35% a 14,3% de P₂O₅ apatítico).

O teor mais elevado de Fe₂O₃ é observado na amostra FIT, com 41%; nas demais amostras este teor varia de 18,2% (PXT) a 28,6% (PIT). Já os teores de MgO estão compreendidos entre 1,36 e 5,0%, exceto na amostra PXT, na qual atinge 11,1%. Os teores de SiO₂ são extremamente variados, situando-se entre 1,73 e 3,79% nas amostras APAT e FIT e entre 19,5 e 24,1% nas amostras FST, PIT e

PXT; na mostra ZMT esse teor corresponde a 13,2%. Os teores de Al_2O_3 variam de 0,81% a 4,58%, com teor mais elevado na amostra PIT e mais baixo na amostra APAT. O teor de TiO_2 mais elevado (8,45%) é observado na amostra PIT e o mais baixo (1,45%) na APAT, mantendo-se entre 4,1 e 6,35% nas demais amostras. Nas amostras PIT e FIT, os teores de BaO correspondem, respectivamente, a 1,06 e 1,18%, sendo inferiores a 1% nas demais amostras.

A Figura 48 mostra comparativamente as distribuições em massa e dos conteúdos de P_2O_5 apatítico, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MgO , no material retido em 0,020 mm, para o conjunto de amostras estudado.

A parcela de material passante em 0,020 mm corresponde, respectivamente, a 20 e 24% para as amostras APAT e FIT, variando de 29 a 34% para as demais amostras. Pode-se observar um comportamento muito semelhante em relação à distribuição de P_2O_5 apatítico em todas as amostras, com 73 a 80% contidos no intervalo -0,21+0,020 mm e de 13 a 21% abaixo de 0,020 mm.

Embora os teores de SiO_2 sejam bastante variáveis entre as amostras, sua distribuição também é bastante similar, com conteúdos de 30 a 42% abaixo de 0,020 mm. Já em relação ao Al_2O_3 , as distribuições são bem distintas, com conteúdos de 53 a 69% abaixo de 0,020 mm, exceto pela amostra PXT, na qual corresponde a 34% nesta fração. Em relação às distribuições de Fe_2O_3 as amostras APAT e FIT mostram conteúdos entre 21 e 23% abaixo de 0,020 mm, enquanto que os conteúdos de MgO correspondem a 17%. Nas outras amostras os conteúdos de Fe_2O_3 variam de 35 a 40% abaixo de 0,020 mm, enquanto que para o MgO , estas proporções estão compreendidas entre 31 e 33%.

Figura 48 - Comparação entre a distribuição em massa e de teores acumulados abaixo para o produto de moagem das amostras estudadas

Se for considerado apenas o intervalo acima de 0,020 mm, a partição de P₂O₅ apatítico em relação ao total de P₂O₅ contido varia de 96 a 98%, à exceção da amostra PIT, na qual esta proporção corresponde a 89%. O P₂O₅ não apatítico está contido principalmente nos aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita, com presença mais evidente nas amostras FIT, ZMT e PIT, além da monazita e traços

intimamente associados à goethita e ao anatásio. Um sumário comparativo entre as partições de P_2O_5 apatítico, tanto para o total na amostra, como também para os conteúdos acima e abaixo de 0,020 mm, é ilustrado no gráfico da Figura 49.

Figura 49 - Partição de P_2O_5 apatítico em relação ao total de P_2O_5

Em relação à composição mineralógica têm-se que as amostras apresentam composições mineralógicas semelhantes, variando apenas as proporções entre os minerais presentes, como mostram a Tabela 40 e a Figura 50.

Os menores conteúdos de apatita são observados nas amostras PXT e PIT (27%), enquanto que o maior conteúdo é encontrado na amostra APAT (65%). Nas demais amostras as proporções de apatita situam-se entre 39 e 41% para o intervalo granulométrico considerado.

As amostras APAT e FIT apresentam os maiores conteúdos de oxi-hidróxidos de ferro, sendo 27% na amostra APAT (21% de magnetita, 6% de goethita e hematita inferior a 1%) e 42% na amostra FIT (37% de magnetita, 4% de goethita e 1% de hematita). Dentre os oxi-hidróxidos de ferro presentes nas outras amostras, os quais variam de 11 a 21%, a magnetita perfaz de 9 a 15%, enquanto que a goethita representa de 2 a 7%; já a hematita corresponde a cerca de 1% na amostra PIT e traços nas demais amostras.

As amostras FST, ZMT, PIT e PXT apresentam maior conteúdo de silicatos, sendo a amostra PIT a mais rica em quartzo (17%) e a amostra PXT a mais rica em

Tabela 40 - Composição mineralógica das amostras estudadas (% em massa) - intervalo +0,020 mm

Minerais (% em massa)	Amostras					
	APAT	FIT	FST	ZMT	PIT	PXT
apatita	64	42	39	41	27	27
Al-fosfatos	0,6	1	0,4	1	2	0,1
monazita	0,5	0,4	0,3	0,4	0,5	0,3
calcita	0,1	0,2	2	2	<0,1	4
dolomita	0,3	0,2	0,8	2	<0,1	2
perovskita	0,4	2	3	4	4	5
anatásio	0,1	0,6	1	2	3	0,9
ilmenita	1	3	4	6	9	5
magnetita	21	37	13	15	12	9
hematita*	<1	1	tr	tr	1	tr
goethita	6	4	3	6	7	2
psilomelano	2	1	1	1	2	0,5
niobatos	0,5	0,3	0,3	0,6	0,5	0,2
zirkelita-zirconolita	0,3	0,9	0,8	1	0,9	0,5
filossilicatos	2	4	15	8	12	24
diopsídio	<0,1	<0,1	4	2	0,1	15
quartzo	0,9	1	11	7	17	3
titanita	<0,1	0,2	1	1	0,7	0,7
outros	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1

Notas: 1. Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; niobatos = pirocloro e traços de Fe-columbita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita; outros = barita, zircão, baddeleita e pirrotita

2. *hematita calculada por diferença em relação à magnetita presente no afundado magnético em 1 kG; tr = traços

Figura 50 - Composição mineralógica das amostras estudadas (+0,020 mm)

silicatos ferro-magnesianos, notadamente filossilicatos (24%; predominantemente vermiculita, além de micas interestratificadas, clorita e caulinita) e diopsídio (15%), este último também presente nas amostras FST e ZMT com conteúdos inferiores a 5%. As proporções de ilmenita variam de 1 a 9%, com maior conteúdo na amostra PIT, a qual também apresenta maior conteúdo de anatásio (3%). Os conteúdos de perovskita variam de 2 a 5% em todas as amostras, à exceção da APAT, na qual corresponde 0,4%. As FST, ZMT e PXT (menos intemperizadas) apresentam conteúdos de calcita entre 2 e 4% e dolomita entre 1 e 2%; nas demais amostras esses carbonatos são praticamente inexistentes. Os aluminofosfatos da série goiazita-gorceixita representam 1% nas amostras APAT, FIT e ZMT e 2% na amostra PIT, sendo inferiores a 0,5% nas amostras FST e PXT.

Os estudos efetuados ao MEV mostram que a apatita ocorre usualmente liberada para a condição de cominuição empregada (~7% retido em 0,21 mm); sua superfície mostra-se límpida à fracamente impregnada por oxi-hidróxidos de ferro. Os ensaios de separações minerais indicam que a parcela altamente impregnada é da ordem de 5 a 6% para as amostras FST, PIT e PXT e da ordem de 7 a 8% para as amostras APAT, FIT e ZMT. A recuperação potencial de apatita, em se considerando unicamente a parcela de apatita não impregnada, está compreendida entre 91 e 93% para todas as amostras, como mostra a Tabela 41 (neste cômputo não foi avaliada a seletividade da concentração por flotação).

Tabela 41 – Características da apatita (+0,020 mm)

Amostras	APAT	FIT	FST	ZMT	PIT	PXT
Recuperação potencial de P ₂ O ₅ apatítico na flotação (%)	91	92	93	91	93	92
Apatita impregnada (%)	8	7	5	7	5	6

Os estudos realizados com o MLA, indicam que o grau de liberação da apatita varia de 90 a 93% nas amostras APAT, FIT e PIT, e de 85 a 89% nas amostras FST, ZMT e PXT. Se for considerada a liberação da apatita expressa em perímetro exposto, esses valores variam de 85 a 88% nas amostras APAT, FIT e PIT, entre 81 e 82% nas amostras FST e ZMT; na amostra PXT esse valor corresponde a 76%.

As curvas do espectro de liberação da apatita para o material retido em 0,020 mm na condição de moagem adotada, considerando as frações em área e em

“superfície livre” (parcela de apatita exposta no perímetro de cada partícula), são apresentadas na Figura 51 e na Figura 52, respectivamente.

Figura 51 - Espectros de liberação da apatita em área das partículas (+0,020 mm)

Figura 52 - Espectros de liberação da apatita em perímetro exposto das partículas (+0,020 mm)

A liberação da apatita expressa em perímetro exposto (associada à “superfície livre”) é sistematicamente menor em relação àquela expressa em área, com diferenças de 5 a 7% em todas as amostras, exceto na PXT, na qual essa diferença chega a 9%. Destaca-se que esta característica tem implicação direta na concentração da apatita por flotação, uma vez que o desempenho da operação depende, entre outras variáveis, da acessibilidade à superfície das partículas de apatita pelo agente coletor.

A Tabela 42 apresenta a comparação entre os teores e distribuições de P_2O_5 apatítico obtidos para o produto afundado não magnético em 4 kG (apatita límpida), bem como o grau de liberação em área e em perímetro exposto de apatita para o total +0,020 mm, obtidos por análise de imagens no MLA.

Tabela 42 - Comparação entre os resultados de teores e distribuição de P_2O_5 apatítico no produto não magnético em 4 kG (3D) e liberação da apatita por MLA (2D), total +0,020 mm

Amostra	Separações minerais - N-Mag 4kG		MLA Liberação apatita (%)	
	Teor P_2O_{5ap} (%)	Distr. P_2O_{5ap} (%)	área	perímetro
APAT	39,2	91	90	85
FIT	38,8	92	93	88
FST	34,2	93	89	82
ZMT	34,9	91	87	81
PIT	35,7	93	92	85
PXT	25,1	92	85	76

Nota: $P_2O_{5ap} = P_2O_5$ apatítico

Os resultados das separações minerais, considerando a obtenção de um produto constituído essencialmente por apatita, permitem estimar a liberação da mesma, em termos volumétricos (3D), a partir da distribuição de P_2O_5 apatítico; por outro lado os dados gerados a partir do MLA referem-se a medidas bidimensionais (2D), cujos valores devem ser superiores àqueles em 3D. Quando tal fato não ocorre (liberação 3D > 2D), o produto N-Mag 4kG mostra menor conteúdo de P_2O_5 e ainda a presença de partículas mistas, não havendo, portanto, correlação direta entre os resultados 2D e 3D.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando-se as composições químicas e a assembléia mineralógica das amostras estudadas, bem como as características da apatita presente nas mesmas, destacam-se, na Tabela 43, as principais características do conjunto de amostras estudado.

Tabela 43 - Sumário comparativo das principais características relevantes ao beneficiamento mineral das amostras estudadas

Amostras	APAT	FIT	PIT	FST	ZMT	PXT
Composição química (% em massa; teores dosados)						
P ₂ O ₅	25,2	16,0	11,7	13,5	14,7	9,00
P ₂ O ₅ apatítico	24,4	14,3	9,35	13,3	13,8	8,89
SiO ₂	1,73	3,79	19,5	13,2	21,7	24,1
Fe ₂ O ₃	27,2	41,0	28,6	23,2	26,9	18,2
MgO	1,36	2,86	1,41	5,00	3,48	11,1
TiO ₂	1,45	4,10	8,45	5,48	6,35	5,28
CaO/P ₂ O ₅	1,32	1,24	1,25	1,53	1,44	2,18
Composição mineralógica (% em massa) para o intervalo +0,020 mm						
apatita	64	42	27	39	41	27
Al-fosfatos	0,6	1	2	0,4	1	0,1
calcita	0,1	0,2	<0,1	2	2	4
dolomita	0,1	0,2	<0,1	0,8	2	2
perovskita	0,3	2	4	3	4	5
anatásio	0,1	0,6	3	1	2	0,9
ilmenita	1	3	9	4	6	5
magnetita	21	37	12	13	15	9
goethita	6	4	7	3	6	2
filossilicatos	2	4	12	15	8	24
diopsídio	<0,1	<0,1	0,1	4	2	15
quartzo	0,9	1	17	11	7	3
Características para fins de concentração por flotação (+0,020 mm)						
Físicas						
Finos (-0,020 mm), % em massa	20	24	33	30	34	29
Conteúdo de P ₂ O ₅ apatítico associado aos finos (%)	16	14	13	19	21	19
Separações minerais						
Apatita impregnada (%)	8	7	5	5	7	6
Análise de imagens - MLA						
Grau de liberação - % área	90	93	92	89	87	85
Grau de liberação - % perímetro exposto	85	88	85	82	81	76

Nota: Al-fosfatos = gorceixita e/ou goiazita; filossilicatos = vermiculita, micas interestratificadas, caulinita e clorita;

As principais semelhanças e dissimilaridades entre as amostras são assinaladas em cores, podendo-se em princípio restringí-las a três grupos ou tipos principais, sendo que a amostra PIT pode caracterizar um termo intermediário.

Os resultados revelam que as amostras APAT, FIT e PIT apresentam algumas semelhanças importantes, como o baixo conteúdo de MgO (de 1,36 a 2,86%) e relação $\text{CaO/P}_2\text{O}_5$ também baixa (entre 1,24 e 1,32). Devido ao maior grau de intemperismo imposto a essas amostras, os carbonatos são praticamente inexistentes e o conteúdo de P_2O_5 apatítico nos finos também é menor. Tem-se ainda que a liberação da apatita, obtida através do MLA para essas amostras, é superior a 90% em área (>85% em perímetro).

Já para as amostras FST e ZMT as principais semelhanças são o alto conteúdo de apatita (entre 39 e 41%) e baixo conteúdo de magnetita (entre 13 e 15%), além de 8 a 15% de filossilicatos, 7 a 11% de quartzo e 2 a 4% de diopsídio. A relação $\text{CaO/P}_2\text{O}_5$ nestas amostras é elevada (1,44 a 1,53) e o grau de liberação da apatita (em área – MLA) situa-se entre 87 e 89%.

A amostra PXT é a menos intemperizada e, além de apresentar baixas proporções de apatita (27%) e magnetita (9%), seus conteúdos de filossilicatos (24%), diopsídio (15%), perovskita (5%) e carbonatos (5%) são os maiores observados. Além disso, esta amostra apresenta o menor grau de liberação para a apatita dentre as amostras estudadas (85% em área; 76% em perímetro - MLA).

Adicionalmente, em relação a outros parâmetros relevantes para fins de beneficiamento tem-se que:

- a impregnação superficial da apatita por oxi-hidróxidos de ferro é relativamente baixa quando comparada com outros depósitos, a exemplo de Araxá e Catalão (Kahn, 1999; Lenharo, 1994). Os maiores valores para de apatita impregnada são observados nas amostras APAT, FIT e ZMT (7 a 8%). Eventual atrição prévia à etapa de flotação pode minimizar as perdas de apatita impregnada e/ou aumentar a seletividade desta na etapa de concentração por flotação;
- para as condições de cominuição adotadas (~93% passante em 0,21 mm), a apatita encontra-se bem liberada;
- algumas amostras contêm minerais portadores de cátions alcalino-terrosos que podem diminuir a seletividade da concentração por flotação, podendo, eventualmente requerer emprego de coletores específicos: perovskita nas amostras PIT e FST e carbonatos nas amostras FST, ZMT e PXT.

Sugere-se, na continuidade dos estudos, avaliar eventual cominuição mais grossa seguida de novo estudo de liberação e determinação da partição entre as

espécies de apatita primária e secundária na alimentação e nos produtos da flotação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGARTE, J. P. A influência dos arqueamentos cratônicos no condicionamento das alcalinas nos Estados de São Paulo e Paraná. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26. 1972. Belém, PA. [Anais] Belém: SBG, v. 1, p. 65-69.

ALMEIDA, F. F. M. Condicionamento tectônico do magmatismo alcalino mesozóico do Sul do Brasil e Paraguai Oriental. *In*: Academia Brasileira de Ciências. 1971. [Anais]. v. 43, p. 835-836.

ALMEIDA, F. F. M. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da plataforma sulamericana. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 13, p. 139-158, 1983.

ALTSCHULER, Z. S. The weathering of phosphate deposits - geochemical and environmental aspects. *In*: GRIFFITH, E. J. *et al.* (Ed.) **Environmental Phosphorus Handbook**. New York: John Wiley & Sons, 1973. Cap. 3, p. 33-95.

ALVES, B. P. Distrito nióbio-titanífero de Tapira. **Boletim de Fomento. Departamento Nacional da Produção Mineral**. Rio de Janeiro, n. 108, 48 p., 1960.

AMARAL, A. J. R. Geologia do fosfato. *In*: SCHOBENHAUS, C. *et al.* (Ed.) **Principais depósitos minerais do Brasil**. Brasília: DNPM / CPRM, 1997. Vol. 4C, p. 3-16.

APATI, S. **Mineralogia, micromorfologia e distribuição granulométrica dos materiais alterados de uma topossequência da Lagoa Campestre, complexo alcalino-carbonatítico de Salitre II, MG**. 1997. 98 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

ARAUJO, E. N. C.; KAHN, H; RATTI, G. Caracterização tecnológica do minério de fosfato de Salitre, MG. *In*: SEMANA IBERO-AMERICANA DE ENGENHARIA DE MINAS, **SIAEM**. São Paulo, 2004. p. 15-20.

BARBERY, G. **Mineral liberation**: measurement, simulation and practical use in mineral processing. Québec: Les Editions GB, 199. 351 p.

BARBOSA, O.; BRAUN, O. P. G.; DYER, R.; CUNHA, C. A. R. Geologia da região do Triângulo Mineiro. **Boletim de Fomento. Divisão da Produção Mineral**, Rio de Janeiro, n. 136, p. 7-141, 1970.

BARROS, L. A. F. **Flotação da apatita da jazida de Tapira, MG.** 1997. 180 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

BARROS, L. A. F.; LEAL FILHO, L. S.; PERES, A. E. C. Technical note plant practice innovations in a phosphate concentrator. **Minerals Engineering**, Oxford, v. 14, n. 1, p. 117-121, 2001.

BARROS, L. A. F. **Caracterização tecnológica de minério Fosfático de Salitre, Patrocínio – MG.** 2006. 446 p. Tese (Doutorado) – CPGEM, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

BARROS, L. A. F.; FERREIRA, E. E.; PERES, A. E. C. Flotability of apatites and gangue minerals of an igneous phosphate ore. Selected Papers from Flotation '07, Cape Town, South Africa, November 2007. Edited by D.J. Bradshaw and N.O. Lotter. **Minerals Engineering**, v. 21, p. 994-999, 2008.

BIONDI, J. C. Ambientes relacionados a rochas alcalinas e carbonatitos. *In*: QUEIROZ, T. A. (Ed.) **Depósitos de minerais metálicos de filiação magmática.** São Paulo: Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 1986. Cap. 5, p. 477-552.

BIONDI, J. C. Sistema endomagmático. *In*: _____. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros.** São Paulo: Oficina de Textos, 2003. Cap. 2, p. 31-98.

BISH, D. L.; REYNOLDS JR., R. C. Sample preparation for x-ray diffraction. *In*: BISH, D.L.; POST, J.E. (Ed.). **Modern powder diffraction.** Washington: Mineralogy Society of America, 1989. p. 73-99. (Reviews in Mineralogy, v. 20).

BORN, H.; KAHN, H. Caracterização geológica e mineralógica voltada ao aproveitamento de jazimentos fosfáticos. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 5, São Paulo, 1990. [**Anais**]. Brasília: Ibrafos, 1990. p. 213-233.

BORN, H., KAHN, H. Mineralogical and geological ore types of Brazilian phosphate ores. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, **ICAM'93.** Fremantle, Austrália. 1993, Proceedings. p. 157-160.

BORN, H.; LENHARO, S. L. R.; KAHN, H. Mineralogical characterization of apatites from brazilian phosphate deposits with reference to flotation behaviour. **Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy**. Section B, London, 1996. v.105, p.117-26.

BRAZ, A. B. **Caracterização mineralógica e tecnológica de minério de fosfato de Salitre, MG**. 2001. 80 p. Monografia (Trabalho de Formatura) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BRAZ, A. B. **Caracterização tecnológica e mineralógica do minério de fosfato de Salitre, MG**. 2004. 138p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BRAZ, A. B.; MANO, E. S.; KAHN, H. Caracterização da apatita primária e secundária de Salitre, MG. *In*: Semana IBERO-AMERICANA DE ENGENHARIA DE MINAS, **SIAEM**. São Paulo, 2004. p. 21-25.

BRAZ, A. B.; KAHN, H.; ULSEN, C.; D'AGOSTINO, L. Z. Characterization of apatite from Salitre deposit by cathodoluminescence microscopy and chemical microanalysis (SEM-EDS/WDS). *In*: **BENEFICIATION OF PHOSPHATES**, 5, Rio de Janeiro, 2008.

CHABAN, N. Relatório Técnico de Avaliação da Reserva Mineral de Salitre – CVRD, 2003.

FANDRICH, R.; GU, Y.; BURROWS, D.; MOELLER, K. Modern SEM-Based mineral liberation analysis. **International Journal of Mineral Processing**, v. 84, n. 1-4, p. 310-320, 2007.

FERREIRA, F. J. F.; ALGARTE, J. P. O comportamento aeromagnético-cintilométrico das principais rochas alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. 1979. *In*: **SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA**, 2, Atas. Rio Claro, São Paulo. V. 2, p. 195-208.

FOSFERTIL. Relatório interno. Projeto fosfato Salitre. Gefer, janeiro de 2003. 30 p.

GAUDIN, A. M. **Principles of Mineral Processing**. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1939. 554 p.

GOLDSTEIN, J.I. *et al.* **Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis: a text for biologists, materials scientists, and geologists.** 2 ed. New York: Plenum Press, 2003. 689 p.

GÖTZE, J. **Cathodoluminescence microscopy and spectroscopy in applied mineralogy.** Freiburger Forschungshefte: C; 485: Geowissenschaften, 2000. 128 p.

GUIMARÃES, R. C.; PERES, A. E. C. Interfering ions in the flotation of a phosphate ore in a batch column. **Minerals Engineering**, v. 12, n. 7, p. 757-768, 1999.

GUIMARÃES, R. C.; ARAÚJO, A. C.; PERES, A. E. C. Reagents in igneous phosphate ores flotation. **Minerals Engineering**, v. 18, p. 199-204, 2005.

HASUI, Y.; CORDANI, U. G. Idades Potássio-Argônio de rochas eruptivas mesozóicas do oeste mineiro e sul de Goiás. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 22, 1968, Belo Horizonte, MG. [**Anais**]. Belo Horizonte: SBG, 1968. p. 139-143.

HENLEY, K.J. Ore-dressing mineralogy. A review of techniques, applications and recent developments. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MINERALOGY, 1, **ICAM'81**. Johannesburg, África do Sul. 1981, Proceedings in Special Publication of Geological Society of South Africa, 7, 1983. p.175-200.

HERZ, W. C.; VROOMEN, H. L. Fertilizers. *In*: KOGEL, J. E. *et al.* (Ed.) **Industrial minerals and rocks: commodities, markets and uses.** 7 ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006. p. 1269-1279.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION (**IFA**). Sumário em 2008. Apresenta dados estatísticos de produção, importação e exportação de fertilizantes e suas matérias primas. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org>>. Acessado em janeiro de 2009.

ISOITKO, V.M. Statistical methods in technological mineralogy. *In*: **Process Mineralogy IX**. Published by The Minerals, Metals & Materials Society, 1990. p. 201-218.

KAHN, H. **Caracterização de matérias primas minerais associadas a complexos alcalino-carbonatíticos.** 1999. 216 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

KAHN, H. Classificação dos intervalos de furos de sonda de Salitre. Relatório de consultoria (planilha eletrônica, *software* Microsoft Excel), 2003, 5p.

KAHN, H.; RATTI, G.; TASSINARI, M. M. M. L.; MANO, E. S.; BARROS, L. A. F. Process mineralogy studies of a foscorite ore from Salitre alkaline carbonatitic complex. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS FOR APPLIED MINERALOGY, 8, 2004, Águas de Lindóia, Brasil. **ICAM 2004**: proceedings. Applied Mineralogy: Developments in Science and Technology. São Paulo: International Council for Applied Mineralogy, 2004. v. 2. p. 997-1000.

KAHN, H.; SANT'AGOSTINO, L. M.; TASSINARI, M. M. M. L.; ULSEN, C.; BRAZ, A. B. Apatite from alkaline complexes - geological aspects, behavior in mineral processing and characterization techniques. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS FOR APPLIED MINERALOGY, 9, 2008, Brisbane, Austrália. **ICAM 2008**: proceedings. Victoria: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2008. p. 507-514.

KLEIN, C.; HURLBUT Jr., C. S. **Manual of Mineralogy**. 21st ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. 681 p.

LEAL FILHO, L. S. **Aspectos relevantes na separação apatita/minerais de ganga via processo serrana**. 1991. 266 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

LEAL FILHO, L. S. **A seletividade na separação apatita/silicatos por flotação: subsídios para a solução de problemas tipicamente brasileiros**. 1999. 160 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

LEAL FILHO, L. S.; SEIDL, P. R.; CORREIA, J. C. G.; CERQUEIRA, L. C. K. Molecular modelling of reagents for flotation. **Minerals Engineering**, v. 13, n. 14-15, p. 1495-1503, 2000.

LEGEROS, R.; LEGEROS, J. P. Phosphate minerals in human tissues. *In*: NRIAGU J. O.; MOORE P. B. (Ed.) **Phosphate minerals**. Berlin: Springer-Verlag, 1984, p. 351-385.

LENHARO, S. L. R. **Caracterização mineralógica/tecnológica das apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfato**. 1994. 196 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

LENHARO, S. L. R. Classificação dos intervalos de furos de sonda de Salitre. Relatório de consultoria (planilha eletrônica, *software* Microsoft Excel), 2004, 1p.

MARSHALL, D. J. **Cathodoluminescence of Geological Materials**. Unwin Hyman Ltd., 1988. 146 p.

MCCONNELL, D. **Apatite** – its crystal chemistry, mineralogy, utilization and geologic and biologic occurrences. Wien, New York: Springer-Verlag. 1973. 111 p.

MEHMEL, M. The structure of apatite. **I.Z. Kristallogr. Mineral.** v. 75, p. 323-31, 1930.

MEHMEL, M. **Differences in the crystal structure and chemical formula of apatites**. Z. Phys. Chem. 1931. v.15, p. 223-41.

MELO, M. T. V.; CHABAN, N.; GROSSI SAD, J. H.; TORRES, N. Depósitos de fosfato, titânio e nióbio de Salitre, Minas Gerais. *In*: BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Principais depósitos minerais do Brasil**. Brasília : DNPM, 1997. v. 4C, Cap. 5. p. 57-68.

MONTEL, G. *et al.* Relations entre la physico-chimie des apatites et leur comportement dans les milieux biologiques et les différents traitements industriels. *In*: **CONGRES INTERNATIONAL DES COMPOSES PHOSPHORES**, 1er, Rabat, 1977, Paris, France: Institut Mondial du Phosphate-IMPHOS, 1977, p. 321-345.

NARAY-SAZBÓ, S. The structure of apatite, $(\text{CaF})\text{CA}_4(\text{PO}_4)_3$. **Zeitschrift fur Kristallographie, Kristallgeometrie, Kristallphysik, Kristallchemie**. Wiesbaden, v. 75, p. 387-398. 1930.

NOTHOLT, A. J. G.; SHELDON, R. P.; DAVIDSON, D. F. (Ed.) **Phosphate deposits of the world**. Cambridge: University Press, Vol. 2. Phosphate rock resources, 1989. 566 p.

OLIVEIRA, M. S.; QUEIROZ, G. M.; GUIMARÃES, R. C.; ATAÍDE, C. HHH.; BARROZO, M. A. S. Selectivity in phosphate column flotation. **Minerals Engineering**, V. 20, p. 197-199, 2007.

PAPINI, R. M.; GUIMARÃES, R. C.; PERES, A. E. C. Technical note study on the flotation selectivity of a problem phosphate ore. **Minerals Engineering**, V.. 14, N. 6, p. 681-684, 2001.

PATROCÍNIO (Município). Município brasileiro do Estado de Minas Gerais. 2008. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org>>. Acessado em: 12 dez 2008.

PATROCÍNIO (Município). Mapa do Município de Patrocínio e áreas adjacentes – visualização por “Terreno”. 2009. Disponível em <<http://maps.google.com.br>>. Acessado em: 06 jan 2009.

PEREIRA, L. F.; DARDENNE, M. A.; ROSIERE, C. A.; PEDROSA-SOARES, A. C. Evolução Geológica dos Grupos Canastra e Ibiá na Região de Coromandel e Guarda-Mor, Mg. **GEONOMOS**, Belo Horizonte, v. 1, n. 2, p. 22-32, 1994.

PERES, A. E. C.; ARAÚJO, A. C. A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. *In*: PINTO CHAVES, A. (Ed.) **Flotação: o estado da arte no Brasil**. São Paulo: Signus Editora, Coleção teoria e prática do tratamento de minérios. 2006. Vol. 4, p. 1-29.

PETRUK, W. General principles of applied mineralogy. *In*: _____. **Applied mineralogy in the mining industry**. Ottawa: Elsevier, 1st ed., 2000. Cap. 1, p. 1-49.

RODRIGUES, A. J.; P. R. G. BRANDÃO. The influence of crystal chemistry properties on the flotability of apatites with sodium oleate. **Minerals Engineering**, v. 6, n. 6, p. 643-653, 1993.

RODRIGUES, C. S.; LIMA, P. R. A. S. Complexos carbonatíticos do Brasil. *In*: RODRIGUES, C. S.; LIMA, P. R. A. S. (Ed.) **Complexos carbonatíticos do Brasil: geologia**. São Paulo: Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 1984. Cap. 1, p. 3-17.

RUBERTI, E.; MARGUTI, R. L.; GOMES, C. B. O Complexo Carbonatítico de Jacupiranga, SP: informações gerais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. **Roteiro das excursões**. São Paulo: SBG, 1992. v. 4, 16 p.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. Caracterização para o beneficiamento gravimétrico. *In*: _____. **Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005. Cap. 2, p. 27-85.

SANT'AGOSTINO, L. M.; KAHN, H. **Metodologia para a caracterização tecnológica de matérias primas minerais**. São Paulo: EPUSP, 1997. 29 P. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/069)

SCHAPIRO, N.; MALLIO, W.J.; PARK, W.C. Process mineralogy in ore deposits development. *In*: AIME ANNUAL MEETING. Symposium sponsored by the TMS-AIME. Process Mineralogy Committee. Chicago, Illinois, USA, 1980. Proceedings in **Process Mineralogy VI**. An special publication of the Metallurgy Society of AIME. 1981. p. 25-30.

SCHUBERT. Relatório Técnico de Avaliação da Reserva Mineral de Salitre – CVRD. 2001.

SILVEIRA, B. V.; GRACIOSO, J. E.; LUZ, P. O.; RODRIGUEZ, P. C. Projeto de mineração - uma abordagem geometalúrgica. **Simpósio EPUSP de Caracterização Tecnológica na Engenharia e Indústria Mineral, 1**, São Paulo, [Anais]. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas. 1990. p.45-58.

SLAVEC, G. B.; MANTOVANI, M. S. M.; SHUKOWSKY, W. Contribuição ao estudo do Complexo de Juquiá. **Revista Brasileira de Geociências**, SBG, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 203-210, 2001.

SONOKI, I. K.; GARDA, G. M. Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. **Boletim IG-USP, Série Científica**, São Paulo, v. 19, p. 63-85, 1988.

SOUZA, A. E.; CARDOSO, V. R. S. **Sumário mineral brasileiro 2008: fosfato**. Departamento Nacional da Produção Mineral. 2008. 2 p. Disponível em: <<http://www.dnprm.gov.br>>. Acesso em: 15 out 2008.

SUTHERLAND, D. N.; GOTTLIEB, P. Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing. **Minerals Engineering**, Clayton: Pergamon Press, v. 4, n. 7-11, p. 753-762, 1991.

TOLEDO, M. C. M. **Mineralogia dos principais fosfatos do maciço alcalino-carbonatítico de Catalão I (GO) e sua evolução no perfil laterítico**. 1999. 193 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

TOLEDO, M. C. M.; PEREIRA, V. P. A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 22, n. 1-2, p. 27-64, 2001.

ULIANA, D. **Caracterização mineralógica e tecnológica do fosfato do complexo alcalino de Salitre, MG - área Fوسفertil**. 2006. 39 p. Monografia (Trabalho de Formatura) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ULIANA, D.; KAHN, H.; BRAZ., A. B.; TOLEDO, M. C. M.; RATTI, G.; CAMPBELL, F. S. Caracterização mineralógica e tecnológica do fosfato do complexo alcalino de Salitre, MG - área Fوسفertil. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 22, 2007, Ouro Preto, MG. **Proceedings**. Ouro Preto: UFOP/UFMG/CDTN, 2007. v. 1, p. 53-60.

ULIANA, D.; KAHN, H.; BRAZ.; A. B.; TOLEDO, M. C. M.; RATTI, G. Characterization studies of phosphate ore types from Salitre Alkaline Complex, Brazil (MG). *In*: Beneficiation of Phosphates, 5, 2008, Rio de Janeiro, RJ. **Abstracts**, Brooklyn: ECI, 2008.

ULIANA, D.; KAHN, H.; BRAZ, A. B. Caracterização tecnológica dos tipos de minério de fosfato do Complexo Alcalino de Salitre, MG - Área Fوسفertil. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 4, p. 511-516, 2009.

ZHANG, P.; WIEGEL, R.; EL-SHALL, H. Phosphate Rock. *In*: KOGEL, J. E. *et al.* (Ed.) **Industrial minerals and rocks: commodities, markets and uses**. 7 ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006. p. 703-722.

APÊNDICE A - Principais equipamentos utilizados

Britador de rolos MR2510, marca Furlan

Amostrador Jones

Moinhos de bolas de porcelana marca Chiaorotti, e acionador duplo

Exemplo de conjunto de peneiras

Centrífuga para separação de material em líquido denso

Separador magnético Frantz, modelo de barreira LB-1

Espectrômetro de fluorescência de raios X seqüencial Axios Advanced (PANalytical)

Máquina de fusão a gás Fluxy 10 (Claisse) de 3 queimadores para a preparação de amostras fundidas para análises por FRX

Moinhos de disco e anéis oscilantes HSM-250P, (Herzog), com recipientes de moagem em aço cromo e carbeto de tungstênio, capacidades de 300, 100 e 10 g

Mufla Ney 3/550 PD e 3/550 NDI (02) (Vulcan) reguláveis até 1100°C, para determinações de umidade e perda ao fogo

Difratômetro modelo MPD 1880 (Philips)

Acima: Suportes de amostras vazados e diferenciados para prensagens manual e hidráulica;

Abaixo: Moinho planetário Pulverizette 5 (Fritsch) com recipientes de moagem de Fe-Cr (capac. de 80 e 300 ml)

Microscópio eletrônico de varredura ambiental (ESEM) Quanta 600 FEG (FEI) com sistemas de microanálise Quantax (Bruker) e de análises de imagens: MLA-Mineral Liberation Analyser (FEI) e SIS

Microscópio eletrônico de varredura Stereoscan S440 (Leo) com sistemas de microanálise INCA (EDS/WDS, marca Oxford) e de análises de imagens QWin Pro (Leica)

Politriz PM2A, marca Logitech, para confecção de seções polidas

Equipamento de recobrimento de amostras SCD050 (Bal-Tec)

Suporte de amostras - MLA

Micro amostrador rotativo, MSR25, marca Microscal

APÊNDICE B - Fluxograma da análise de imagens no MLA

Amostra FIT – Difratoograma do produto flutuado, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de vermiculita, quartzo, dolomita, calcita e possível presença de goiazita.

Amostra FIT – Difratoograma do produto afundado magnético em 1 kG, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de magnetita, hematita, ilmenita e apatita.

Amostra FST – Difratoograma do produto flutuado, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de quartzo, vermiculita (e possível presença de clorita), dolomita, calcita, apatita.

Amostra FST – Difratoograma do produto magnético em 1 kG, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de magnetita, hematita, ilmenita e possível presença de diopsídio.

ZMT -0,15+0,074 mm Af. Mag. 1 kG

Counts

1600

400

0

10 20 30 40

Position [°2Theta] (Copper (Cu))

Magnetite

Hematite, syn: Ilmenite

Magnetite

Ilmenite Hematite, syn

Magnetite: Hematite, syn: Ilmenite

Magnetite

Hematite, syn

Magnetite: Ilmenite

Amostra ZMT – Difratograma do produto magnético em 1 kG, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de magnetita, hematita e ilmenita.

Amostra PIT – Difratoograma do produto flutuado, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de quartzo, vermiculita (e micas interestratificadas) e possível presença de anatásio, goiazita, apatita e magnetita.

Amostra PIT - Difratoograma do produto magnético em 1 kG, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de magnetita, hematita, ilmenita e possível presença de quartzo.

Amostra PIT – Difratoograma do produto magnético em 4 kG, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de ilmenita, hematita, anatásio, quartzo, apatita, goiazita, goethita e possível presença de perovskita.

Amostra PIT – Difratoograma do produto não magnético em 4 kG, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de apatita, anatásio (e possível presença de rutilo), quartzo, gorceixita e/ou goiazita e possível presença de perovskita.

Amostra PXT – Difratoograma do produto flutuado, fração -0,15 +0,074 mm, mostrando a presença de vermiculita (e micas interestratificadas), dolomita, calcita e quartzo.

Amostra PXT – Difratoograma do produto magnético em 1 kG, fração -0,15 +0,074 mm, mostrado a presença de magnetita, ilmenita, perovskita e possível presença de diopsídio.

APÊNDICE D - Fotomicrografias e microanálises obtidas ao
MEV/EDS

Amostra APAT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)														
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	ThO ₂
apatita	1	2,01					43,4		54,1				2,21			
Fe-columbita	2				1,59	1,33	2,59		0,80	1,92		41,9			15,7	
apatita	3	2,64					39,4		52,8			1,09	1,77			
apatita	4	3,13	0,86				41,3		50,3				2,34			
apatita	5	4,30					39,4		55,1							
apatita	6	5,39					36,7		53,7							
apatita	7	1,51					43,3		54,6				2,28			
apatita	8	2,07					43,1		55,1				2,03			
apatita	9	1,80					42,9		54,1				2,17			
zirk-zirconol	10			0,50					11,8	31,3		6,21		26,6		6,23
apatita	11	3,30					42,6		54,3			0,36	1,87			
magnetita	12			7,88	0,95				0,27	1,80	0,80	90,8				
magnetita	13			4,79						3,73	1,41	91,7				
dolomita	14			19,2					28,6		0,32	1,39	1,04			
apatita	15	4,71					39,2		54,1							
filossilicato	16			20,0	9,91	34,2		0,27	2,36	1,52		7,66

Amostra APAT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)												
		F	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅	BaO	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	ThO ₂
apatita primária	1a	1,94			42,0	54,4			1,76					
apatita primária	1b	1,70			41,9	53,6			1,94					
apatita primária	1c	1,44			41,8	53,5			1,93					
apatita primária	1d	1,91			40,2	53,4			1,77					
apatita secundária	2a	3,76			40,4	54,3	0,63		1,44					
apatita primária	2b	2,31			43,2	54,2			2,39					
apatita primária	2c	2,39			43,1	54,5			2,59					
apatita primária	2d	3,12			43,1	54,8			2,68					
apatita primária	3	1,07			43,1	54,9	0,36		2,28					
monazita	4				28,9	15,5	2,10	3,11		1,95	1,93	1,05	34,4	
oxi-hidróx. Fe	5		2,65	1,07	6,79	1,47	1,12	64,5		5,46		1,43		
apatita primária	6	2,59			43,0	54,4			2,41					
apatita secundária	7	3,43			40,0	53,1	0,97	1,50						
monazita	8		1,10		21,1	13,0	1,83			1,08		2,17	15,4	
pirocloro	9					2,83	4,17	2,14	4,21	41,1	8,27	1,39		2,24

Amostra APAT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)									
		F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO
apatita	1	1,63				43,7	54,8				1,93
apatita	2	1,43				42,2	54,5				1,54
apatita	3	2,14				43,5	54,4				2,55
apatita	4	3,32		1,87		40,0	51,4			0,46	1,82
apatita	5	1,66				42,2	53,7				1,68
apatita	6	2,93				40,6	52,6			0,94	1,68
apatita	7	1,79				43,2	55,2				1,96
quartzo	8				98,8						
apatita	9	3,15				41,0	53,6			2,69	1,55
magnetita	10		7,60	0,83			0,24	1,07	0,81	90,3	
magnetita	11						0,32	1,72	0,39	95,0

Amostra FIT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)											
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO
apatita	1	1,45				0,94	41,0		53,2				2,02
apatita	2	2,72					42,2		54,0				2,14
apatita	3	2,43					42,2		53,5			0,30	2,35
apatita	4	1,60					42,9		54,3				2,19
apatita	5	1,86					42,3		53,7				2,46
apatita	6	1,93					43,4		54,6				2,14
apatita	7	1,65	0,29				42,9		54,5				2,32
apatita	8	2,01					42,6		54,2				2,25
magnetita	9			5,59	0,78					1,27	0,97	90,8	
magnetita	10			5,56						2,33	0,80	92,5	
magnetita	11			3,73						1,37	0,61	94,5	
magnetita	12			4,01						2,50	1,49	89,2	
magnetita	13			4,15	0,38					1,70	1,10	95,4	
calcita	14			1,29					50,6				1,69
apatita	15	3,24					36,1		51,4			1,01	
ilm+Al-fosf (?)	16				3,02	0,86	2,61	0,19	0,52	9,17	0,47	47,7

Amostra FIT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)								
		F	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	SrO	BaO
apatita	1	1,52			40,9		54,2			
apatita	2	1,71			43,2		54,5		2,30	
apatita	3	1,91			41,9		53,4		2,13	
oxi-hidróx. Fe	4			1,76	0,78		0,21	86,5		
oxi-hidróx. Fe	5		0,93	3,04	1,58		0,34	77,9		
gorceix-goiazita	6		23,5	9,19	18,6	0,33	1,97	5,40	4,81	8,90

Amostra FIT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)														
		F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅	BaO	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	ThO ₂
apatita	1	1,03				41,8	54,0				1,82					
apatita	2	2,10				42,5	53,9				2,22					
apatita	3	2,17				34,7	50,4			0,80	1,56					
magnetita	4		0,38	3,04	0,92	2,96	0,60	0,67		72,8						
monazita	5					14,9	7,61			3,91			2,29	3,51	1,25	16,1
magnetita	6		1,63					4,07	0,93	93,4						
magnetita	7		5,14	0,40				1,57	0,97	93,5						
psilomelano	8			0,57		0,57	0,28		60,2	2,03			15,8			
goethita	9			3,08	0,60	3,12		0,78	0,39	77,4						
ilmenita	10		12,0					55,8	3,99	31,1		1,52				
psilomelano	11			0,49	0,36	8,10	1,69		38,1	5,01			20,3			
ilmenita	12			1,12	0,49	2,48	0,31	69,7	0,30	17,2		4,01

Amostra FST, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)								
		F	MgO	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅
apatita	1	1,54		40,9	53,2				1,91	
apatita	2	1,68		41,1	54,1				1,73	
apatita	3	1,67		42,6	54,1				2,28	
apatita	4	1,41		40,7	53,4				1,88	
perovskita	5				38,3	57,1		0,96	0,57	
magnetita	6					1,28	0,71	99,7		
magnetita	7		4,61			3,88	0,90	92,8		
apatita	8	1,55		43,4	54,2				2,01	
ilmenita	9		14,7			57,4	2,75	25,9		1,13
apatita	10	2,09		42,3	53,6				2,06	
ilmenita	11		3,62			54,1	3,20	43,4		
ilmenita	12		17,6			58,4	3,99	21,7		1,75

Amostra FST, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)													
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	Nd ₂ O ₃
perovskita	1		0,70					36,1	56,3		1,20	0,60		1,33	
perovskita	2		0,39					37,9	57,0		0,93	0,63		0,63	
ilmenita	3			17,7					58,2	4,19	20,6			1,52	
apatita	4	2,80					42,5	53,9				2,13			
zirk-zirconol	5							8,32	26,5		8,34		26,2		5,17
baddeleita	6												94,0		
apatita	7	1,62					42,4	53,8			1,14	1,97			
magnetita	8			0,50					2,23	0,75	95,7				
ilmenita	9			13,8					45,6	3,37	40,2				
magnetita	10			2,82					2,62	0,79	95,1				
oxi-hidróx. Fe	11			1,63	0,81	4,43	0,92	0,52	0,67		71,0				
apatita	12	2,99		0,35		1,13	36,4	52,3				1,38

Amostra FST, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)												
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅
apatita	1	1,64					42,8	54,8				2,13		
ilmenita	2			9,64					55,4	4,02	34,0			1,29
magnetita	3								1,88	0,87	95,4			
zirk-zirconol	4							12,2	18,6				67,4	
apatita	5	1,55					42,8	54,0				2,25		
quartzo	6					94,5								
calcita	7			1,00				53,8						
apatita	8	3,49					37,7	53,6						
filossilicato	9			29,1	6,16	40,5		2,52			12,6			
quartzo	10					97,2								
oxi-hidróx. Fe	11				1,72	4,00	1,83	0,46			74,4			
apatita	12	2,64	0,33				42,3	53,5				2,64		
quartzo	13					100								
magnetita	14			0,66					1,55	0,68	97,9			
quartzo	15					97,1					1,27			
perovskita	16							13,9	38,8		3,44		38,9	
apatita	17	1,82	0,40				43,1	53,8				2,29		
quartzo	18					100

Amostra FST, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)												
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅
apatita	1	1,58					42,0		54,4				1,80	
apatita	2						39,9		53,2				1,22	
apatita	3	1,79					41,8		54,2				1,87	
apatita	4	3,64					38,4		51,7					
apatita	5	2,83	1,22				35,1		47,3			4,70	1,90	
filossilicato	6			26,0	14,8	39,2			1,36	0,80		4,71		
ilmenita	7			5,51						53,9	2,73	41,7		
anatásio	8				4,29		6,22		1,97	71,4	0,31	6,43		
apatita	9	1,82					42,4		53,7				2,16	
quartzo	10					94,6								
oxi-hidróx. Fe	11			1,44		3,83		0,54		5,57		87,7		
ilmenita	12			10,7						37,8	2,66	51,5		
filossilicato	13			19,7	11,2	37,1			3,61	1,77		10,3		
apatita	14	1,89					42,9		54,2				2,35	
ilmenita	15			7,88						56,3	3,29	36,7		0,70

Amostra ZMT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)												
		F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂
zirconolita	1							12,3	18,6					67,7
apatita	2	1,47				41,9		54,1					1,67	
apatita	3	1,23				42,5		54,7					1,67	
zirconolita	4							12,9	15,4			0,87		67,2
apatita	5	1,35				43,3		55,0					1,93	
magnetita	6		3,37						3,23	5,18	2,34	87,9		
ilmenita	7		11,6						56,8		3,39	31,8		
apatita	8	1,59				42,6	0,00	54,9					1,69	
ilmenita	9			0,79	1,52	0,57			24,7		1,06	63,3

Amostra ZMT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)										
		F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅
apatita	1	1,51				43,1	54,9			0,20	2,19	
apatita	2	3,40				40,5	54,2			0,39	1,35	
apatita	3	1,57				42,7	55,0				1,80	
apatita	4	1,80				42,1	54,5				1,95	
magnetita	5		2,72					5,32	0,76	93,2		
magnetita	6		1,09					3,32	0,93	96,3	0,22	
ilmenita	7		8,31					56,5	4,04	35,9		1,12
magnetita	8		5,99					4,12	1,10	91,3		
magnetita	9		1,28					4,70	1,11	96,9		
magnetita	10		3,62					3,55	0,81	92,7		
dolomita	11		21,0				29,1		0,36	0,59	1,11	
dolomita	12		20,3				29,4			0,56	0,57	
dolomita	13		20,1				30,1			0,33	0,80	
filossilicato	14		23,6	11,2	40,7		2,62			4,53

Amostra ZMT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)												
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅
apatita	1	2,76					41,5	53,5				1,87		
apatita	2	1,65	0,31				41,9	52,7				2,08		
apatita	3	1,94					42,3	54,3				1,96		
apatita	4	1,81					41,5	53,9			0,51	1,74		
apatita	5	2,16	0,31				42,8	53,9				2,28		
apatita	6	1,41					41,9	53,9				1,84		
apatita	7	3,32			2,02		39,2	50,6			0,94	1,58		
apatita	8	2,04					42,8	54,3				2,12		
magnetita	9			1,09					4,88	1,07	94,2			
magnetita	10			1,00					2,43	0,61	97,0			
magnetita	11			1,87		0,36			6,78	1,37	92,9			
filossilicato	12			26,6	10,3	38,0		0,92	0,48		3,93			
filossilicato	13			23,4	9,22	39,9		4,14			5,51			
apatita	14	1,62					42,7	52,9				2,41		
ilmenita	15			15,3					57,4	3,76	24,3			0,76
apatita	16	0,87					42,1	54,3			0,51	2,10		
titanita c/ Fe (?)	17		0,37	1,46	0,60	24,9		31,0	16,8		20,1		4,43	
magnetita	18			1,21					1,28	0,47	96,4

Amostra PIT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)													
		F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	BaO	CeO ₂
apatita	1	1,37			1,01	41,9	54,9			2,25					
apatita	2	1,54				42,3	55,4			1,83					
apatita	3	1,51			4,56	41,2	53,0								
quartzo	4				94,3				0,87						
titanita	5				30,6		28,6	39,6	1,30		1,77				
ilmenita	6		14,9					58,7	2,08	27,5			1,14		
anatásio	7			6,58	0,34	4,06	0,21	80,6	0,74	1,46					
anatásio (?)	8			4,44		2,39		76,7		9,29					
anatásio	9			0,70	0,32	2,20	1,33	91,7		3,93					
perovskita	10						38,8	58,8	1,30	0,40		0,84			
magnetita	11		1,84		0,41			3,05	0,74	95,9					
ilmenita	12		11,9					58,2	4,28	31,8					
oxi-hidróx. Fe	13			1,38	6,51	1,67	0,67	0,87	1,61	73,0					
quartzo	14				99,2										
quartzo	15				99,2										
anatásio	16			3,14	0,32	4,04	0,48	78,4		9,34					
anatásio	17			6,28		5,18	0,62	78,9		2,51					
quartzo	18				95,1										
quartzo	19				97,9										
filossilicato	20		1,39	23,2	32,8	0,85	0,55	3,15		8,26					
filossilicato	21		3,13	6,03	47,3	0,57	1,30	0,50		24,3					
filossilicato	22		3,62	6,24	47,8	0,57	1,20	0,73		23,3					
Al-fosf.+oxi-hidróx. Fe	23			17,3		14,8	2,14			34,4	2,68		2,92	0,90	
quartzo	24				100,5					0,41					
ilmenita	25		0,68					53,4	1,96	51,9					
magnetita	26							7,43		95,2

Amostra PIT, fração -0,15+0,074 mm

mineral	EDS	Teores (%)											
		F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅
apatita	1	1,59				43,6		55,8				1,96	
apatita	2	1,61				43,1		56,0				2,41	
apatita	3	2,14				44,3		56,4				2,08	
apatita	4	2,33				45,1		56,5				2,87	
filossilicato	5		1,46	9,98	36,7	0,69		1,15	12,5		17,0		
quartzo	6				100								
filossilicato	7		5,34	3,99	29,3		0,70	1,19	12,3		18,1		
filossilicato	8		15,1	4,61	42,3		3,92	0,92		0,32	18,6		
agreg. silicatos + TiO	9				26,2				70,5		1,66		0,74
ilmenita	10		11,9						57,3	2,52	33,3		1,17
magnetita	11		0,93						6,75	1,23	93,9		
quartzo	12				99,2								
ilmenita	13			1,83	0,99	0,99			82,3		14,6		
filossilicato	14			14,0	8,50	8,56		1,13	3,58		18,8		
apatita	15	1,53				43,3		56,0				1,93	
oxi-hidróx. Fe	16			2,99	0,47	4,17		0,24	0,33		76,3		
quartzo	17				100								
quartzo	18				99,1								
anatásio	19			3,12		3,53		0,28	83,1		5,46		1,90
hidróx. Fe (?)	20			0,89	1,61	2,13		0,46	2,15	0,72	47,7		2,05
wavellita (?)	21			39,1		37,0

Amostra PIT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)												
		F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	BaO
anatásio	1			2,12	0,45	2,82	0,25	86,4		6,00			2,02	
apatita	2	1,97				43,0	55,8				1,88			
apatita	3	1,39				43,2	56,3				1,87			
ilmenita	4		4,46					55,8	6,59	40,6				
magnetita	5		0,63					2,10	0,43	97,6				
titanita	6				29,7		28,2	38,7		1,39		2,16		
quartzo	7				100									
apatita	8	1,66				43,8	56,8				1,96			
oxi-hidróx. Fe	9			3,44	0,54	4,29				77,9				
ilmenita	10		12,1					58,4	2,66	33,7			1,29	
quartzo	11				100									
quartzo	12				100									
gorceix-goiazita	13			33,0		32,9	2,03			5,36	7,80			17,1
quartzo	14				99,2									
anatásio (?)	15			1,08	0,51	3,14	0,50	76,0		11,3			8,64

Amostra PIT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)												
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅
apatita	1	1,20					42,5		53,8				2,40	
apatita	2	1,71					43,6		56,5				1,87	
magnetita	3			0,40		0,54				4,10	0,90	96,8		
titanita	4					31,4			28,6	40,7		4,34		
anatásio	5				5,46		5,25		0,76	77,8	0,66	3,93		
perovskita	6		0,36						40,5	60,4		0,96	0,64	0,33
magnetita	7									2,08		100,4		
perovskita	8		0,73		0,87		1,40		25,4	64,3		2,26		2,29
oxi-hidróx. Fe	9				6,50	0,69	2,73		0,29	0,88		67,7		
perovskita	10		0,55						36,5	56,5		2,60	0,66	
perovskita	11					0,66	1,77		13,3	74,2		3,69		1,29
quartzo	12					95,1								
apatita	13	1,99					44,6		56,1				2,41	
filossilicato	14			21,5	12,1	41,3		5,10	1,72	2,82		8,56

Amostra PXT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)															
		F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	BaO	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	PbO
apatita	1	1,53				42,8		54,8				1,96					
apatita	2	2,80				36,5		52,3				1,50					
oxi-hidróx. Fe	3		0,58		1,82	1,70		0,43	6,05	0,50	53,9						
ilmenita	4		0,56						53,0	2,76	48,1						
monazita	5					25,0		3,19				2,84	1,79	8,75	24,6	14,0	
óxid. MnFe (?)	6				0,58	1,47		1,06		10,6	11,9		1,04				3,81
filossilicato	7		22,5	10,7	37,7		3,94	1,19	2,43		10,9						
filossilicato	8		22,7	11,2	36,8			2,64	2,12		10,1						
filossilicato	9		22,2	10,3	34,3			1,27	1,75		7,31

Amostra PXT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)											
		F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅
apatita	1	1,50			0,96	40,8		54,4				2,09	
apatita	2	3,12				35,7		52,5					
calcita	3		0,36					55,2					
apatita	4	1,77				43,3		54,7				2,15	
apatita	5	2,24				43,1		54,0				2,20	
agreg. minerais	6		0,41	0,72	1,56	3,60		3,72	0,70	1,60	54,8		5,81
magnetita	7		4,73						2,82	1,34	95,0		
diopsídio	8		15,9	0,36	52,9			25,2	0,85		3,37		
diopsídio	9		15,4	0,25	52,0			24,9	0,97		4,11		
diopsídio	10		15,5		53,2			25,0	0,60		4,71		
ilmenita	11		9,04						55,6	3,68	34,4		0,96
filossilicato	12		17,2	10,9	34,2			2,73	2,07		9,74		
filossilicato	13		23,6	11,1	39,3		1,42	2,03	2,23		8,13		
filossilicato	14		20,0	0,74	34,5			2,80			18,8		
hidróx. Fe (?)	15		1,28	1,63	2,33	1,15		0,34	0,65	0,34	32,9

Amostra PXT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)													
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	Nb ₂ O ₅	CeO ₂	ThO ₂
apatita	1	1,96					42,5	53,8				2,20			
apatita	2	1,34					41,8	54,6				1,70			
apatita	3	1,48					43,1	55,1				1,95			
apatita	4	1,61					41,4	54,8				1,97			
apatita	5	2,01					42,4	54,3				1,94			
diopsídio	6		0,43	14,4	0,66	51,1		24,4	0,78		6,29				
calcita	7			0,32				52,8				1,32			
apatita	8	0,99				1,24	41,9	54,4				2,13			
diopsídio	9			15,6		52,4		25,2	0,68		3,89				
magnetita	10			3,18					4,40	1,32	92,7				
(??)	11		2,41			0,64		14,2	13,8		1,83		37,2	4,15	15,9
ilmenita	12			6,88					47,5	2,73	48,0				
magnetita	13			0,73					1,29		97,98				
ilmenita	14			1,54					52,8	2,38	47,0				
dolomita	15			19,5				28,8		0,43	0,93				
diopsídio	16		0,53	13,3	0,53	51,2		23,6	0,67		7,87

Amostra PXT, fração -0,15+0,074 mm

Mineral	EDS	Teores (%)															
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Nb ₂ O ₅	Nd ₂ O ₃	ThO ₂
apatita	1	1,51					42,1		54,8				1,97				
apatita	2	3,50					39,7		54,1				1,75				
apatita	3	3,25					36,7		53,7				1,35				
ilmenita	4			6,92						55,7	3,18	38,1					
perovskita	5		0,56						36,6	54,6		2,44	0,66		0,87		
diopsício	6			15,8		52,2			25,3	0,35		3,23					
diopsício	7			15,0	0,47	51,5			24,9	0,92		4,49					
filossilicato	8			23,4	10,9	36,6			0,70	1,75		6,50					
diopsício	9			14,6		52,6			25,0	0,67		5,49					
apatita	10	3,39					36,3		53,8				1,47				
filossilicato	11		5,82	19,8	0,49	57,5		3,93	4,64	0,80		8,23					
filossilicato	12			21,1	7,90	36,2		1,54	2,59	0,85		11,6					
filossilicato	13			29,1	11,4	41,6			1,03	1,53		4,94					
zirconolita	14								11,8	15,8		0,94		66,0			
baddeleíta	15													90,9			
zirkelita	16			0,73					10,4	22,8		7,91		29,3	16,0	3,55	1,16
magnetita	17			0,51						1,35	0,45	99,7					
ilmenita	18			3,81						52,8	5,66	41,9					

APÊNDICE E - Composições químicas das fases minerais adotadas no sistema MLA

Mineral	Peso específ.	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	H ₂ O	CO ₂	F	K ₂ O	MnO	Na ₂ O	Nb ₂ O ₅	CeO ₂	La ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	SO ₃	SrO	ThO ₂	ZrO ₂
apatita	3,20	41,6	53,8							0,51		2,21									1,90		
Al-fosfatos	3,30	24,0	2,00		26,0	10,0			22,5	12,0											3,50		
monazita	5,15	29,5																					
ETR-monazita	5,00	37,0	18,3															34,1	16,9	14,0			5,50
ThCa-monazita																		4,00		4,17			36,5
carbonatos																							
calcita	2,70	54,8					0,61				44,0										0,62		
dolomita	2,85	29,9				0,87	20,4				47,7			0,23							0,88		
perovskita	4,00		40,0			2,50		55,0								1,50					1,00		
anatásio	3,90	3,28			2,94	7,44		84,9								1,43							
ilmenita	4,50					36,3	8,24	52,2						3,23									
magnetita	5,15					93,9	3,30	2,84															
goethita	3,80	1,60		1,40	2,00	81,0				14,0													
psilomelano	4,55								31,0	3,18				65,8									
piroclore																							
piroclore	5,30	7,96								1,92		1,35			13,2	75,6							
Ba-piroclore	4,00	1,63						4,65	13,5	4,20						70,0					6,03		
Sr-piroclore	3,80									3,70						54,3					42,0		
Fe-columbita	6,30					21,3										78,7							
zirkelita-zirconolita																							
zirkelita	4,70	8,75						31,1															
zirconolita	4,80	12,5			1,40	5,92		33,0									17,2	4,29				6,90	31,8
quartzo	2,65			100,0													3,65	9,02					34,5
diopsídio	3,40	26,1	54,0			5,00	14,3	0,60															
titanita	3,50	28,6	30,7					40,7															
filossilicatos																							
mica	2,80	3,40	45,7	7,00	8,63	22,0	1,90			8,00			3,45										
filo-SiMgAlFe	2,70		40,5	10,6	12,0	21,7	1,20			14,0													
serpentina	3,00		56,0		25,0	11,0				8,00													
caulinita	2,60		46,6	39,5						14,0													
outros																							
barita	4,50								65,4												32,7	1,86	
zircão	4,70																						67,3
baddeleita	5,75			32,7																			100,0
pirotrita	4,60					37,67*														62,33*			

Nota: (*) expresso em elemento

APÊNDICE F - Composições químicas dosadas (FRX) *versus* calculadas (MLA)

Amostra APAT

Fração (mm)	FRX - Teores calculados a partir das separações minerais (%)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF
+0,21	32,5	44,5	2,25	0,49	10,4	0,73	0,71	1,15	3,81
-0,21+0,15	26,7	36,0	1,08	0,37	27,0	1,32	0,73	1,58	2,58
-0,15+0,074	26,4	35,2	1,09	0,44	27,6	1,39	0,79	1,60	2,04
-0,074+0,020	24,4	32,1	1,63	0,66	28,8	1,59	0,88	1,76	3,70
Total +0,020	26,4	35,2	1,35	0,50	26,3	1,38	0,80	1,60	2,85
Fração (mm)	MLA - Teores calculados (% - proporções e química mineral)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF*
+0,21	34,1	44,3	2,68	0,43	10,3	0,74	0,31	1,23	1,52
-0,21+0,15	27,5	36,8	1,61	0,48	25,6	1,07	0,38	1,56	1,50
-0,15+0,074	27,0	36,1	1,50	0,52	26,3	1,07	0,47	1,53	1,53
-0,074+0,020	24,3	30,9	1,74	0,80	29,0	1,14	1,44	1,85	2,16
Total +0,020	26,9	35,4	1,70	0,59	25,6	1,06	0,73	1,61	1,72

Nota: (*) = soma dos teores de CO₂ + H₂O

Amostra FIT

Fração (mm)	FRX - Teores calculados a partir das separações minerais (%)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF
+0,21	17,8	24,4	3,40	0,92	36,5	2,93	0,84	5,42	3,60
-0,21+0,15	17,8	23,6	2,08	0,91	41,7	2,80	0,94	4,72	2,02
-0,15+0,074	17,8	23,4	2,30	0,94	40,0	2,89	0,92	4,53	2,80
-0,074+0,020	15,7	19,8	3,85	1,66	40,8	3,27	1,02	4,80	4,35
Total +0,020	17,1	22,4	2,80	1,16	40,5	2,99	0,95	4,72	3,14
Fração (mm)	MLA - Teores calculados (% - proporções e química mineral)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF*
+0,21	18,4	27,5	4,64	1,22	35,4	2,57	0,39	5,48	2,15
-0,21+0,15	17,7	23,2	2,42	1,08	43,0	2,09	0,62	4,74	1,81
-0,15+0,074	17,9	20,8	2,06	0,78	45,5	2,20	0,42	4,51	1,35
-0,074+0,020	19,0	24,5	3,50	1,35	37,6	2,06	0,81	4,47	2,09
Total +0,020	18,2	23,0	2,77	1,07	41,7	2,15	0,59	4,62	1,75

Nota: (*) = soma dos teores de CO₂ + H₂O

Amostra FST

Fração (mm)	FRX - Teores calculados a partir das separações minerais (%)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF
+0,21	14,0	24,3	27,9	2,69	8,16	7,28	0,55	6,19	4,77
-0,21+0,15	18,0	27,8	16,9	1,23	18,8	3,97	0,63	6,14	3,76
-0,15+0,074	16,9	25,8	16,2	1,33	21,4	4,22	0,68	6,48	3,51
-0,074+0,020	13,4	20,7	19,7	1,99	23,3	5,35	0,75	6,91	4,60
Total +0,020	15,7	24,3	18,6	1,66	20,3	4,83	0,68	6,53	4,06

Fração (mm)	MLA - Teores calculados (% - proporções e química mineral)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF*
+0,21	14,7	24,1	30,0	2,95	7,88	7,24	0,10	5,89	4,93
-0,21+0,15	18,7	28,4	17,2	1,03	19,1	3,29	0,25	5,91	3,05
-0,15+0,074	18,7	27,5	16,5	1,21	19,8	3,57	0,30	6,17	3,09
-0,074+0,020	14,2	20,9	20,0	2,10	21,4	4,84	0,72	7,00	4,51
Total +0,020	16,7	25,1	19,1	1,64	19,1	4,28	0,42	6,37	3,74

Nota: (*) = soma dos teores de CO₂ + H₂O

Amostra ZMT

Fração (mm)	FRX - Teores calculados a partir das separações minerais (%)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF
+0,21	16,1	27,1	18,4	1,58	15,8	3,99	0,64	8,87	4,29
-0,21+0,15	19,3	29,1	10,1	1,28	22,5	2,94	0,74	7,31	4,72
-0,15+0,074	18,5	27,7	9,65	1,37	25,8	3,16	0,77	7,49	3,98
-0,074+0,020	15,5	23,0	12,5	1,95	25,6	3,85	0,83	7,91	6,14
Total +0,020	17,4	26,3	11,5	1,57	24,2	3,42	0,78	7,71	4,91

Fração (mm)	MLA - Teores calculados (% - proporções e química mineral)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF*
+0,21	18,1	29,3	19,6	1,38	12,7	3,96	0,14	8,53	3,58
-0,21+0,15	19,4	29,2	11,9	1,37	20,0	3,08	0,50	7,03	4,19
-0,15+0,074	18,8	27,9	10,6	1,33	22,8	3,02	0,62	7,09	4,04
-0,074+0,020	15,3	22,5	10,4	1,68	26,4	3,24	1,03	9,46	4,45
Total +0,020	17,6	26,4	11,5	1,47	22,6	3,19	0,70	8,02	4,18

Nota: (*) = soma dos teores de CO₂ + H₂O

Amostra PIT

Fração (mm)	FRX - Teores calculados a partir das separações minerais (%)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF
+0,21	13,7	19,7	29,8	1,58	17,4	1,48	0,74	11,3	2,52
-0,21+0,15	15,6	20,9	17,6	1,51	27,0	1,16	0,84	10,8	2,68
-0,15+0,074	16,2	21,4	15,3	1,76	27,5	1,32	0,83	10,5	2,51
-0,074+0,020	11,8	15,2	21,7	3,32	27,3	1,72	0,91	10,8	4,10
Total +0,020	14,2	18,9	19,6	2,25	26,3	1,45	0,85	10,8	3,12

Fração (mm)	MLA - Teores calculados (% - proporções e química mineral)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF*
+0,21	13,2	19,5	33,7	1,41	15,5	2,14	0,40	9,86	1,76
-0,21+0,15	14,1	19,1	21,5	2,46	24,0	1,96	0,77	10,5	2,28
-0,15+0,074	14,3	18,7	19,7	2,82	24,8	2,32	1,04	9,57	2,88
-0,074+0,020	10,3	13,1	18,8	2,85	29,1	2,53	1,56	12,5	3,39
Total +0,020	12,7	16,9	21,2	2,61	25,2	2,30	1,11	10,9	2,83

Nota: (*) = soma dos teores de CO₂ + H₂O

Amostra PXT

Fração (mm)	FRX - Teores calculados a partir das separações minerais (%)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF
+0,21	4,87	17,8	35,5	4,78	7,41	15,8	0,48	5,19	5,55
-0,21+0,15	11,9	25,8	22,3	2,08	14,9	9,13	0,59	5,78	5,46
-0,15+0,074	11,5	24,0	21,0	2,09	17,0	9,16	0,62	6,26	5,29
-0,074+0,020	8,90	19,1	23,6	2,46	19,0	11,2	0,61	5,98	7,23
Total +0,020	10,1	22,0	23,4	2,44	16,5	10,4	0,60	5,96	6,09

Fração (mm)	MLA - Teores calculados (% - proporções e química mineral)								
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF*
+0,21	6,07	17,5	35,8	4,86	8,74	14,1	0,00	4,96	7,04
-0,21+0,15	13,2	26,7	22,2	2,08	14,1	7,87	0,06	6,24	5,42
-0,15+0,074	12,2	24,1	21,0	2,44	16,9	8,12	0,14	6,77	6,04
-0,074+0,020	11,2	22,3	19,6	2,43	18,4	7,73	0,33	8,68	6,27
Total +0,020	11,5	23,5	21,9	2,55	16,2	8,38	0,18	7,24	6,07

Nota: (*) = soma dos teores de CO₂ + H₂O

ANEXO A - Coluna estratigráfica da região do Alto Paranaíba

Idade	Grupos	Formação	Membro/Fácies	Litologia
Quaternário			Aluvial	
Terciário				solo laterítico
Cretáceo Superior		Bauru	F. Bauru prop. dita	arenitos argilosos
			F. Ponte Alta	arenitos calcíferos e calcários conglomeráticos
			F. Uberaba	tufitos, argilitos e conglomerados
Cretáceo		Aerado	M. Três Barras	arenitos
			M. Quiricó	siltitos, argilitos e arenitos finos
			M. Abaeté	conglomerado
Cretáceo Inferior	São Bento	Botucatu		arenitos
		Serra Geral		basaltos
Pré Cambriano	Bambuí	Três Marias		arcóseos, siltitos e arenitos arcoseanos
		Paraopeba		calcários, ardósias e siltitos
		Paranoá		quartzitos e filitos
Pré Cambriano		Ibiá		calcixistos
Pré Cambriano	Canastra			quartzitos e filitos
Pré Cambriano	Araxá			micaxistos e quartzitos
Pré Cambriano	Complexo Granito Gnáissico			granodioritos, granitos e gnaisses

(Barbosa et al., 1970)

ANEXO B - Composição das amostras estudadas

Tipo de minério	Furos	Intervalo (m)
Apatitito (APAT)	FF7	21 a 45
	FF10	18 a 45
Foscorito intemperizado (FIT)	FF3	15 a 38
	FF7	0 a 21
	FF10	0 a 18
	FF9	21 a 50
	FF2	18 a 41
	FF13	27 a 45
Foscorito silicificado (FST)	FF14	6 a 50
Zona de mistura (ZMT)	FF8	15 a 42
Piroxenito intemperizado (PIT)	FF11	6 a 12
	FF5	12 a 18
	FF12	12 a 33
	FF4	0 a 36
	FF6	3 a 12
Piroxenito (PXT)	FF11	12 a 30
	FF5	18 a 36
	FF12	33 a 51
	FF4	36 a 50
	FF6	18 a 33
	FF8	42 a 50
	FF7	45 a 50