

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E
TECNOLÓGICA DE MINÉRIO DE FOSFATO DE
CATALÃO I (GO) - ÁREA DA LAGOA SECA**

Alessandra Miranda Crespi

Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2003/02)

SÃO PAULO
2003

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências



**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E
TECNOLÓGICA DE MINÉRIO DE FOSFATO DE
CATALÃO I (GO) – ÁREA DA LAGOA SECA**

Alessandra Miranda Crespi

Orientador: Prof. Dr. Henrique Kahn

TF-2003 / 02 – Trabalho de Formatura

São Paulo

2003

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900014561



CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TECNOLÓGICA DE MINÉRIO DE FOSFATO DE CATALÃO I (GO) – ÁREA DA LAGOA SECA

ALESSANDRA MIRANDA CRESPI

Monografia de Trabalho de Formatura

Banca Examinadora

Prof. Dr. Henrique Kahn

Profa. Dra. Lilia Mascarenhas Sant'Agostinho

Prof. Dr. Maria Cristina Motta de Toledo

São Paulo

2003

TF
C921
AM.C

DOAÇÃO	Seção
Graduação - IGr	
Data:	06/05/2004

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos parentes aqui e longe e aos meus pais, Sr. João e Dona Fideia, por serem um exemplo e motivo de orgulho e por serem um apoio especial e muito mais, e também a todos os que me incentivaram a ser geólogo, mesmo não sabendo muito de que se tratava a profissão.

Agradeço também ao amigo, geólogo, Sr. João e Cláudia por todo incentivo e colaboração durante estes anos de graduação.

Ao Prof. Dr. Henrique Reis, que me ensinou várias coisas sobre esta bela ciência e minha orientação, com toda sua paciência, sempre quando a coisa já estava acabando.

A todos alunos do 1º Ano, mais uma vez, um agradecimento especial ao João, por sempre me dar uma ajuda e por sempre me animar.

A empresa Unifert Petróleos S.A. pelo fornecimento dos materiais de graduação e pelas análises dos materiais coletados.

A todos que estão aqui no Colégio que me incentivaram e me ajudaram pelo estudo das geologia e petrologia, e que me ajudaram muito durante estes anos de estudo.

Um agradecimento especial ao meu amigo Fernando por toda a paciência e compreensão e por ser um dos meus melhores incentivadores.

Aos meus pais, pelo grande incentivo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus e aos meus pais, Sr. Luis e Dona Fidelina, por tornarem possível a realização desse sonho. Um agradecimento especial a minha mãe, a primeira a acreditar e me incentivar a ser geóloga, mesmo não sabendo direito do que se tratava a profissão.

Agradeço também as minhas queridas irmãs Kátia e Cláudia por todo incentivo e colaboração durante esses cinco anos de graduação.

Ao Prof. Dr. Henrique Kahn que me dedicou várias horas dos seus dias na minha orientação, com toda sua paciência, mesmo quando a minha já estava acabando.

A equipe técnica do LCT-POLI Minas, pelos auxílios; um agradecimento especial ao Juscelino que sempre me deu toda atenção na preparação das amostras.

A empresa Utrafétil Fertilizantes S.A. pelo fornecimento dos testemunhos de sondagens e dados analíticos das amostras estudados.

A minha querida amiga Ana Gabriela que me transmitiu seu entusiasmo pelo estudo das apatitas e carbonatitos, o que me trouxe grande interesse pelo tema do projeto.

Um agradecimento especial ao meu querido Fernando por toda a paciência e compreensão, e por ser uns dos meus maiores incentivadores.

SUMÁRIO

	página
1 IDENTIFICAÇÃO.....	1
2 INTRODUÇÃO.....	2
3 OBJETIVOS E METAS.....	3
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4.1 GEOLOGIA.....	4
4.1.1 <i>Os depósitos de fosfato</i>	<i>4</i>
4.1.2 <i>O complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I.....</i>	<i>5</i>
4.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TECNOLÓGICA DE MATÉRIAS PRIMAS MINERAIS	7
4.2.1 <i>Amostragem para estudos de caracterização</i>	<i>7</i>
4.2.2 <i>Metodologias para caracterização tecnológica.....</i>	<i>7</i>
4.2.3 <i>Parâmetros da matéria prima mineral</i>	<i>8</i>
4.2.4 <i>Procedimentos de laboratório</i>	<i>9</i>
4.2.5 <i>Influência das características do minério no processo de beneficiamento de fosfato... 14</i>	<i>14</i>
4.3 MINERALOGIA DAS APATITAS	15
4.3.1 <i>Apatita.....</i>	<i>15</i>
4.3.2 <i>As apatitas de Catalão I.....</i>	<i>17</i>
5 METODOLOGIA	19
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	19
5.1.1 <i>Área objeto de estudo.....</i>	<i>19</i>
5.1.2 <i>Critérios de composição de amostras para os estudos.....</i>	<i>20</i>
5.1.3 <i>Estudos de caracterização</i>	<i>23</i>
6 CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES REALIZADAS.....	27
7 RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÕES PRELIMINARES.....	28
7.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	28
7.2 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	29
7.3 SEPARAÇÕES MINERAIS	42
7.3.1 <i>Amostra 1</i>	<i>42</i>
7.3.2 <i>Amostra 2.....</i>	<i>44</i>
7.3.3 <i>Amostra 3.....</i>	<i>46</i>
7.3.4 <i>Amostra 4.....</i>	<i>48</i>
7.4 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA E CARACTERÍSTICAS DA APATITA	51
7.4.1 <i>Comportamento dos minerais nos ensaios de separações minerais.....</i>	<i>51</i>
7.4.2 <i>Composição mineralógica das amostras estudadas</i>	<i>51</i>
7.4.3 <i>Características da apatita ao microscópio óptico</i>	<i>54</i>
7.4.4 <i>Características da apatita ao MEV</i>	<i>55</i>
7.4.5 <i>Variedades de apatitas.....</i>	<i>55</i>
8 CONCLUSÕES.....	58
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXO 1 – DIFRAÇÕES DE RAIOS X.....	62

ANEXO 2 - FOTOMICROGRAFIAS AO MICROSCÓPIO ÓPTICO66

**ANEXO 3 - FOTOMICROGRAFIAS AO MEV EM IMAGENS DE ELÉTRONS
RETROESPALHADOS (BSE) E CATHODO (CL) E ELÉTRONS SECUNDÁRIOS (SE).....69**

Tabela 1 - Paleta de cores da malha para mineral (Segundo Sant'Agostino & Kohn, 1997)	6
Tabela 2 - Etapas de construção e suas linhas aproximadas de graduação de alimentação	11
Tabela 3 - Principais métodos de separações minerais	12
Tabela 4 - Técnicas de mineralogia determinativa usual e estudos de caracterização mineral	13
Tabela 5 - Intervalos considerados na composição de amostras	20
Tabela 6 - Composição química das amostras estudadas	23
Tabela 7 - Distribuição de teor por fração - Amostra 1 (Tal qual)	24
Tabela 8 - Distribuição de teor por fração no produto da moagem - Amostra 1	25
Tabela 9 - Distribuição de teor por fração da composição dos frs naturais com o produto da moagem - Amostra 1	32
Tabela 10 - Distribuição de teor por fração - Amostra 2 (Tal qual)	33
Tabela 11 - Distribuição de teor por fração no produto da moagem - Amostra 2	34
Tabela 12 - Distribuição de teor por fração da composição dos frs naturais com o produto da moagem - Amostra 2	35
Tabela 13 - Distribuição de teor por fração - Amostra 3 (Tal qual)	36
Tabela 14 - Distribuição de teor por fração no produto da moagem - Amostra 3	42
Tabela 15 - Distribuição de teor por fração da composição dos frs naturais com o produto da moagem - Amostra 3	43
Tabela 16 - Distribuição de teor por fração - Amostra 4 (Tal qual)	39
Tabela 17 - Distribuição de teor por fração no produto da moagem - Amostra 4	40
Tabela 18 - Distribuição de teor por fração no produto da moagem - Amostra 4	41
Tabela 19 - Resultados dos estudos de separações minerais - Amostra 1, composição dos frs naturais com o produto da moagem	42
Tabela 20 - Resultados dos estudos de separações minerais - Amostra 2, composição dos frs naturais com o produto da moagem	43
Tabela 21 - Resultados dos estudos de separações minerais - Amostra 3, composição dos frs naturais com o produto da moagem	47
Tabela 22 - Resultados dos estudos de separações minerais - Amostra 4, composição dos frs naturais com o produto da moagem	48
Tabela 23 - Estimativa da composição mineralógica - Amostra 1	51
Tabela 24 - Estimativa da composição mineralógica - Amostra 2	52
Tabela 25 - Estimativa da composição mineralógica - Amostra 3	53

ÍNDICE DE TABELAS

página

Tabela 1 - Parâmetros da matéria prima mineral (Segundo Sant'Agostino & Kahn (1997)	9
Tabela 2 - Etapas de cominuição e seus limites aproximados de granulação de alimentação	11
Tabela 3 - Principais métodos de separações minerais	12
Tabela 4 - Técnicas de mineralogia determinativa usuais e estudos de caracterização de minérios	13
Tabela 5 - Intervalos considerados na composição de amostras	23
Tabela 6 - Composição química das amostras estudadas	28
Tabela 7 - Distribuição de teores por fração – Amostra 1 (Tal qual).	30
Tabela 8 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 1	31
Tabela 9 - Distribuição de teores por fração da composição dos finos naturais com o produto da moagem – Amostra 1	32
Tabela 10 - Distribuição de teores por fração – Amostra 2 (Tal qual).	33
Tabela 11 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 2	34
Tabela 12 – Distribuição de teores por fração da composição dos finos naturais com o produto da moagem – Amostra 2	35
Tabela 13 - Distribuição de teores por fração – Amostra 3 (Tal qual).	36
Tabela 14 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 3	37
Tabela 15 - Distribuição de teores por fração da composição dos finos naturais com o produto da moagem – Amostra 3	38
Tabela 16 - Distribuição de teores por fração – Amostra 4 (Tal qual).	39
Tabela 17 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 4	40
Tabela 18 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 4	41
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de separações minerais - Amostra 1, composição dos finos naturais com o produto de moagem.....	43
Tabela 20 - Resultados dos ensaios de separações minerais - Amostra 2, composição dos finos naturais com o produto de moagem.....	45
Tabela 21 - Resultados dos ensaios de separações minerais - Amostra 3, composição dos finos naturais com o produto de moagem.....	47
Tabela 22 - Resultados dos ensaios de separações minerais - Amostra 4, composição dos finos naturais com o produto de moagem.....	49
Tabela 23 – Estimativa da composição mineralógica – Amostra 1	51
Tabela 24 - Estimativa da composição mineralógica – Amostra 2	52
Tabela 25 - Estimativa da composição mineralógica – Amostra 3	53

Tabela 26 – Estimativa da composição mineralógica – Amostra 4	53
Tabela 27 – Impregnação de apatita por películas superficiais - % apatita não flotável	54
Tabela 28 - Análises semiquantitativas das variedades de apatitas por EDS (normalizadas a 100%).....	56
Tabela 29 - Sumário dos resultados dos estudos de caracterização	59

Figura 2 - Esboço geológico parcial do complexo antracítico de Catalão I (Petroli, 1990)	6
Figura 3 - Fluxograma das principais etapas experimentais em caracterização de minerais sedimentares de São Agostinho & Koller (1997)	10
Figura 4 - Vista aérea do complexo de Catalão I mostrando as áreas objeto de estudo para P (Petrópolis & Capelinha) e NB (Mineração Catalão) e a do presente estudo - Lagoa Seca	19
Figura 5 - Imagem de satélite do complexo de Catalão I mostrando a área objeto do presente estudo (Lagoa Seca)	20
Figura 6 - Localização de furos de sondagem na área da Lagoa Seca	20
Figura 7 - Correlação de níveis CaO e P_2O_5 para intervalos de testemunhas de sondagem da área da Lagoa Seca	21
Figura 8 - Diagrama ternários entre os níveis de Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 e SiO_2	22
Figura 9 - Diagrama ternários entre os níveis de MgO , Al_2O_3 , SiO_2 e Na_2O	22
Figura 10 - Fluxograma do procedimento experimental empregado nos estudos de caracterização	24
Figura 11 - Gráficos de distribuição acumulada para as amostras estudadas (% em massa)	28
Figura 12 - Distribuição granulométrica dos produtos de fratura	30
Figura 13 - Comparação entre diagramas dos produtos de fratura obtidos nas separações minerais	32
Figura 14 - Comparação entre diagramas dos produtos de fratura registrados com o câmbio nas separações minerais	33
Figura 15 - Comparação entre diagramas dos produtos de fratura registrados com o Fratura 0.3A obtidos nas separações minerais	34
Figura 16 - Comparação entre diagramas dos produtos de fratura das magnéticas obtidas nos níveis NB e P	35

ÍNDICE DE FIGURAS

página

Figura 1 - Mapa de localização do complexo de Catalão I	5
Figura 2 - Esboço geológico parcial do complexo alcalino carbonatítico de Catalão I (Ribeiro, inédito)	6
Figura 3 - Fluxograma dos procedimentos experimentais em caracterização de minérios (adaptado de Sant'Agostino & Kahn; 1997)	10
Figura 4 – Vista aérea do complexo de Catalão I ilustrando as áreas objeto de lavra para P (Ultrafertil e Copebras) e Nb (Mineração Catalão) e a do presente estudo - Lagoa Seca.....	19
Figura 5 - Imagem de satélite do complexo de Catalão I ilustrando a área objeto do presente estudo (Lagoa Seca)	20
Figura 6 Localização de furos de sondagem na área da Lagoa Seca.....	20
Figura 7 - Correlação de teores $\text{CaO} \times \text{P}_2\text{O}_5$ para intervalos de testemunhos de sondagem da área da Lagoa Seca.....	21
Figura 8 - Diagramas triangulares entre os teores de Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 e SiO_2	22
Figura 9 - Diagramas triangulares entre os teores de MgO , Al_2O_3 , SiO_2 e BaO	22
Figura 10 - Esquema de procedimento experimental empregado nos estudos de caracterização	24
Figura 11 - Gráficos de distribuição acumulada para as amostras estudadas (% em massa)	29
Figura 12 - Distribuição granulométrica dos produtos de moagem	30
Figura 13 – Comparação entre difratogramas dos produtos flutuados obtidos nas separações minerais.....	62
Figura 14 - Comparação entre difratogramas dos produtos afundados magnéticos -0,0A obtidos nas separações minerais	63
Figura 15 - Comparação entre difratogramas dos produtos afundados magnéticos – Frantz 0,3A obtidos nas separações minerais.....	64
Figura 16 - Comparação entre difratogramas dos produtos afundados não magnéticos obtidos nas separações minerais	65

ÍNDICE DE FOTOMICROGRAFIAS

página

Foto 1 - Amostra: 1, fração -0,21+ 0,15 mm.....	66
Foto 2 - Amostra: 1, -0,21+ 0,15 mm.....	66
Foto 3 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.....	66
Foto 4 - Amostra: 2, -0,21+ 0,15 mm.....	66
Foto 5 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.....	67
Foto 6 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.....	67
Foto 7 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.....	67
Foto 8 - Amostra: 3, -0,21+ 0,15 mm.....	67
Foto 9 - Amostra: 4, -0,30+0,21mm.....	68
Foto 10 - Amostra: 4, -0,21+ 0,15 mm.....	68
Foto 11 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.....	68
Foto 12 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.....	68
Foto 13 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.....	69
Foto 14 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.....	69
Foto 15 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.....	69
Foto 16 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.....	69
Foto 17 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.....	69
Foto 18 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.....	69
Foto 19 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.....	70
Foto 20 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.....	70
Foto 21 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.....	70
Foto 22 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.....	70
Foto 23 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.....	70
Foto 24 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.....	70
Foto 25 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.....	71
Foto 26 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.....	71

Foto 27 - Amostra: 4, -0,30+0,21mm.....	71
Foto 28 - Amostra: 4, -0,30+0,21mm.....	71
Foto 29 - Amostra: 4, -0,30+0,21mm.....	71
Foto 30 - Amostra: 4, -0,30+0,21mm.....	71
Foto 31 - Amostra: 1, Afundado Não Magnético,.....	72
Foto 32 - Amostra: 2, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.	72
Foto 33 - Amostra: 2, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.	72
Foto 34 - Amostra: 3, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.	72
Foto 35 - Amostra: 3, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.	72
Foto 36 - Amostra: 4, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.	72

RESUMO

Este trabalho aborda os conceitos e metodologias empregadas na caracterização mineralógica e tecnológica de minério de fosfato, proveniente de testemunhos de sondagens da porção central do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I, (GO), em área de interesse da indústria Ultrafertil.

Neste trabalho foram estudadas quatro amostras do minério, submetidas a etapas de cominuição seguidas de separações minerais e análises químicas e mineralógicas dos produtos obtidos.

Mineralogicamente as quatro amostras são muito semelhantes; os principais constituintes são apatita, quartzo, oxi-hidróxidos de ferro (hematita, magnetita e goethita), filossilicatos e ilmenita; como minerais acessórios e traços foram observados alumino-fosfatos secundários (gorceixita e/ou goyazita) e anatásio. Salienta-se, ainda, a presença de dolomita nas amostras 2 e 4 e, secundariamente, barita e monazita nas amostras 1 e 2; alumino-fosfatos são pouco expressivos. A parcela de fósforo relativa a apatita representa de 91 a 97% do total contido de fósforo para o material retido em 0,037 mm. As proporções em massa da apatita estão por volta de 12 a 33%, sendo que a sua liberação se dá entre de 0,21 a 0,30 mm. Apresenta superfície límpida a pouco impregnada, sendo comum serem observadas com sulcos de dissolução; ao MEV foram verificadas variações composicionais. Estima-se que a parcela de apatita impregnada, que não responde satisfatoriamente ao processo de flotação, corresponda de 5 a 12% nas amostras estudadas.

ABSTRACT

This work presents the applied mineralogy concepts and methodologies focusing the study of the phosphate ore from Catalao I alkaline-carbonatite complex (GO), in area of interest of the Ultrafertil company.

Four samples composed from drill holes in the central area of the complex had been studied. They were submitted to comminution followed by mineral separations and chemical and mineralogical analyses of the attained products.

The samples are very similar in terms of mineralogical composition; major constituents are apatite, quartz, iron oxi-hydroxides (hematite, magnetite and goethite), phyllosilicates and ilmenite; secondary aluminum-phosphates (gorceixite and/or goyazite) and anatase are found as accessories and traces minerals. In addition, dolomite is present in samples N. 2 and 4; barite and minor amounts of monazite are also in samples 1 and 2. Apatite contents are between 12 a 33% in weight, and carries 91 to 97% of the total phosphorus content for the fraction size above 0.30 mm; under SEM-EDS it was characterized at least four distinct apatite species. A proper liberation for mineral concentration is estimated for material ground to minus 0.30 – 0.21 mm; their surface are predominantly clear or with lower coating intensity by iron oxi-hydroxides; dissolution rims are relatively common. The amount of apatite with high coating intensity that not responds satisfactorily to the flotation process are estimated in 5 to 12% of the total content of the fraction size above 0.30 mm.

1 IDENTIFICAÇÃO

INSTITUTO DE ORIGEM	Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo
Nº / Título	02 / CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TECNOLÓGICA DE MINÉRIO DE FOSFATO DE CATALÃO I (GO) – ÁREA DA LAGOA SECA
Autor	Alessandra Miranda Crespi
Orientador	Prof. Dr. Henrique Kahn (EPUSP – PMI)
Local e ano de conclusão	São Paulo, 2003

2 INTRODUÇÃO

Este projeto trata da temática de caracterização mineralógica e tecnológica de matérias primas minerais, propondo-se ao estudo de amostras provenientes de testemunhos de sondagens do depósito de fosfato de Catalão I, GO, em área de interesse da indústria Ultrafertil Fertilizantes Fosfatados S.A..

A caracterização mineralógica e tecnológica é ferramenta essencial para se obter o conhecimento das propriedades da matéria prima mineral de forma a otimizar o seu aproveitamento econômico.

A empresa proprietária da área em questão pretende ampliar a área de exploração de fosfato, ampliando a cava da mina dentro de sua área de concessão. Neste contexto, as atividades de lavra nos próximos anos deverão ser estendidas para uma região hoje denominada de Lagoa Seca, situada na porção central do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I.

O minério estudado refere-se a uma mineralização secundária de fosfato apresentando mineralogia complexa. A caracterização mineralógica e tecnológica tratará do conhecimento das propriedades do minério visando fornecer subsídios para fins de seu beneficiamento.

A metodologia empregada compreende uma série de ensaios e análises laboratoriais, segundo uma seqüência de procedimentos e critérios planejados fundamentalmente em função do bem mineral em estudo.

Todas as atividades práticas e ensaios de laboratório foram efetuados no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

3 OBJETIVOS E METAS

Este trabalho tem por objetivo a caracterização tecnológica e mineralógica de distintas amostras de minério de fosfato, provenientes do complexo de Catalão I, área de concessão da empresa Ultrafertil Fertilizantes Fosfatados S.A., mais especificamente na região denominada de Lagoa Seca.

Serão detalhadas características mineralógicas e das variedades de apatitas presentes em quatro amostras de minério visando definir os aspectos mais relevantes para fins de processamento mineral, tais como:

- composição mineralógica qualitativa e quantitativa;
- avaliação da forma de ocorrência e associações da apatita;
- determinação do grau de liberação e impregnação superficial da apatita;
- partição (distribuição) do fósforo entre os minerais portadores deste elemento;
- estabelecimento de estimativas de recuperação no processo de beneficiamento.

Adicionalmente, este estudo tem por finalidade a familiarização da formanda com os conceitos e metodologias empregadas em estudos de caracterização tecnológica de matérias primas minerais.

Ao final do trabalho, com todos os procedimentos de caracterização realizados, espera-se que tenham sido cumpridas as seguintes metas:

- a caracterização tecnológica e mineralógica do minério da área denominada Lagoa Seca do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I .
- aprendizado por parte da aluna da prática utilizada em estudos de caracterização tecnológica de matérias primas minerais.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 GEOLOGIA

4.1.1 *Os depósitos de fosfato*

Os depósitos podem ser de origem magmática (complexos alcalinos-carbonatíticos; exemplos: Rússia, Uganda, Brasil e África do Sul), sedimentar (fosforitos marinhos: exemplos: norte da África e EUA) ou de acumulação orgânica (guano: exemplo: norte e nordeste do Brasil).

Sob a ação de intemperismo esses depósitos podem sofrer um enriquecimento supergeno significativo, formando depósitos de acumulação laterítica, com exemplos principalmente no Brasil, África e Austrália (Toledo, 2001).

Em termos globais, os depósitos ígneos e sedimentares, são os mais abundantes. De acordo com Albuquerque (1996), a grande maioria do fosfato lavrado mundialmente, provém de depósitos fosfáticos marinhos (fosforitos). No Brasil os complexos alcalino-carbonatíticos constituem os maiores depósitos, sendo responsáveis pela quase totalidade do concentrado fosfático produzido.

Atualmente, encontram-se em operação no Brasil cinco minas, sendo quatro em manto de intemperismo derivados de rochas alcalinas e uma em rocha sã. Três outros depósitos de origem sedimentar são ainda hoje objeto de lavra, porém com produção pouco expressiva frente àqueles relacionados aos complexos alcalinos.

Os depósitos relacionados a complexos alcalino-carbonatíticos apresentam uma variabilidade constitucional acentuada, normalmente relacionada a fatores de ordem mineralógica ou textural. Essa variabilidade reflete a diversidade dos tipos litológicos, freqüentemente originados em episódios geológicos diferentes, verificando-se uma complexidade adicional causada por processos posteriores: hidrotermais tardios ou de intemperismo superficial (Born e Kahn, 1990).

Os depósitos de fosfato de origem ígnea apresentam ainda variações laterais, que são principalmente ocasionadas pela própria complexidade na distribuição das rochas primárias. Essa complexidade é refletida no manto de intemperismo, que também apresenta um zoneamento vertical, cujo desenvolvido depende da maior ou menor intensidade dos processos que atuaram na formação e evolução do manto de alteração (Born e Kahn, 1990).

4.1.2 O complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I

4.1.2.1 Localização e aspectos fisiográficos

O complexo ultramáfico alcalino-carbonático de Catalão I localiza-se no sudeste do Estado de Goiás a cerca de 15 km a nordeste da cidade de Catalão, 280 km ao sul de Brasília e 720 km de São Paulo. Situa-se nas coordenadas geográficas 18°08' de latitude Sul e 47°48' de longitude oeste. (Tassinari, 2001). A Figura 1 apresenta o mapa de localização do complexo de Catalão I.

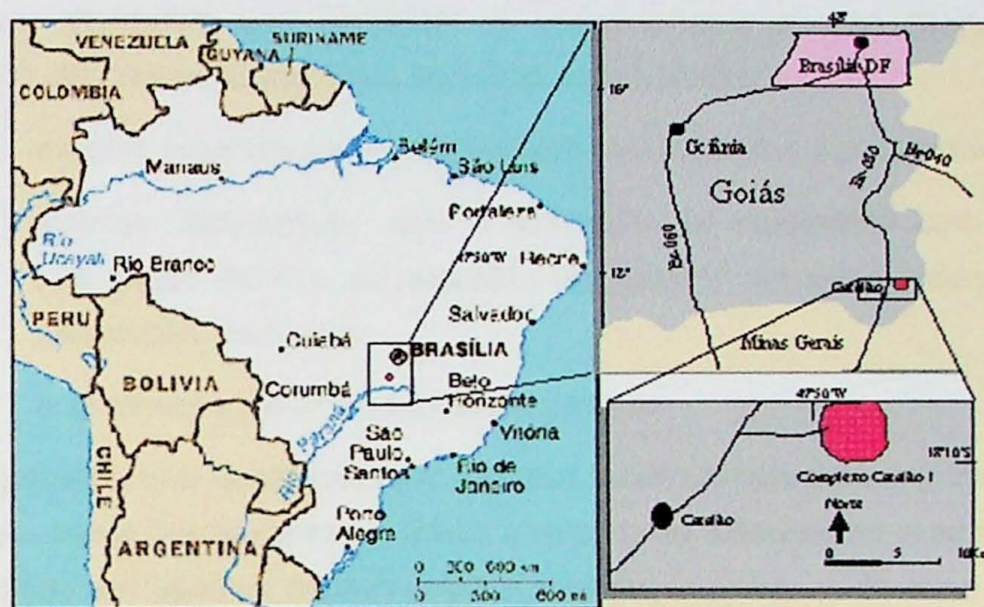


Figura 1 - Mapa de localização do complexo de Catalão I

Fonte: Tassinari (2001)

O maciço alcalino de Catalão I apresenta forma elíptica, com eixos NS de 6 km e EW de 5,5 km; topograficamente destaca-se como um platô, com altitude média de 900 m, que se eleva cerca de 100 m em relação aos terrenos circundantes. É sustentado por rochas quartzíticas encaixantes fenitizadas quando da intrusão do maciço (Toledo, 1999). A parte interna da elevação apresenta relevo suave e condições geomorfológicas favoráveis ao aprofundamento dos perfis de alteração, que chegam atingir mais de 200m (Carvalho, 1974).

4.1.2.2 Aspectos geológicos

O complexo ultramáfico-alcalino-carbonático de Catalão apresenta idade cretácea superior (calculada em flogopitas por Imbernon, 1993, em $91,8 \pm 3,3$ Ma), sendo constituído por rochas ultramáficas, carbonáticas, pertencentes à província alcalino-carbonática do Alto Paraíba.

O complexo é intrusivo em metamorfitos de idade pré-cambriana, fenitizados ao longo do contato com o complexo alcalino. Este é composto por um núcleo de rochas ígneas

de natureza silico-carbonática, representado por rochas ultramáficas, principalmente glimeritos e foscoritos (Carvalho, 1974b), com peridotitos e piroxenitos serpentizados, cortados por veios e intrusões irregulares de carbonatitos (sovitos).

As rochas deste complexo passaram por quatro processos de transformação: flogopitização, carbonatização, serpentização e silicificação identificados por Carvalho (1974b) e confirmados por Lapido-Loureiro (1995).

Complexo Alcalino de Catalão I enquadra-se no tipo geométrico de complexos carbonatíticos anelares, resultantes de cinco estágios de intrusões magmáticas carbonatíticas, alternados com processo de metamorfismo alcalino (Carvalho, 1974b). Pereira (1995), descreveu as seguintes seqüências de eventos:

- eventos magmáticos, com a formação de foscoritos e piroxenitos;
- eventos hidrotermais, com a formação de magnetito com pirocloro, de carbonatito sovítico, de apatitito, de "silexito" em veios, veios de barita, de carbonatito beforsítico
- e, finalmente, os processos supergênicos.

O intemperismo que desenvolveu o espesso manto proporcionou a concentração de fosfato, nióbio, elementos terras raras, titânio e vermiculita. Localmente, a apatita residual se altera resultando em apatitas neoformadas e fosfatos aluminosos da série da crandalita, podendo estar enriquecidos em ETR.

A Figura 2 mostra a distribuição das principais litologias obtidas a partir de informações de furos de sondagens (Ribeiro, inédito).

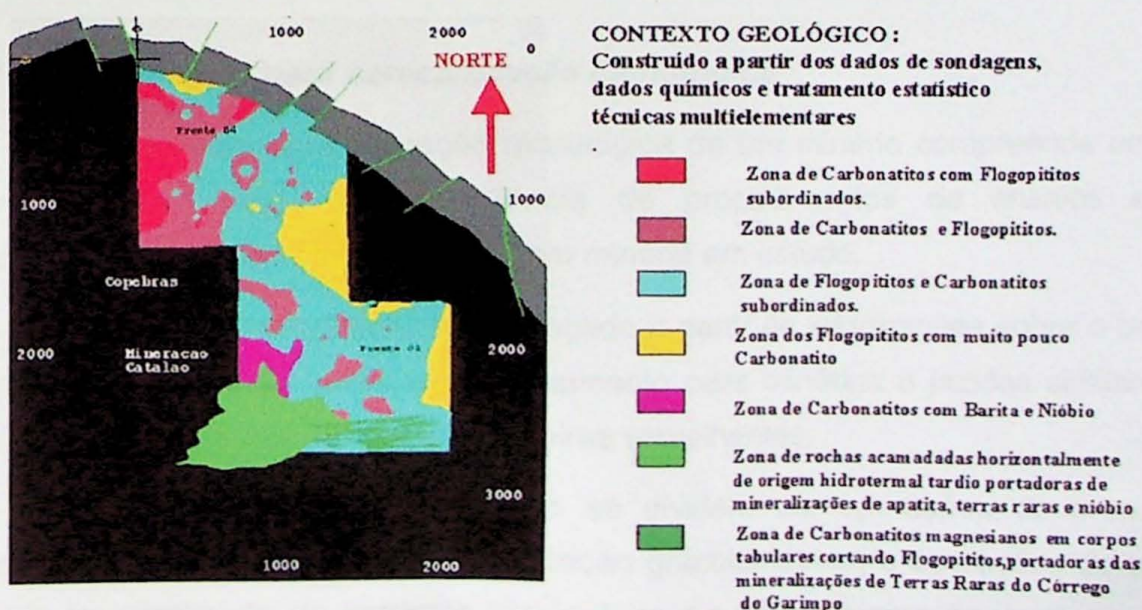


Figura 2 - Esboço geológico parcial do complexo alcalino carbonatítico de Catalão I (Ribeiro, inédito)

4.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TECNOLÓGICA DE MATÉRIAS PRIMAS MINERAIS

Segundo Sant'Agostino e Kahn (1997), o termo caracterização tecnológica de matérias primas minerais tem sido aplicado no Brasil para denominar o estudo das características de matérias primas minerais para fins de seu beneficiamento ou emprego final. Internacionalmente é conhecida como "ore-dressing mineralogy", "process mineralogy", "metallurgical mineralogy", "technological mineralogy" e "mineralurgie" compreendendo uma especialização ou ramo da mineralogia aplicada.

4.2.1 Amostragem para estudos de caracterização

Nas fases de prospecção e pesquisa, são normalmente estudadas uma ou poucas amostras, e o material a ser caracterizado deve ter representatividade adequada em função do nível de conhecimento da ocorrência.

A seleção de amostras deve ter como base as feições mais comuns presentes na ocorrência, identificadas por observações interpretativas do minério e com base em análises químicas, individualizando em amostras separadas materiais com características mineralógicas / químicas e/ou texturais (tipos distintos), bem como porções mais anômalas ou atípicas detectadas.

Como normalmente as amostras utilizadas na caracterização tem volume limitado, face a utilização de material de furos de sondagens, a questão de representatividade é normalmente resolvida com a composição de intervalos de amostragem, bem como de amostras provenientes de dois ou mais furos próximos.

4.2.2 Metodologias para caracterização tecnológica

O estudo para caracterização tecnológica de um minério compreende um processo sistemático, envolvendo uma seqüência de procedimentos de ensaios e análises laboratoriais planejados em função do bem mineral em estudo.

O roteiro de procedimentos é esboçado a partir de informações sobre o bem mineral em questão, bem como sobre o beneficiamento para minérios e jazidas similares, ambos obtidos em literatura e/ou operações mineiras semelhantes.

Os procedimentos de laboratório se dividem em operações de preparação de amostras (envolvendo redução e classificação granulométrica) e operações de separações minerais (concentração de espécies minerais para o detalhamento de suas propriedades e associações mineralógicas).

O desempenho e aferição da qualidade dessas operações são checados sistematicamente através dos balanços de massa e metalúrgico, determinados,

respectivamente, a partir de dados de massa e análises químicas dos produtos obtidos. O balanço de massa compara o peso alimentado no ensaio e a somatória dos pesos dos produtos obtidos, aceitando-se variações relativas inferiores a 5% e, idealmente, abaixo de 2%; já o balanço metalúrgico compara os teores dosados e calculados, aceitando-se variações relativas usualmente inferiores a 10%.

4.2.3 Parâmetros da matéria prima mineral

Sant'Agostino & Kahn (1997) e Born & Kahn (1992) mencionam a importância dos parâmetros da matéria prima mineral que podem interferir de forma negativa no processo de beneficiamento.

É fundamental definir a distribuição do elemento de interesse na granulometria, dado obtido apenas pelos ensaios de preparação da amostra e análises químicas. São bastante comuns casos em que existem duas ou mais fases portadoras do elemento de interesse, na maioria das vezes apresentando distintos comportamentos frente aos processos de beneficiamento. É de vital importância determinar os minerais portadores do elemento de interesse, a sua partição nas várias fases, bem como a distribuição destas fases na granulometria.

Os principais parâmetros relevantes ao beneficiamento, que se referem às fases minerais portadoras do elemento de interesse, estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros da matéria prima mineral (Segundo Sant'Agostino & Kahn (1997))

Parâmetros relevantes	Relevância para o beneficiamento
Identificação das fases e composição química do mineral útil e de ganga	Identificando as fases e suas composições químicas, obtém-se através da literatura suas propriedades físicas e composição química teórica, bem como as possíveis substituições por elemento menores.
Formas de inclusões e associações minerais	As formas de associações e inclusões entre as diferentes fases portadoras do elemento de interesse tornam-se importantes sempre que apresentarem comportamento diferencial no beneficiamento.
Impregnação e recobrimento superficial por variedades neoformadas	Partículas impregnadas, ainda que monominerálicas, tem propriedades de superfície diferentes de partículas límpidas, respondendo de forma distinta a certos processos de beneficiamento e dificultando a concentração.
Estado de alteração	Aspectos de alteração do mineral útil podem modificar substancialmente as características das partículas, interferindo no seu comportamento no beneficiamento
Grau de liberação	Determinação da granulação em que ocorre a individualização do mineral útil em partículas monominerálicas. A definição de partícula livre ou monominerálicas torna-se relativa por feições de inclusões, recobrimentos ou alteração.

4.2.4 Procedimentos de laboratório

O roteiro de procedimento a ser adotado deve ser adaptado frente às características do material em estudo, bem como às alternativas de beneficiamento vislumbradas; a Figura 3 apresenta um fluxograma geral de procedimento experimental em estudos de caracterização, adaptado de Sant'Agostino & Kahn (op. cit.).

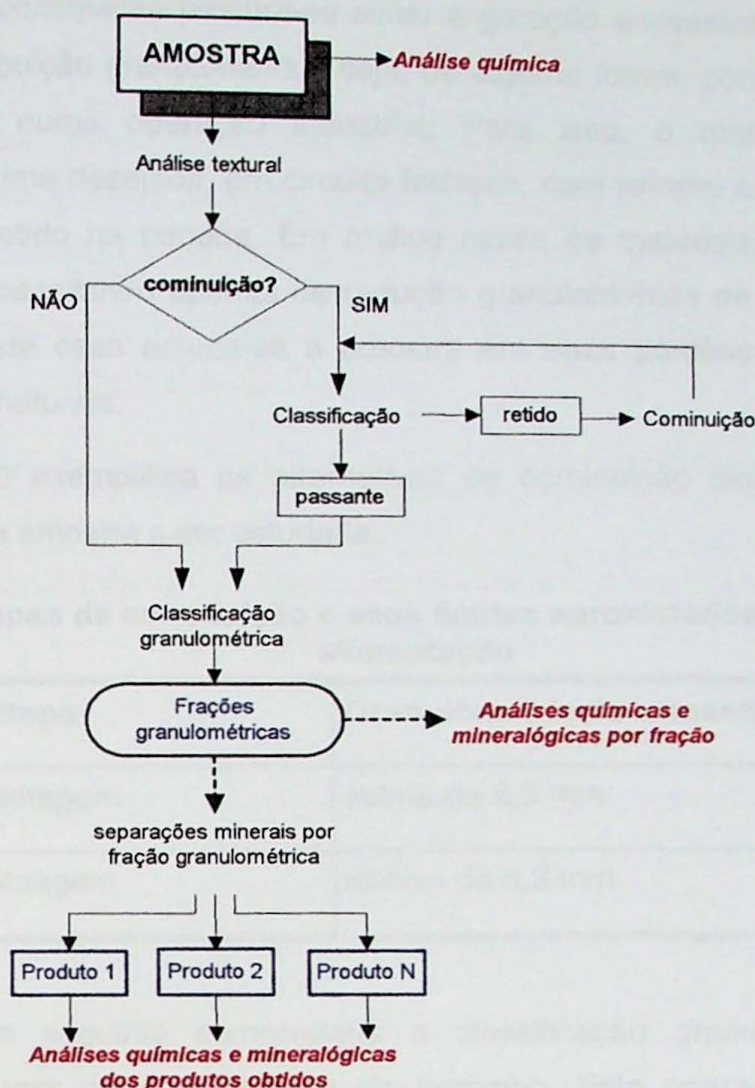


Figura 3 - Fluxograma dos procedimentos experimentais em caracterização de minérios (adaptado de Sant'Agostino & Kahn; 1997)

4.2.4.1 Técnicas de preparação de amostras

A preparação de amostras tem por finalidade adequar a granulometria do material em questão às especificações granulométricas do produto (concentrado) mineral desejado, ou do processo de beneficiamento a ser aplicado. A granulometria do(s) mineral(is) de interesse é avaliada através de uma análise textural do material, efetuada mediante observações macroscópicas acuradas e/ou por microscópio estereoscópico / de polarização.

Para materiais que se encontram em dimensões maiores que as desejadas, deve-se realizar a redução da granulação do material. Materiais naturalmente desagregados muitas vezes requerem apenas redução granulométrica da parcela de fragmentos mais grossos, nestes casos faz-se uma classificação granulométrica separando grossos e finos naturais e estuda-se a amostra em duas porções separadas: os grossos moídos e os finos naturais.

A cominuição, conjunto de procedimentos para redução de tamanho de fragmentos, pode ser realizada utilizando-se britadores de mandíbulas e martelos e/ou moinhos de rolos e jarros.

Durante a cominuição procura-se evitar a geração excessiva de finos, gerando um produto cuja distribuição granulométrica seja, de alguma forma, correlacionável com o que se espera obter numa operação industrial. Para isso, o material é peneirado na granulometria máxima desejada, em circuito fechado, com retorno a cominuição apenas do material grosso, retido na peneira. Em muitos casos os materiais ocorrem naturalmente desagregados, necessitando apenas de redução granulométrica da parcela de fragmentos mais grossos; neste caso estuda-se a amostra em duas porções separadas: os grosso moídos e os finos naturais.

A Tabela 3 exemplifica as alternativas de cominuição diante das características granulométricas da amostra a ser estudada.

Tabela 2 - Etapas de cominuição e seus limites aproximados de granulação de alimentação

Etapas	Granulometria de alimentação
Britagem	acima de 6,3 mm
Moagem	abaixo de 6,3 mm

A atividade seguinte compreende a classificação granulométrica da amostra, gerando frações com distintas classes de tamanho. Esta operação pode ser efetuada através de peneiramento (a úmido ou a seco) manual ou em peneirador vibratório, tendo como limite inferior usual 0,020 mm (peneira de 635 malhas); abaixo desta granulação, são empregados ou hidrociclones ou cicloclassificador Warman.

4.2.4.2 Técnicas de separações minerais

As técnicas de separações minerais baseiam-se nas diferenças de propriedades físicas das espécies minerais presentes no material. As principais técnicas empregadas em laboratório são resumidas na seqüência:

- a) Separação por densidade: esse tipo de separação se apóia nas diferenças de densidade dos minerais ao serem submetidos a ensaios de imersão em líquidos densos. A utilização de líquidos com densidades conhecidas permite separar minerais, obtendo, dessa forma, produtos distintos em cada etapa de separação. Os líquidos conhecidos cobrem a faixa de densidade desde 1,6 até 4,3 g/cm³.
- b) Separação magnética: essa, por sua vez, se baseia na diferença de susceptibilidade magnética dos minerais quando submetidos a um campo magnético externo. Para separações magnéticas ideais, ou com desempenho

operacional otimizado, recorre-se aos separadores Frantz, de uso tradicional em mineralogia.

- c) Separação eletrostática: baseia-se nas diferenças de condutibilidade elétrica de superfície. O principal equipamento utilizado em laboratório é o separador de alta tensão e, secundariamente, os separadores de placas e placa/tela.

Os principais métodos utilizados para separações minerais empregados em estudos de caracterização são detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 - Principais métodos de separações minerais

Tipo de Separação	Equipamento
Separações por densidade	Líquidos densos/suspensões densas Separador magneto-densitário Mesa Mozley (Mozley mineral separator, C-800) Batéia (manual ou mecanizada)
Separações magnéticas	Ímã permanente de baixa intensidade (<2kG) Ímã permanente de média intensidade (2 a 8 kG, compostos cerâmicos de terras raras) Separadores magnéticos Frantz (isodinâmico e de barreiras) Tubo Davis Separação de alta intensidade via úmida

4.2.4.3 Análises químicas

As análises são usualmente efetuadas na amostra inicial, nas várias frações granulométricas e nos produtos finais resultantes das separações minerais permitindo, assim, avaliar a composição da amostra e o comportamento dos diversos elementos de interesse nas várias etapas de um estudo.

As principais técnicas empregadas referem-se a:

- Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX);
- Espectrometria de emissão por plasma de acoplamento induzido (ICP-AES);
- Espectrometria de absorção atômica.

4.2.4.4 Análises mineralógicas

As análises mineralógicas têm por objetivo não só a identificação como quantificação das espécies minerais, viabilizando a determinação da composição mineral e do grau de liberação do mineral útil, como também a definição das formas de associações minerais presentes, particularmente com a determinação do grau de liberação do mineral (is) útil (eis) e aspectos de recobrimento superficial (relevantes para a concentração por flotação e

separação eletrostática). Várias são as ferramentas empregadas, muitas vezes sendo necessária a conjugação de duas ou mais técnicas para situações de associações mais complexas. A Tabela 4 apresenta as técnicas gerais e específicas utilizadas na caracterização de minérios.

Tabela 4 - Técnicas de mineralogia determinativa usuais e estudos de caracterização de minérios

Técnica	Equipamento/Método	Propriedades
Microscopia óptica	Microscópios estereoscópicos Microscópios ópticos de polarização	Forma, cor, alterações, propriedades ópticas, associações, liberação
Difração de raios X	Método do pó	Estrutura cristalina
Microscopia eletrônica de varredura	Microscópio eletrônico de varredura	Forma, associações, liberação
Sistemas de microanálise	Dispersão de energia (EDS) Dispersão de comprimento de onda (WDS)	Composição química
Recursos Diversos	Análise termodiferencial	Transformações de fases
	Análise termogravimétrica	
	Análise por infravermelho	Composição química
Luminescência	Catodoluminescência	Excitação por elementos ativadores
	Fluorescência	

Fonte: Sant'Agostino e Kahn (1997).

A primeira e tradicionalmente mais empregada refere-se ao uso da microscopia óptica de polarização (luz refletida ou transmitida) e também da estereomicroscopia (lupa binocular). Estas ferramentas permitem definir forma, hábito, cor, características de superfície, associações minerais e grau de liberação das partículas ou grãos minerais de interesse.

A outra técnica, também muito utilizada, corresponde à difração de raios X, através do método do pó. Esta ferramenta permite a identificação das fases minerais presentes segundo o espectro de difração gerado por fases minerais quando a amostra é submetida à incidência de raios X de comprimento de onda fixo. Em situações específicas pode também ser empregada na quantificação das espécies minerais.

Uma outra técnica mais refinada e de uso mais restrito, refere-se à microscopia eletrônica de varredura (MEV); trata-se de uma ferramenta apropriada para análise de formas e associações de partículas, capaz de produzir imagens resultantes da interação de um feixe de elétrons incidente na amostra, possibilitando a obtenção de imagens com aumentos entre 30 e 100.000 vezes. As imagens geradas a partir de *elétrons retro-espalhados* permitem a individualização de fases minerais a partir de seus números atômicos, comumente associadas com informações químicas pontuais obtidas por espectrômetros de fluorescência de raios X acoplados ao MEV (EDS ou WDS). As imagens geradas a partir de elétrons secundários, permitem identificar morfologia das partículas.

A catodoluminescência, técnica de aplicação muito específica e restrita, recurso acoplável à microscopia óptica ou eletrônica de varredura, possibilita a diferenciação de fases devido à excitação de elementos ativadores associados à fase mineral, referindo-se a heranças ou assinaturas dos processos mineralizadores ou de formação dos minerais.

4.2.5 *Influência das características do minério no processo de beneficiamento de fosfato*

Segundo Born e Kahn (1990), a apatita é usualmente concentrada através da flotação aniônica, com o emprego de uma associação coletor-depressor, ajustada em função dos minerais de ganga presentes e das características de superfície dos grãos de apatita. As principais características do minério que influem no processo estão relacionadas as seguintes características físico-químicas do minério:

- Presença de magnetita: a magnetita tende a ser coletada juntamente com a apatita, aumentando os teores de ferro do concentrado. O problema é minimizado com a inclusão de separação magnética na etapa de moagem.
- Conteúdo de finos no minério: a presença de lamas na flotação aumenta o consumo de reagentes e inibe a flotação. O problema é resolvido em parte pelo aumento do número de estágios de atrição e/ou deslamagem ou com a adição de dispersantes.
- Presença de minerais portadores de cátions de elementos alcalino-terrosos: esses minerais tendem a serem coletados juntamente com a apatita diluindo o concentrado, adicionando elementos indesejáveis acima dos limites de especificação.
- Impregnação superficial da apatita por óxidos-hidróxidos de ferro: os grãos intensamente impregnados não respondem adequadamente ao processo; a eventual recuperação destes resulta em aumento do teor de impurezas do concentrado.
- Liberação inadequada da apatita (parcela da apatita que ocorre associada aos minerais de ganga, na forma de grãos mistos): acarreta em maiores perdas de

fosfato e/ou elevação de contaminantes no concentrado. Este aspecto, bem como a impregnação superficial da apatita, podem ser reduzidos pela moagem em granulometria mais fina, desde que os grãos de apatita já não sejam naturalmente muito finos. Implica em custo de moagem adicional, além de geração de lamas.

- Presença de fosfatos não apatíticos: a presença destes minerais implica na redução da recuperação global do fósforo, sendo que somente o fósforo apatítico é passível de recuperação.
- Presença de diferentes variedades de apatita: flúor / carbonato / hidroxí-apatita apresentam respostas diferentes frente ao processo de flotação, sendo muito comum essa diversidade.

Verifica-se claramente a importância da caracterização tecnológica de matérias primas minerais no auxílio ao beneficiamento mineral, buscando atingir as especificações e exigências de qualidade do produto final.

4.3 MINERALOGIA DAS APATITAS

4.3.1 Apatita

A apatita é o mineral útil dos depósitos fosfáticos explorados no mundo para uso na indústria alimentar e na agricultura. Apresenta fórmula geral $A_{10}(XO_4)_6Z_2$, onde A= Ca, Pb, Sr, Zn, Na, Be Cd, REE, Sc, Mg, MN, ...; X= P, As, V, S, C, Si, Cr, ...; Z= F, OH, Cl, Br,(Born et al., 1996).

A variedade de apatita geralmente citada como a mais freqüentemente associada aos carbonatitos, e como acessório nas rochas ígneas, em geral, é a fluorapatita.

A fluorapatita, de fórmula simplificada, $Ca_5(PO_4)_3F_2$, cristaliza-se no sistema hexagonal, grupo espacial P63/m (Bragg et al., 1965, apud Toledo, 1999).

Segundo Slansky (1980, apud Toledo ,1999), apresenta dois planos de simetria paralelos ao plano (001) e tetraedros PO_4 associados a colunas Ca-O, formando uma estrutura em colméia. Perpendicularmente ao plano (001), há dois tipos de canais; o primeiro, com diâmetro de aproximadamente 2\AA , corresponde aos eixos ternários da estrutura e são bordejados por íons Ca^{2+} em posição Ca1, coordenados a 9 átomos de oxigênio. O segundo tipo, com diâmetro que varia de 3 a $3,5\text{\AA}$, é formado por eixos helicoidais c, bordejados pelos íons Ca^{2+} na posição Ca, seis íons P, dois íons F e 24 átomos de O.

Além da fluorapatita, as demais variedades de ocorrência natural, com suas respectivas fórmulas simplificadas são:

- hidroxíapatita, $Ca_5(PO_4)_3(OH)$

- hidroxiapatita carbonatada (dahllita) $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{F}, \text{OH})$
- flúorcarbonatoapatita (francolita), $(\text{Ca}, \text{Na}, \text{Mg})_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{F}, \text{OH})$
- cloroapatita, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ (Toledo, 1999).

Normalmente, nenhuma destas variedades é encontrada na natureza face às inúmeras substituições atômicas.

A composição das apatitas depende do meio de formação e da necessidade de compensação de cargas quando ocorrem substituições entre íons de carga diferente em relação à apatita ideal. A variabilidade de composição resulta em diferenças de densidade, índice de refração, birrefringência, susceptibilidade magnética, solubilidade, etc (Toledo, 1999).

As substituições aniônicas podem modificar em muito a estrutura das apatitas; o ânion CO_3^{2-} pode ocupar tanto a posição do PO_4^{3-} como a posição dos ânions F^- ou OH^- nos canais, subdividindo as apatitas carbonatadas em duas subvariedades distintas (Toledo, 1999):

- tipo A: o íon carbonato substitui os ânions F^- ou OH^- dos canais
- tipo B: o íon carbonato substitui o ânion PO_4^{3-} .

Segundo McConnell (1973), numerosas carbonatoapatitas seriam monoclinicas ou mesmo triclinicas, como resultado de deformações provocadas pelas substituições.

O ânion PO_4^{3-} pode ser substituído por outros ânions além do ânion CO_3^{2-} . A posição P pode ser ocupada por Si, S, V, As, Cr, Ge, Se, Al, Nb, Zr e C, sendo Si e S as substituições mais importantes (McConnell, 1974).

O flúor é o ânion mais comum do sítio aniônico monovalente na estrutura de apatitas de origem mineral, podendo ser substituído pelos ânions OH^- e Cl^- , formando membros de uma solução sólida (Toledo, 1999). Segundo Deer et al.(1971), as características ópticas das apatitas variam devido a essas substituições; a birrefringência é mais baixa refere-se a cloroapatita e a intermediária a fluorapatita.

O cálcio das posições Ca1 e Ca podem ser substituídos por Na, K, Ag, Sr, Mg, Mn, Al, Fe, Pb, Ba, Sn, Zn, Cd, Sc, Y, ETR, Bi, U, entre outros (McConnell, 1974).

Muitas das substituições citadas acima afetam os parâmetros da célula unitária das apatitas. As distorções ocasionadas definem as diferentes variedades de apatita e podem ser observadas por difratometria de raios X (DRX), juntamente com análises químicas e uma série de outras técnicas (catodoluminescência e microscopia eletrônica de varredura - MEV/EDS).

Em geral, as substituições no sítio A geram as maiores modificações nos parâmetros da célula unitária, enquanto as substituições no sítio X afetam diferentemente as dimensões a e c, resultando em anisotropias. As menores variações relatadas ocorrem nas substituições no sítio Z (Born et al., 1996).

4.3.2 As apatitas de Catalão I

O estudo realizado por Toledo (1999) permitiu o reconhecimento das várias gerações de apatitas presentes no Maciço de Catalão I.

Foram identificados três tipos principais de apatitas, que representam sete gerações:

- Apatita magmática primária: provenientes principalmente dos apatititos e dos carbonatitos, e também associadas aos glimeritos e foscoritos; são encontradas em todo o perfil de intemperismo apresentando sinais de alteração nas amostras dos níveis mais evoluídos. Apresenta-se em grãos ovóides ou tendendo a prismáticos, em textura em mosaico.
- Apatita de alteração pré-meteórica: considerada como tardimagmática ou hidrotermal; ocorre como transformações limitadas dos cristais de apatita primária, em bordas de maior birrefringência, em faixas de intracristalinas, em bordas com hábito lamelar e em pequenos cristais prismáticos tabulares. São encontradas principalmente nas rochas ainda não submetidas a alteração intempérica.
- Apatita supérgena: encontrada em vários níveis do perfil de alteração, nas zonas sujeitas a remobilização do P, mas sem a participação do Al, fato que levaria à neoformação de fosfatos secundários, aluminosos. Encontram-se tanto no meio fissural quanto em plasma secundário, apresentando-se como cristais fibrosos em agregados fibro-radiados e globulares.

Estes três tipos principais apresentaram algumas feições químicas marcadamente distintas:

- Apatita primária: teores de 1,8 a 2,8% de F; 0,2 a 0,6% de SiO₂; Cl, Na₂O, MgO, BaO, Al₂O₃, FeO e MnO sempre abaixo dos limites de detecção e razões de CaO/P₂O₅ de 1,26 a 1,37.
- Apatita de alteração pré-meteórica: em relação a apatitas primárias, apresentam maiores teores de F e razões de CaO/P₂O₅ variando de 1,26 a 1,55.
- Apatita supérgena: apresenta teores de F mais elevados que o das apatitas primárias, variando de 2,75 a 3,51%, além de enriquecimento em MgO e BaO nas variedades de apatitas globulares, respectivamente apresentando teores de 0,37 a 0,84% e 0,28 a 0,75%. As razões de CaO/P₂O₅ variam de 1,40 a 1,62%.

Segundo os estudos de Lenharo (1994), as apatitas de Catalão I são similares às aquelas observadas principalmente nos complexos de Juquiá e Araxá, havendo algumas variações granulométricas. Os estudos foram realizados a partir de concentrados apatíticos gerados a partir de amostras pontuais coletadas no complexo de Catalão I; as apatitas então estudadas foram classificadas em quatro tipos distintos:

- Apatitas primárias: hábito geralmente granular, com superfícies lisas ou irregulares, compostas por conjuntos de fraturas conchoidais com sulcos e estrias de dissolução, porém comumente sem impregnação superficial.
- Apatitas secundárias prismáticas hexagonais: formam crostas com disposição radial e são de granulação nitidamente mais grossa do que as de Juquiá e Araxá; apresentam formas de “leques” com extinção ondulante radial concêntrica ou de aglomerados semi-esféricos.
- Apatitas secundárias microcristalinas: formam agregados irregulares, com aspecto rugosos e extinção irregular ou ausente, geralmente associados a crostas de óxidos de ferro.
- Apatitas secundárias criptocristalinas: ocorrem associadas as microcristalinas e a crostas de óxido de ferro, geralmente recobrimdo grãos de apatita primária.

Lenharo (1994), classificou as apatitas primárias de Catalão I como estrôncio-hidróxi-fluorapatita e as secundárias como carbonato-fluorapatita. Segundo Toledo (1999), as apatitas primárias de Catalão I são normalmente fluorapatita com estrôncio. O F^- é o ânion dominante sítio aniônico monovalente e a presença de CO_3^{2-} em substituição ao PO_4^{3-} é inexistente ou muito discreta. A presença de OH^- foi qualitativamente demonstrada por Lenharo (1994) por FTIR. As apatitas de alteração pré-meteórica, produto de modificações pós-magmáticas / hidrotermais, apresentam remobilização parcial dos cátions substituintes por cálcio (ETR e às vezes Sr), evoluindo para carbonato-apatitas. As apatitas secundárias de alteração meteórica apresentam perda de cátions de substituição do cálcio (total para os ETR e parcial para Sr), perda de PO_4^{3-} (substituído por CO_3^{2-}) e aumento de F^- , tendências das apatitas supérgenas mais comuns.

Segundo Toledo (op. cit) não estão estabelecidos os limites para as denominações que adicionam os prefixos fluor, hidróxi e carbonato ao nome apatita, sendo difícil classificar as apatitas em função da localização do F^- e de seu aumento de teor acompanhando a substituição do ânion fosfato pelo ânion carbonato.

5 METODOLOGIA

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

5.1.1 Área objeto de estudo

A área objeto de estudo localiza-se no quadrante sudeste do complexo alcalino de Catalão I., em área de concessão da Ultrafertil Fertilizantes Fosfatados S.A., conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5.



Figura 4 – Vista aérea do complexo de Catalão I ilustrando as áreas objeto de lavra para P (Ultrafertil e Copebras) e Nb (Mineração Catalão) e a do presente estudo - Lagoa Seca

A porção do complexo objeto de estudo corresponde a uma atual área de pastagem apresentando substancial volume de recursos minerais de P, os quais deverão ser objeto de lavra no decorrer dos próximos 10 a 20 anos.

Nesta porção do complexo foram efetuados furos de sondagens, cujos resultados de análises químicas foram disponibilizados para a seleção de amostras visando à realização de estudos de caracterização dirigidos ao aproveitamento do minério de fosfato (Figura 6). Os furos assinalados com círculos azuis referem-se aos testemunhos de sondagens amostrados para o presente estudo.

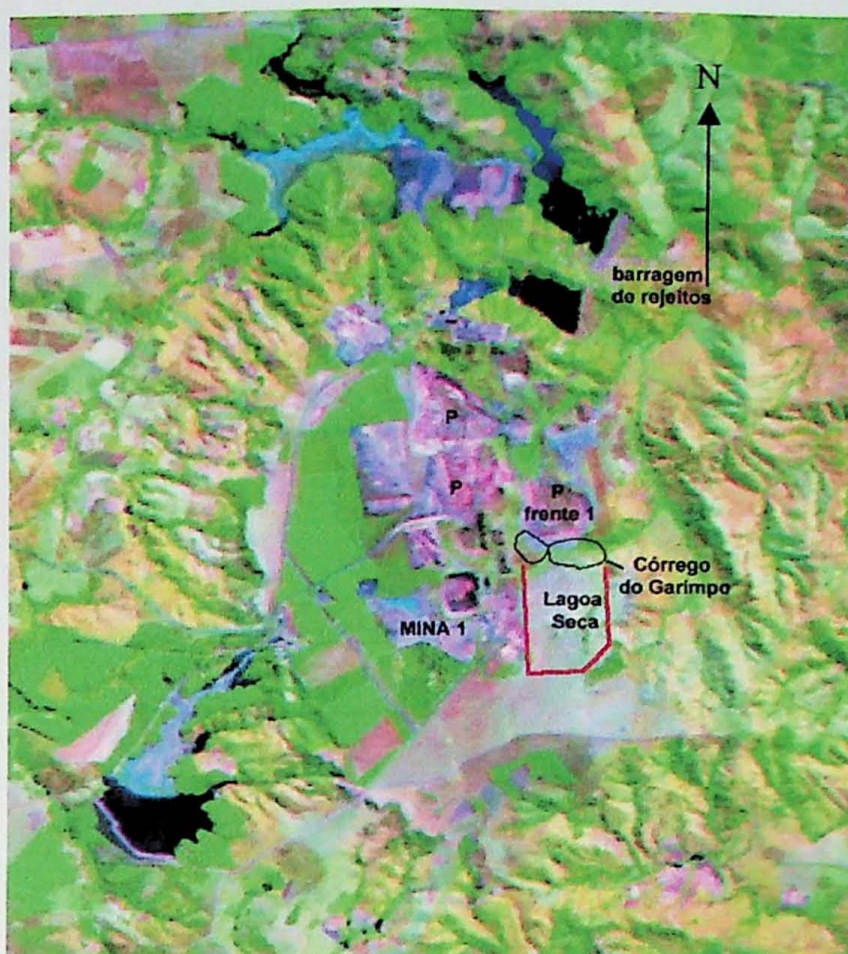


Figura 5 - Imagem de satélite do complexo de Catalão I ilustrando a área objeto do presente estudo (Lagoa Seca)

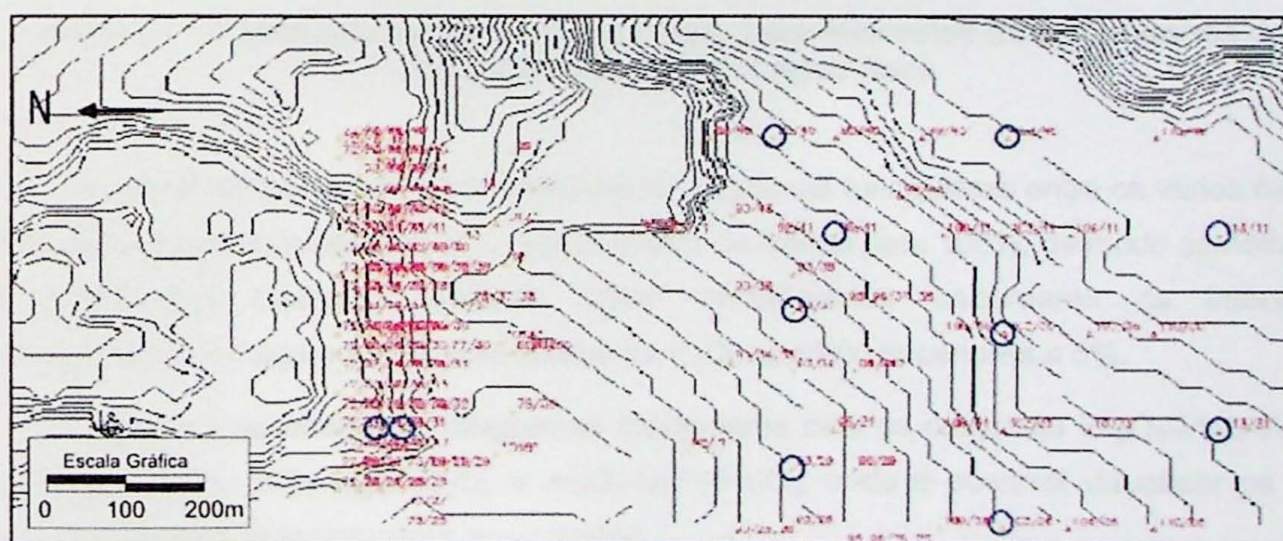


Figura 6 Localização de furos de sondagem na área da Lagoa Seca

5.1.2 Critérios de composição de amostras para os estudos

A composição das amostras para os estudos de caracterização foi definida partir de dados de análises químicas disponíveis para amostras dos testemunhos de sondagens da área da Lagoa Seca (Figura 6), fornecidos pela indústria Ultrafertil Fertilizantes Fosfatados S.A..

Inicialmente foram feitos vários diagramas (binários) de correlação entre os teores de Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , CaO e BaO , buscando definir tipos preliminares de materiais distintos. Apenas a correlação entre os teores de CaO x P_2O_5 , Figura 6, relativa aos intervalos com P_2O_5 apatítico superior a 5%, permitiu individualizar materiais distintos. Um primeiro tipo refere-se a material com presença de apatita e relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ próxima de 1,3 (grupo azul na Figura 7); outro tipo apresenta relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ acima de 2,0, indicativa da presença de carbonatos (grupo laranja).

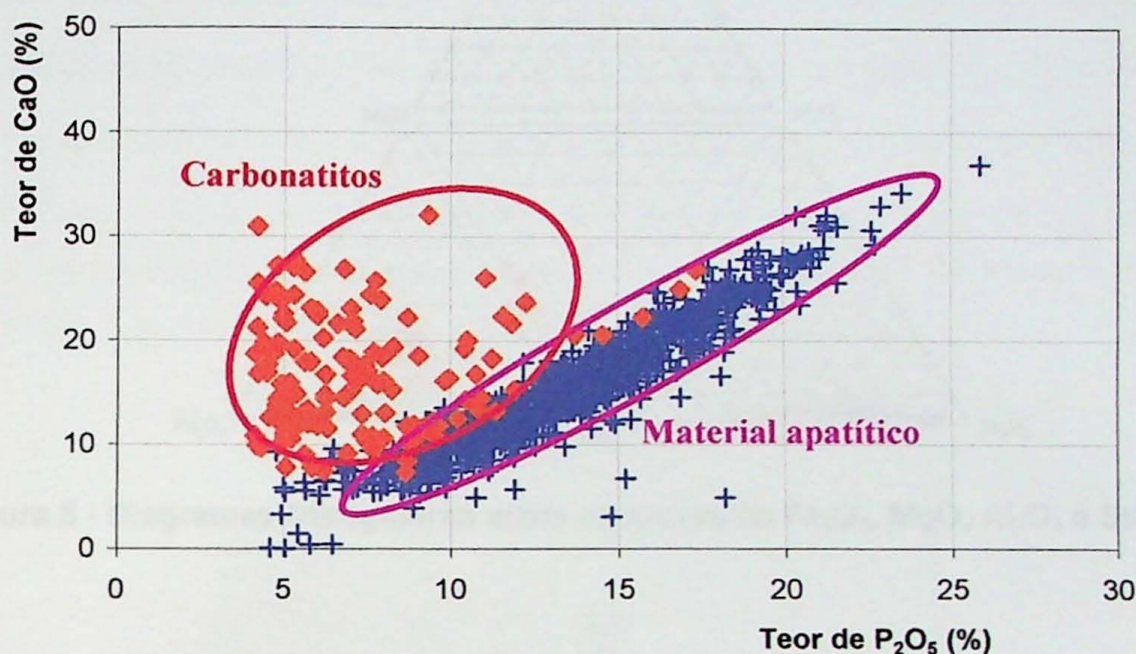


Figura 7 - Correlação de teores CaO x P_2O_5 para intervalos de testemunhos de sondagem da área da Lagoa Seca

Adicionalmente, foram ainda elaborados diagramas triangulares entre os vários óxidos analisados, após normalização de cada conjunto de óxidos para 100%; de modo semelhante as correlações binárias, também foram considerados unicamente os intervalos mineralizados, ou seja aqueles com teores de P_2O_5 apatítico superiores a 5%.

A Figura 8 apresenta os diagramas triangulares para os conjuntos Fe_2O_3 - MgO - Al_2O_3 , MgO - Fe_2O_3 - SiO_2 , SiO_2 - MgO - Al_2O_3 e Al_2O_3 - SiO_2 - Fe_2O_3 , onde é possível visualizar os dois tipos de materiais anteriormente assinalados.

O primeiro tipo, em azul, apresenta elevados conteúdos relativos de Fe_2O_3 e SiO_2 ; o segundo tipo (em laranja) apresenta baixo conteúdo relativo de Al_2O_3 e elevado MgO .

A Figura 9 ilustra os diagramas triangulares para os conjuntos BaO - MgO - Al_2O_3 , MgO - BaO - SiO_2 , SiO_2 - MgO - Al_2O_3 e Al_2O_3 - SiO_2 - BaO , onde se observa que não há nenhuma correlação que permita individualizar algum tipo de material, ou seja a presença de BaO parece não estar relacionada ao evento principal que deu origem as rochas do complexo e

sim a eventos tardios, de natureza metassomática, conforme já descrito por Imbernon (1993).

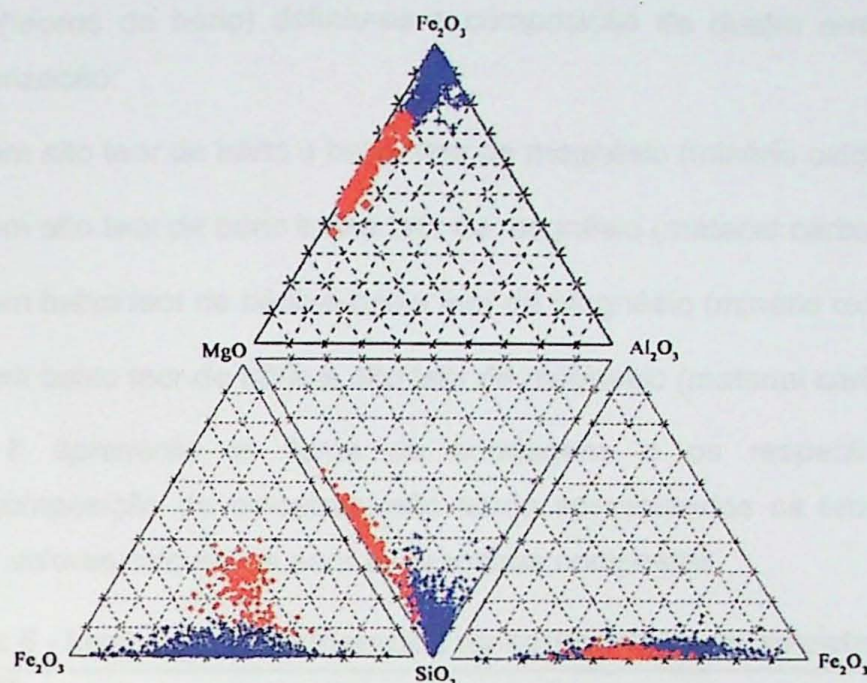


Figura 8 - Diagramas triangulares entre os teores de Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 e SiO_2

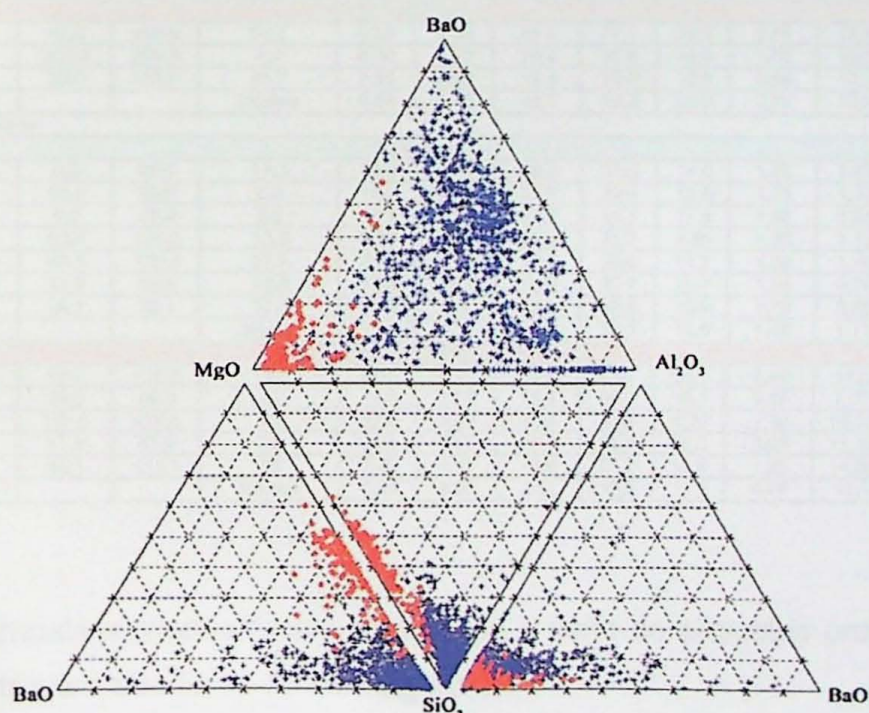


Figura 9 - Diagramas triangulares entre os teores de MgO , Al_2O_3 , SiO_2 e BaO

Uma vez definidos os principais agrupamentos ou tipos de materiais no depósito, foram solicitadas a Ultrafertil alíquotas dos testemunhos relativos aos furos de sondagens 73/31, 74/31, 93/29, 93/37, 95/41, 95/46, 103/26, 103/36, 103/46, 113/31 e 113/41 (ver

Figura 7) de forma tal que uma composição de amostras abrangesse da forma mais ampla possível o minério de fosfato da área da Lagoa Seca.

Baseado nos dois grupos estabelecidos a partir das correlações apresentadas e dos gráficos ternários (teores de bário) definiu-se a composição de quatro amostras para os estudos de caracterização:

- Minério com alto teor de bário e baixo teor de magnésio (minério oxidado).
- Minério com alto teor de bário e alto teor de magnésio (material carbonático).
- Minério com baixo teor de bário e baixo teor de magnésio (minério oxidado).
- Minério com baixo teor de bário e alto teor de magnésio (material carbonático).

A Tabela 5 apresenta os furos de sondagens e os respectivos intervalos considerados na composição de amostras; são ainda apresentados os teores médios de cada intervalo e os valores calculados para as amostras compostas.

Tabela 5 - Intervalos considerados na composição de amostras

Minério com Alto Teor de Bário														
Oxidado														
Amostra	Nº Furo	Qtde (m)	Intervalo		Distribuição (%)	P ₂ O ₅ T	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	BaO	CaO/P ₂ O ₅ T
1	73/31	75,0	16,6	91,6	25,8	13,5	11,0	29,9	20,4	14,4	1,93	2,22	2,49	1,07
	74/31	180,0	15,0	195,0	62,1	12,9	11,9	25,9	13,6	15,3	1,31	2,33	4,31	1,19
	93/29	35,0	57,1	92,1	12,1	15,9	13,2	23,4	25,5	17,9	2,67	0,44	1,98	1,13
	Total	290,0			Médias	13,4	11,8	26,6	16,8	15,4	1,63	2,07	3,56	1,15
Alto Teor MgO														
2	73/31	65,0	91,6	156,6	54,2	6,20	6,20	18,1	17,1	23,5	0,49	11,4	1,16	3,78
	74/31	5,0	200,0	205,0	4,2	6,30	6,10	19,4	15,6	14,9	1,00	16,9	1,98	2,32
	103/26	55,0	80,0	135,0	41,7	7,20	6,80	19,4	19,8	16,6	0,98	13,4	1,16	2,30
	Total	125,0			Médias	6,63	6,45	18,7	18,2	20,3	0,72	12,5	1,20	3,11
Minério com Baixo Teor de Bário														
Oxidado														
3	103/26	85,0	0,0	85,0	17,3	12,0	10,5	28,5	27,2	14,0	1,67	1,79	0,69	1,17
	103/36	40,0	55,0	95,0	8,2	13,3	11,4	27,5	29,4	15,5	1,69	1,18	0,29	1,17
	103/46	40,0	0,0	40,0	8,2	14,8	13,5	26,7	24,3	17,8	1,62	0,64	0,11	1,20
	113/31	65,0	62,0	127,0	13,3	8,70	7,40	35,9	32,7	9,80	1,35	1,10	0,49	1,13
	113/41	135,4	83,3	135,4	27,6	9,70	8,40	32,3	35,6	11,2	1,36	1,19	0,23	1,15
	93/37	65,0	31,9	96,9	13,3	16,3	15,1	24,0	20,7	20,7	1,14	0,70	1,16	1,27
	95/46	60,0	29,1	89,1	12,2	10,5	8,30	28,2	28,6	10,9	1,79	0,69	0,18	1,04
	Total	490,4			Médias	11,7	10,2	29,7	29,5	13,6	1,49	1,11	0,46	1,16
Alto Teor MgO														
4	103/36	20,0	95,0	115,0	20	8,50	8,30	21,9	13,1	20,7	0,46	14,0	0,67	2,44
	103/46	25,0	40,0	65,0	25	12,3	12,3	18,1	24,0	19,7	0,87	7,31	0,04	1,60
	113/31	10,0	127,0	137,0	10	5,50	5,40	25,3	26,6	9,30	1,49	16,57	0,22	1,69
	95/41	20,0	67,9	87,9	20	9,30	9,10	19,0	16,2	20,5	0,98	11,22	0,35	2,20
	95/46	25,0	89,1	114,1	25	7,40	7,10	19,6	21,2	12,8	1,26	14,32	0,09	1,73
	Total	100,0			Médias	9,04	8,87	20,1	19,8	17,3	0,97	12,1	0,26	1,93

As quatro amostras citadas foram compostas a partir de alíquotas proporcionais aos intervalos de amostragem dos furos de sondagens.

5.1.3 Estudos de caracterização

5.1.3.1 Procedimento experimental

A Figura 9 apresenta o esquema de procedimento experimental empregado nos estudos de caracterização.

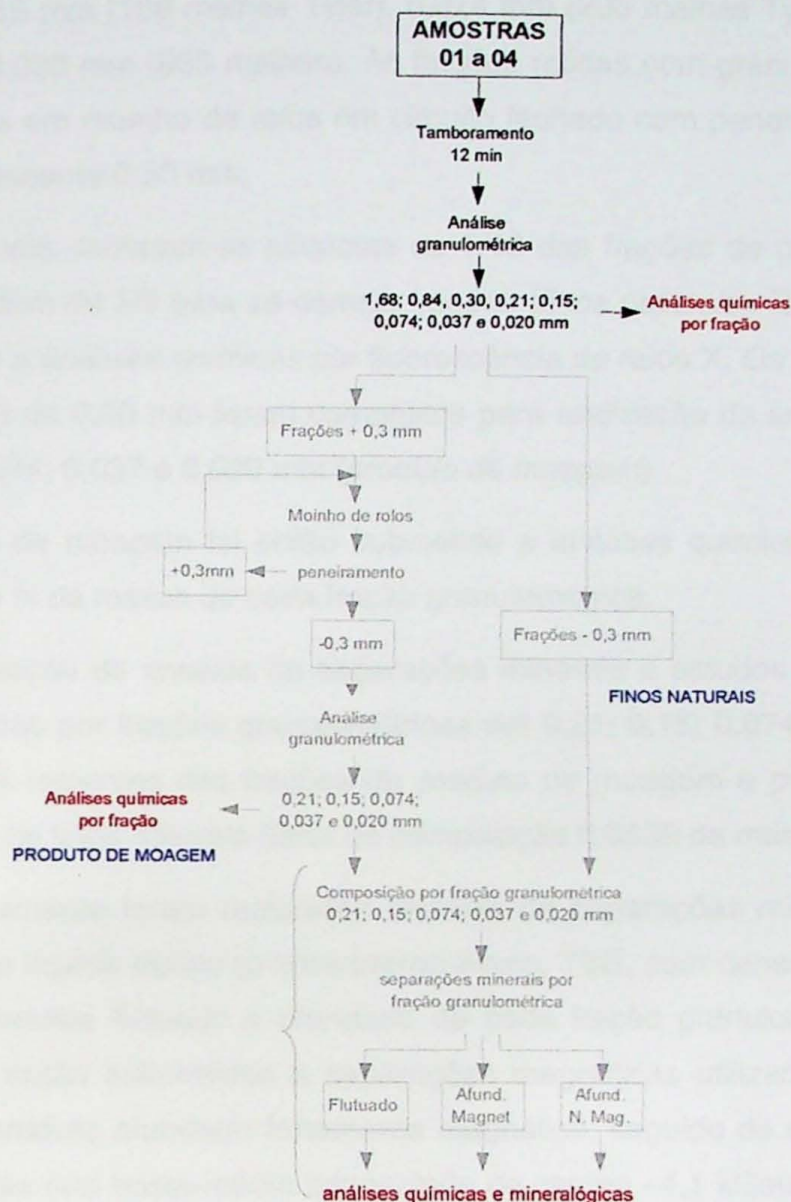


Figura 10 - Esquema de procedimento experimental empregado nos estudos de caracterização

As amostras compostas com massas entre 2 e 10 kg foram inicialmente homogeneizadas através de pilha alongada e subdivididas através de amostrador Jones, com retirada de aproximadamente 300g para a execução de análises químicas e 1,5 kg para os estudos de caracterização.

As alíquotas retiradas para análises químicas foram cominuídas em moinho de rolos, sendo posteriormente quarteadas para a realização de análises químicas por espectrometria de fluorescência de raios X (cerca de 75 g de cada amostra).

Em seguida, as alíquotas relativas aos estudos de caracterização foram submetidas a uma etapa de desagregação mediante tamboramento, por 12 minutos, a 60 % de sólidos em massa e 40% de água. Este produto, por sua vez, foi submetido à classificação

granulométrica, por peneiramento a úmido, em peneiras com aberturas de 1,68 mm (10 malhas Tyler) e 0,84 mm (20 malhas Tyler), 0,30 mm (48 malhas Tyler), 0,21 mm (65 malhas Tyler), 0,15 mm (100 malhas Tyler), 0,074 mm (200 malhas Tyler), 0,037 mm (400 malhas Tyler) e 0,020 mm (635 malhas). As frações retidas com granulação acima de 0,30 mm foram moídas em moinho de rolos em circuito fechado com peneira até a obtenção de todo o material passante 0,30 mm.

Na seqüência, tomaram-se alíquotas de 1/16 das frações de granulação superior a 0,30 mm e da ordem de 1/8 para as demais frações (*finos naturais*). Estas alíquotas foram, então submetidas a análises químicas por fluorescência de raios X. Os 15/16 avos restantes das frações acima de 0,30 mm foram compostos para realização de análise granulométrica em 0,21; 0,15; 0,074; 0,037 e 0,020 mm (*produto de moagem*)

O produto de moagem foi então submetido a análises químicas, retirando-se para tanto alíquotas de ¼ da massa de cada fração granulométrica.

Para realização de ensaios de separações minerais e estudos mineralógicos foram compostas amostras por frações granulométricas em 0,21; 0,15; 0,074; 0,037 e 0,020 mm, utilizando-se os ¾ restantes das frações do produto de moagem e proporcionalmente em massa as frações de finos naturais (fator de composição 0,6539 da massa).

Sistematicamente foram realizados ensaios de separações minerais em escala de bancada utilizando líquido denso (o tetra-bromo-etano, TBE, com densidade de 2,95 g/cm³), obtendo-se os produtos flutuado e afundado de cada fração granulométrica. Os produtos afundados foram então submetidos a separações magnéticas utilizando ímã permanente, para retirada do produto afundado fortemente magnético, seguido de separação em Frantz modelo de barreiras (em baixa-média intensidade de campo -4,1 kGauss) para retirada dos produtos magnético em 0,3A e afundado não magnético em 0,3A.

Desta forma, para cada fração granulométrica (0,21; 0,15; 0,074; 0,037 e 0,020 mm) obtiveram-se os seguintes produtos:

- produto flutuado, com densidade inferior a 2,95 g/cm³;
- produto afundado magnético em 0,0A (MAG);
- produto afundado fracamente magnético em 0,3A (FRM);
- produto afundado não magnético em 0,3A (NMAG);

Finalmente, todos os produtos obtidos foram submetidos a análises químicas por fluorescência de raios X.

As análises mineralógicas destes mesmos produtos foram realizadas mediante a conjugação de técnica de microscopia óptica (luz transmitida), difratometria de raios X (modelo Phillips MPD - 1880/PW1710, utilizando radiação de Cu K α e 40 Kv - 40 ma) e

microscopia eletrônica de varredura (modelo Leo – Stereoscan 440, utilizando elétrons retroespalhados com distância de trabalho de 25 mm a uma aceleração de 20 KV).

A interação das informações mineralógicas com os resultados de balanço de massa e metalúrgicos das análises granulométricas e separações minerais efetuadas possibilitaram definir:

- composição mineralógica qualitativa e quantitativa;
- avaliação da forma de ocorrência da apatita, incluindo estimativa de liberação e aspectos de impregnação superficial;
- partição (distribuição) do fósforo entre os minerais portadores deste elemento;
- conteúdo de finos;
- conteúdo de magnetita;
- eventual estabelecimento de estimativas de recuperação no processo de beneficiamento.

7 RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÕES PRELIMINARES

Os resultados obtidos através das diversas técnicas utilizadas são apresentados e concisamente discutidos, segundo a seqüência de execução dos trabalhos.

7.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química das amostras estudadas é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química das amostras estudadas

Amostra	Teores (%)									Cao/ P ₂ O ₅
	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	P.F.	
1	12,5	14,4	16,1	1,53	28,2	1,63	5,08	4,37	6,79	1,15
2	4,95	13,6	22,8	1,24	17,6	15,3	3,80	1,53	18,0	2,75
3	8,96	10,2	20,7	2,38	36,6	1,32	8,24	0,90	5,59	1,14
4	7,55	14,0	18,1	1,41	23,8	11,7	6,09	0,75	12,8	1,85

A tabela apresentada acima permite concluir que a amostra 1 apresenta o maior teor de P₂O₅ (12,5%) e a amostra 2 o menor teor (4,95%), esta última apresenta, ainda, a maior relação de CaO/P₂O₅. As amostras 3 e 4 apresentam valores intermediários para os teores de P₂O₅ (8% em média).

Os teores de CaO são relativamente semelhantes para as amostras 1, 2 e 4 (14% em média), enquanto na amostra 3 é inferior (10%).

As amostras 2 e 4 relativamente apresentam altos teores de MgO, entre 11 e 15%, sendo que as amostras 1 e 3 apresentam teores de MgO inferiores a 2%.

Os teores de SiO₂ são relativamente baixos apresentando valores de 21,8% em média para as amostras 2 e 3 e 17% em média para as amostras 1 e 4.

As amostras 1 e 2 apresentam teores de BaO superiores a 1%, sendo que a primeira apresenta o maior valor de BaO (4,37), sendo que as amostras de 3 e 4 apresentam valores inferiores variando de 0,75 a 0,90%.

Comparando os resultados de análises químicas das Tabelas 5 (utilizada para composição das amostras) e 6, verifica-se que para algumas amostras os teores de P₂O₅, CaO, SiO₂, Fe₂O₃, MgO e BaO apresentam variações significativas.

As amostras 1 e 4 apresentam as menores variações entre os teores das amostras estudadas (Tabela 6) e os teores previstos inicialmente (Tabela 5). Os teores de P₂O₅, CaO, SiO₂ e MgO são um pouco mais elevados para a composição inicial, apresentando variações de 1 a 2%; e os teores de Fe₂O₃ e BaO são um pouco inferiores, respectivamente com variações de 3% e 0,5 a 1%.

Comparando os resultados das duas tabelas, observa-se que a amostra 2 apresenta teores mais elevados de CaO (variação de 2%) e P_2O_5 (variação de 6%), para composição química inicial (Tabela 5), e teores inferiores de SiO_2 (variação de 5%). Os demais teores não apresentam variações significativas.

A amostra 3 apresenta teores mais elevados de CaO e P_2O_5 (variações de 3%) e SiO_2 (variação de 9%); e teores inferiores de Fe_2O_3 (variação de 7%) para a composição química inicial (Tabela 5).

7.2 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

Os resultados de distribuição em massa são apresentados comparativamente na forma de curvas de distribuição granulométricas acumuladas no passante, expostas na Figura 11.

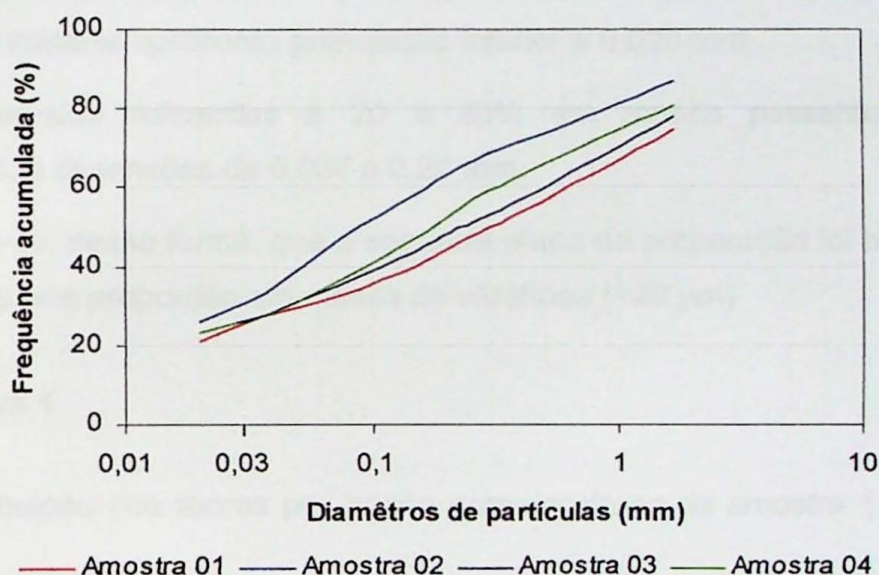


Figura 11 - Gráficos de distribuição acumulada para as amostras estudadas (% em massa)

As amostras 2 e 4, relativas ao material menos intemperizado e com presença de carbonatos, apresentam granulação mais fina, com cerca de 59 a 69% de massa passante em 0,03 mm. Já as amostras 1 e 3 apresentam-se um pouco mais grossas com 50 a 53% de massa passante em 0,03 mm.

As distribuições granulométricas referentes aos produtos obtidos a partir da cominuição do material retido em 0,3 mm (produtos de moagens) são apresentadas comparativamente na Figura 12.

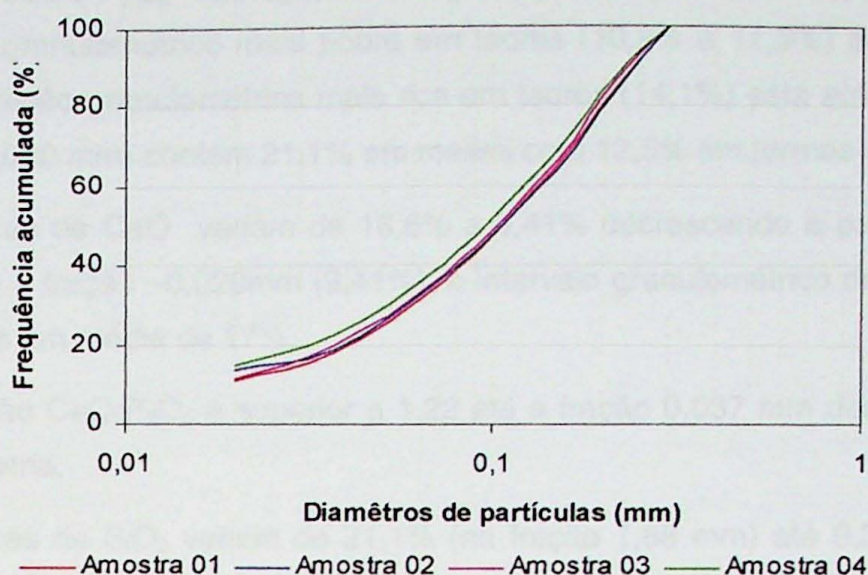


Figura 12 - Distribuição granulométrica dos produtos de moagem

Verifica-se que todas as amostras apresentam comportamento semelhante, cerca de 10 a 15% do material apresenta granulação inferior a 0,020 mm.

Os intervalos referentes a 20 e 80% em massa passante correspondem, respectivamente, a dimensões de 0,037 a 0,20 mm.

Conclui-se, dessa forma, que a segunda etapa de preparação foi bastante eficiente, gerando um pequena proporção em massa de ultrafinos (<20 μ m)

7.2.1.1 Amostra 1

A distribuição dos teores por fração granulométrica da amostra 1 está exposta na Tabela 7

Tabela 7 - Distribuição de teores por fração – Amostra 1 (Tal qual).

Fração (mm)	% em massa retido ac.abaixo		Teores (%)									Distribuição na amostra(%)						
			P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF	CaO/ P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO
+1,68	25,4	74,6	13,6	17,8	21,2	1,03	30,2	0,91	3,88	3,12	4,19	1,31	26,9	30,2	34,2	26,5	13,1	17,9
-1,68+0,84	10,5	64,1	12,4	16,2	16,4	0,94	35,5	0,83	5,14	4,45	3,66	1,31	10,1	11,4	10,9	12,9	4,9	10,6
-0,84+0,297	14,6	49,5	14,1	18,6	17,3	1,25	28,9	1,31	5,18	4,55	4,49	1,32	16,0	18,1	16,0	14,6	10,8	15,0
-0,297+0,210	4,71	44,8	12,6	16,5	18,4	1,45	27,6	2,14	6,15	4,62	5,46	1,31	4,6	5,2	5,5	4,5	5,7	4,9
-0,210+0,149	4,83	40,0	12,1	15,4	17,2	1,67	29,3	1,96	7,12	5,26	5,29	1,27	4,5	5,0	5,3	4,9	5,4	5,7
-0,149+0,074	7,33	32,6	11,3	14,0	15,0	1,97	29,3	2,27	8,56	5,52	5,91	1,24	6,4	6,9	7,0	7,4	9,4	9,1
-0,074+0,037	4,80	27,8	10,9	13,3	13,4	2,47	25,3	3,98	8,18	5,01	9,29	1,22	4,1	4,3	4,1	4,2	10,8	5,4
-0,037+0,020	6,65	21,1	12,8	12,8	10,6	3,00	25,9	2,83	7,47	6,20	6,01	1,00	6,6	5,7	4,5	5,9	10,7	9,3
-0,020	21,1		12,5	9,41	9,31	4,08	26,3	2,43	2,95	4,60	10,10	0,75	20,6	13,3	12,5	19,2	29,1	22,0
Total calculado	100,0		12,8	15,0	15,8	2,02	29,0	1,76	5,06	4,43	6,03	1,17	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

A análise granulométrica permitiu concluir que 50,5% em massa da amostra ficaram retidos na peneira de 0,3 mm e 21,1% abaixo de 0,020 mm.

Os teores de P_2O_5 não apresentam grandes variações (de 10,9 a 14,1 %), sendo que o intervalo granulométrico mais pobre em teores (10,9% a 11,3%) está entre 0,074 e 0,037 mm e a fração granulométrica mais rica em teores (14,1%) está acima de 0,3 mm. O material fino (-0,020 mm) contém 21,1% em massa com 12,5% em termos de P_2O_5 contido.

Os teores de CaO variam de 18,6% a 9,41% decrescendo a partir da fração 0,3 mm (18,6%) até a fração -0,020mm (9,41%), o intervalo granulométrico de 1,68 a 0,84 mm apresenta teores em média de 17%.

A relação CaO/ P_2O_5 é superior a 1,22 até a fração 0,037 mm decrescendo abaixo desta granulometria.

Os teores de SiO_2 variam de 21,1% (na fração 1,68 mm) até 9,31% (na fração -0,020 mm), decrescendo em direção aos finos. O Al_2O_3 apresenta valores variando de 0,94 a 4,08% (da fração 0,84 mm até a fração -0,020 mm) com aumento em direção aos finos.

O Fe_2O_3 apresenta valores variando de 25,3 a 35,5%, sendo que o intervalo granulométrico mais rico em teores (30,2 a 35,5%) está entre as frações de 1,68 a 0,84 mm e o intervalo granulométrico mais pobre em teores (25,3 a 25,9%) está entre as frações de 0,037 a 0,020 mm.

Os teores de TiO_2 crescem abaixo da fração 1,68 mm (3,88%) até a de 0,074 mm (8,56%); abaixo desta os teores decrescem, chegando a 2,95% na fração -0,020 mm.

Os teores de MgO apresentam variações de 0,91 a 3,98% sendo que o intervalo granulométrico mais rico em teores (2,43 a 3,98%) está entre as frações -0,020 mm e 0,037 mm e o intervalo granulométrico mais pobre em teores (0,91 a 1,31%) situa-se entre as frações de 1,68 e 0,3 mm.

O BaO apresenta valores crescentes em direção aos finos variando de 3,88 a 7,47%, entre o intervalo granulométrico de 1,68 a 0,020mm, sendo que a fração -0,020 mm apresenta teor de 4,60%.

Na Tabela 8 está exposta a distribuição dos teores por fração do produto de moagem da amostra 1.

Tabela 8 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 1

Fração (mm)	% em massa		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição na amostra(%)					
	ensaio	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	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO	
-0,297+0,210	16,2	8,20	13,2	17,4	21,7	0,81	32,1	0,86	4,19	3,19	4,02	1,32	8,3	9,3	11,3	8,9	5,9	5,6	
-0,210+0,149	19,1	9,66	13,2	17,5	20,6	0,79	32,7	0,65	4,53	3,65	2,82	1,33	9,7	11,0	12,7	10,7	5,2	7,6	
-0,149+0,074	28,1	14,2	13,5	17,9	19,6	0,74	32,3	0,64	4,65	3,79	3,66	1,33	14,6	16,6	17,8	15,5	7,6	11,6	
-0,074+0,037	18,6	9,40	14,0	18,4	18,0	0,86	31,7	0,67	4,87	4,36	4,01	1,31	10,0	11,3	10,8	10,1	5,2	8,8	
-0,037+0,020	6,91	3,49	14,5	19,0	16,4	1,18	30,2	0,68	5,05	4,97	2,58	1,31	3,9	4,3	3,7	3,6	2,0	3,7	
-0,020	11,0	5,58	15,5	19,6	13,9	1,22	27,3	0,65	4,53	5,16	4,71	1,26	6,6	7,1	4,9	5,2	3,0	6,2	
Total calculado	100,0	50,5	13,8	18,1	19,0	0,87	31,5	0,69	4,61	4,00	3,66	1,31	53,1	59,7	61,2	53,9	28,9	43,5	

A análise granulométrica permite indicar que 16% em massa do material estão retidos em 0,210 mm e aproximadamente 11% passante em 0,020mm.

Os teores de P_2O_5 variam de 13,2 a 15,5% com aumento em direção aos finos. O mesmo comportamento é observado para o CaO variando de 17,4 a 19,6%. A relação CaO/ P_2O_5 é superior a 1,26 para todas as frações granulométricas, chegando a 1,33 no intervalo granulométrico de 0,149 a 0,074 mm.

Os valores de SiO_2 decrescem em direção aos finos, variando de 21,7% na fração 0,210 a 13,9% na fração -0,020 mm. Os teores de Fe_2O_3 apresentam o mesmo comportamento variando de 32,1 a 27,3%, assim como os teores de MgO variando de 0,86 a 0,65%.

Os teores de Al_2O_3 apresentam o intervalo mais pobre em teores (0,74 a 0,81%) entre frações de 0,074 e 0,210 mm e o intervalo mais rico em teores (0,86 a 1,22%) entre frações de 0,037 e -0,020 mm.

O BaO apresenta valores de 3,19 a 5,16%, com aumento em direção aos finos. O TiO_2 apresenta comportamento semelhante com teores variando de 4,19 a 5,05%, sendo que a fração -0,020 mm apresenta teor de 4,53%.

Na Tabela 9 está exposta a distribuição dos teores por fração da amostra 1 resultante da composição dos finos naturais com o produto de moagem.

Tabela 9 - Distribuição de teores por fração da composição dos finos naturais com o produto da moagem – Amostra 1

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição na amostra(%)						
	retido	ac.abaixo	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	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO		
-0,297+0,210	12,9	87,1	13,0	17,1	20,5	1,04	30,5	1,33	4,91	3,71	4,55	1,32	12,9	14,5	16,8	13,4	11,6	10,5		
-0,210+0,149	14,5	72,6	12,8	16,8	19,5	1,08	31,6	1,09	5,39	4,19	3,64	1,31	14,3	16,0	18,0	15,6	10,6	13,3		
-0,149+0,074	21,5	51,1	12,8	16,6	18,0	1,16	31,3	1,19	5,98	4,38	4,43	1,30	21,1	23,5	24,7	22,9	17,0	20,7		
-0,074+0,037	14,2	36,9	13,0	16,7	18,0	1,18	30,5	1,48	5,54	4,10	5,08	1,29	14,1	15,6	14,9	14,3	16,1	14,2		
-0,037+0,020	10,1	26,7	13,4	14,9	12,6	2,37	27,4	2,09	6,64	5,78	4,83	1,12	10,5	10,0	8,1	9,5	12,6	13,0		
-0,020	26,7		13,1	11,5	10,3	3,48	26,5	2,06	3,28	4,72	8,97	0,88	27,2	20,4	17,4	24,3	32,1	28,2		
Total calculado	100,0		13,0	15,2	15,71	1,91	29,3	1,60	5,10	4,53	5,78	1,17	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		

A análise granulométrica permite indicar que 63% em massa do material estão retidos em 0,037 mm e cerca de 27% em massa corresponde a fração -0,020 mm.

Os teores de P_2O_5 variam de 12,8 a 13,4%. O CaO apresenta teores variando de 17,1 a 11,5% decrescendo em direção aos finos. A relação CaO/ P_2O_5 é superior a 1,29 no intervalo granulométrico entre as frações de 0,210 e 0,037 mm, variando de 0,88 a 1,12 para as frações abaixo de 0,037 mm.

Os teores de SiO_2 decrescem em direção aos finos, variando de 20,5% na fração retida em 0,210 mm a 10,3% nos finos (-0,020 mm). Os teores de Fe_2O_3 apresentam o mesmo comportamento variando de 30,5 a 26,5%.

O Al_2O_3 apresenta valores crescentes em direção aos finos variando de 1,04 (na fração 0,210 mm) a 3,48% (-0,020 mm). Comportamento semelhante é observado no MgO variando de 1,09 a 2,09.

O BaO apresenta variações de 3,71 a 5,78% aumentando em direção aos finos (-0,020 mm), sendo que a fração -0,020 mm apresenta teor de 4,72%. O TiO_2 apresenta comportamento semelhante com teores variando de 4,91 a 6,64%, sendo que a fração -0,020 mm apresenta teor de 3,28%.

7.2.1.2 Amostra 2

A distribuição de teores por fração tal qual da amostra 2 está apresentada na Tabela 10

Tabela 10 - Distribuição de teores por fração – Amostra 2 (Tal qual).

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)									CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição na amostra(%)						
	retido	ac.abaixo	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	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO	
+1,68	13,5	86,5	3,89	13,6	25,7	0,48	25,7	8,52	3,64	1,76	15,8	3,50	10,7	13,8	15,6	18,3	8,0	15,8	
-1,68+0,84	7,24	79,2	5,83	14,1	24,4	0,53	28,1	7,39	4,34	1,59	12,8	2,42	8,6	7,6	7,9	10,7	3,7	7,7	
-0,84+0,297	10,8	68,5	7,36	17,4	20,8	0,74	22,8	8,95	3,88	1,60	14,5	2,36	16,1	14,0	10,0	12,9	6,7	11,5	
-0,297+0,210	4,74	63,7	7,65	19,3	16,5	1,15	18,9	11,1	3,85	1,97	17,8	2,52	7,4	6,8	3,5	4,7	3,6	6,2	
-0,210+0,149	5,50	58,2	6,72	17,6	16,9	1,71	16,8	12,5	4,45	1,93	18,5	2,62	7,5	7,2	4,2	4,9	4,8	7,1	
-0,149+0,074	11,2	47,0	5,45	15,9	18,9	1,72	15,8	14,9	5,32	1,55	19,4	2,92	12,5	13,4	9,5	9,4	11,6	11,6	
-0,074+0,037	14,1	32,9	4,71	13,0	20,4	1,98	15,4	16,7	5,88	1,12	19,0	2,76	13,5	13,7	12,9	11,4	16,3	10,5	
-0,037+0,020	7,06	25,9	4,26	11,5	21,9	1,80	15,8	17,8	5,66	1,31	17,4	2,70	6,1	6,1	6,9	5,9	8,7	6,2	
-0,020	25,9		3,32	8,96	25,5	2,10	16,0	20,4	2,00	1,37	17,8	2,70	17,5	17,3	29,5	21,8	36,6	23,6	
Total calculado	100,0		4,91	13,4	22,3	1,47	19,0	14,4	3,99	1,50	17,2	2,72	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Os teores de P_2O_5 apresentam variações de 3,89 a 7,36%, no intervalo granulométrico entre 1,68 e 0,297 mm, sendo que a partir de 0,210 mm (7,65%) até o a fração 0,020 mm (3,32%) os teores de P_2O_5 decrescem. Salienta-se que o material fino (-0,020 mm) representa 26% em massa e 18% da distribuição de fósforo na amostra.

O CaO apresenta teores variando de 13,6 a 8,96% com tendência decrescente em direção aos finos. A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ é superior a 2,36 para todas as frações granulométricas, chegando a 3,50 na fração 1,68 mm.

Os teores de SiO_2 apresentam valores que variam de 16,5 a 25,7%, sendo que o intervalo granulométrico mais pobre em teores (16,5 e 16,9%) está nas frações de 0,210 e 0,149 mm e os maiores teores associadas às frações granulométricas extremas (1,68 mm e -0,020 mm).

O Al_2O_3 apresenta valores de teor que aumentam em direção aos finos, variando de 0,48 (na fração 1,68mm) a 2,10% (na fração -0,020 mm). Comportamento semelhante é observado para os teores de MgO apresentando variações de 8,52 a 20,4%, assim como para o TiO_2 que varia de 3,64 a 5,66%, sendo que a fração -0,020 mm apresenta teor de 2,00%.

Os teores de Fe_2O_3 variam de 28,1 a 15,4% com um tendência decrescente em direção aos finos. O BaO apresenta teores variando de 1,12 a 1,97%, com o intervalo granulométrico de teores mais elevados (1,97 e 1,93%) nas frações de 0,210 e 0,149 mm e o intervalo mais pobre (1,12 e 1,31%) nas frações de abaixo de 0,074 mm.

Na Tabela 11 está exposta a distribuição dos teores por fração da amostra 2 no produto de moagem.

Tabela 11 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 2

Fração (mm)	% em massa		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição na amostra(%)						
	ensaio	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	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO		
-0,297+0,210	17,1	5,40	5,25	14,3	23,6	0,84	27,6	8,44	4,07	1,50	13,7	2,72	5,7	5,7	5,9	7,8	3,2	5,1		
-0,210+0,149	19,3	6,09	5,54	15,3	22,6	0,46	28,0	7,69	4,10	1,70	13,7	2,76	6,8	6,9	6,3	8,9	3,2	6,6		
-0,149+0,074	26,0	8,21	5,72	15,5	22,8	0,50	27,2	7,81	4,11	1,76	13,7	2,71	9,4	9,4	8,6	11,7	4,4	9,1		
-0,074+0,037	18,7	5,91	5,88	15,1	22,7	0,81	25,0	8,24	4,18	1,76	13,9	2,57	7,0	6,6	6,2	7,7	3,4	6,6		
-0,037+0,020	5,29	1,67	5,61	14,7	23,5	0,89	23,6	8,77	4,36	1,98	13,2	2,62	1,9	1,8	1,8	2,1	1,0	2,1		
-0,020	13,5	4,25	5,54	16,2	24,5	0,58	17,2	10,70	3,15	2,03	17,0	2,92	4,7	5,1	4,8	3,8	3,1	5,5		
Total calculado	100,0	31,5	5,60	15,2	23,1	0,64	25,5	8,42	4,00	1,75	14,2	2,72	35,5	35,4	33,5	42,0	18,4	34,9		

A análise granulométrica permite dizer que 17,1% da amostra estão retidos em 0,210 mm e 19% da amostra passantes em 0,020 mm.

Os teores de P_2O_5 apresentam pouca variação de 5,25 a 5,88% em todo o intervalo granulométrico, assim como os de CaO que apresenta variações de 14,3 a 16,2% e os de SiO_2 que apresenta variações de 22,6 a 24,5%. A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ é superior a 2,57 em todo intervalo granulométrico, chegando a 2,92% no material fino (-0,020 mm).

O Al_2O_3 apresenta teores variando de 0,46 a 0,89%, sendo que o intervalo granulométrico mais pobre em teores (0,46 a 0,50%) está compreendido no intervalo de 0,210 a 0,074 mm.

Os teores de Fe_2O_3 apresentam valores de 17,2 a 28,0%, com uma queda gradativa em direção aos finos (17,2% na fração -0,020 mm).

O MgO apresenta um aumento gradativo de teores em direção aos finos, variando de 7,69 (na fração 0,149 mm) a 10,7% (na fração -0,020 mm), sendo que a fração retida em 0,210 mm apresenta teor de 8,44%. O mesmo comportamento é observado para o BaO ,

variando de 4,07 (na fração 0,210 mm) a 2,03% (na fração -0,020mm); TiO_2 apresenta variações de 4,07% a 4,36%, com queda de teores para a fração -0,020 mm (3,15%).

Na Tabela 12 está exposta o resultado da distribuição dos teores por fração da composição dos finos com o produto de moagem da amostra 2.

Tabela 12 – Distribuição de teores por fração da composição dos finos naturais com o produto da moagem – Amostra 2

Fração (mm)	% em massa		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição na amostra(%)						
	retido	ac abaixo	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	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO		
-0,297+0,210	10,1	89,9	6,4	16,6	20,3	0,98	23,5	9,68	3,97	1,72	15,6	2,61	13,1	12,5	9,4	12,5	6,8	11,3		
-0,210+0,149	11,6	78,3	6,1	16,4	19,9	1,05	22,7	9,97	4,27	1,81	16,0	2,69	14,3	14,1	10,5	13,8	8,0	13,6		
-0,149+0,074	19,5	58,8	5,6	15,7	20,5	1,21	20,6	11,9	4,81	1,64	17,0	2,83	21,9	22,8	18,1	21,0	16,1	20,7		
-0,074+0,037	20,0	38,8	5,1	13,9	21,3	1,43	19,7	13,4	5,23	1,36	17,0	2,75	20,5	20,3	19,0	19,1	19,7	17,1		
-0,037+0,020	8,7	30,1	4,5	12,1	22,2	1,63	17,3	16,1	5,41	1,44	16,6	2,68	8,0	7,9	8,7	7,9	9,7	8,2		
-0,020	30,1		3,6	10,0	25,4	1,89	16,2	19,0	2,16	1,46	17,7	2,75	22,2	22,4	34,3	25,6	39,7	29,0		
Total calculado	100,0		4,9	13,4	22,1	1,49	19,0	14,4	4,03	1,53	17,0	2,72	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		

A análise granulométrica permite dizer que 61% da amostra estão retidos em 0,037 mm e que 30% em massa constituem o passante em 0,020 mm.

Os teores de P_2O_5 decrescem em direção aos finos, apresentando valores que variam de 6,4 (na fração 0,21 mm) a 3,6% (em -0,020 mm). Observa-se que o passante em 0,020 mm contém 22% do fósforo da amostra e representa 30% em massa.

Apresentando o mesmo padrão de comportamento que os teores de P_2O_5 , o CaO varia de 16,6 a 10,0%. A relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ é superior a 2,61 em todo o intervalo granulométrico, atingindo valores de 2,83 na fração de 0,074 mm.

Os teores de Fe_2O_3 variam de 16,2 a 23,5%, com teores diminuindo gradativamente em direção aos finos. O BaO apresenta decréscimo de teores da fração 0,21 mm (1,72%) até 0,037 mm (1,36%), aumentando até 1,46% no passante em 0,020 mm.

A SiO_2 apresenta teores variando em torno de 19,9 a 25,4%, com teores aumentando gradativamente em direção aos finos. Comportamento semelhante é observado no Al_2O_3 que varia de 0,98 a 1,89%; MgO que varia de 9,68 a 19,0%.

O TiO_2 apresenta teores de 3,9% (na fração 0,21 mm) até 5,41% (na fração 0,020 mm), com significativo decréscimo junto aos finos (2,16% na fração -0,020 mm).

7.2.1.3 Amostra 3

Na Tabela 13 estão expostos os resultados da distribuição dos teores por fração da amostra 3.

Tabela 13 - Distribuição de teores por fração – Amostra 3 (Tal qual).

Fração (mm)	% em massa retido ac.abaixo		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	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	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO		
+1,68	22,2	77,8	8,62	11,3	23,4	1,01	40,2	0,92	7,22	0,79	2,73	1,31	21,8	24,4	23,5	24,9	17,2	21,0		
-1,68+0,84	10,5	67,2	7,75	10,2	23,7	0,90	42,1	1,02	7,93	0,67	2,55	1,32	9,3	10,4	11,3	12,4	9,0	8,4		
-0,84+0,297	14,0	53,2	8,42	10,9	26,1	1,04	37,4	1,03	8,31	0,56	2,50	1,29	13,4	14,8	16,5	14,6	12,1	9,4		
-0,297+0,210	4,70	48,5	9,01	11,4	24,4	1,33	33,9	1,39	8,92	0,97	3,53	1,27	4,8	5,2	5,2	4,4	5,5	5,4		
-0,210+0,149	5,09	43,4	9,02	11,4	23,5	1,58	34,3	1,26	9,96	0,68	3,43	1,26	5,2	5,6	5,4	4,9	5,4	4,1		
-0,149+0,074	7,81	35,6	8,92	11,0	22,5	1,89	33,3	1,38	11,3	0,69	3,76	1,23	7,9	8,3	8,0	7,3	9,0	6,4		
-0,074+0,037	7,89	27,7	8,95	10,5	22,5	2,66	30,0	1,55	11,4	0,81	5,09	1,17	8,0	8,0	8,0	6,6	10,3	7,6		
-0,037+0,020	4,62	23,1	9,38	10,0	22,6	3,76	28,1	1,59	9,70	1,05	5,97	1,07	4,9	4,5	4,7	3,6	6,2	5,8		
-0,020	23,1		9,40	8,35	16,6	5,88	33,0	1,31	4,77	1,15	9,59	0,89	24,7	18,7	17,4	21,3	25,4	31,8		
Total calculado	100,0		8,80	10,3	22,1	2,50	35,8	1,19	7,86	0,84	4,75	1,17	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		

A análise granulométrica indica que 47% em massa do material ficaram retidos em 0,3 mm e 28% constituem o produto passante em 0,037 mm.

Os teores de P₂O₅ variam de 7,8 a 9,4%, com intervalo mais rico em teores situando-se abaixo de 0,037 mm, sendo que os finos contém 28% em massa do ensaio.

O CaO apresenta o intervalo mais rico entre as frações 0,210 e 0,149 mm, com teor de 11,4%, sendo que abaixo dessa fração os valores diminuem gradativamente em direção aos finos (8,4%) nos finos (-0,020 mm). A relação CaO/P₂O₅ varia de 0,89 a 1,32, diminuindo gradativamente em direção aos finos.

O SiO₂ apresenta teores diminuindo gradativamente em direção aos finos, variando de 26,1 a 16,6%. O mesmo comportamento é observado para o Fe₂O₃ que varia de 42,1 a 28,1%.

O Al₂O₃ apresenta comportamento inverso ao SiO₂ apresentando valores que crescem gradativamente em direção aos finos, variando de 1,01 a 5,88% nos finos, os quais são responsáveis por 54% do alumínio presente nesta amostra. O TiO₂ apresenta comportamento algo semelhante variando de 7,22% (na fração 1,68 mm) a 11,4% (na fração 0,037 mm), sendo que a partir desta fração os valores diminuem em direção aos finos (4,77% nos finos, -0,020 mm).

O MgO apresenta os maiores teores (1,55 e 1,59%) no intervalo acima de 0,150 mm e os menores teores (0,92 a 1,03%), no intervalo acima de 0,297 mm. O BaO apresenta

o intervalo mais rico para as frações abaixo de 0,037 mm, variando de 1,05 a 1,15%, e os menores valores entre as frações de 0,84 e 0,297 mm.

Na Tabela 14 estão expostos os resultados da distribuição dos teores por fração no produto de moagem da amostra 3.

Tabela 14 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 3

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição na amostra (%)						
	ensaio	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	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO		
-0,297+0,210	8,8	4,7	7,7	10,3	24,9	1,02	41,0	1,02	7,64	0,49	2,29	1,34	4,8	5,2	5,2	4,4	5,5	6,0		
-0,210+0,149	9,6	5,1	7,6	10,2	26,2	0,75	41,5	0,91	7,56	0,54	1,94	1,34	5,2	5,6	5,4	4,9	5,4	9,0		
-0,149+0,074	14,7	7,8	7,8	10,4	25,7	0,74	41,7	0,89	7,81	0,51	1,80	1,34	7,9	8,3	8,0	7,3	9,0	12,2		
-0,074+0,037	14,8	7,9	8,2	11,0	23,6	0,85	41,9	0,94	8,27	0,49	2,20	1,33	8,0	8,0	8,0	6,6	10,3	7,6		
-0,037+0,020	8,7	4,6	9,1	11,9	22,5	1,10	39,7	0,94	8,67	0,57	2,03	1,31	4,9	4,5	4,7	3,6	6,2	3,9		
-0,020	43,4	23,1	10,8	13,4	20,9	1,42	34,7	0,81	8,20	0,64	3,21	1,24	24,7	18,7	17,4	21,3	25,4	0,0		
Total calculado	100,0	53,2	9,2	11,9	23,0	1,11	38,4	0,88	8,08	0,57	2,55	1,29	44,4	49,6	51,4	51,9	38,3	38,8		

Observa-se que 9% em massa do material estão retidos na peneira 0,210 mm e 43% em massa constituem o material passante em 0,020 mm.

Os teores de P₂O₅ variam de 7,7 a 9,1%, aumentando gradativamente em direção aos finos. O mesmo comportamento é observado para o CaO que varia de 10,2 a 11,9%.

A relação CaO/P₂O₅ é superior a 1,31 para todo o intervalo granulométrico, chegando a 1,34 nas frações mais grossas.

Os teores de SiO₂ diminuem gradativamente em direção aos finos, variando de 26,2 a 22,5%. O mesmo comportamento é observado para o MgO que varia de 1,02 a 0,89%.

O Al₂O₃ apresenta teores variando de 0,74 a 1,10%. Os teores de Fe₂O₃ apresentam pequena variação de 41,9% (na fração 0,037 mm) a 39,7% (na fração -0,020 mm), com uma média 41% para todo o intervalo granulométrico. O mesmo comportamento é apresentado para o MgO, com média de teores de 1%, e para o BaO com média de 0,5%.

Na Tabela 15 estão expostos os resultados da composição dos finos naturais com o produto de moagem da amostra 3.

Tabela 15 - Distribuição de teores por fração da composição dos finos naturais com o produto da moagem – Amostra 3

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição na amostra(%)						
	retido	ac.abaixo	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	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO		
-0,297+0,210	11,4	88,6	7,69	10,3	24,9	1,02	41,0	1,02	7,64	0,49	2,29	1,34	11,9	13,1	13,6	12,9	12,3	11,5		
-0,210+0,149	14,2	74,3	7,61	10,2	26,2	0,75	41,5	0,91	7,56	0,54	1,94	1,34	14,7	16,2	17,4	16,4	13,7	13,2		
-0,149+0,074	20,9	53,4	7,75	10,4	25,7	0,74	41,7	0,89	7,81	0,51	1,80	1,34	21,7	23,8	24,8	23,9	20,7	18,7		
-0,074+0,037	16,4	36,9	8,24	10,6	24,9	0,78	41,8	0,91	7,98	0,50	1,95	1,29	17,6	18,7	18,1	17,5	18,3	15,3		
-0,037+0,020	8,32	28,6	9,07	11,9	22,5	1,10	39,7	0,94	8,67	0,57	2,03	1,31	9,5	9,5	8,9	8,1	9,6	9,7		
-0,020	28,6		8,72	10,8	16,9	1,15	28,0	0,65	6,62	0,52	2,59	1,24	24,7	18,7	17,4	21,3	25,4	31,8		
Total calculado	100,0		8,19	10,7	22,5	0,94	37,5	0,85	7,56	0,52	2,19	1,31	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		

A análise granulométrica permite dizer que 11% em massa do material estão retidos na peneira abertura de 0,21 mm e 29% em massa constituem o passante em 0,020 mm.

O P₂O₅ apresenta aumento gradativo de teores em direção aos finos, variando de 7,7 a 9,1%. O passante em 0,020 mm contém 25% do fósforo presente. Os teores de CaO apresentam comportamento semelhante variando de 10,3 a 11,9%. A relação CaO/P₂O₅ varia em torno de 1,24 a 1,34.

Os teores de SiO₂ variam de 16,9 a 26,2%, diminuindo gradativamente em direção aos finos. O mesmo comportamento é observado no Fe₂O₃ que varia de 41,0 a 28,0%.

Os teores de Al₂O₃ decrescem gradativamente a partir da fração 0,210 mm (1,15%) até a fração 0,074 mm (0,74%), aumentando a partir desta fração em direção aos finos (1,15 na fração -0,020 mm).

O MgO apresenta teores de 0,65 (na fração -0,020 mm) a 1,02% (na fração 0,210 mm). O BaO apresenta teor médio de 0,52%, com valores relativamente homogêneos nas frações analisadas.

7.2.1.4 Amostra 4

A Tabela 16 apresenta a distribuição dos teores por fração granulométrica da amostra 4.

Tabela 16 - Distribuição de teores por fração – Amostra 4 (Tal qual).

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição na amostra(%)						
	retido	ac.abaixo	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	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO		
+1,68	19,2	80,8	8,99	17,9	14,1	0,69	27,1	7,87	7,18	0,70	11,9	1,99	22,2	24,3	14,9	21,8	13,7	19,5		
-1,68+0,84	8,63	72,1	7,72	14,6	12,6	0,64	35,7	7,09	7,84	0,78	9,13	1,89	8,6	8,9	6,0	12,9	5,5	9,7		
-0,84+0,297	13,1	59,0	8,74	15,7	15,8	1,04	29,5	8,74	7,18	0,62	9,81	1,80	14,7	14,5	11,4	16,1	10,4	11,8		
-0,297+0,210	5,97	53,0	8,04	15,2	17,5	1,50	25,3	10,4	6,38	0,54	11,9	1,89	6,2	6,4	5,7	6,3	5,6	4,7		
-0,210+0,149	6,18	46,9	7,81	15,2	18,7	1,76	21,9	11,8	6,07	0,55	12,9	1,95	6,2	6,6	6,3	5,6	6,6	4,9		
-0,149+0,074	10,4	36,5	7,92	15,5	19,0	1,91	19,7	12,6	6,25	0,58	13,4	1,96	10,6	11,4	10,9	8,6	11,9	8,7		
-0,074+0,037	8,61	27,8	7,48	14,5	19,8	1,93	17,7	12,7	6,68	0,68	14,5	1,94	8,3	8,8	9,4	6,4	9,9	8,5		
-0,037+0,020	4,65	23,2	7,59	13,7	21,7	1,95	16,9	12,6	6,95	0,76	12,9	1,81	4,5	4,5	5,5	3,3	5,3	5,1		
-0,020	23,2		6,30	8,98	23,4	2,81	19,8	14,8	3,67	0,81	13,6	1,43	18,8	14,7	29,8	19,2	31,1	27,2		
Total calculado	100,0		7,8	14,2	18,2	1,63	24,0	11,0	6,16	0,69	12,3	1,82	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		

Cerca de 41% em massa do material ficaram retidos na peneira 0,3 mm sendo que 28% referem-se ao material passante em 0,037 mm.

Os teores de P₂O₅ apresentam um tendência decresce gradativamente em direção aos finos, variando de 8,99 a 6,30%. O mesmo comportamento é observado para o CaO que varia de 8,98 a 17,9%.

Acima da fração 0,020 mm a relação CaO/P₂O₅ varia de 1,81 a 1,99, sendo que os finos apresentam relação de 1,43.

O SiO₂ apresenta teores que crescem gradativamente em direção aos finos, variando de 12,6 a 23,4%. Os teores de Al₂O₃ apresenta comportamento semelhante variando de 0,64 a 2,81%, assim como o MgO que varia de 7,09 a 14,8%.

Os teores de Fe₂O₃ também apresentam tendência decrescente gradativa, variando de 35,7 a 16,9%, sendo as frações extremas 1,68 mm e -0,020 mm não seguem esse comportamento, apresentando respectivamente teores de 27,1% e 19,8%.

O TiO₂ apresenta teores que decrescem gradativamente em direção aos finos, variando de 7,18 a 3,67%. Os teores de BaO variam de 0,54 a 0,81%, sendo que as frações extremas apresentam os maiores teores.

A Tabela 17 mostra os teores por faixa granulométrica do produto de moagem em 0,3 mm da amostra 4.

Tabela 17 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 4

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)									CaO/ Distribuição na amostra (%)						
	ensaio	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	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO
-0,297+0,210	13,2	5,4	7,64	14,6	16,4	1,44	31,1	9,00	6,86	0,58	9,08	1,91	5,2	5,4	4,9	6,8	4,4	5,5
-0,210+0,149	18,1	7,4	8,27	15,8	13,7	0,59	35,0	7,02	7,60	0,60	6,34	1,91	7,7	8,1	5,6	10,5	4,7	7,9
-0,149+0,074	27,9	11,5	8,72	16,8	13,7	0,54	33,3	7,13	7,64	0,64	9,48	1,93	12,4	13,2	8,6	15,4	7,4	12,9
-0,074+0,037	18,2	7,5	9,81	18,1	13,9	0,57	32,3	7,71	7,82	0,18	7,79	1,85	9,1	9,3	5,7	9,7	5,2	2,4
-0,037+0,020	7,6	3,1	9,60	18,0	13,8	0,63	28,0	7,99	8,09	0,75	10,00	1,88	3,7	3,9	2,4	3,5	2,3	4,1
-0,020	14,9	6,1	9,74	18,7	15,0	0,41	20,0	9,98	7,18	0,76	12,7	1,92	7,4	7,8	5,0	4,9	5,5	8,2
Total calculado	100,0	41,0	8,9	16,9	14,29	0,66	30,8	7,95	7,53	0,57	9,07	1,90	45,5	47,7	32,3	50,7	29,6	41,0

Cerca de 13% em massa do material estão retidos em 0,210mm e 15% em massa passantes em 0,020 mm.

Os teores de P₂O₅ aumentam gradativamente em direção aos finos, variando de 7,64 a 9,74%, sendo que os finos (-0,020 mm) são responsáveis por 16,3% do fósforo presente no produto de moagem. O CaO apresenta comportamento semelhante variando de 14,6 a 18,7%. A relação CaO/P₂O₅ é superior a 1,85 para todo o intervalo granulométrico.

O SiO₂ apresenta uma média de teores de 13,7% para o intervalo de 0,149 a 0,020 mm, sendo que as frações extremas apresentam os maiores teores (16,4 e 15,0%). Comportamento semelhante é observado para o MgO com média de teores de 7,46%, e frações extremas mostrando teores de 9,00 e 9,98%.

Os teores de Al₂O₃ apresentam tendência decrescente gradativa em direção aos finos, variando de 1,44 a 0,41%. O Fe₂O₃ apresenta comportamento semelhante variando de 35,0 a 20,0%.

O TiO₂ apresenta teores que aumentam gradativamente em direção aos finos, variando de 6,86 a 8,09%, sendo que a fração -0,020 mm é de 7,18%. O mesmo comportamento é observado para o BaO que varia de 0,58 a 0,76%, com exceção da fração -0,020 mm (0,18%).

Na Tabela 18 tem-se a distribuição dos teores por faixa granulométrica da composição dos finos naturais com o produto de moagem da amostra 4.

Tabela 18 - Distribuição de teores por fração no produto da moagem - Amostra 4

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)									CaO/	Distribuição na amostra(%)					
	retido	ac.abaixo	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	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO
-0,297+0,210	11,4	88,6	7,85	14,9	17,0	1,47	28,1	9,73	6,61	0,56	10,6	1,90	11,3	11,8	10,6	13,1	10,0	10,2
-0,210+0,149	13,6	75,0	8,06	15,5	16,0	1,12	29,1	9,19	6,91	0,58	9,3	1,93	13,9	14,7	12,0	16,1	11,3	12,8
-0,149+0,074	21,9	53,1	8,34	16,2	16,2	1,19	26,8	9,73	6,98	0,61	11,3	1,94	23,0	24,6	19,5	23,9	19,3	21,6
-0,074+0,037	16,1	37,1	8,56	15,8	16,3	1,14	26,6	9,52	7,23	0,66	11,6	1,85	17,4	18,1	15,1	16,0	15,1	10,8
-0,037+0,020	7,8	29,3	8,40	15,4	18,5	1,42	21,4	10,7	7,41	0,76	11,7	1,84	8,3	8,3	7,9	6,8	7,6	9,2
-0,020	29,3		7,02	11,0	21,7	2,31	19,8	13,8	4,40	0,80	13,4	1,57	26,2	22,5	34,9	24,1	36,6	35,3
Total calculado	100,0		7,9	14,4	18,2	1,58	24,4	11,0	6,24	0,64	11,62	1,82	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Na composição destes produtos têm-se aproximadamente 11% em massa do material retido na peneira com abertura de 0,210 mm e 29% em massa corresponde ao passante em 0,020 mm.

Os teores de P₂O₅ variam de 7,02 a 8,56% sendo que as frações extremas apresentam os menores teores. O CaO varia de 11,0 (em -0,020 mm) a 16,2% (na fração 0,074 mm), com uma média de 15,4% para as demais frações.

A relação CaO/P₂O₅ é superior a 1,84 para todo o intervalo granulométrico, com exceção do passante em 0,020 mm (1,57%).

7.3 SEPARAÇÕES MINERAIS

As separações minerais foram efetuadas com o objetivo de auxiliar não só na determinação da composição mineralógica das amostras estudadas, como também das características da apatita, tais como liberação, impregnação superficial e partição do fósforo.

Seguindo o mesmo objetivo de interpretação feito na avaliação da distribuição de teores por fração, estes ensaios foram efetuados a partir da composição dos finos naturais com o produto de moagem. Na sequência, são apresentados os resultados da das separações minerais realizadas.

7.3.1 Amostra 1

Os resultados das separações minerais efetuadas a partir da composição dos finos naturais com o produto de moagem da amostra 1 estão expostos na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de separações minerais - Amostra 1, composição dos finos naturais com o produto de moagem

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)										CaO/ P ₂ O ₅	Distribuição na amostra(%)										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	BaO	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO									
-0,297+0,210	Flut	23,3	3,01	1,28	1,82	77,8	1,20	9,12	2,48	0,57	4,70	1,42	2,3	2,6	87,2	6,9	45,7	2,1	0,3	0,4	14,7	0,9	5,3	0,2									
	Afund. Mag 0,0A	24,2	3,13	1,10	1,85	1,90	0,17	83,8	1,43	9,46	0,22	1,68	2,1	2,7	2,2	66,4	27,4	4,2	0,3	0,4	0,4	8,9	3,2	0,4									
	Afund. FRM 0,3A	16,5	2,13	8,80	8,68	6,21	1,94	42,9	0,51	11,3	3,57	0,99	11,5	8,7	4,9	23,2	6,7	15,4	1,5	1,3	0,8	3,1	0,8	1,6									
	Afund. NMAG 0,3A	35,9	4,64	29,7	39,6	3,28	0,45	2,98	0,71	1,36	8,37	1,33	84,1	86,0	5,7	3,5	20,2	78,3	10,8	12,5	1,0	0,5	2,3	8,3									
	Total calculado Total dosado	100,0	12,9	12,7	16,5	20,8	0,80	30,6	1,26	4,78	3,84	4,93	1,30	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	12,9	14,5	16,8	13,4	11,6	10,5									
-0,210+0,149	Flut	21,6	3,13	1,12	1,62	78,4	1,24	8,59	2,51	0,49	4,53	1,45	1,6	1,8	90,4	6,7	53,9	1,1	0,2	0,3	16,2	1,0	5,7	0,1									
	Afund. Mag 0,0A	24,7	3,58	1,24	1,91	1,25	0,18	84,0	1,37	9,46	0,39	1,54	2,1	2,4	1,6	74,4	33,6	4,1	0,3	0,4	0,3	11,6	3,6	0,5									
	Afund. FRM 0,3A	9,56	1,39	7,69	7,23	5,65	1,78	43,3	0,53	13,6	3,11	0,94	5,0	3,6	2,9	14,8	5,0	6,3	0,7	0,6	0,5	2,3	0,5	0,8									
	Afund. NMAG 0,3A	44,1	6,39	30,5	40,3	2,15	0,42	2,62	0,17	1,31	9,53	1,32	91,3	92,2	5,1	4,1	7,4	88,5	13,0	14,8	0,9	0,6	0,8	11,8									
	Total calculado Total dosado	100,0	14,5	14,7	19,3	18,8	0,67	27,9	1,01	4,32	4,75	4,77	1,31	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	14,3	16,0	18,0	15,6	10,6	13,3									
-0,149+0,074	Flut	23,6	5,08	1,10	1,65	78,0	1,38	8,15	2,88	0,39	4,82	1,50	1,6	1,9	84,5	10,8	67,9	0,9	0,3	0,5	20,9	2,5	11,5	0,2									
	Afund. Mag 0,0A	2,76	0,60	1,17	1,81	1,01	0,15	83,9	1,32	8,83	0,84	1,74	1,55	0,2	0,2	0,1	13,0	3,6	0,4	0,0	0,1	0,0	0,6	0,1									
	Afund. FRM 0,3A	21,8	4,68	5,71	5,45	4,27	1,43	47,5	0,74	17,3	2,70	0,95	7,9	5,9	4,3	58,0	16,1	10,5	1,7	1,4	1,1	13,3	2,7	2,2									
	Afund. NMAG 0,3A	51,9	11,2	27,4	35,5	4,67	0,70	6,23	0,24	2,17	9,55	1,30	90,3	91,9	11,1	18,2	12,4	88,2	19,0	21,6	2,8	4,2	2,1	18,3									
	Total calculado Total dosado	100,0	21,5	15,7	20,0	21,8	1,00	17,8	1,00	5,23	5,62	6,15	1,27	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	21,1	23,5	24,7	22,9	17,0	20,7									
-0,074+0,037	Flut	15,2	2,16	1,11	1,83	73,4	2,59	7,51	4,84	0,35	6,94	1,65	1,3	1,8	71,7	3,9	54,3	0,8	0,2	0,3	10,7	0,6	8,7	0,1									
	Afund. Mag 0,0A	18,1	2,57	1,48	2,23	0,98	0,20	82,4	1,31	7,96	1,00	1,32	2,1	2,6	1,1	50,8	17,5	3,7	0,3	0,4	0,2	7,2	2,8	0,5									
	Afund. FRM 0,3A	22,7	3,22	5,40	4,96	4,23	1,54	47,4	1,02	16,9	2,19	0,92	9,6	7,1	6,2	36,5	17,1	10,2	1,4	1,1	0,9	5,2	2,7	1,4									
	Afund. NMAG 0,3A	44,0	6,24	25,3	31,8	7,43	0,87	5,90	0,34	1,69	9,48	1,26	87,0	88,6	21,0	8,8	11,0	85,3	12,3	13,8	3,1	1,3	1,8	12,1									
	Total calculado Total dosado	100,0	14,2	12,8	15,8	15,6	1,16	29,4	1,35	6,07	4,89	8,76	1,23	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	14,1	15,6	14,9	14,3	16,1	14,2									
-0,037+0,020	Flut	13,3	1,35	3,18	4,44	59,1	4,39	8,15	7,18	0,48	10,2	1,40	3,2	4,0	64,0	4,2	56,4	1,1	0,3	0,4	5,2	0,4	7,1	0,1									
	Afund. Mag 0,0A	12,0	1,22	3,21	3,94	1,87	0,48	74,8	1,30	7,11	1,56	1,23	3,0	3,2	1,8	34,5	9,2	3,3	0,3	0,3	0,1	3,3	1,2	0,4									
	Afund. FRM 0,3A	74,7	7,58	16,4	18,3	5,64	1,52	21,4	0,78	7,29	7,17	1,12	93,8	92,8	34,2	61,4	34,4	95,5	9,8	9,3	2,8	5,8	4,3	12,5									
	Afund. NMAG 0,3A	100,0	10,1	13,1	14,7	12,3	1,78	26,0	1,69	6,36	5,60	9,15	1,13	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	10,5	10,0	8,1	9,5	12,6	13,0									
	Total calculado Total dosado	100,0	10,1	13,4	14,9	12,6	2,37	27,4	2,09	6,64	5,78	4,83	1,13	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	10,5	10,0	8,1	9,5	12,6	13,0									
TOTAL + 0,037	Flut	21,2	13,4	1,15	1,71	77,3	1,50	8,37	3,02	0,45	5,07	1,49	1,7	2,0	84,0	7,6	56,6	1,1	1,1	1,4	62,5	5,0	31,3	0,7									
	Afund. Mag 0,0A	15,6	9,9	1,25	1,97	1,37	0,18	83,5	1,37	9,03	0,81	1,13	1,57	1,5	1,8	1,2	46,4	18,4	2,7	0,9	1,2	0,9	30,7	10,2	1,6								
	Afund. FRM 0,3A	18,1	11,4	6,44	6,13	4,79	1,60	46,1	0,75	15,6	2,77	0,95	8,3	6,2	4,5	36,2	12,3	10,3	5,2	4,3	3,3	23,9	6,8	6,1									
	Afund. NMAG 0,3A	45,1	28,4	28,0	36,4	4,48	0,63	4,82	0,32	1,74	9,34	1,30	88,5	90,0	10,4	9,9	12,7	85,8	55,2	62,6	7,7	6,5	7,0	50,5									
	Total calculado	100,0	63,1	14,2	18,2	19,5	0,92	25,4	1,14	5,12	4,89	6,17	1,28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	62,3	69,5	74,4	66,2	55,2	58,8									

O produto flutuado total +0,037 mm corresponde a 21% em massa do ensaio (13,4% na amostra); sendo constituído, essencialmente, por SiO_2 (77%), Fe_2O_3 (8%), MgO (3%) e Al_2O_3 (1,5%).

O produto afundado magnético em 0,0A total +0,037 mm é constituído predominantemente por Fe_2O_3 (84%) e TiO_2 (9%), com quantidades menores de SiO_2 , CaO e P_2O_5 , na ordem de 1,25 a 1,97%. Esse produto corresponde a 16% em massa do ensaio (10% na amostra).

O produto afundado magnético no separador Frantz em intensidade de corrente de 0,3A total +0,037 mm representa 18% em massa do ensaio (11% na amostra); sendo constituído essencialmente por Fe_2O_3 (46%), TiO_2 (16%), SiO_2 , CaO e P_2O_5 , na ordem de 5 a 6%, e BaO (3% em média).

O produto afundado não magnético total +0,037 mm é constituído predominantemente por CaO e P_2O_5 (apatita predominante), com teores da ordem de 36 e 28%, respectivamente. Nos diversos intervalos granulométricos os teores de P_2O_5 variam entre 25,3 a 30,5%. Os principais óxidos associados a este produto são Fe_2O_3 (5%), TiO_2 (2%) e SiO_2 (5%); o BaO apresenta teores de 9% em média, relacionada a presença de barita.

Em termos de distribuição, verifica-se que em média 89% do fósforo estão associados ao produto afundado não magnético; salienta-se que a parcela de P_2O_5 associada ao flutuado (apatita mista) é baixa, variando de 1,3 a 2,3%; já a parcela associada aos magnéticos (apatita impregnada) varia entre 7 e 12%.

7.3.2 Amostra 2

Os resultados das separações minerais efetuadas a partir da composição dos finos naturais com o produto de moagem da amostra 2 estão expostos na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios de separações minerais - Amostra 2, composição dos finos naturais com o produto de moagem

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)							CaO/ P ₂ O ₅	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	BaO
-0,297+0,210	Flut	55,9	1,38	14,8	35,6	1,52	5,28	15,5	0,80	0,42	25,2	10,72	13,2	51,4	92,3	13,4	86,0	16,8
	Afund. Mag 0,0A	21,1	0,64	2,70	2,85	<0,10	79,6	2,86	9,63	0,50	2,21	4,22	2,3	3,5	2,8	76,0	6,0	7,5
	Afund. FRM 0,3A	7,99	6,87	14,0	5,92	<0,10	25,0	5,51	11,6	3,26	17,7	2,04	9,4	7,0	2,2	9,0	4,4	18,6
	Afund. NMAG 0,3A	15,0	29,3	40,9	3,83	<0,10	2,31	2,45	1,17	5,33	4,99	1,40	75,1	38,1	2,7	1,6	3,6	57,1
	Total calculado Total dosado	100,0	5,8 6,4	16,1 16,6	21,6 20,3	... 0,98	22,1 23,5	10,1 9,68	3,58 3,97	1,40 1,72	16,7 15,6	2,75	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-0,210+0,149	Flut	56,3	1,27	15,1	33,5	1,56	5,00	16,4	0,68	0,45	25,6	11,89	13,0	53,5	92,1	13,1	85,7	18,9
	Afund. Mag 0,0A	21,1	0,53	2,55	2,58	<0,10	76,2	2,81	9,96	0,55	5,68	4,81	2,0	3,4	2,7	75,0	5,5	8,7
	Afund. FRM 0,3A	8,13	6,98	12,80	6,06	0,52	28,4	4,94	15,9	2,65	11,5	1,83	10,4	6,6	2,4	10,8	3,7	16,1
	Afund. NMAG 0,3A	14,5	28,2	40,0	4,03	0,13	1,70	3,76	0,80	5,20	9,09	1,42	74,6	36,5	2,9	1,1	5,1	56,3
	Total calculado Total dosado	100,0	5,48 6,10	15,9 16,4	20,5 19,9	0,94 1,05	21,4 22,7	10,8 9,97	3,89 4,27	1,34 1,81	17,9 16,0	2,90	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-0,149+0,074	Flut	58,6	1,96	14,70	32,4	1,56	5,84	17,7	0,61	0,65	25,1	7,50	19,4	54,3	93,7	16,8	88,2	25,1
	Afund. Mag 0,0A	17,5	0,64	2,52	2,29	<0,10	80,1	2,77	10,9	0,65	0,34	3,94	1,9	2,8	2,0	68,8	4,1	7,5
	Afund. FRM 0,3A	9,36	5,18	10,2	5,12	0,30	28,7	5,48	22,7	1,88	9,13	1,97	8,2	6,0	2,4	13,2	4,4	11,6
	Afund. NMAG 0,3A	14,5	28,8	40,2	2,69	<0,10	1,56	2,65	1,32	5,83	7,93	1,40	70,6	36,9	1,9	1,1	3,3	55,8
	Total calculado Total dosado	100,0	5,93 5,56	15,9 15,7	20,3 20,5	0,94 1,21	20,3 20,6	11,8 11,9	4,58 4,81	1,52 1,64	16,8 17,0	2,67	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-0,074+0,037	Flut	65,4	2,22	12,4	30,9	1,79	7,87	19,6	0,78	0,39	24,1	5,59	26,7	59,1	93,9	28,6	93,1	21,4
	Afund. Mag 0,0A	10,9	0,99	2,61	1,73	<0,10	77,5	2,37	10,10	0,72	3,61	2,64	2,0	2,1	0,9	47,0	1,9	6,6
	Afund. FRM 0,3A	13,8	8,53	12,30	3,42	0,44	30,0	3,50	23,9	1,87	5,7	1,44	21,6	12,4	2,2	23,0	3,5	21,6
	Afund. NMAG 0,3A	9,92	27,2	36,7	6,47	<0,10	2,55	2,16	2,01	6,05	8,91	1,35	49,6	26,5	3,0	1,4	1,6	50,4
	Total calculado Total dosado	100,0	5,43 5,06	13,7 13,9	21,5 21,3	1,23 1,43	18,0 19,7	13,8 13,4	5,11 5,23	1,19 1,36	17,82 17,05	2,53	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-0,037+0,020	Flut	72,0	2,12	10,9	30,0	1,64	10,1	20,6	0,88	0,56	23,2	5,14	34,5	66,4	96,8	41,9	95,1	31,5
	Afund. Mag 0,0A	8,04	0,70	4,16	1,62	0,14	71,5	2,27	9,81	1,13	1,48	1,68	4,5	2,8	0,6	33,1	1,2	7,1
	Afund. FRM 0,3A	20,0	13,5	18,2	2,88	0,44	21,8	2,95	18,4	3,94	6,01	1,35	61,0	30,8	2,6	25,1	3,8	61,4
	Afund. NMAG 0,3A	13,1	28,4	39,4	4,12	<0,10	1,98	2,72	1,35	5,66	7,86	1,39	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Total calculado Total dosado	100,0	4,42 4,52	11,8 12,1	22,3 22,2	1,28 1,63	17,4 17,3	15,6 16,1	5,10 5,41	1,28 1,44	18,0 16,6	2,67	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
TOTAL + 0,037	Flut	59,9	1,84	13,97	32,6	1,64	6,33	17,81	0,71	0,49	24,85	7,59	19,1	55,0	93,3	18,8	89,4	21,2
	Afund. Mag 0,0A	16,6	0,69	2,58	2,36	<0,10	78,5	2,71	10,23	0,61	2,72	3,75	2,0	2,8	1,9	65,2	3,7	7,5
	Afund. FRM 0,3A	10,3	6,33	11,99	4,62	<0,10	28,7	4,54	20,8	2,17	9,09	1,68	12,8	8,1	2,3	14,7	3,9	16,6
	Afund. NMAG 0,3A	13,1	28,4	39,4	4,12	<0,10	1,98	2,72	1,35	5,66	7,86	1,39	66,1	34,0	2,6	1,3	2,9	54,7
	Total calculado	100,0	5,7	15,2	20,9	...	20,1	11,95	4,46	1,36	17,32	2,68	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

O produto flutuado total +0,037 mm corresponde a 60% em massa do ensaio (37% na amostra), sendo constituído, essencialmente, por SiO_2 (33%), CaO (14%), Fe_2O_3 (6,3%), MgO (18%), P_2O_5 (2%) e Al_2O_3 (1,6%). A elevada relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ e alto teor de MgO estão relacionados a presença de dolomita.

O produto afundado magnético em 0,0A total +0,037 mm é constituído predominantemente por Fe_2O_3 (79%) e TiO_2 (10%), com quantidades menores de SiO_2 , CaO e MgO , na ordem de 2,4 a 2,7%. Esse produto corresponde a 17% em massa do ensaio (10% na amostra).

O produto afundado magnético em separador Frantz 0,3A, total +0,037 mm, representa 10% em massa do ensaio (6% na amostra); sendo constituído essencialmente por Fe_2O_3 (29%), TiO_2 (21%) e CaO (12%), com quantidades menores de SiO_2 e MgO na ordem de 5% a 7%, P_2O_5 (7%) e BaO (2%).

O produto afundado não magnético, total +0,037 mm, é constituído predominantemente por CaO e P_2O_5 (apatita predominante), com teores da ordem de 39 e 28%, respectivamente. Nos diversos intervalos granulométricos os teores de P_2O_5 variam entre 27,2 a 29,3%. Os principais óxidos associados a este produto são MgO (2,7%), Fe_2O_3 (2%), TiO_2 (1,4%) e SiO_2 (4%); o BaO apresenta teores de 5,7% em média, relacionados essencialmente a presença de barita.

Em termos de distribuição, verifica-se que em média 66% do fósforo estão associados ao produto afundado não magnético; salienta-se que a parcela de P_2O_5 associada ao flutuado (apatita mista) varia de 13,2 a 19,4%, com exceção da fração 0,037 mm onde houve problemas de queda de eficiência da separação na execução do ensaio; já a parcela associada aos magnéticos (apatita impregnada) varia entre 8 e 10% (a separação da fração -0,074 +0,037 mm também apresenta problemas de queda de eficiência).

7.3.3 Amostra 3

Os resultados das separações minerais efetuadas a partir da composição dos finos naturais com o produto de moagem da amostra 3 estão expostos na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados dos ensaios de separações minerais - Amostra 3, composição dos finos naturais com o produto de moagem

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)					CaO/ P ₂ O ₅		Distribuição na amostra(%)					Distribuição na amo											
			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	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
-0,297+0,210	Flut	27,6	3,16	5,32	73,2	0,56	7,63	1,05	1,22	0,16	4,90	1,37	12,1	12,8	88,5	5,6	27,1	8,2	1,4	1,7	12,0	0,7				
	Afund. Mag 0,0A	34,9	3,99	1,81	2,27	0,10	78,1	1,61	10,3	0,50	0,30	1,85	3,9	5,5	3,5	72,2	52,6	32,3	0,5	0,7	0,5	9,3				
	Afund. FRM 0,3A	10,5	1,20	9,03	10,5	5,88	2,25	42,2	15,5	0,85	5,67	1,16	10,7	9,6	2,7	11,7	9,0	16,5	1,3	1,3	0,4	1,5				
	Afund. NMAG 0,3A	27,1	3,10	24,0	30,4	4,51	1,29	14,7	9,77	0,86	4,68	1,27	73,3	72,0	5,4	10,5	11,2	43,1	8,7	9,4	0,7	1,4				
	Total calculado Total dosado	100,0	11,4	8,86	11,4	22,8	0,77	37,7	1,07	8,20	0,54	3,32	1,29	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	11,9	13,1	13,6	12,9			
-0,210+0,149	Flut	27,6	3,92	2,98	4,01	0,53	8,01	0,71	1,13	0,13	5,46	1,35	9,9	10,3	87,4	5,6	16,5	7,3	1,5	1,7	15,2	0,9				
	Afund. Mag 0,0A	32,4	4,61	0,62	1,34	1,72	<0,10	83,0	10,4	0,49	0,00	2,16	2,4	4,0	2,3	68,7	46,0	32,3	0,4	0,7	0,4	11,3				
	Afund. FRM 0,3A	19,4	2,76	6,68	7,40	5,60	2,09	46,6	17,5	0,83	5,38	1,11	15,7	13,4	4,5	23,1	16,0	32,8	2,3	2,2	0,8	3,8				
	Afund. NMAG 0,3A	20,7	2,94	28,8	37,6	6,64	0,72	4,80	6,97	0,66	5,19	1,31	71,9	72,3	5,7	2,5	21,5	27,7	10,6	11,7	1,0	0,4				
	Total calculado Total dosado	100,0	14,2	8,27	10,7	23,9	...	39,1	1,19	8,51	0,49	3,62	1,30	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	14,7	16,2	17,4	16,4			
-0,149+0,074	Flut	26,0	5,43	3,59	5,23	0,62	6,63	1,34	0,53	0,51	5,11	1,46	10,6	12,1	87,6	4,5	29,0	22,4	2,3	2,9	21,7	1,1				
	Afund. Mag 0,0A	30,5	6,38	0,64	1,33	1,34	85,1	1,67	10,2	0,44	0,38	2,08	2,2	3,6	1,8	67,1	42,4	22,7	0,5	0,9	0,5	16,0				
	Afund. FRM 0,3A	21,6	4,52	5,60	6,26	4,58	2,00	46,5	19,4	0,83	6,32	1,12	13,8	12,0	4,4	26,0	25,0	30,3	3,0	2,9	1,1	6,2				
	Afund. NMAG 0,3A	22,0	4,60	29,2	37,0	6,26	1,01	4,26	7,38	0,66	4,16	1,27	73,3	72,3	6,2	2,4	3,7	24,5	15,9	17,2	1,5	0,6				
	Total calculado Total dosado	100,0	20,9	8,75	11,2	22,3	...	38,6	1,20	9,06	0,59	3,72	1,28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	21,7	23,8	24,8	23,9			
-0,074+0,037	Flut	23,5	3,87	1,01	2,77	1,65	7,02	4,11	0,55		6,58	2,74	2,8	6,1	84,4	4,6	52,7	0,0	0,5	1,1	15,3	0,8				
	Afund. Mag 0,0A	23,9	3,93	1,14	1,89	1,27	82,5	1,64	9,40	0,52	1,19	1,66	3,2	4,2	1,5	55,0	21,3	20,9	0,6	0,8	0,3	9,6				
	Afund. FRM 0,3A	35,8	5,89	9,26	10,5	5,07	37,8	1,16	17,2	0,96	5,77	1,13	39,2	35,0	8,7	37,8	22,6	57,8	6,9	6,5	1,6	6,6				
	Afund. NMAG 0,3A	16,8	2,75	27,7	35,1	6,85	1,10	5,47	7,84	0,76	5,34	1,27	54,8	54,7	5,5	2,6	3,4	21,4	9,6	10,2	1,0	0,4				
	Total calculado Total dosado	100,0	16,4	8,47	10,7	20,9	1,41	35,8	1,84	9,85	0,60	4,79	1,27	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	17,6	18,7	18,1	17,5			
-0,037+0,020	Flut	21,8	1,81	1,49	2,19	2,67	9,33	2,35	0,81	0,10	5,19	1,47	3,4	4,4	80,7	6,0	38,8	2,6	0,3	0,4	7,2	0,5				
	Afund. Mag 0,0A	16,4	1,36	2,15	3,03	1,68	79,6	1,71	8,37	0,55	0,95	1,41	3,7	4,5	1,4	38,4	21,3	10,9	0,4	0,4	0,1	3,1				
	Afund. FRM 0,3A	61,9	5,15	14,1	16,1	5,84	30,5	0,85	13,1	1,15	6,16	1,14	92,8	91,1	18,0	55,6	39,9	86,4	8,8	8,6	1,6	4,5				
	Afund. NMAG 0,3A	21,2	13,4	27,6	35,2	6,06	7,04	0,52	7,94	0,73	4,75	1,28	68,1	67,7	5,7	4,0	8,8	28,1	44,8	48,6	4,2	2,8				
	Total calculado Total dosado	100,0	8,32	9,40	10,9	20,1	2,21	33,9	1,32	9,65	0,82	5,10	1,16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	9,5	9,5	8,9	8,1			
TOTAL + 0,037	Flut	26,0	16,4	2,89	4,37	75,0	0,83	7,25	0,81	0,23	5,50	1,51	8,7	10,2	86,9	5,0	32,6	10,4	5,7	7,4	64,1	3,5				
	Afund. Mag 0,0A	30,0	18,9	0,81	1,55	1,61	<0,10	82,6	10,1	0,48	0,44	1,91	2,8	4,2	2,2	65,4	39,2	26,2	1,9	3,0	1,6	46,2				
	Afund. FRM 0,3A	22,8	14,4	7,59	8,57	5,09	2,13	42,6	17,8	0,88	5,86	1,13	20,4	17,9	5,2	25,7	19,4	35,3	13,5	12,8	3,8	18,1				
	Afund. NMAG 0,3A	21,2	13,4	27,6	35,2	6,06	1,03	7,04	7,94	0,73	4,75	1,28	68,1	67,7	5,7	4,0	8,8	28,1	44,8	48,6	4,2	2,8				
	Total calculado	100,0	63,1	8,59	11,0	22,4	...	37,8	8,99	0,56	3,90	1,28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	65,8	71,8	73,8	70,6				

O produto flutuado total +0,037 mm corresponde a 26% em massa do ensaio (16% na amostra); sendo essencialmente constituído por SiO_2 (75%), Fe_2O_3 (7,3%) e, em menores quantidades, por MgO (1,8%), Al_2O_3 (1,6%), CaO (4,4%) e P_2O_5 (2,9%).

O produto afundado magnético em 0,0A, total +0,037 mm, é constituído predominantemente por Fe_2O_3 (83%) e TiO_2 (10%), com quantidades menores de SiO_2 , CaO e MgO , na ordem de 1,6% em média. Esse produto corresponde a 30% em massa do ensaio (19% na amostra).

O produto afundado magnético em separador Frantz 0,3A total +0,037 mm representa 23% em massa do ensaio (14% na amostra); sendo constituído essencialmente por Fe_2O_3 (43%), TiO_2 (18%) e CaO (8,6%) e P_2O_5 (7,6%), com quantidades menores de SiO_2 (5%) e MgO (1,2%).

O produto afundado não magnético total +0,037 mm é constituído predominantemente por CaO e P_2O_5 (apatita predominante), com teores da ordem de 35 e 28%, respectivamente. Nos diversos intervalos granulométricos os teores de P_2O_5 variam entre 24 a 29,2%. Os principais óxidos associados a este produto são Fe_2O_3 (7%), TiO_2 (8%) e SiO_2 (6%).

Em termos de distribuição, verifica-se que em média 68% do fósforo estão associados ao produto afundado não magnético; salienta-se que a parcela de P_2O_5 associada ao flutuado (apatita mista) varia de 9,9 a 12,1%, com exceção da fração 0,037 mm onde houve problemas na execução do ensaio; já a parcela associada aos magnéticos (apatita impregnada) varia entre 11 a 16% (também se verifica problemas operacionais para a fração -0,074 + 0,037 mm).

7.3.4 Amostra 4

Os resultados das separações minerais efetuadas na composição dos finos naturais com o produto de moagem da amostra 4 estão expostos na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios de separações minerais - Amostra 4, composição dos finos naturais com o produto de moagem

Fração (mm)	Produto	% Massa ensaio amostra	Teores (%)								Distribuição na amostra(%)					Distribuição n						
			P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	BaO	PF	CaO/ P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	
-0,297+0,210	Flut	38,6	4,39	10,1	36,7	2,48	7,75	18,9	0,67	0,30	21,1	10,63	4,4	25,7	91,1	10,1	79,9	22,6	0,5	3,0	9,7	
	Afund. Mag 0,0A	30,1	3,43	2,26	1,30	<0,10	80,3	2,98	10,5	0,48	0,50	2,79	2,9	4,5	2,5	81,5	9,8	28,2	0,3	0,5	0,3	
	Afund. FRM 0,3A	9,61	1,09	9,84	15,5	6,15	0,64	22,4	5,60	19,2	0,86	1,58	11,4	9,8	3,8	7,3	5,9	16,1	1,3	1,2	0,4	
	Afund. NMAG 0,3A	21,7	2,47	31,2	41,9	1,86	<0,10	1,61	1,84	7,25	0,78	5,79	1,34	81,3	59,9	2,6	1,2	4,4	33,0	9,2	7,1	0,3
	Total calculado Total dosado	100,0	11,4	8,3	15,1	15,5	...	29,7	9,13	6,84	0,51	10,6	1,82	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	11,3	11,8	10,6	
-0,210+0,149	Flut	39,0	5,31	11,2	37,5	1,76	7,58	18,6	0,55	0,33	21,7	14,74	3,7	28,3	89,9	10,2	79,4	25,0	0,5	4,2	10,8	
	Afund. Mag 0,0A	29,0	3,95	1,82	1,07	<0,10	81,1	2,76	10,2	0,46	1,57	3,25	2,0	3,4	1,9	81,0	8,8	25,9	0,3	0,5	0,2	
	Afund. FRM 0,3A	8,37	1,14	8,7	14,2	7,07	0,63	24,8	6,01	20,4	0,85	1,63	9,0	7,7	3,6	7,1	5,5	13,8	1,2	1,1	0,4	
	Afund. NMAG 0,3A	23,6	3,21	29,4	39,8	3,12	0,18	2,07	2,45	7,79	0,77	1,35	85,4	60,6	4,5	1,7	6,3	35,2	11,8	8,9	0,5	
	Total calculado Total dosado	100,0	13,6	8,11	15,5	16,3	...	29,1	9,14	6,72	0,51	11,14	1,91	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	13,9	14,7	12,0	
-0,149+0,074	Flut	40,6	8,88	11,5	35,7	1,75	7,54	18,8	0,60	0,36	22,7	14,56	3,9	29,6	89,7	11,2	79,6	25,6	0,9	7,3	17,5	
	Afund. Mag 0,0A	26,3	5,74	1,98	0,78	<0,10	82,9	2,72	10,1	0,51	0,54	2,91	2,2	3,3	1,3	79,6	7,4	23,5	0,5	0,8	0,2	
	Afund. FRM 0,3A	7,65	1,67	6,24	11,0	9,84	0,96	23,7	8,10	19,7	0,77	1,76	5,8	5,3	4,7	6,6	6,5	10,3	1,3	1,3	0,9	
	Afund. NMAG 0,3A	25,5	5,57	28,4	38,3	2,75	0,26	2,80	2,46	8,98	0,91	1,35	88,1	61,8	4,3	2,6	6,5	40,6	20,3	15,2	0,8	
	Total calculado Total dosado	100,0	21,9	8,21	15,79	16,15	...	27,36	9,59	6,69	0,57	11,86	1,92	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	23,0	24,6	19,5	
-0,074+0,037	Flut	42,4	6,80	11,0	34,2	1,59	8,70	18,6	1,40	0,39	22,4	12,36	4,6	30,4	88,5	15,0	81,4	26,2	0,8	5,5	13,3	
	Afund. Mag 0,0A	20,3	3,27	2,39	0,83	0,23	80,0	2,68	9,23	0,46	1,03	2,13	2,8	3,2	1,0	66,3	5,6	14,8	0,5	0,6	0,2	
	Afund. FRM 0,3A	25,0	4,02	17,4	23,6	5,28	0,67	15,7	3,77	15,8	0,88	1,36	53,6	38,5	8,1	16,0	9,7	34,9	9,3	7,0	1,2	
	Afund. NMAG 0,3A	12,2	1,97	25,9	34,9	3,18	0,35	5,50	2,58	9,47	1,24	1,35	39,0	27,9	2,4	2,7	3,3	24,1	6,8	5,0	0,4	
	Total calculado Total dosado	100,0	16,1	8,13	15,3	16,4	0,93	24,6	9,69	7,59	0,63	12,5	1,88	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	17,4	18,1	15,1	
-0,037+0,020	Flut	47,8	3,71	11,0	34,9	1,65	9,09	18,5	0,97	0,47	20,4	5,19	12,5	35,5	91,3	19,8	84,7	30,8	1,0	3,0	7,2	
	Afund. Mag 0,0A	15,6	1,21	3,10	4,88	1,37	0,15	74,0	2,75	9,20	0,58	1,57	5,9	5,1	1,2	52,6	4,1	12,4	0,5	0,4	0,1	
	Afund. FRM 0,3A	36,7	2,85	18,1	24,0	3,74	0,81	16,5	3,18	15,3	1,13	1,33	81,6	59,4	7,5	27,6	11,2	56,8	6,7	5,0	0,6	
	Afund. NMAG 0,3A	100,0	7,77	8,13	14,8	18,3	1,11	21,9	10,4	7,51	0,73	1,82	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,3	8,3	7,9	
	Total calculado Total dosado	100,0	7,77	8,40	15,4	18,5	1,42	21,4	10,7	7,41	0,76	11,7	1,82	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,3	8,3	7,9	
TOTAL + 0,037	Flut	40,3	25,4	11,1	35,8	1,84	7,90	18,7	0,82	0,35	22,1	13,20	4,1	28,9	89,7	11,6	80,1	25,0	2,7	19,9	51,3	
	Afund. Mag 0,0A	26,1	16,4	2,08	0,97	...	81,3	2,78	10,0	0,48	0,88	2,72	2,4	3,5	1,6	77,2	7,7	23,2	1,6	2,4	0,9	
	Afund. FRM 0,3A	12,6	7,9	18,5	6,62	0,72	19,6	5,26	17,8	0,85	9,05	1,45	20,1	15,3	5,2	9,0	7,1	17,0	13,2	10,6	3,0	
	Afund. NMAG 0,3A	21,0	13,2	28,8	38,8	2,74	...	2,80	2,36	8,44	0,90	1,35	73,3	52,4	3,5	2,2	5,2	34,7	48,1	36,2	2,0	
	Total calculado	100,0	62,9	8,19	15,5	16,1	...	27,4	9,44	6,95	0,56	11,6	1,89	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	65,6	69,1	57,2	

O produto flutuado total +0,037 mm corresponde a 40% em massa do ensaio (25% na amostra); sendo constituído, essencialmente, por SiO_2 (36%), MgO (19%), CaO (11%), Fe_2O_3 (8%) e Al_2O_3 (1,8%). A elevada relação $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$ e alto teor de MgO estão relacionados a presença de dolomita.

O produto afundado magnético em 0,0A total, +0,037 mm, é constituído predominantemente por Fe_2O_3 (81%), TiO_2 (10%), com quantidades menores de SiO_2 , CaO e MgO , na ordem de 1 a 3%. Esse produto corresponde a 26% em massa do ensaio (16% na amostra).

O produto afundado magnético em separador Frantz 0,3A total +0,037 mm representa 13% em massa do ensaio (8% na amostra); sendo constituído essencialmente por Fe_2O_3 (20%), TiO_2 (18%), CaO (19%) e P_2O_5 13%, com quantidades menores de SiO_2 e MgO (na ordem de 5% a 7%).

O produto afundado não magnético total +0,037 mm é constituído predominantemente por CaO e P_2O_5 (apatita predominante), com teores da ordem de 39 e 29%, respectivamente. Nos diversos intervalos granulométricos os teores de P_2O_5 variam entre 25,9 a 31,2%. Os principais óxidos associados a este produto são TiO_2 (8,4%), MgO (2,4%), Fe_2O_3 (2,8%) e SiO_2 (2,8%).

Em termos de distribuição, verifica-se que em média 73% do fósforo estão associados ao produto afundado não magnético; salienta-se que a parcela de P_2O_5 relativa ao flutuado (apatita mista) varia de 3,7 a 4,6%; já a parcela associada aos magnéticos (apatita impregnada) varia entre 6 a 11%, com exceção da fração 0,037 mm onde houve problemas na execução do ensaio.

7.4 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA E CARACTERÍSTICAS DA APATITA

A composição mineralógica (qualitativa e quantitativa) foi estimada a partir da composição dos finos naturais com o produto de moagem, considerando-se os resultados de análises químicas de cada produto gerado nas separações minerais e respectivas análises por difratometria de raios X (ver Anexo 1).

7.4.1 Comportamento dos minerais nos ensaios de separações minerais

Ao produto flutuado dos ensaios de separações minerais se associam os minerais de ganga leve ($d < 2,95$) constituídos essencialmente por quartzo, filossilicatos (vermiculita, micas interestratificadas de 10 e 14A, hidrobiotita) e, nas amostras 2 e 4, dolomita.

Oxi-hidróxidos de ferro (magnetita, hematita e goethita) e ilmenita são os principais constituintes dos produtos afundados magnéticos. No produto afundado magnético em Frantz 0,3A a apatita aparece em quantidade expressiva, variando de 6 a 38%, aliada a alumino-fosfatos secundários (gorceixita-goyazita), quartzo, micas e, em algumas amostras, dolomita (2 a 22%), barita (1 a 2%), anátasio (4 a 7%) e monazita (0,1 a 1%).

Já o produto afundado não magnético é constituído essencialmente por apatita (usualmente > 60%) com conteúdos menores de quartzo, micas, ilmenita, alumino-fosfatos secundários (gorceixita-goyazita), óxidos de ferro, e, em algumas amostras, barita, anatósio, dolomita e monazita.

7.4.2 Composição mineralógica das amostras estudadas

7.4.2.1 Amostra 1

A estimativa da composição mineralógica da amostra 1 está exposta na Tabela 23.

Tabela 23 – Estimativa da composição mineralógica – Amostra 1

Fração (mm)	% em massa	Apatita	Quartzo	Mica	Barita	Gorceixita	Anatósio	Ilmenita	Oxi-Hidróxidos de Fe	Monazita
-0,297+0,210	12,9	29	20	4	5	3	1	8	30	1
-0,210+0,149	14,5	34	18	3	7	3	1	7	27	1
-0,149+0,074	21,5	36	21	4	8	4	1	7	17	1
-0,074+0,037	14,2	30	15	5	7	3	1	10	29	1
-0,037+0,020	10,1	31	11	8	8	4	4	6	28	2
TOTAL + 0,020	73,3	33	18	5	7	3	1	7	25	1

Notas: (1) micas são representadas por vermiculita, micas interestratificadas de 10 e 14A

(2) oxi-hidróxidos de ferro são constituídos por hematita, magnetita e goethita.

A composição dos finos naturais com o produto de moagem gera uma amostra constituída predominantemente por apatita (33%), óxidos-hidróxidos de ferro (25%), quartzo (18%), ilmenita (7%), barita (7%), micas (4%), fosfatos secundários gorceixita e/ou goyazita (4%) e anatásio (2%).

Nas várias frações estudadas a proporção em massa de apatita situa-se entre 29 a 36%. Nos produtos de separações minerais, esta concentra-se junto ao afundado não magnético. A parcela de fósforo associada a alumino-fosfatos e monazita é estimada em cerca de 9% do total contido acima de 0,037 mm (respectivamente, 7% e 2%) Nesta amostra a apatita apresenta elevado grau de liberação para material cominuído a -0,30 mm (>95%); estima-se que a apatita flotável represente cerca de 95% do total contido.

7.4.2.2 Amostra 2

A estimativa da composição mineralógica da composição dos finos naturais com o produto da moagem da amostra 2 está exposta na Tabela 24.

Tabela 24 - Estimativa da composição mineralógica – Amostra 2

	% massa	Apatita	Quartzo	Micas	Barita	Gorceixita	Anatásio	Ilmenita	Oxi- Hidróxidos de Fe	Outros	Dolomita
-0,297+0,210	10,1	12	17	12	1	1	<1	6	20	<1	28
-0,210+0,149	11,6	11	16	13	1	1	<1	6	19	<1	30
-0,149+0,074	19,5	12	14	18	1	1	<1	7	17	<1	27
-0,074+0,037	20,0	11	11	28	1	1	1,3	8	15	<1	23
-0,037+0,020	8,7	9	9	36	1	1	<1	8	14	<1	21
TOTAL + 0,020	69,9	11	13	22	1	1	<1	7	17	<1	26

Notas: (1) micas são representadas por vermiculita, micas interestratificadas de 10 e 14 Å

(2) oxi-hidróxidos de ferro são constituídos por hematita, magnetita e goethita.

A amostra é constituída predominantemente por dolomita (26%), filossilicatos (22%), óxidos-hidróxidos de ferro (17%), quartzo (13%), apatita (11%) e, secundariamente, por ilmenita (7%), barita (1%), fosfatos secundários gorceixita e/ou goyazita (2%) e anatásio (<1%).

A proporção em massa de apatita varia de 11 a 12% sendo que esta concentra-se junto ao afundado não magnético. Associação de apatita com dolomita é relativamente freqüente, sendo que a liberação global da apatita para material entre 0,30 e 0,037 mm é da ordem de 80 a 85%. A parcela de fósforo associada a gorceixita-goyazita e monazita é estimada em 6% do total contido deste elemento, sendo que a parcela de apatita impregnada (não flotável) foi estimada em cerca de 6%.

7.4.2.3 Amostra 3

A estimativa da composição mineralógica da composição dos finos naturais com o produto da moagem da amostra 3 está exposta na Tabela 25.

Tabela 25 - Estimativa da composição mineralógica – Amostra 3

Fração (mm)	% massa	Apatita	Quartzo	Micas	Gorceixita	Anatásio	Ilmenita	Oxi-Hidróxido de Fe	Outros
-0,297+0,210	11,4	21	24	3	2	3	7	39	1
-0,210+0,149	14,2	19	23	5	1	2	9	38	1
-0,149+0,074	20,9	20	22	5	2	2	9	38	1
-0,074+0,037	16,4	20	20	7	3	3	10	36	2
-0,037+0,020	8,3	20	20	5	5	9	2	38	1
TOTAL + 0,020	71,4	20	22	5	3	3	8	38	1

Notas: (1) micas são representadas por vermiculita, micas interestratificadas de 10 e 14 Å

(2) oxi-hidróxidos de ferro são constituídos por hematita, magnetita e goethita.

A composição dos finos naturais com o produto de moagem gera uma amostra constituída predominantemente por oxi-hidróxidos de ferro (38%), quartzo (22%), apatita (20%), e secundariamente, por ilmenita (8%), fosfatos secundários gorceixita e/ou goyazita (3%), micas (5%) e anatásio (3%).

Nas várias frações estudadas a proporção em massa de apatita situa-se ao redor de 20%. Nos produtos de separações minerais, esta concentra-se junto ao afundado não magnético. A parcela de fósforo associada a alumino-fosfatos é estimada em cerca de 9% do total contido acima de 0,037 mm, sendo que a parcela de apatita impregnada (não flotável) foi estimada em cerca de 12%. Estima-se que a apatita flotável represente cerca de 83% do total contido.

7.4.2.4 Amostra 4

A estimativa da composição mineralógica da amostra 4 está exposta na Tabela 26.

Tabela 26 – Estimativa da composição mineralógica – Amostra 4

Fração (mm)	% em massa	Apatita	Quartzo	Micas	Barita	Gorceixita	Anatásio	Ilmenita	Oxi-Hidróxido de Fe	Outros	Dolomita
-0,297+0,210	11,4	19	9	18	tr	1	3	6	28	1	14
-0,210+0,149	13,6	19	10	17	tr	1	4	5	28	1	15
-0,149+0,074	21,9	19	10	18	tr	1	4	5	26	1	16
-0,074+0,037	16,1	19	10	20	tr	1	3	7	23	1	16
-0,037+0,020	7,8	19	11	23	1	1	3	7	21	1	14
TOTAL + 0,020	70,7	19	10	19	0	1	4	6	26	1	15

Notas: (1) micas são representadas por vermiculita, micas interestratificadas de 10 e 14 Å

(2) oxi-hidróxidos de ferro são constituídos por hematita, magnetita e goethita.

A composição dos finos naturais com o produto de moagem gera uma amostra constituída predominantemente por oxi-hidróxidos de ferro (26%), apatita (19%), micas (19%), dolomita (15%), quartzo (10%) e secundariamente, por ilmenita (6%), anatásio (4%) e fosfatos secundários gorceixita e/ou goyazita (1%).

A proporção em massa de apatita é da ordem de 19% sendo que esta concentra-se junto ao afundado não magnético. Em comparação com a amostra 2 a associação de apatita com dolomita é menos freqüente, sendo que a liberação global da apatita para o material entre 0,30 a 0,037 mm é superior a 90%. A parcela de fósforo associada a apatita é estimada em 97% do total contido deste elemento, sendo que a parcela de apatita impregnada (não flotável) foi estimada em cerca de 9%.

7.4.3 Características da apatita ao microscópico óptico

As observações efetuadas a luz transmitida (com ou sem nicóis cruzados) permitiram verificar as características ópticas e morfológicas das partículas de apatita presentes em cada amostra estudada.

Os produtos afundados não magnéticos das frações 0,210 e 0,150 mm, foram sistematicamente observados ao microscópio, tendo-se verificado apatitas com superfícies lisas a rugosa, presença de sulcos de dissolução e impregnações superficiais por óxido-hidróxido de ferro. Observa-se desde de apatitas limpas (sem impregnações superficiais) até apatitas totalmente recobertas. No Anexo 2 são apresentadas fotomicrografias das principais feições observadas para a apatita.

As partículas de apatita revelaram faces bem formadas (euhedrais a subhedrais) a grãos com bordas de corrosão (anhedrais). Podem-se observar hábitos aciculares, tabulares e prismáticos. O seu relevo mostrou-se forte e incolor, cuja birrefringência mostrou-se baixa sob nicóis cruzados.

As parcelas de apatita altamente impregnadas, não flotáveis no processo de concentração, foram determinadas a partir de separações minerais em Frantz, sendo estas feições confirmadas qualitativamente ao microscópio óptico. O sumário destes resultados é apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Impregnação de apatita por películas superficiais - % apatita não flotável

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
% de apatita impregnada	5	6	12	9

Nota: valores determinados a partir de separações minerais em Frantz.

7.4.4 Características da apatita ao MEV

As análises ao MEV foram efetuadas sistematicamente em seções polidas e montagem de grãos das frações de -0,297 +0,210 mm de cada amostra.

Estes estudos permitiram reconhecer em muito mais detalhe as feições observadas em microscopia óptica, além da presença de outros minerais.

Os principais minerais que se encontram associados à apatita são quartzo, filossilicatos (flogopita/vermiculita) e dolomita (esta restrita as amostras 2 e 4. Associações com monazita são também observadas nas amostra 1 e 2.

Nas imagens de elétrons retroespalhados pequenas diferenças nos tons de cinza da apatita permitiram identificar variações composicionais bem marcadas, que podem estar relacionadas com a presença de elementos terras raras e/ou do elemento Sr (ver espectros de fluorescência de raios X, na Figura 13).

Nas montagens de grãos observa-se mais claramente os aspectos de superfície das partículas de apatita, tais como neoformação de apatita microcristalina, películas de recobrimento superficial por oxi-hidróxidos de ferro, alumino-fosfatos e monazita, particularmente para as amostras 1 e 3.

Nas amostras 2 e 4 tem-se franca predominância de partículas sem recobrimento superficial, sendo que partículas contendo pequenas proporções de ganga são relativamente comuns. Na amostra 2 as partículas mistas são predominantemente com dolomita e na amostra 4 com filossilicatos (micas).

7.4.5 Variedades de apatitas

Complementando a caracterização morfológica e micro estrutural das apatitas foram efetuadas microanálises químicas por EDS, as quais permitiram individualizar as apatitas em quatro principais variedades. Estes resultados, normalizados a 100% são apresentados na Tabela 28; destaca-se que os maiores desvios analíticos estão associados às determinações de F (cerca de 20 a 30% relativos – sobreposição com linhas L do ferro e overlap parcial com O, além de elementos de terras raras).

Tabela 28 - Análises semiquantitativas das variedades de apatitas por EDS (normalizadas a 100%).

Ponto	Amostra	CaO	P ₂ O ₅	F	SiO ₂	SrO	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO/ P ₂ O ₅
pt 3	1, -0,30+0,21 mm	58,0	40,7	0,85						0,38		1,42
pt 5	1, -0,30+0,21 mm	56,9	41,2	1,96								1,38
pt 21	4, -0,30+0,21 mm	57,9	41,2	0,71							0,18	1,41
pt 13	3, -0,30+0,21 mm	58,1	40,0	1,67						0,23		1,45
media		57,7	40,8	1,30								1,42
desvio		0,58	0,56	0,61								0,03
pt 1	1, -0,30+0,21 mm	59,1	35,7	4,24						0,43	0,51	1,66
pt 12	2, -0,30+0,21 mm	56,0	38,7	3,82			0,34	0,79		0,35		1,45
pt 14	3, -0,30+0,21 mm	57,8	37,3	4,33						0,18	0,41	1,55
pt 16	3, -0,30+0,21 mm	55,3	37,4	5,66		0,45				0,83	0,33	1,48
pt 18	3, -0,30+0,21 mm	57,1	37,7	4,26						0,24	0,70	1,51
pt 20	4, -0,30+0,21 mm	57,9	38,0	3,70							0,46	1,52
pt 23	4, -0,30+0,21 mm	58,2	39,2	2,67								1,49
pt 11	2, -0,30+0,21 mm	59,3	37,4	3,31								1,59
pt 15	3, -0,30+0,21 mm	56,7	40,5	2,60						0,22		1,40
media		57,5	38,0	3,84						0,37	0,48	1,52
desvio		1,35	1,36	0,94						0,24	0,14	0,08
pt 6	1, -0,30+0,21 mm	50,2	36,7	5,71	0,37	7,04						1,37
pt 2	1, -0,30+0,21 mm	48,1	35,4	5,21	0,63	8,09		1,36	0,89		0,35	1,36
pt 4	1, -0,30+0,21 mm	50,6	36,6	4,56		8,23						1,38
pt 8	1, -0,30+0,21 mm	47,9	36,6	4,72	0,71	10,1						1,31
media		49,6	36,2	5,16	0,50	7,79						1,37
desvio		1,36	0,71	0,58	0,18	0,65						0,01
pt 17	3, -0,30+0,21 mm	56,0	40,3	1,73			0,41	0,59	0,62	0,15	0,23	1,39
pt 7	1, -0,30+0,21 mm	56,5	39,1	1,03	0,90		0,61	1,25	0,63			1,44
pt 9	2, -0,30+0,21 mm	56,4	41,0	0,60			0,58	0,80	0,57			1,38
pt 10	2, -0,30+0,21 mm	55,5	39,9	2,28	0,48		0,72	1,04	0,04			1,39
pt 22	4, -0,30+0,21 mm	47,2	37,7	2,81		0,23	2,31	6,64	1,88	1,21		1,25
pt 19	4, -0,30+0,21 mm	51,1	39,0	1,92		0,74	2,17	3,71	1,01	0,15	0,19	1,31
pt 24	4, -0,30+0,21 mm	50,4	38,0	3,50		0,77	1,70	3,89	0,81	0,40	0,59	1,33
media		53,3	39,3	1,98	0,69	0,58	1,22	2,56	0,79	0,48	0,33	1,36
desvio		3,71	1,20	1,00	0,29	0,30	0,82	2,26	0,56	0,50	0,22	0,06

O primeiro grupo apresenta teores de F variando de 0,7 a 1,7% e relação CaO/P₂O₅ de 1,42, sem a presença de ETR e Sr (apatitas neoformadas).

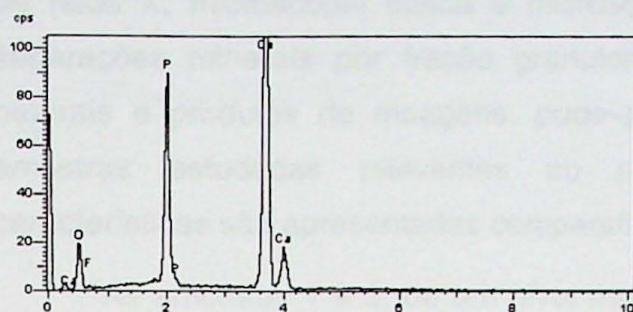
O segundo grupo apresenta as maiores relações de CaO/P₂O₅ (1,52) e F variando de 2,6 a 5,7%, quase sempre com presença de Al e Fe.

No terceiro grupo as apatitas apresentam altos teores de F, variando de 4,6 a 5,7%, relação de CaO/P₂O₅ mais baixa que as dos grupos anteriores 1,37 e presença de Sr variando de 7,0 a 8,2%.

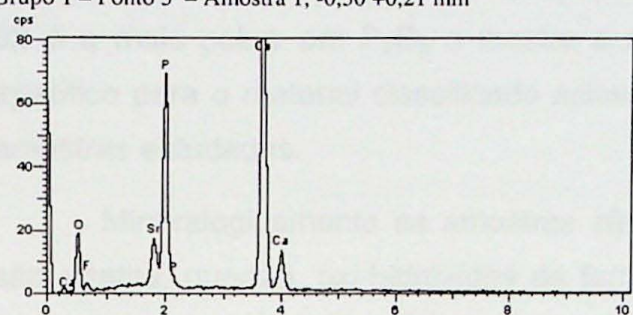
O quarto grupo apresenta apatitas com presença de ETR (LaO₃, CeO₂ e Nd₂O₃) respectivamente apresentando teores de 0,4 a 2,3%, 0,6 a 3,9% e 0,04 a 1,9%, com ou sem a presença de Sr.

As distinções entre os quatro grupos podem ser melhor visualizadas na Figura 13, onde são apresentados alguns dos espectros de fluorescência de raios X coletados nas várias partículas de apatitas observadas ao MEV (ver imagens no Anexo 3).

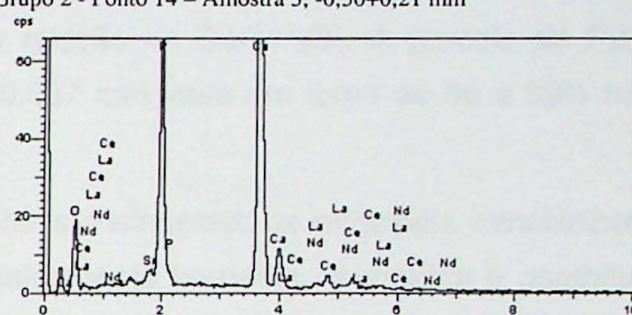
Figura 13 – Espectros de fluorescência de raios X (EDS) de apatitas coletados ao MEV.



Grupo 1 – Ponto 5 – Amostra 1, -0,30 +0,21 mm

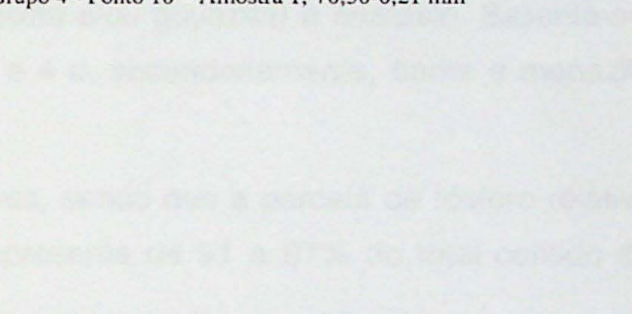


Grupo 2 – Ponto 14 – Amostra 3, -0,30 +0,21 mm



Grupo 3 – Ponto 4 – Amostra 1, -0,30 +0,21 mm

Grupo 4 – Ponto 10 – Amostra 1, +0,30 -0,21 mm



8 CONCLUSÕES

Foram estudadas um total de quatro amostras compostas a partir de furos de sondagens do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I, relativas a área da Lagoa Seca.

Com base nos resultados de composição química e análises mineralógicas (difração de raios X, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura) dos produtos de separações minerais por fração granulométrica, considerando a composição dos finos naturais e produtos de moagens, pode-se estabelecer as principais características das amostras estudadas relevantes ao processo de beneficiamento mineral. Estas características são apresentadas comparativamente na Tabela 32.

As amostras 1 e 3, de um nível mais superficial no manto de intemperismo, são as mais ricas em termos de teor de P_2O_5 , apresentando a menor relação CaO/P_2O_5 ; a amostra 02 é a mais pobre em P_2O_5 e mostra a maior relação de CaO/P_2O_5 . A parcela de P_2O_5 apatítico para o material classificado acima de 0,037 mm varia em torno de 66 a 89% nas amostras estudadas.

Mineralogicamente as amostras são muito semelhantes; os principais constituintes são apatita, quartzo, oxi-hidróxidos de ferro (basicamente hematita, magnetita e goethita), filossilicatos (minerais micáceos) e ilmenita; como minerais acessórios e traços foram observados alumino-fosfatos secundários (gorceixita e/ou goyazita) e anatásio. Salienta-se, ainda, a presença de dolomita nas amostras 2 e 4 e, secundariamente, barita e monazita nas amostras 1 e 2.

Os alumino-fosfatos são pouco expressivos, sendo que a parcela de fósforo relativa a apatita, no material retido em +0,037 mm, representa de 91 a 97% do total contido de fósforo.

As proporções em massa da apatita estão por volta de 12 a 33%, sendo que a sua liberação ideal está por volta de 0,21 a 0,30 mm. Apresenta superfície límpida a pouco impregnada, sendo comum serem observadas com sulcos de dissolução; ao MEV foram verificadas variações composicionais. Estima-se que a parcela de apatita impregnada, que não responde satisfatoriamente ao processo de flotação, corresponda de 5 a 12% nas amostras estudadas.

Em termos de processamento mineral destaca-se com principais aspectos a serem salientados:

- A presença de barita, particularmente na amostra 1. A depender da blendagem da alimentação do processo, poderá haver a necessidade de concentração prévia da barita na etapa de flotação.

- A presença de dolomita nas amostras 2 e 4 limita a proporção destas na alimentação do circuito, em face de perda de seletividade de flotação de apatita, quando da presença de dolomita.

Tabela 29 - Sumário dos resultados dos estudos de caracterização

	AMOSTRA			
	1	2	3	4
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)				
P ₂ O ₅	12,5	4,95	8,96	7,55
CaO	14,4	13,6	10,2	14,0
SiO ₂	16,1	22,8	20,7	18,1
Al ₂ O ₃	1,53	1,24	2,38	1,41
Fe ₂ O ₃	28,2	17,6	36,6	23,8
MgO	1,63	15,3	1,32	11,7
TiO ₂	5,08	3,8	8,24	6,09
BaO	4,37	1,53	0,9	0,75
relação CaO/P ₂ O ₅	1,75	2,75	1,14	1,85
COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA ESTIMADA DO RETIDO EM 0,037 mm (%)				
Apatita	33	12	20	19
Quartzo	19	14	22	10
Micas	4	20	5	18
Barita	7	1	-	tr
Gorceixita	3	1	2	1
Anatásio	1	tr	3	4
Ilmenita	8	7	9	6
Oxi-hidróxidos de ferro	24	17	38	26
Outros	1	<1	1	1
Dolomita	-	26	-	15
CARACTERÍSTICAS RELEVANTES PARA FINS DE BENEFICIAMENTO MINERAL				
Finos (-0,020 mm) % massa	26,7%	30,1%	28,6%	29,3%
Perdas de P ₂ O ₅ nos finos	27,2%	22,2%	24,7%	26,2%
Parcela de P ₂ O ₅ em apatita	91%	94%	92%	97%
Apatita impregnada (não flotável)	5%	6%	12%	9%
Recuperação potencial na flotação				
▪ Apatita	95%	82%	83%	88%
▪ P ₂ O ₅ total	86%	77%	76%	85%
Malha de liberação (moagem, mm)	0,30	0,21 – 0,15	0,21	0,30

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

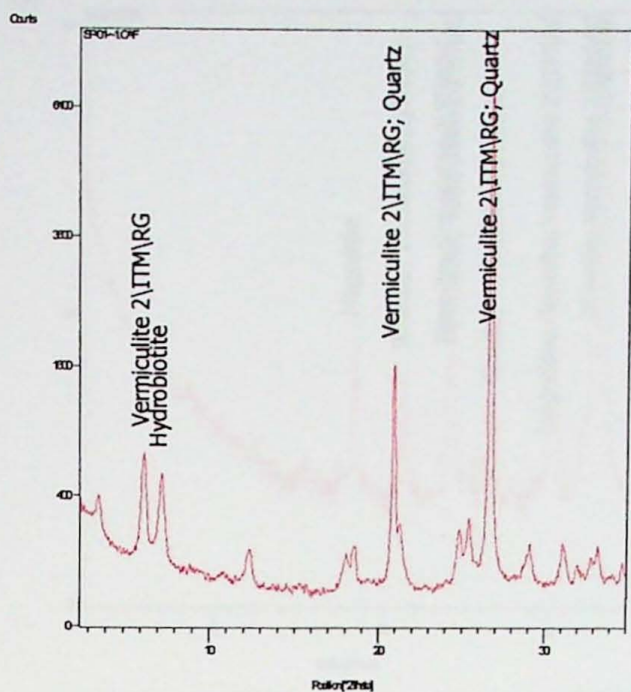
- ALBUQUERQUE, G. A. S. 1996. A produção de fosfato no Brasil: uma apreciação histórica das condicionantes envolvidas. Série Estudos e Documentos 31, MCT, CNPq, CETEM, 129p.
- BORN, H; KAHN, H. 1990. Caracterização geológica e mineralógica voltada ao aproveitamento de jazimentos fosfáticos. *In: V Encontro Nacional de Rocha Fosfática.* São Paulo. IBRAFOS. São Paulo. p. 213-233.
- BORN, H; LENHARO, S.L.; KAHN, H. 1996. Technological characterization of apatites from Brazilian phosphate deposits. *In: Trans. Inst. Min. Metall. Sect. B, IMM. V.B101-50, p. B117 a B126.*
- CARVALHO, W.T. 1974. Aspectos geológicos e petrográficos do complexo ultramáfico-alcalino de Catalão I, GO. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Porto Alegre, Anais..., São Paulo, SBG, v.5, p.107-23.*
- CARVALHO, W.T. - 1974b - Recursos minerais do complexo ultramáfico-alcalino de Catalão I, GO. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Porto Alegre, Anais.... São Paulo, SBG, v.6, p.165-84.*
- DEER, W. A.; ZUSSMAN, J.; HOWIE, R. A. 1971. Rock-forming minerais, vol. 5: non silicates. Longman, London.
- BAECKER, M.L. 1983. A mineralização de nióbio no solo laterítico e a petrografia das rochas ultramáficas-alcalinas do domo de Catalão I. Dissertação de Mestrado n.23. Departamento de Geociências, Universidade de Brasília. Goiás. Brasília. 114 p.
- IMBERNON, R. A. L. 1993. Evolução geoquímica e mineralógica dos produtos de alteração intempérica sobre as rochas do Complexo Alcalino-carbonatítico de Catalão I, GO. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado. São Paulo. 131p.
- LAPIDO LOUREIRO, F. E. V. 1995. A mega província carbonatítica Brasil-Angola e seus recursos minerais: geologia, petrografia, geoquímica, geologia econômica. Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Tese de Doutorado, 305p.
- LENHARO, S.L.R. - 1994 - Caracterização mineralógica/tecnológica das apatitas de alguns depósitos brasileiros de fosfato. São Paulo, 196 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- McCONNELL, D. 1973. Apatite – its crystal chemistry, mineralogy, utilization and geologic and biologic occurrences. Wien, New York, Springer Verlag, 111p.

- McCONNELL, D. 1974. The crystal chemistry of apatite. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et Cristallographie*, 97:237-240.
- PEREIRA, V. P. 1995. Alteração no maciço alcalino carbonático de Catalão I (GO), Brasil. Evolução mineralógica. Tese de doutorado – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 279p.
- RIBEIRO, C. C. Maciço de Catalão I, GO. Catalão:Ultrafértil, 1998. (Relatório Interno).
- RIBEIRO, C. C. Projeto Córrego do Garimpo – Relatório final [S.I]:Ultrafértil, 1998. (Relatório Interno).
- SANT'AGOSTINO, L.M.; KAHN, H. 1997 - Metodologia para a caracterização de matérias primas minerais. Boletim Técnico da Escola Politécnica. BT-PMI-069. 29p.
- TASSINARI, M. M. M. L. 2001. Caracterização Tecnológica do depósito de terras raras de Catalão I, GO. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Tese de Doutor em Engenharia. São Paulo, 157p.
- TOLEDO, M. C. M. 1999. Mineralogia dos principais fosfatos do maciço alcalino-carbonatítico de Catalão I (GO) e sua evolução no perfil laterítico. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Livre Docência. São Paulo, 198p.
- TOLEDO, M. C. M.; PEREIRA, V. P. 2001. A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. São Paulo: *Revista do Instituto Geológico*, 22(1/2): 27-64.

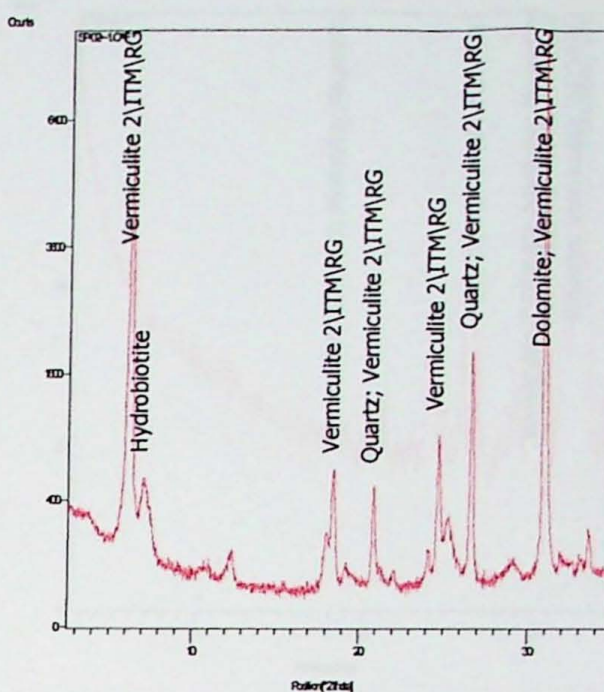


Figura 13 – Comparação entre difratogramas dos produtos de alteração obtidos nos experimentos laborais.

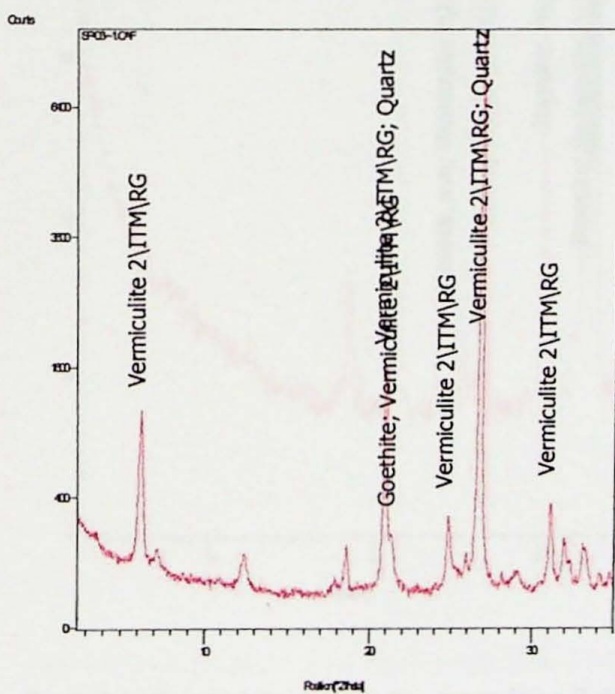
ANEXO 1 – DIFRAÇÕES DE RAIOS X



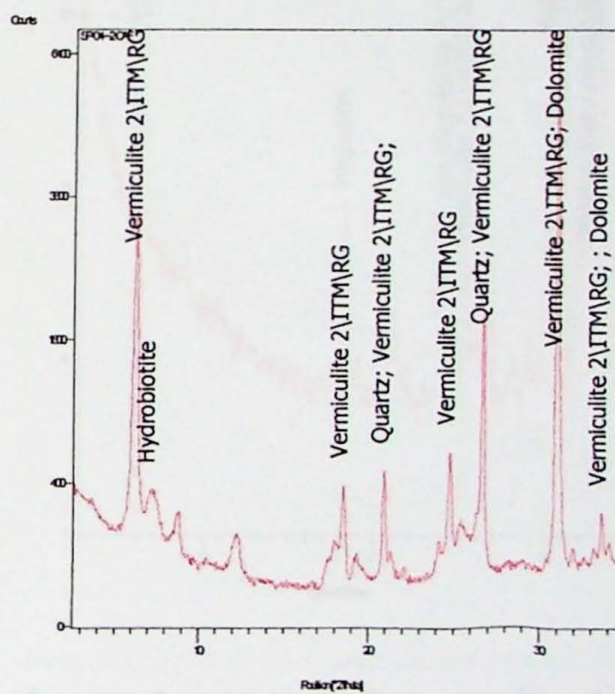
Amostra: 1, produto flutuado



Amostra: 2, produto flutuado

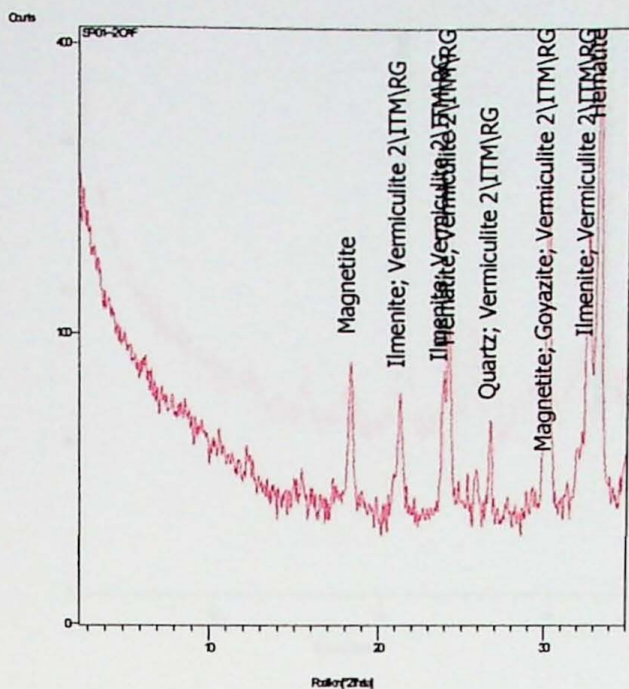


Amostra: 3, produto flutuado

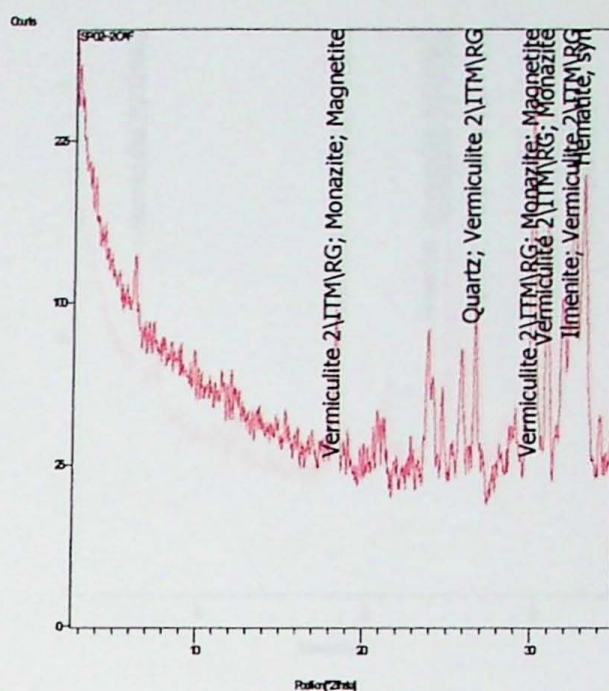


Amostra 4: produto flutuado

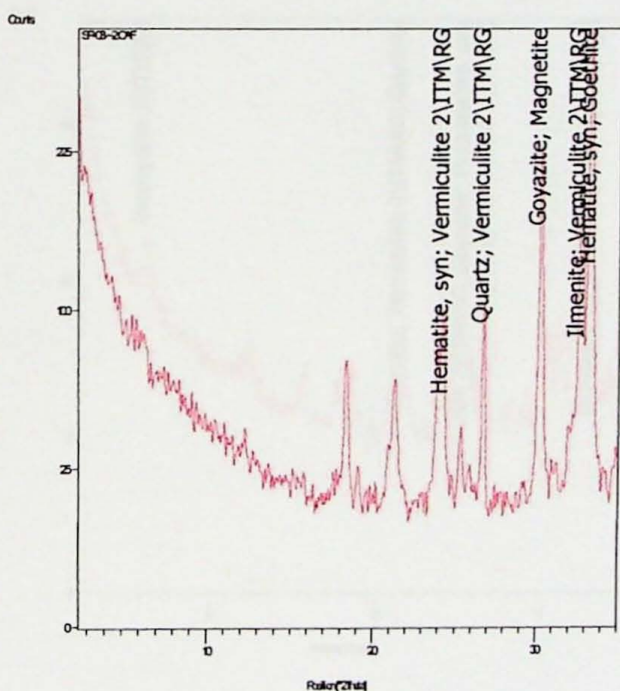
Figura 13 – Comparação entre difratogramas dos produtos flutuados obtidos nas separações minerais



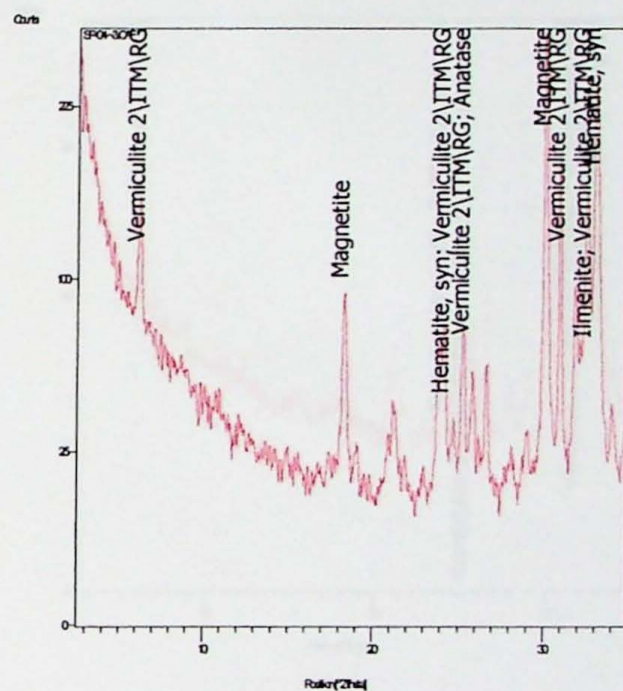
Amostra: 1, produto afundado magnético 0,0A



Amostra: 2, produto afundado magnético 0,0A

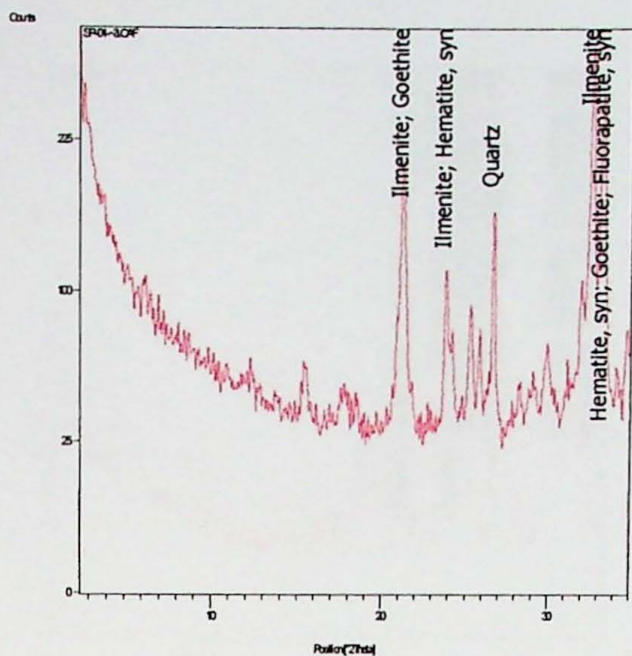


Amostra: 3- produto afundado magnético 0,0A

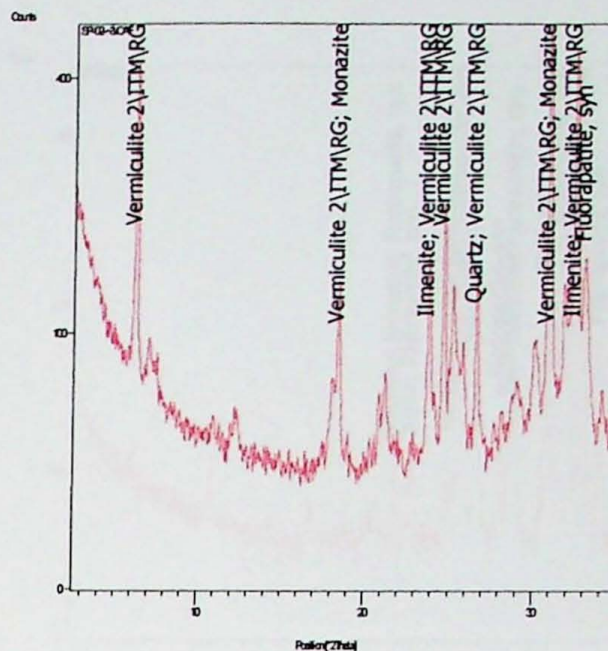


Amostra: 4, produto afundado magnético 0,0A

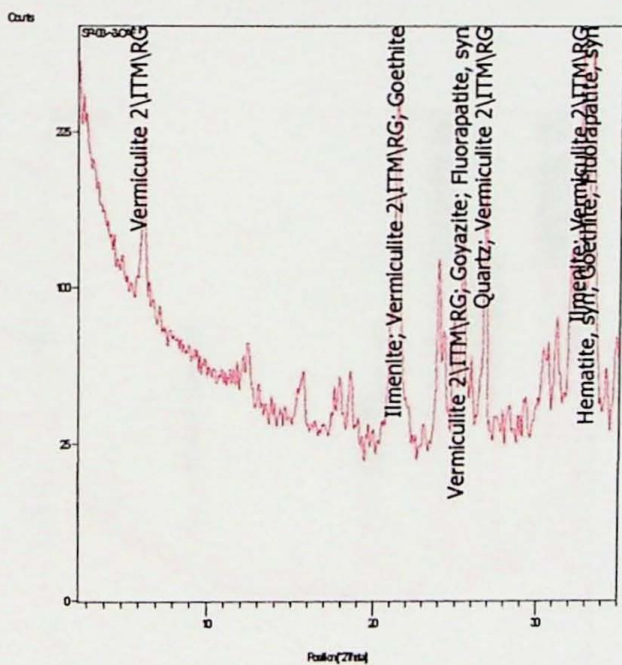
Figura 14 - Comparação entre difratogramas dos produtos afundados magnéticos - 0,0A obtidos nas separações minerais



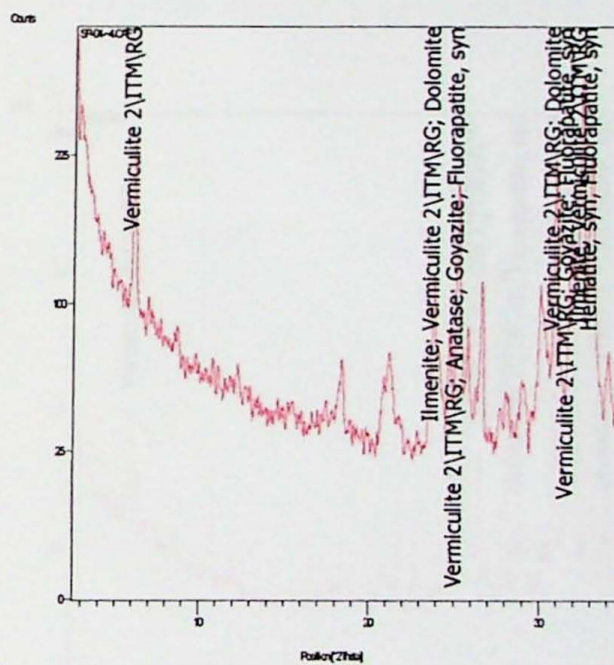
Amostra: 1, produto afundado magnético FRM 0,3A



Amostra: 2, produto afundado magnético FRM 0,3A

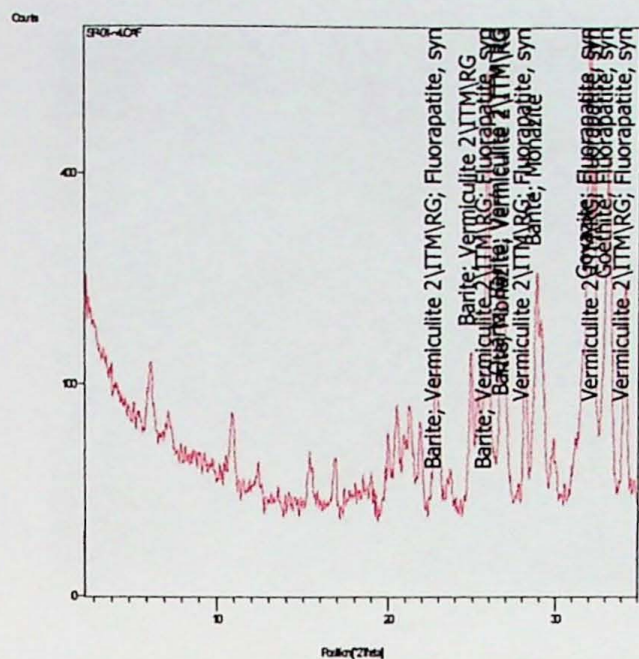


Amostra: 3, produto afundado magnético FRM 0,3A

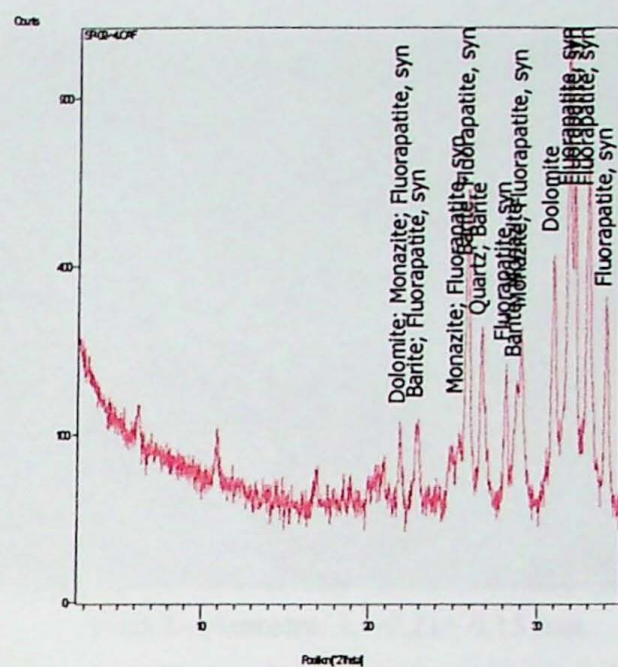


Amostra: 4, produto afundado magnético FRM 0,3A

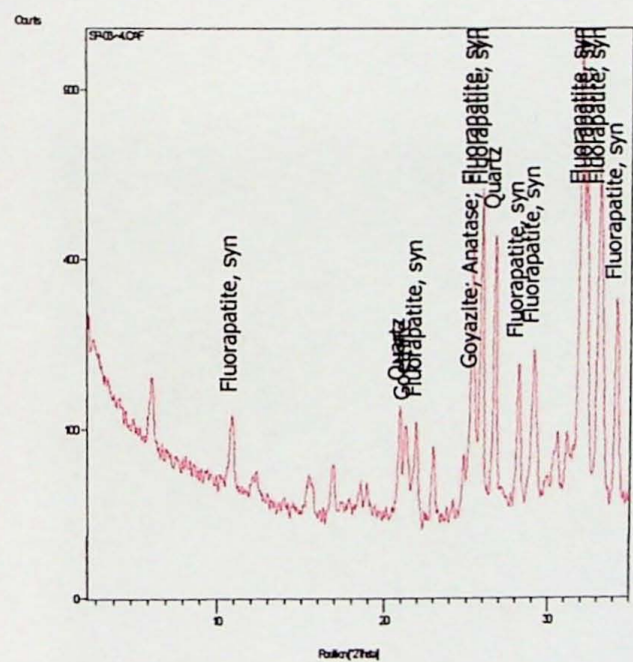
Figura 15 - Comparação entre difratogramas dos produtos afundados magnéticos – Frantz 0,3A obtidos nas separações minerais



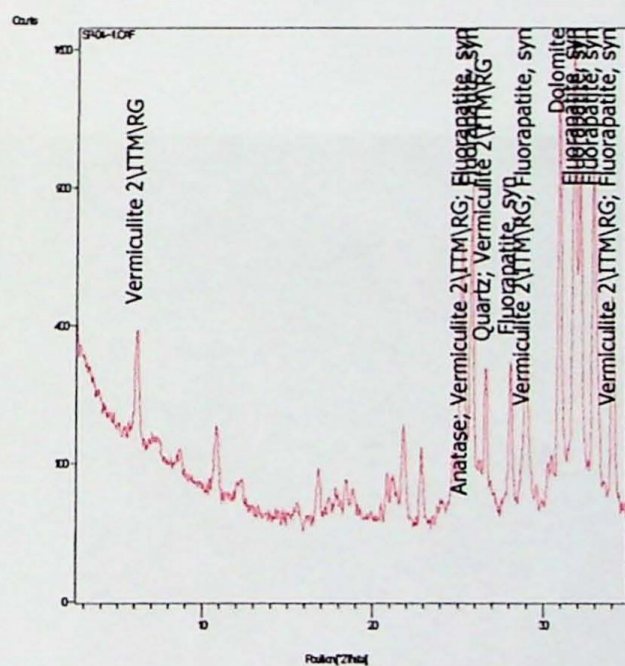
Amostra: 1, produto afundado não magnético



Amostra: 2, produto afundado não magnético



Amostra: 3, produto afundado não magnético



Amostra: 4, produto afundado não magnético

Figura 16 - Comparação entre difratogramas dos produtos afundados não magnéticos obtidos nas separações minerais

ANEXO 2 - FOTOMICROGRAFIAS AO MICROSCÓPIO ÓPTICO

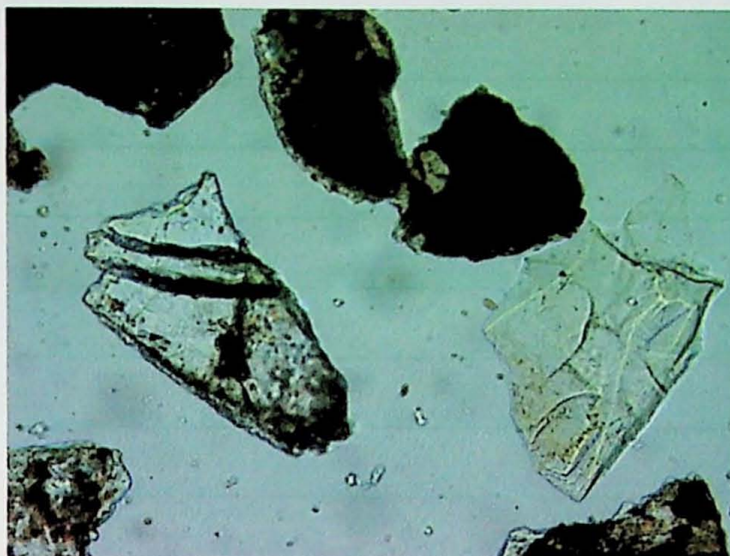


Foto 1- Amostra: 1, fração $-0,21 + 0,15$ mm.

Cristais de apatita com impregnação superficial e com sulcos de dissolução ao lado de cristal límpido.

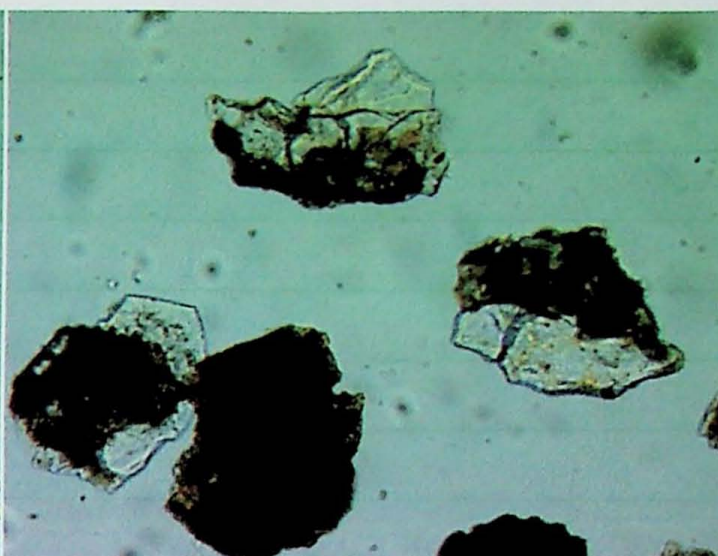


Foto 2 – Amostra: 1, $-0,21 + 0,15$ mm.

Apatita em cristal com face bem formada (euhedral) e cristais de apatita parcialmente a totalmente impregnados.

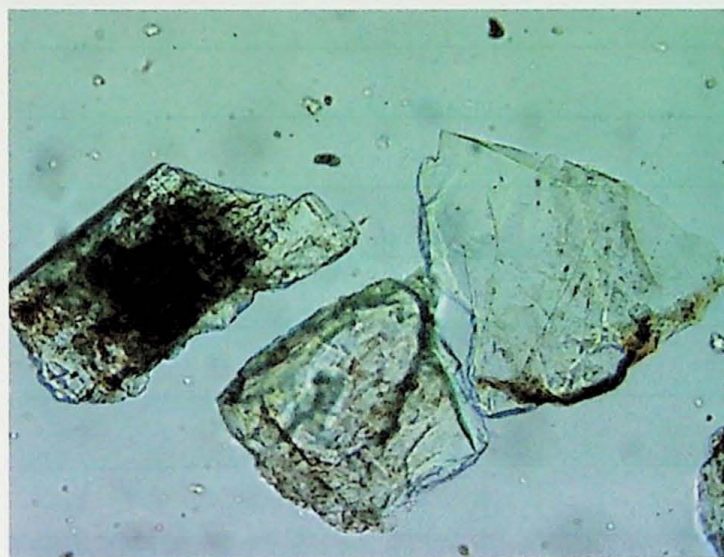


Foto 3 - Amostra: 1, $-0,30 + 0,21$ mm.

Apatita com impregnação superficial fraca a moderada e cristal límpido. Sulcos de dissolução podem ser observados.

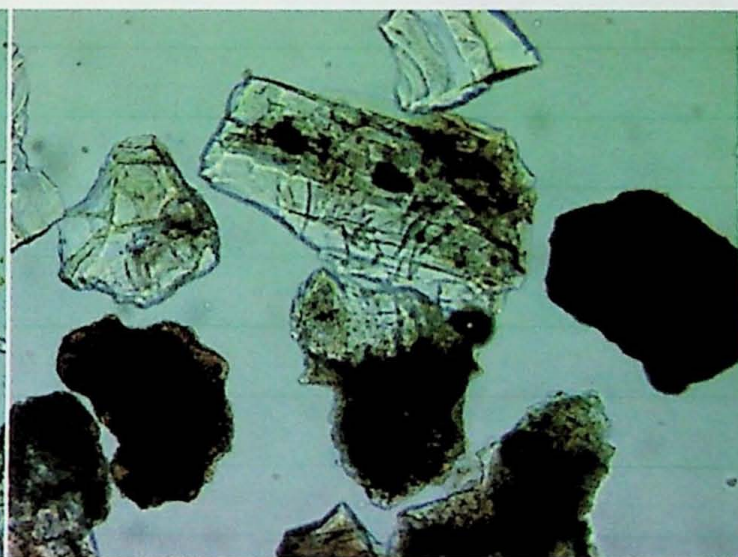


Foto 4 – Amostra: 2, $-0,21 + 0,15$ mm.

Apatita em cristais límpido e com impregnação superficial de fraca a intensa.

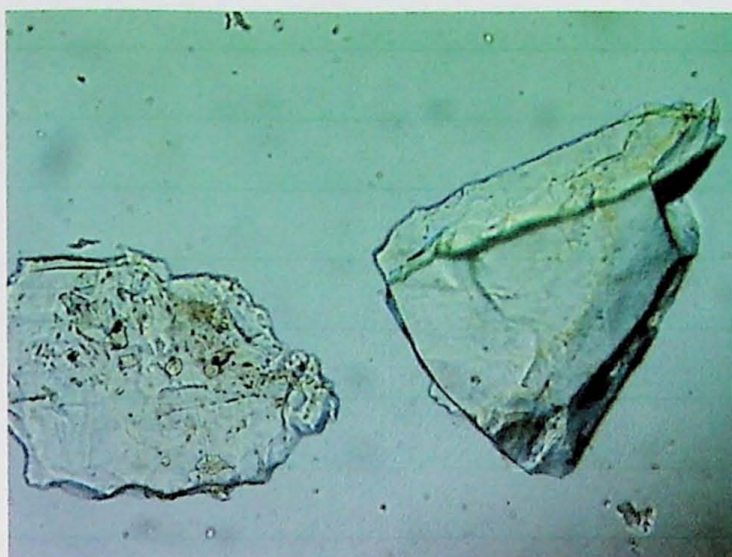


Foto 5 - Amostra: 2, $-0,30+0,21$ mm.

Cristais de apatita límpida com hábitos acicular e prismático.

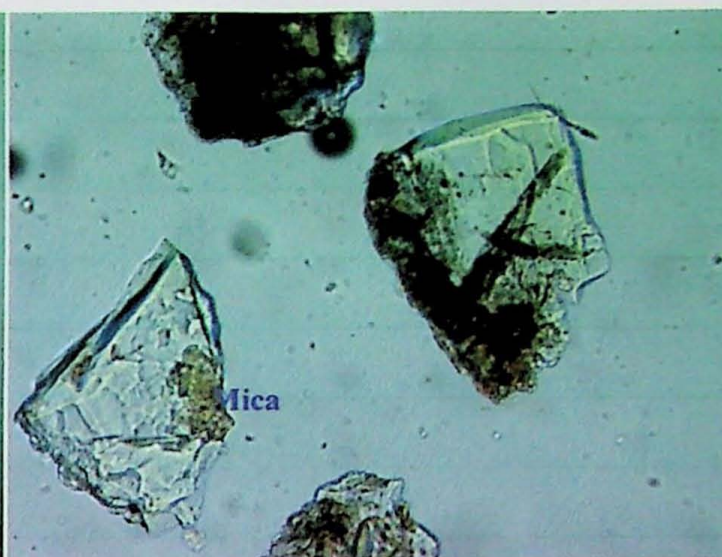


Foto 6 - Amostra: 2, $-0,30+0,21$ mm.

Grão misto de apatita e mica e grãos de apatita com impregnação superficial e sulcos de dissolução.

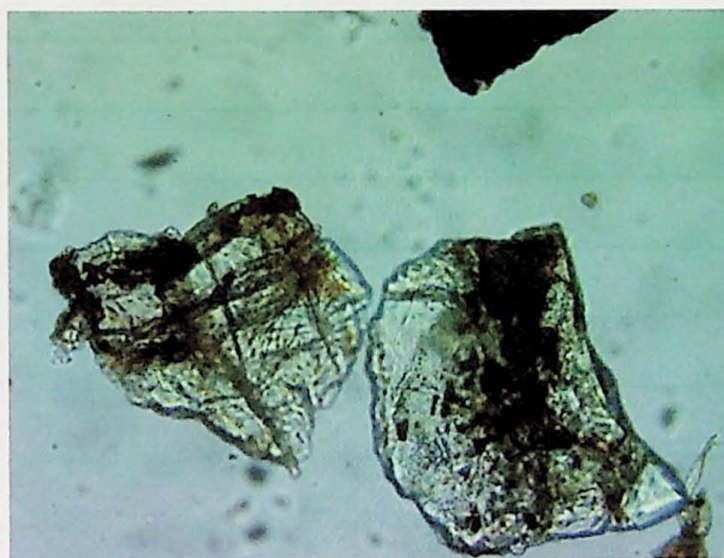


Foto 7 - Amostra: 3, $-0,30+0,21$ mm.

Grãos de apatita fracamente impregnados e com sulcos de dissolução.

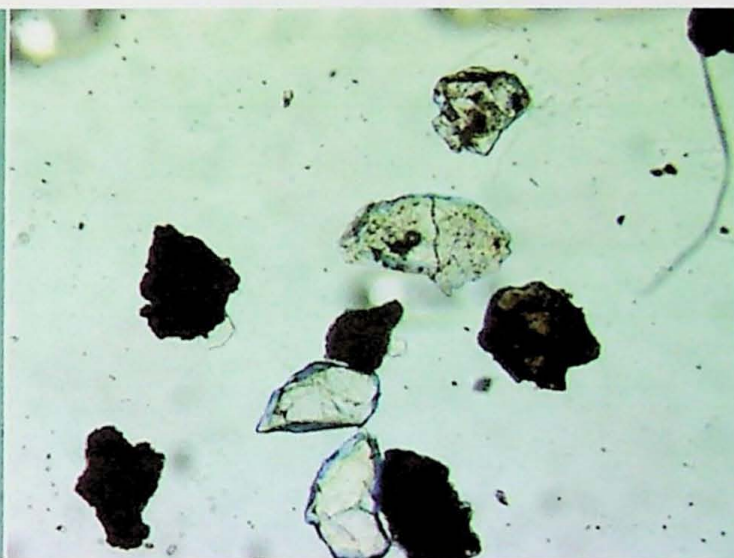


Foto 8 - Amostra: 3, $-0,21+0,15$ mm.

Grãos de apatita límpidos a totalmente impregnados.

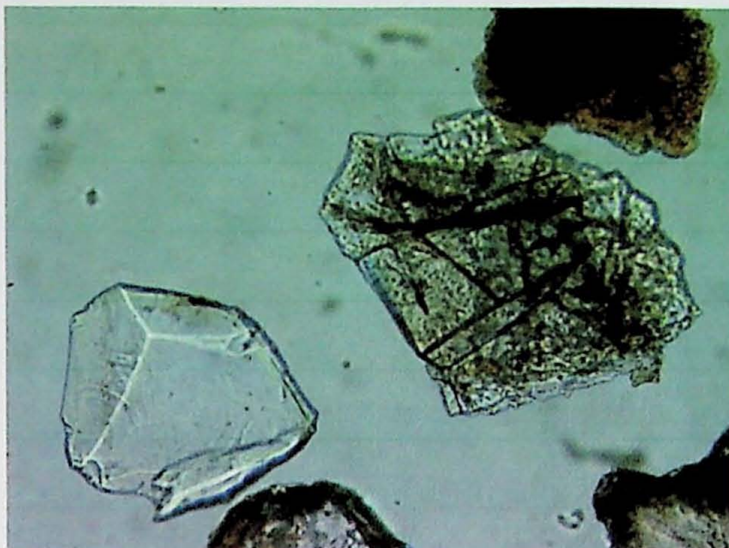


Foto 9 - Amostra: 4, $-0,30+0,21$ mm.

Grão de apatita com faces bem formadas, superfície lisa e límpida e grãos de apatita com sulcos de dissolução.

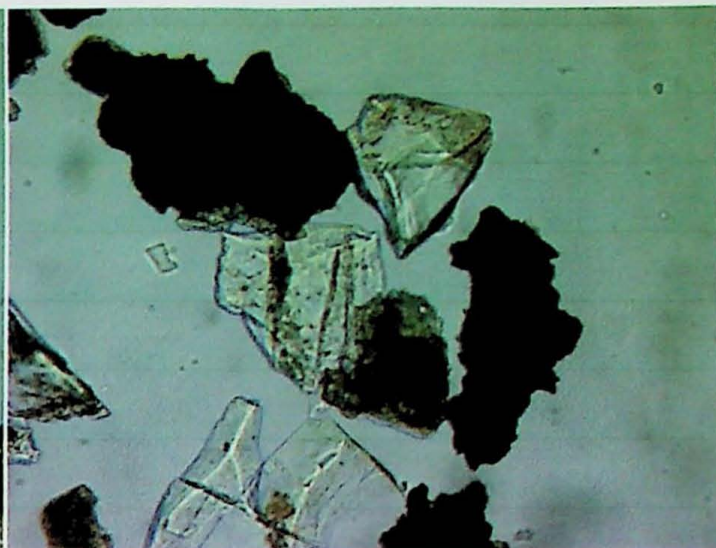


Foto 10— Amostra: 4, $-0,21+ 0,15$ mm.

Grãos de apatita límpidos a fortemente impregnados.

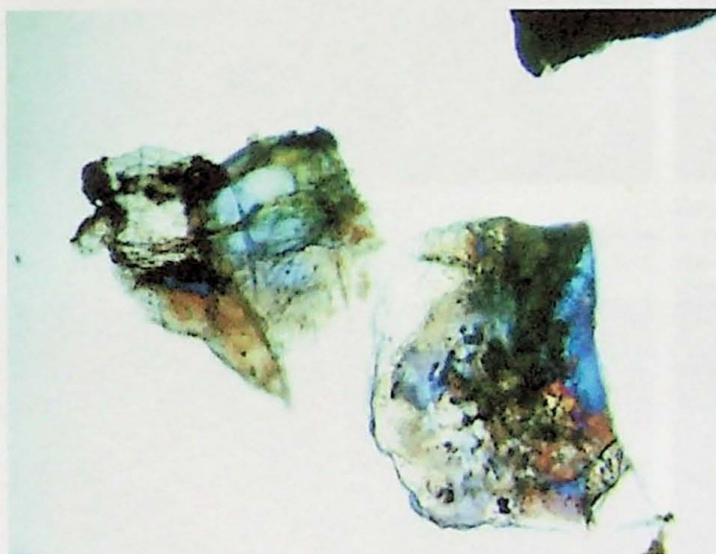


Foto 11 - Amostra: 3, $-0,30+0,21$ mm.

Grãos de apatita mostrando impregnações superficiais sob nicóis cruzados.

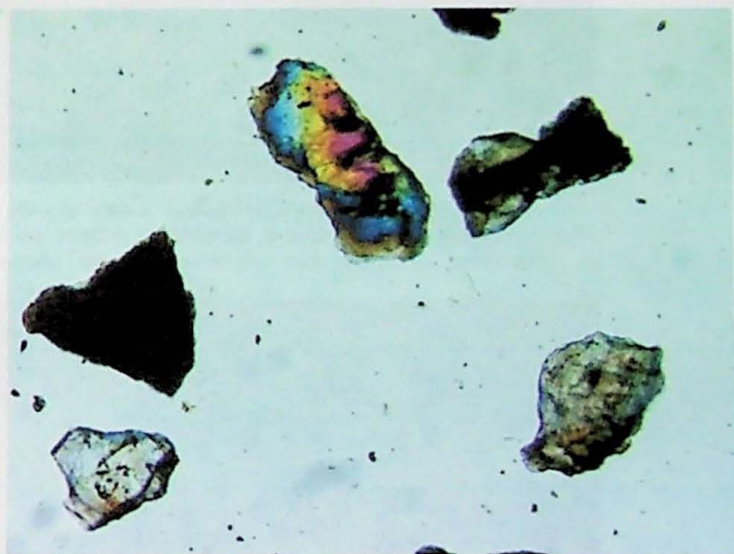


Foto 12 – Amostra: 1, $-0,30+0,21$ mm.

Grãos de apatita mostrando impregnações superficiais sob nicóis cruzados.

ANEXO 3 - FOTOMICROGRAFIAS AO MEV EM IMAGENS DE ELÉTRONS RETROESPALHADOS (BSE) E CATHODO (CL) E ELÉTRONS SECUNDÁRIOS (SE)

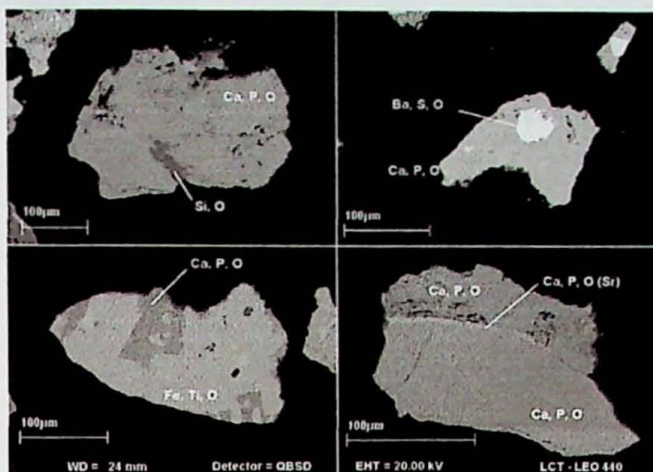


Foto 13 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.

Grãos de apatita mista e com variação composicional.

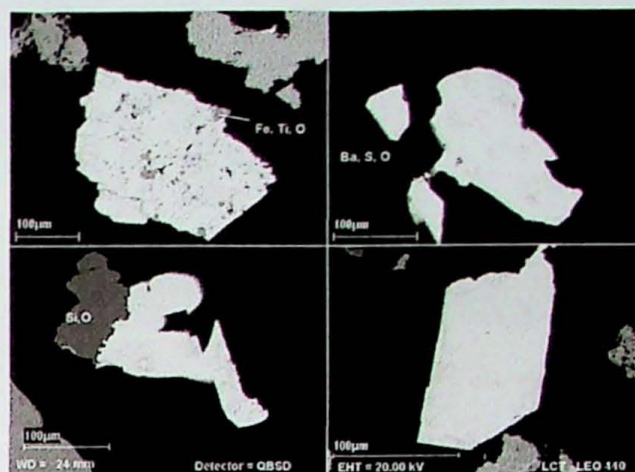


Foto 14 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.

Grãos mistos de barita livres e mistos com quartzo e ilmenita.

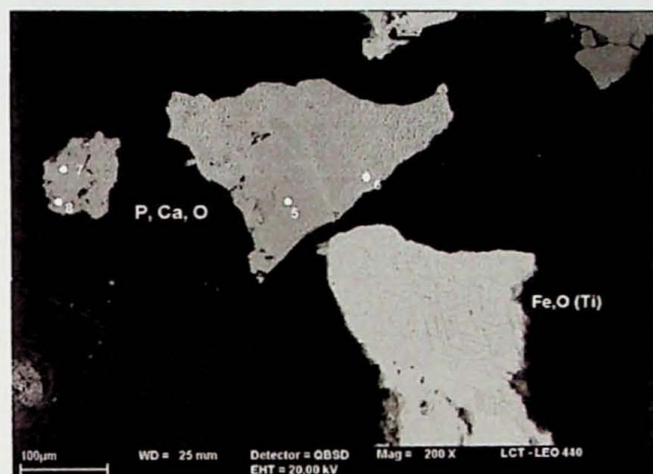


Foto 15 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.

Grão de apatita com variação composicional e grão de óxido-hidróxido de ferro com titânio. (os pontos 5 a 8 referem-se a microanálises por EDS).

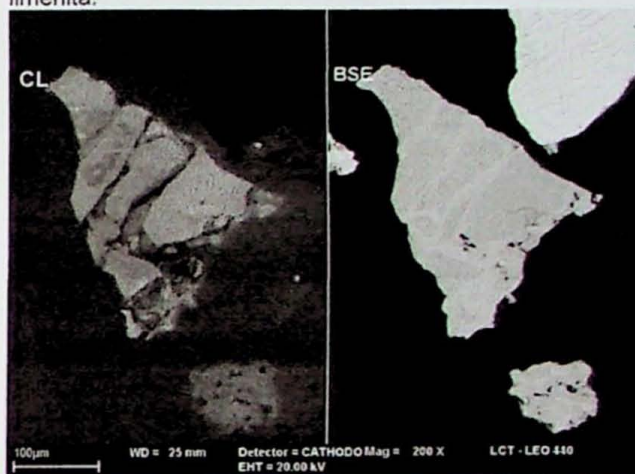


Foto 16 - Amostra: 1, -0,30+0,21mm.

Grão de apatita mostrando a sua variação composicional, observado em imagens de catodoluminescência (CL) e elétrons retro-espalhados.

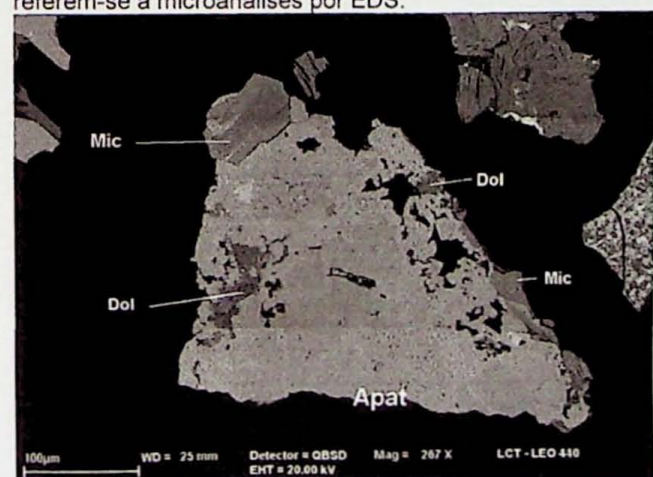


Foto 17 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.

Grão misto de apatita com dolomita e mica, observado em BSE.

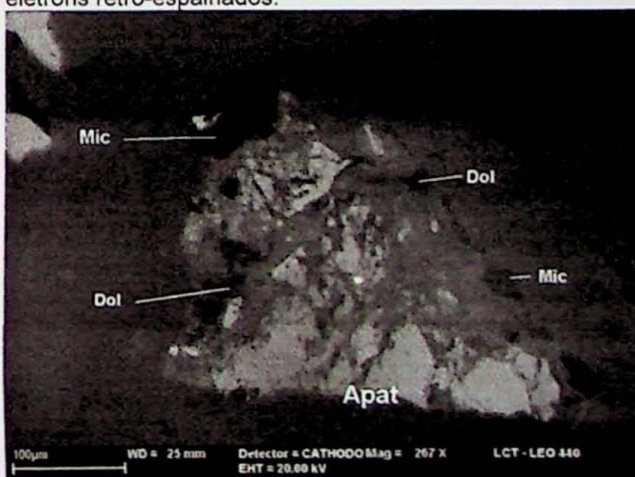


Foto 18 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.

Mesmo grão da foto anterior observado em imagem de CL.

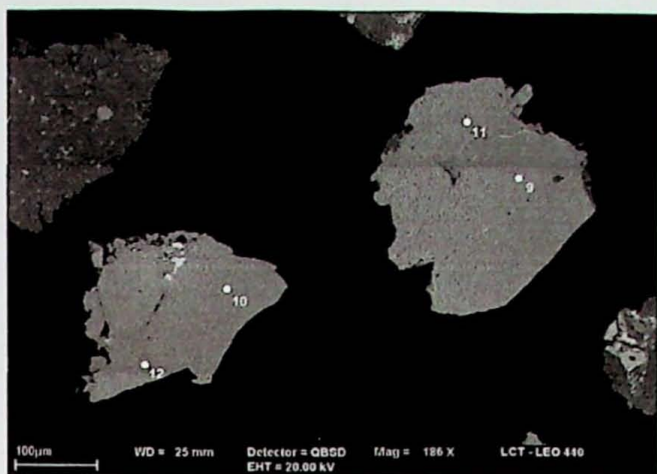


Foto 19 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.
Grão de apatita mostrando variação da tonalidade de cinza (pontos referem-se a microanálises por EDS).



Foto 20 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.
Mesmo grão da foto anterior visto em CL, evidenciando variações composicionais.

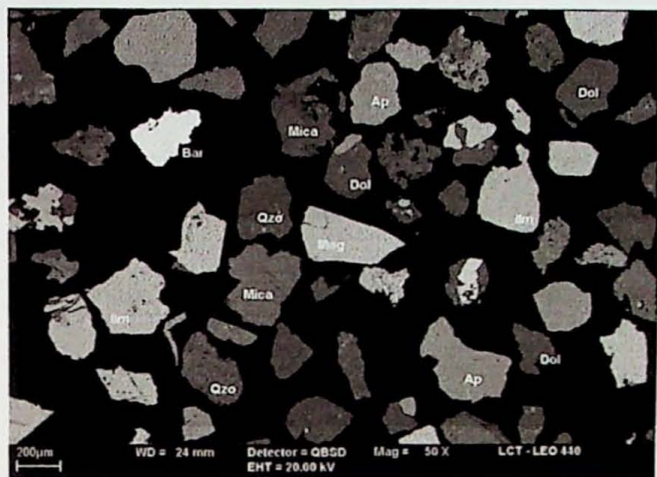


Foto 21 - Amostra: 2, -0,30+0,21mm.
Visão geral da amostra apresentando grãos de apatita, mica, dolomita, barita, quartzo, ilmenita e magnetita.

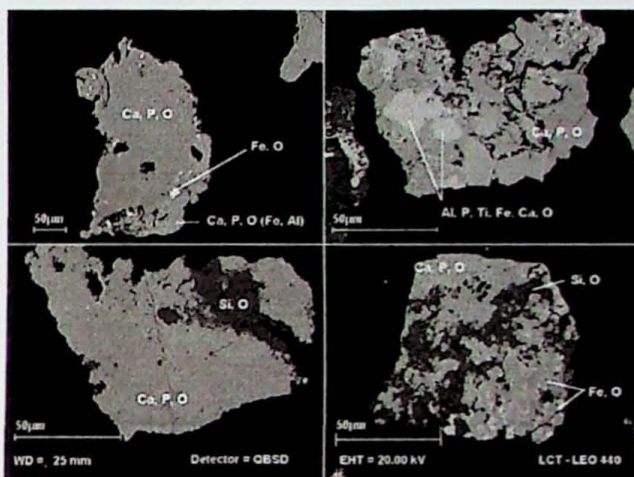


Foto 22 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.
Grãos mistos de apatita (com variações de composicionais e presença de ETR).



Foto 23 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.
Grão de apatita com superfície límpida e variação composicional e aglomerado de alumino-fosfatos com variações composicionais apresentando (Fe, O, Al, P e Si).

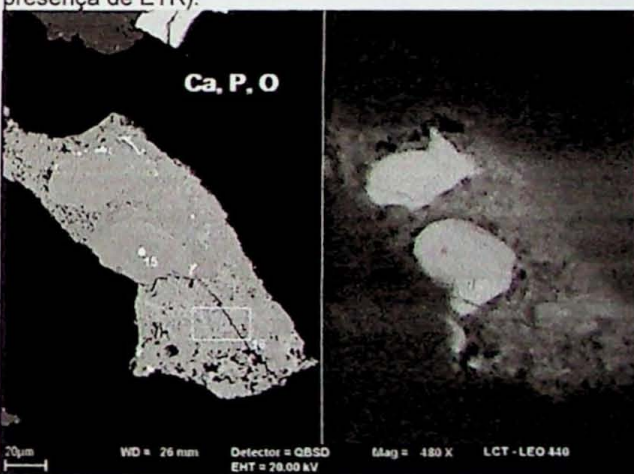


Foto 24 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.
Grão de apatita apresentando variação composicional, observado em imagens de BSE e CL (ponto/área referem-se a microanálises por EDS).

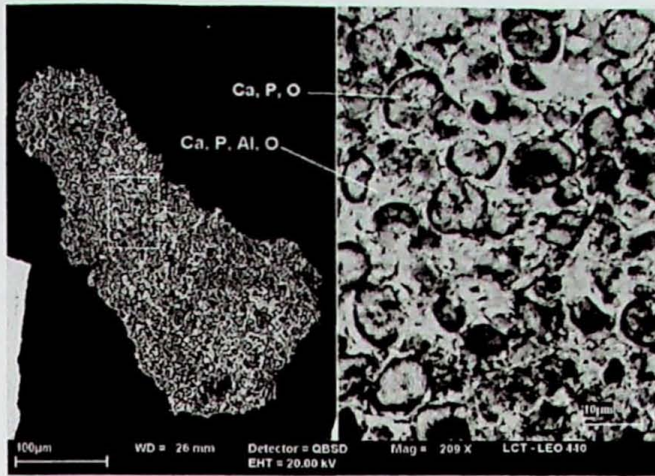


Foto 25 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.
Grão de apatita microcristalina de aspecto globular, mostrando variação composicional.

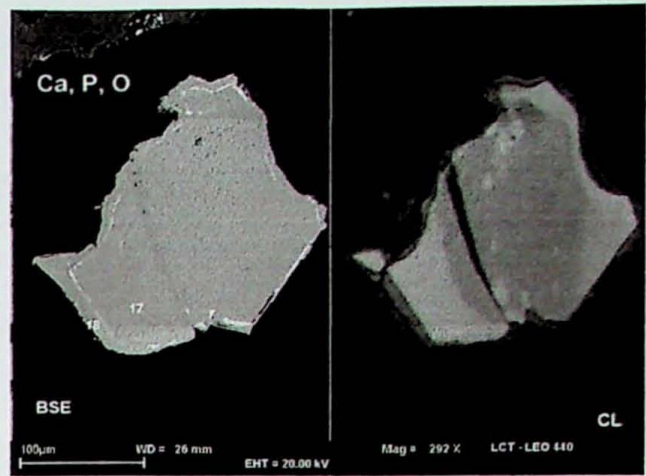


Foto 26 - Amostra: 3, -0,30+0,21mm.
Grão de apatita mostrando variação composicional observado em imagens de BSE e CL.

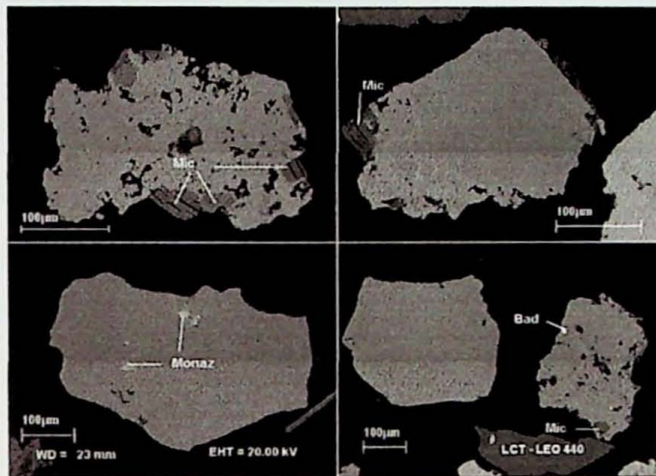


Foto 27 - Amostra: 4, -0,30+0,21mm.
Feições de apatita em partículas mistas com mica e com inclusões de monazita e baddleyita.

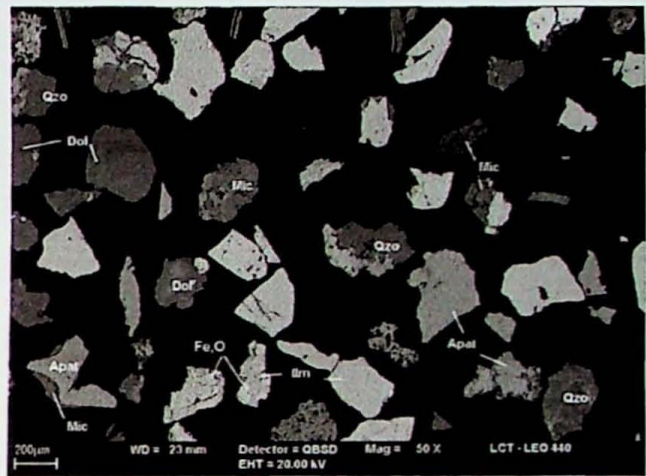


Foto 28 - Amostra: 4, -0,30+0,21mm.
Visão geral da amostra 4 onde são observados grãos de apatita, dolomita, mica, oxi-hidróxidos de ferro e ilmenita.

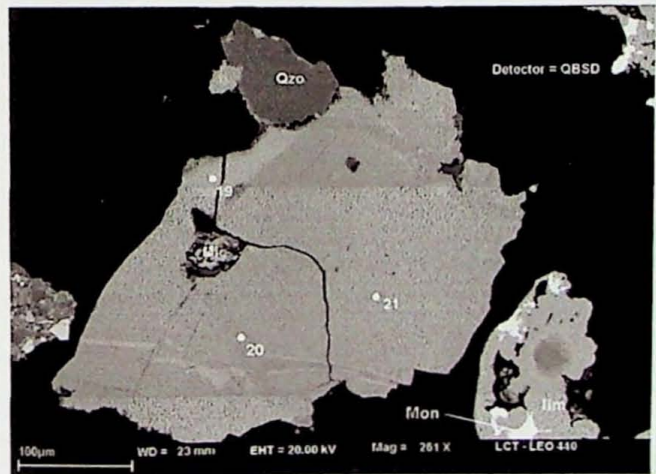


Foto 29 - Amostra: 4, -0,30+0,21mm.
Grão misto de apatita com quartzo e mica, apresentando variação da tonalidade de cinza e grão misto de ilmenita com monazita.

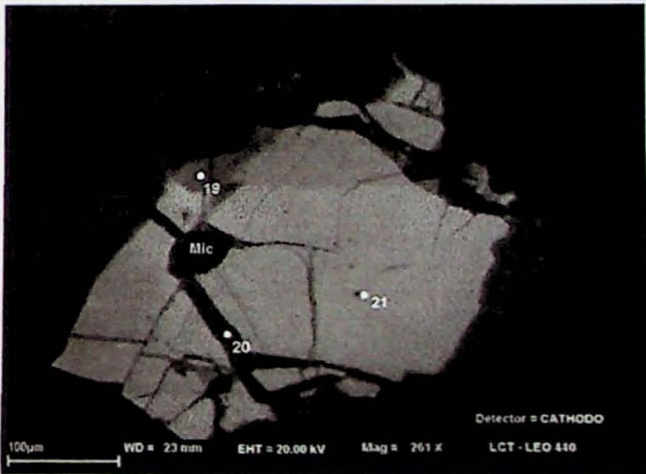


Foto 30 - Amostra: 4, -0,30+0,21mm.
Idem foto anterior em imagem de CL evidenciando variações composicionais.

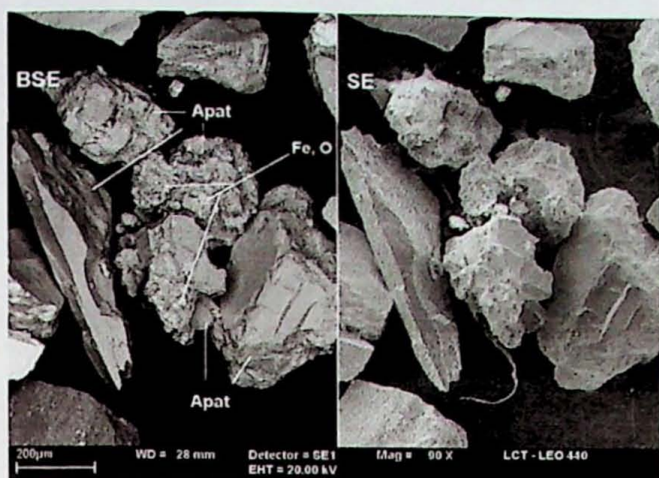


Foto 31 - Amostra: 1, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.

Grãos de apatita com impregnação superficial por oxi-hidróxido de ferro (superfície rugosa).



Foto 32 - Amostra: 2, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.

Grãos de apatita secundária impregnada (superfície rugosa) e apatita límpida (superfície lisa com fratura conchoidal).

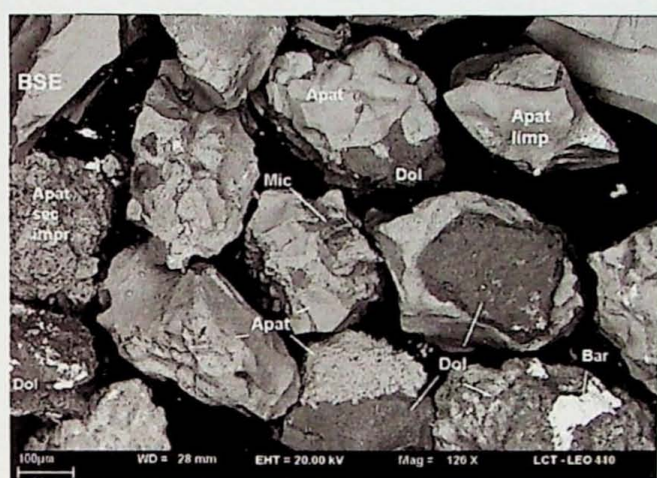


Foto 33 - Amostra: 2, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.

Vista geral mostrando grãos mistos de apatita com dolomita e mica, apatita límpida, apatita secundária impregnada e barita.

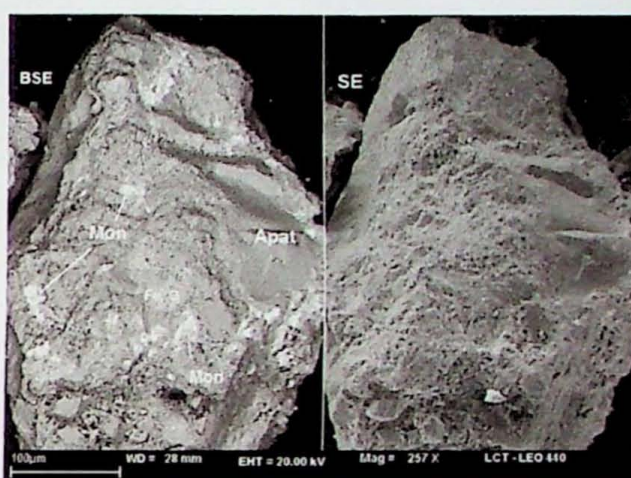


Foto 34 - Amostra: 3, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.

Grão de apatita misto com monazita e impregnação superficial por oxi-hidróxidos de ferro.

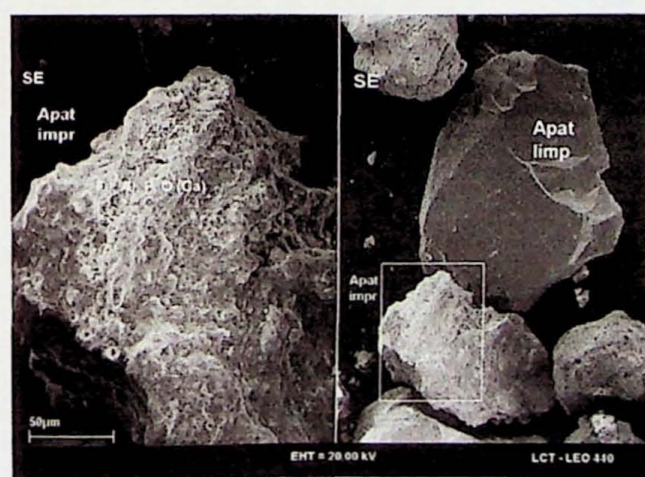


Foto 35 - Amostra: 3, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.

Grãos de apatita límpida e apatia impregnada por Fe, Al, P, P, Ca

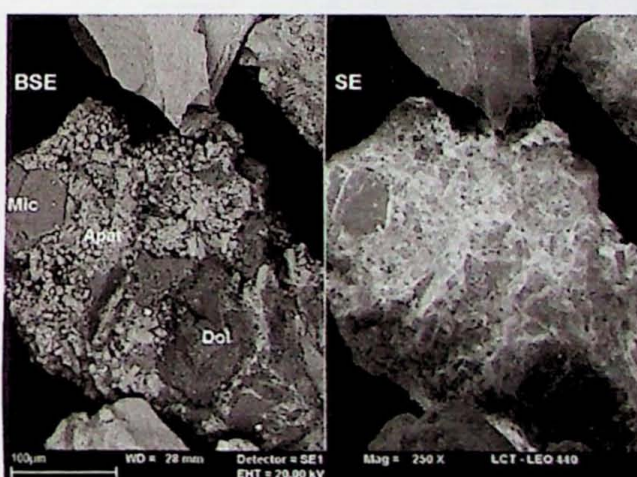


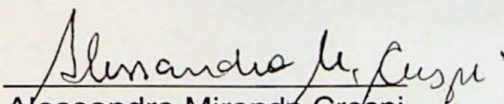
Foto 36 - Amostra: 4, Afundado Não Magnético, -0,30+0,21mm.

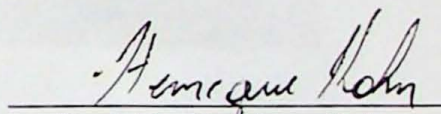
Partícula com apatita secundária microcristalina (observa-se cristais bem formados) mista com dolomita e mica.

RELATÓRIO FINAL (TF-2003/02): CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E
TECNOLÓGICA DE MINÉRIO DE FOSFATO DE CATALÃO I – ÁREA DA LAGOA SECA

O conteúdo que foi apresentado nesse trabalho de formatura pela aluna está de acordo com o que ficou estabelecido pelo orientador.

São Paulo, 10 de Novembro de 2003


Alessandra Miranda Crespi
(aluna)


Prof. Dr. Henrique Kahn
(orientador)

